

M0009/92B

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère aux Universités

Ecole Nationale Polytechnique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

THESE DE MAGISTER EN METALLURGIE

Présentée Par

ABDI Saïd

Ingénieur Diplômé de L'E.N.P.

AMELIORATION DES PERFORMANCES TRIBOLOGIQUES DES
SEMELLES DE FREIN D'UN TRAIN MINIER CIRCULANT
DANS UN MILIEU AGRESSIF

Soutenu le Mai 1992 devant le jury :

- | | | | |
|---------------|-------------------------|-----------|------------|
| MM. A. SOUAMI | Maître de
Conférence | U-BLIDA : | Président |
| N. MESRATI | Docteur | ENP : | Examineur |
| A. ATI | Docteur | USTHB : | Examineur |
| L. BELHANECHÉ | Docteur | ENP : | Examineur |
| N. BACHA | Ph.D | U-BLIDA : | Rapporteur |

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

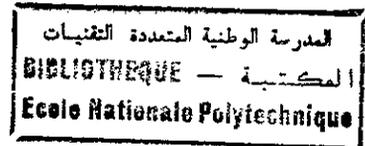
* D E D I C A C E S *

A MES PARENTS
A MA FAMILLE
A MES AMIS

Je dédie ce modeste travail.

P. ABDJ

*
* REMERCIEMENTS *
*



Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à mon directeur de thèse Mr N.BACHA pour son aide fructueuse et pour ses critiques et ses suggestions sur le plan scientifique

Je remercie également Mr N. MESRATI, Chef du département de métallurgie qui s'est intéressé à mon travail et qui a bien voulu participer à ce jury .

J'exprime ma gratitude a Mr A. SOUHI pour la présidence du jury ainsi qu'à Mrs A. ATI, L. BELHANECHÉ d'avoir accepté de juger ce travail.

Je ne saurais oublier de remercier les techniciens des laboratoires: Physique du Solide Université de Constantine, ENITA, et HCR de m'avoir aider à effectuer les analyses.

Mes remerciements vont également au professeur K. MEZACHE de m'avoir accueilli dans son laboratoire de tribologie de l'institut de Génie Mécanique de Boumerdes pour réaliser les tests d'usure et de frottement

Mon profond respect va à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail.

INTRODUCTION GENERALE

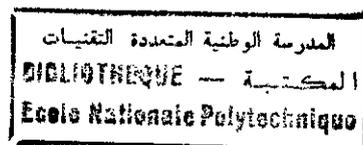
PREMIERE PARTIE : ETUDE THEORIQUE

CHAP I ETUDE BIBLIOGRAPHIE

1 INTRODUCTION.....	4
1.1 Définition de la tribologie	4
1.2 Importance économique	5
1.3 Structure d'un système.....	8
1.4 Description d'un système	8
1.5 Définition de l'usure	11
1.6 L'adhésion	12
1.6.1 Paramètres influençant l'adhésion	14
1.6.2 Mécanismes d'adhésion du couple acier/fonte	17
1.6.3 Introduction.....	17
1.6.4 Facteurs influençant l'usure adhésive du couple d'usure "acier/fonte ".....	18
1.6.5 Modèles d'adhésions.....	21
1.7 Usure abrasive.....	24
1.7.1 Paramètres influençant l'usure abrasive.....	26
1.7.2 Mécanisme d'usure abrasive de la fonte grise.....	31
1.8 Conclusion.....	34

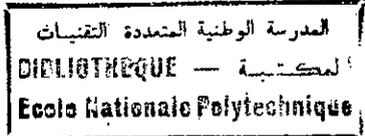
CHAP II ETUDE ANALYTIQUE

2 INTRODUCTION	35
2.1 Historique d'utilisation des semelles de frein.....	35
2.2 Notion de freinage.....	36
2.2.1 Introduction et définition.....	36
2.2.2 Caractéristiques de freinage de la semelle de frein	37
2.2.3 Effort de freinage exercé par la semelle de frein	37
2.3 Fonte grise: un matériau des semelles de frein.....	39
2.3.1 Généralité	39
2.3.2 Les principales caractéristiques mécaniques et métallurgiques de la fonte grise.....	39
2.4 Influence des paramètres métallurgiques sur la performance des semelles de freins à l'usure... ..	41



2.4.1	Introduction.....	41
2.4.2	Influence du phosphore et la microstructure sur l'usure des semelles de freins.....	41
2.4.3	Influence d'éléments d'additions autres que le phosphore sur l'usure des semelles de frein	44
2.5	Choix final des fontes à simuler sur machine.....	45
2.6	Conclusion.....	46

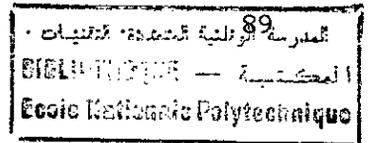
DEUXIEME PARTIE : ETUDE EXPERIMENTALE



CHAP III ETUDE EXPERIMENTAL EN SITE

3	INTRODUCTION.....	47
3.1	Description du site.....	47
3.1.1	Généralité.....	47
3.1.2	Analyse de minerai.....	49
3.1.3	Procédure expérimentale.....	50
3.1.4	Composition chimique.....	50
3.1.5	Granulométrie.....	52
3.1.6	Interprétation et conclusion des résultats.....	53
3.2	Description du couple de freinage (semelle/ roue)	56
3.1.2	Les conditions d'utilisation du couple de freinage (semelle/roue)	56
3.3	Terminologie.....	56
3.4	Description des moyens de contrôle des caractéristiques physico-chimiques des semelle.....	57
3.4.1	Dureté Brinell.....	57
3.4.2	Résistance au choc.....	58
3.4.3	Vérification de la texture	59
3.5	Etude d'expertise du couple utilisé sur site industriel.....	59
3.5.1	Résultats d'expertise du couple de freinage.....	63
3.5.2	Conclusion d'expertise.....	63
3.6	Elaboration des éprouvettes de semelles de frein	64
3.6.1	Méthode d'élaboration.....	66
3.6.2	Caractéristiques microstructurale de la semelle..	67
3.6.3	Caractéristiques microstructurale de la roue.....	69
3.6.4	Caractéristiques mécaniques du couple.....	70
3.7	Essai de freinage.....	73
3.7.1	Introduction.....	73
3.7.2	Procédure expérimentale sur site.....	73
3.7.3	Moyens d'analyses des résultats.....	74
3.7.4	Présentation et discussion des résultats.....	74
3.7.5	Conclusion des essais de freinage.....	79
3.8	Analyse des surfaces usées après l'essai de freinage des semelles de frein.....	80
3.9	Etude de l'effet de la température.....	85

3.9.1 Procédure expérimentale.....	85
3.9.2 discussion des résultats.....	86
3.10 Conclusion.....	



CHAP IV SIMULATION EXPERIMENTALE

4 Introduction.....	90
4.1 Description des dispositifs de simulation.....	90
4.1.1 Description générale de la machine de simulation de l'usure abrasive du couple.....	91
4.1.2 Description de dérivatographe en vue de simuler l'effet d'échauffement des surfaces de glissement des semelles de freinage	97
4.2 Elaboration des alliages éprouvettes.....	99
4.2.1 Fabrication de la pèche de coulee.....	99
4.2.2 Elaboration des alliages d'éprouvettes	99
4.2.3 Caractéristiques physico-chimiques des matériaux d'étude	101
4.3 Préparation des éprouvettes de simulation.....	103
4.4 Mode opératoire de simulation de l'usure du.....	105
couple de freinage	
4.4.1 Principe d'essai.....	105
4.5 Optimisation des paramètres de la simulation.....	107
4.5.1 Simulation des paramètres dynamiques.....	107
4.5.2 Simulation de l'environnement.....	110
4.6 Mode opératoire de simulation de l'effet d'échauffement des couches de glissement	113
4.6.1 Etude thermocinétique	113
4.6.2 Principe d'essai.....	113
4.7 PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS DE SIMULATION DE L'USURE ET FROTTEMENT	
4.7.1 Etude de l'usure abrasive du couple	115
4.7.2 Etude de l'usure à sec du couple	119
4.7.3 Coefficient de frottement	123
4.7.4 Influence de la température	126
4.7.5 Propriétés mécanique	131
4.7.6 Etude de l'état de surface.....	134
4.7.7 Analyse des particules incrustées	134
4.7.8 Conclusion.....	136
4.8 PRESENTATION ET DISCUSSIONS DES RESULTATS DE SIMULATION DE L'EFFET D'ECHAUFFEMENT DES COUCHES DE GLISSEMENTS	
4.8.1 Introduction.....	137
4.8.2 Interprétation des résultats.....	139
4.8.3 Conclusion.....	143
4.9 Conclusion générale de la simulation	145
4.10 COMPARAISONS DES RESULTATS DE SITE ET LABORATOIRE.....	146

V- CONCLUSION GENERALE 149

Bibliographie

RESUME

L'objectif principal de cette étude est d'améliorer les performances tribologiques des semelles de frein d'un train minier circulant dans un milieu agressif afin de lutter contre l'usure prématurée

Dans ce but, une étude bibliographique et analytique a permis de choisir les différents constituants d'un produit capable de remédier l'usure prématurée des semelles de freins.

L'étude expérimentale effectuée sur site industriel et le calcul de similitude ont permis de simuler les conditions réelles de fonctionnement du couple (semelle / roue), en laboratoire par un couple d'usure (pion / disque) sur une machine de frottement et d'usure.

L'analyse par microscopie optique, microscopie électronique, Rayon X, et mesure du taux d'usure, microdureté, température, et coefficient de frottement des surfaces usées ; Ainsi que l'analyse dilatométrique ont permis de montrer d'une part, que la phase eutectique phosphoreux se comporte très mal à l'usure et frottement et développe une usure prématurée dans les conditions simulant le site industriel. D'autre part l'ajout d'une petite quantité en éléments d'addition (Cr, Mn, Ti, V..etc) dans les fontes, forment des carbures et des précipités durs, stables et augmentent le coefficient de frottement, la résistance à l'usure abrasive, et améliorent considérablement la durée de vie des semelles de freins.

En fin d'un point de vue technologique, nous avons proposé respectivement les produits suivant en fonte (A14, US, NH57-4) dont les premiers résultats sont satisfaisants

Historiquement, les organes de freinage utilisés en chemin de fer, étaient en fonte et frottaient sur de l'acier.

Depuis que les chemins de fer existent les chercheurs ne cessent de déterminer la forme, les dimensions et la nature des matériaux qui constituent le couple de freinage afin de réduire le taux d'usure et d'augmenter leur durée de vie tout en mettant en considération l'aspect économique et performance du freinage

Toute fois, les conditions de frottement sont assez particulières, le couple de freinage doit répondre aux exigences de ces conditions. C'est le cas de l'usure prématurée des semelles de frein enregistrée par le freinage sévère en ligne minière (voie minière ferrée: EST d'Algérie) ou la durée de vie de ces dernières ne dépasse guère quelques semaines au lieu de quelques mois constaté dans d'autres réseaux ferroviaire.

Ces conditions de freinage sévère dans cette région minière est imputable à l'action simultanée et conjuguée de plusieurs facteurs (tribologique, thermique, physico-chimique et mécanique) Le processus de ruine ne résulte pas d'une simple additivité de ces sollicitations, mais d'un effet de synergie nécessitant la prise en compte de plusieurs paramètres.

Pour cela, nous nous sommes fixé comme objectif dans ce travail de faire une étude physico-chimique et tribologique sur le matériau en fonte utilisé actuellement sur la ligne minière afin de déterminer l'usure prématurée. Le résultat obtenu sera comparé aux comportements des différentes fontes qui vont être simulées sur machine, en vue de choisir des matériaux en fontes adéquats constituent les semelles de frein pour lutter contre l'usure prématurée rencontrée en la ligne minière. A cette fin nous avons sélectionné par le biais d'une étude théorique des variantes de fontes faiblement alliées adaptées aux conditions de sollicitations rencontrées en freinage sévère.

Une étude expérimentale sur site industriel a été réalisée pour déterminer l'environnement du milieu minier en vue de simuler le processus de freinage de la ligne minière en laboratoire sur une machine de frottement /usure.

Notre approche scientifique vise à caractériser les modes d'action des différentes fontes en considérant leurs rôle respectif et relatif à l'endommagement. Ce matériau capable de remédier l'usure prématurée des semelles sur site industriel, doit posséder des propriétés très divers c'est ainsi quelle doit satisfaire aux exigences suivantes:

Propriété de la résistance à l'usure abrasive: Le matériau utilisée devra avoir une microstructure stable et dure qui peut résister à l'usure abrasive. Il doit en outre résister à l'incrustation des particules abrasives et à l'arrachement de la matière par effet d'abrasion.

Propriété thermique ou réfractaire: Ces microstructures qui constituent les fontes devraient avoir des caractéristiques thermique et réfractaire qui peuvent résister aux chocs thermiques et mécaniques dû au freinage brusque des semelles de frein en site industriel.

Propriété lubrifiant: Afin de limiter le grippage du produit frotté sur la table de roulement tout en évitant son agressivité.

Propriété économique : Ce produit doit être facile à élaborer et posséder un bas prix de revient

De telles propriétés sont rarement compatible entre elles et seul un compromis est envisageable.

Le programme de recherche que nous avons mené est le suivant:

A - Une étude théorique servant:

1- A faire une étude bibliographique sur les phénomènes et mécanismes d'usure sévères rencontrés en freinage des semelles de frein dans un milieu agressif.

2- A sélectionner les fontes qui ont fait l'objet d'études récentes pour un choix en fonction du problème posé, servant la simulation expérimentale pour un éventuel remède à l'usure prématurée des semelles de freins.

B - Une étude expérimentale sur site industriel qui consiste:

A faire des essais de freinage pour déterminer certains facteurs servant l'étude de simulation expérimentale, tel que la nature du milieu qui va être simulée sur une machine d'usure et frottement.

C - Une simulation expérimentale en laboratoire qui sert:

A simuler le freinage du couple du site industriel par le frottement et usure abrasive du couple *pion / disque* à l'aide d'un tribomètre rotatif.

A simuler l'effet de chauffage des couches de glissements des semelles de freins sur un dérivatographe.

D - Un transfert technologique vers une application industrielle, permettant d'améliorer les performances tribologiques des semelles de frein à utiliser en ligne minière

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1

ETUDE BIBLIOGRAPHIE

1 INTRODUCTION

Nous allons dans ce chapitre faire le point bibliographique des principaux travaux ayant abordé de façon plus au moins spécifique les processus de détérioration par usure du couple de frottement (Acier / fonte).

Nous aborderons ici essentiellement l'aspect d'usure adhésive et abrasive.

Nous insisterons toutefois sur l'usure abrasive qui semble jouer un rôle prépondérant dans l'endommagement

1.1 DEFINITION DE LA TRIBOLOGIE [1]

La tribologie est une science technologique concernant :

- La fabrication des éléments et organes de friction, roulements, segments de piston, roues dentées, aciers à outils et tout autre appareil impliquant l'interaction de surfaces dans le glissement ou autre mouvement relatif.
- L'utilisation correcte des matériaux, pour l'interaction des surfaces solides, l'interaction de ces dernières avec les lubrifiants et leurs additifs.
- La compréhension des mécanismes de friction, d'usure et de lubrification;
- La réduction de la friction et de l'usure (ou, dans le cas des courroies, freins, embrayages et autre appareil semblable, d'optimiser la friction avec le minimum d'usure)
- l'élimination des pertes liées aux arrêts de machines

1.2 IMPORTANCE ECONOMIQUE

Plusieurs organismes ont estimé le coût total du frottement et de l'usure. JOST [1] a établi que le frottement et l'usure entraînaient aux Etats-Unis une dépense de 100 milliards de dollars par an. Un comité du ministère de la recherche et de la technologie [1] a estimé qu'en République Fédérale Allemande, le frottement et l'usure causaient un déficit de 10 milliards de DM par an, dont la moitié était due à l'abrasion seule ; RABINOWICZ [1..] a estimé qu'environ 10 % de l'énergie produite par l'homme était dissipée dans les procédés de frottement.

Dix ans plus tard, un comité du département de l'Education et des Sciences du Royaume-Uni, cité par BACHA [1], a estimé qu'environ 20% des coûts du frottement, de la lubrification et de l'usure pourraient être diminués avec les solutions technologiques existantes, soit environ 500 millions de livres par an actuellement. Le tableau 1.1 donne le pourcentage de l'économie réalisée attribué aux différents postes retenus par le comité. Ces économies potentielles, ajoutées aux conditions de plus en plus onéreuses dans lesquelles l'industrie doit faire fonctionner ses équipements ainsi qu'aux exigences des consommateurs pour une meilleure qualité, offre un considérable stimulant à la fois à la recherche et à l'enseignement en frottement, lubrification et usure.

Un obstacle supplémentaire à la réduction des effets courants de l'abrasion réside souvent à l'impossibilité mécaniques. On ne s'en étonnera pas puisque des matériaux potentiellement abrasifs tel que la silice, l'alumine et les oxydes de fer constituent 81 % de la croûte terrestre. Avec un réservoir aussi important de matériaux abrasifs, certains d'entre eux arriveront toujours à mettre en défaut les protections par joints ou filtres des équipements mécaniques.

Mais les problèmes les plus critiques se posent dans les équipements qui sont au contact avec le sol, les roches ou le minéraux pour des raisons inhérentes aux technologies mises en oeuvre, à savoir dans l'industrie minière et métallurgique, en agriculture et dans la construction. Le tableau 1.2 indique le coût, en pourcentage, du total de l'usure abrasive selon les différents secteurs industriels en République Fédérale Allemande, cité par BACHA [1]. Certaines solutions ont été apportées à ces industries grâce à des conceptions limitant les fréquences, les pressions et les distances de contact des particules abrasives. Les résultats les plus spectaculaires ont toute fois été obtenus par l'application des règles établies pour la sélection des matériaux résistant à l'abrasion. Malheureusement, ces matériaux ne constituent pas toujours la solution économique la plus efficace.

Le coût économique de matière varie considérablement d'une technique à une autre, elle dépend de facteurs tels que le prix de revient du remplacement d'éléments ou même de la totalité d'un équipement, le prix de revient des temps morts nécessaires à la réparation ou à la substitution des pièces, l'inopportunité de l'arrêt d'une activité pour les opérations qui en dépendent, et répercussion des prix de bases de matériaux différents et de composants réalisés avec des matériaux différents.

Tableau 1.1 : Pourcentage de répartition de l'économie réalisable sur le coût du frottement, de la lubrification et de l'usure selon les postes retenus [1]

Estimation des économies	%
Maintenance et coût de remplacement	5
Perte de production	22
Investissements préservés(durée de vie accrue).....	19
Economie d'énergie	6
Investissement preserves grâce à un meilleur taux d'utilisation et une plus grande efficacité mécanique...4	
Economie de main-d'oeuvre	2
Economie de lubrifiants	2

Tableau 1.2 Pourcentage de répartition du coût de l'abrasion selon diverses industries en République Fédérale d'Allemagne [1]

Secteurs industriels	%
Exploitation minière et extraction des métaux	40
Extraction, transport et pulvérisation du charbon.....	30
Agriculture, construction, extraction et broyage de pierre, graviers et sable.....	20
Fabrication mécanique.....	10

1.3- STRUCTURE D'UN SYSTEME TRIBOLOGIQUE

Les contraintes mécaniques peuvent agir sur les matériaux de deux manières différentes , en *volume* ou en *surface* comme illustré à la *figure 1.1*

a - En volume

Il s'agit des contraintes statiques ou dynamiques qui sont connues dans le domaine des sciences des matériaux par les formes suivantes: (voir la *figure 1.1,A*)

- traction, compression, cisaillement, flexion et torsion

b - En surface

Ces types de contraintes sont dues principalement au contact des surfaces antagonistes en mouvement relatif et qui sont traitées dans le domaine de la tribologie (voir la *figure 1.1,B*)

Ce second type de contrainte se manifeste par les phénomènes tribologiques suivants:

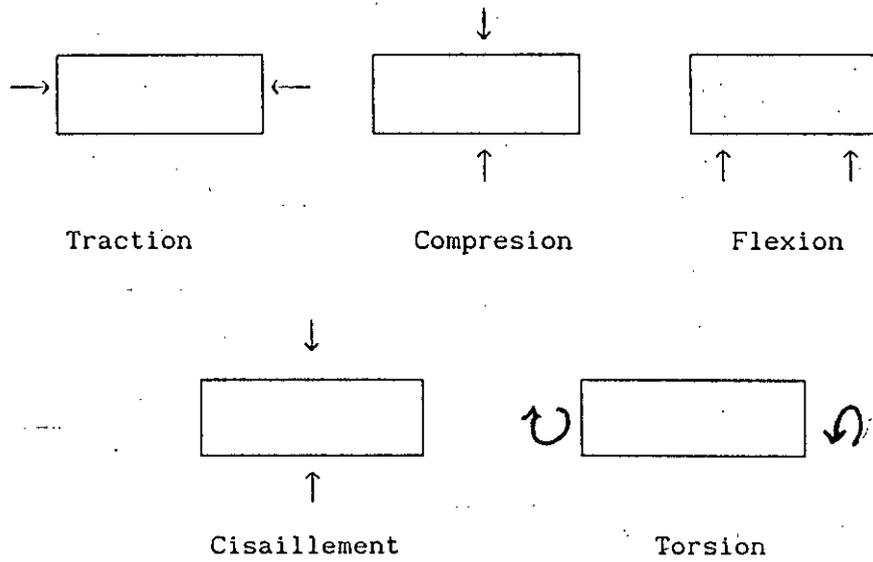
- La friction, comme une caractéristique de frottement
- L'usure, comme une mesure de la perte de matière et changement des côtes et des contraintes en surface .

1.4 DESCRIPTION D'UN SYSTEME

1.4.1 Définition

Un système est un ensemble d'éléments interconnectés par structure et fonction. Il peut être ouvert lorsque l'échange de la masse et l'énergie se produit avec le mode extérieur, et fermé si l'échange est considéré comme négligeable.

(A) Actions mécaniques sur le volume des matériaux



(B) Actions mécaniques sur la surface des matériaux

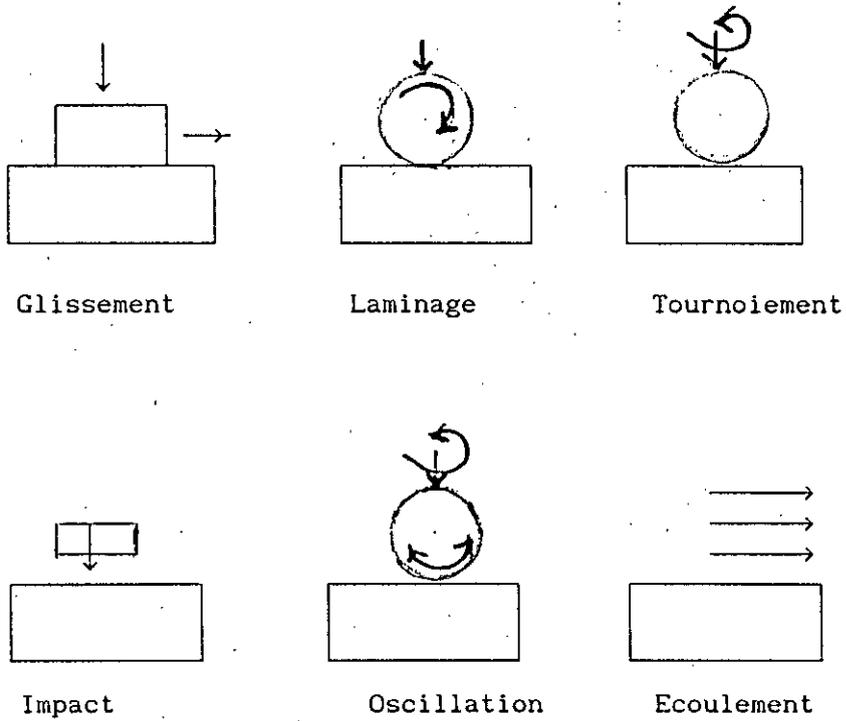


Figure 1.1 Types d'actions mécaniques sur les matériaux [1]

La figure 1.2 ci-dessous représente la notion d'un système.

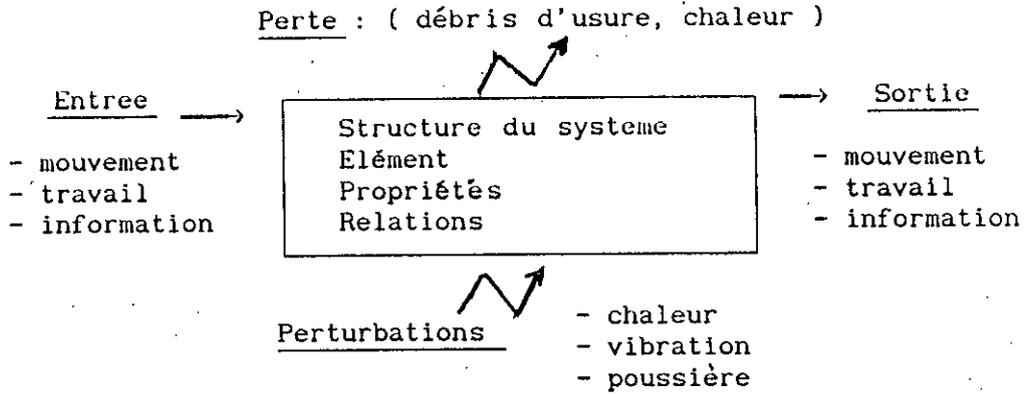


Figure (1.2) Description d'un système [1]

1.4.2 Système tribologique

Le système tribologique est constitué des paramètres internes liés directement au système, comme le montre la figure (1.3), ce sont les éléments (1) et (2) et le milieu (3) et les paramètres externes agissent sur le système, comme la charge, la vitesse, ...etc

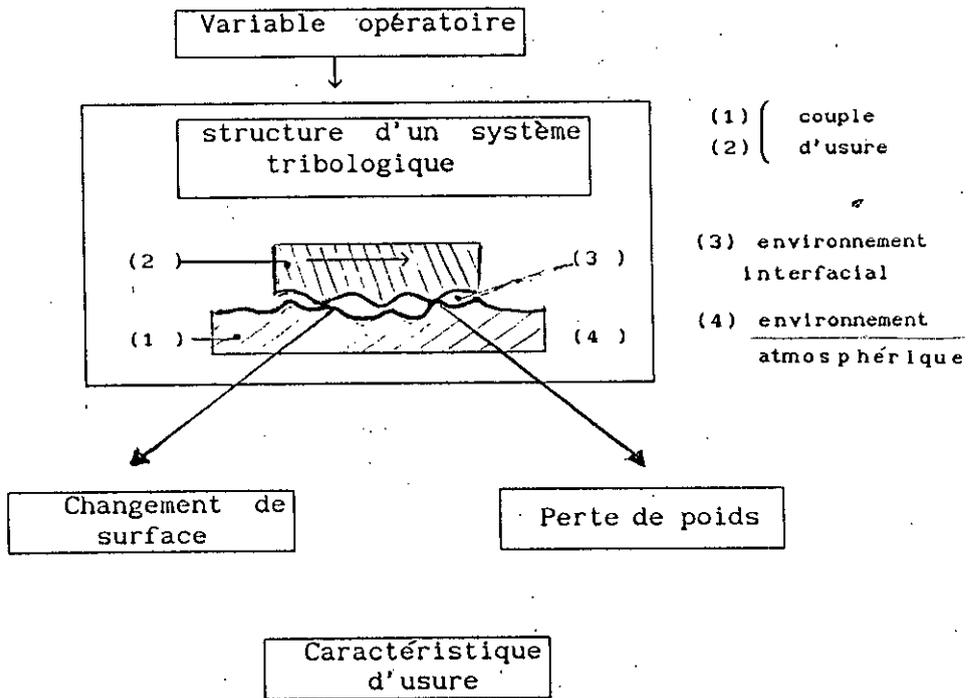


Figure 1.3 Description d'un système tribologique [1]

1.5 DEFINITION DE L'USURE

L'usure est un terme très général qui englobe tous les mécanismes et phénomènes de frottement entraînant la perte de cote, de forme et de poids par production de débris.

L'usure constitue une des principales causes de la mise hors service des machines et limite la durée de fonctionnement des organes.

Le mécanisme d'usure dépend d'un grand nombre de paramètres, les plus importants sont: la pression, la vitesse et le mode de lubrification. D'autres paramètres doivent aussi être pris en compte telles que les propriétés métallurgiques et en particulier les traitements de surface, rugosité, tolérance des pièces et l'environnement.

En outre les études sur l'usure font en général intervenir un grand nombre de paramètres, de mode d'observation et de processus physique:

a - *les modes observables* : résistance au déplacement, vibration, phénomènes thermiques, transformation mécaniques et tribochimiques, variation de masse

b - *les processus physiques* : les mécanismes physiques élémentaires mis en jeu dans la détérioration des surfaces au cours du temps peuvent être classés en 2 types fondamentaux d'usure :

ADHESIVE - ABRASIVE

A ces formes d'usure s'ajoutent des phénomènes secondaires :

- corrosion - érosion - cavitation - fatigue

1.6 L'ADHESION

L'explication la plus cohérente du mécanisme d'adhésion a été proposé par BODWEN [2]. Considérons le contact de deux corps métalliques (voir figure 1.4), dont les surfaces réelles des corps en contact comportent des aspérités de dimensions très grandes à l'échelle atomique.

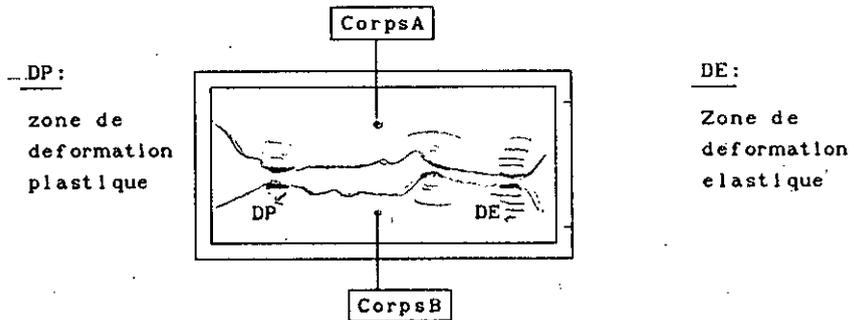


figure 1.4 : Contact de deux corps métalliques d'après BODWEN [2]

Ces aspérités existent quel que soit le soin apporté à la préparation des surfaces. Le contact de deux corps s'établit par l'intermédiaire de ces aspérités et l'aire réelle de contact n'est donc qu'une faible partie de l'aire apparente [2]

Ce contact s'effectue en des zones discrètes. Certaines aspérités sont en déformation plastique sous pression de contact égale à la dureté du métal le plus mou. Le rapprochement des atomes de chacun des corps métalliques est suffisant pour donner naissance à des jonctions métalliques qui peuvent constituer de véritables soudures à froid. Si toutes les jonctions participent à la résistance au déplacement, certaines d'entre elles peuvent donner naissance à des débris d'usure.

Les ponts d'adhésion sont éliminés par rupture du constituant le moins dur, ce qui se traduit nécessairement par un transfert de matière d'une surface sur l'autre. Par écrasement, les particules produites et les débris d'usure peuvent devenir beaucoup plus durs, que les surfaces antagonistes provoquant ainsi une usure par adhésion .

D'une manière générale, le degré d'usure par adhésion peut être quantifié par la relation (1.1) [3] :

$$U_1 = K_1 \cdot P \cdot S / \sigma \quad (1.1)$$

- P : charge appliquée S : surface de contact
- σ : contrainte d'écoulement
- k : paramètre qui dépend des caractéristiques physico-chimique des deux corps

Le phénomène d'adhésion dépend dans une large mesure de l'affinité chimique des constituants des deux surfaces antagonistes. Il sera très important s'il y a miscibilité totale entre les constituants et contrairement faible s'il y a immiscibilité [4]

Le phénomène d'adhésion peut être sujet de brutaux changements de régime ; des modifications légères de charge ou de vitesse peuvent entraîner des variations sensibles des conditions thermique des surfaces avec modification importante du processus d'usure. La figure (1-5), montre deux transitions dans les conditions de frottement d'aciers sur eux mêmes, lorsque la charge d'application et la vitesse de glissement varient; la première est causée par une déformation plastique avec rupture de la couche d'oxyde superficielle, la deuxième est due à la plastification de la couche d'oxyde superficielle par effet thermique.

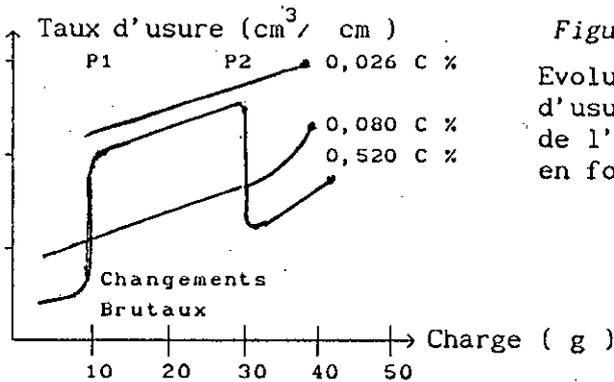


Figure 1-5
Evolution du taux d'usure par adhésion de l'acier sur lui même en fonction de la charge [4]

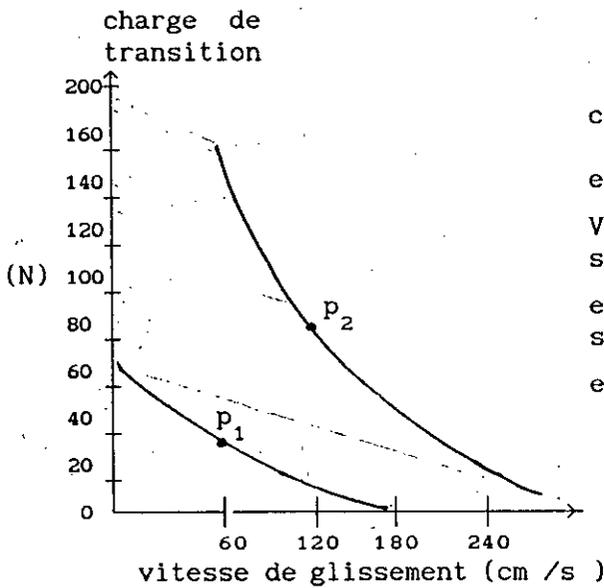
1.6.1 Paramètres influençant l'adhésion

1.6.1.1 Paramètres dynamiques

a - Effet combinés de la charge et la vitesse

Sous l'effet combiné de charge et de vitesse, il peut se produire des transformations microstructurales et/ou formation d'oxydes. Dans ces conditions (charge, vitesse: variable) on observe l'apparition de deux charges critiques définies par P1 et P2 comme le montre la figure 1-6 . Ces charges critiques indiquent la formation de couches d'oxydes à l'air ambiant (air, gaz.....etc) au moment de la friction.

On remarque généralement dans cette situation que la charge P1 diminue suite à la déformation plastique avec rupture de la couche d'oxyde ; et que P2 augmente à cause de la plastification de la couche d'oxydes dû à l'effet thermique.



Facteur d'usure :
 contact ponctuel par
 cylindre croisé ($\phi_1 : 6,35$
 et $\phi_2 : 25,4$)
 $V = 1 \text{ m/s}$
 si $p < p_1$ et $p > p_2$: l'usure
 est dite modérée
 si $p_1 < p < p_2$: l'usure
 est dite sévère.

[3]

Figure 1-6 Charge critique en fonction de la vitesse (système frotteur—piste en acier)

La température instantanée [3] est d'environ 200°C au voisinage de P1, et de 860°C au voisinage de P2. L'augmentation de la vitesse a pour effet d'augmenter la température superficielle, et de diminuer les pressions au voisinage de P1, on observe généralement un écrouissage du matériau.

Par contre au voisinage de P₂ des changements microstructuraux complexes s'opèrent de façon rapide.

Ces transformations microstructurales pourraient être utilisées pour créer des couches superficielles très résistantes à l'usure, cependant il resterait à déterminer pour chaque type de matériau les conditions de charge et de vitesse permettant d'obtenir de telles couches.

On doit noter que l'effet combiné de la charge et la vitesse peut être modifié par la température, et la teneur de l'oxygène dans l'atmosphère ambiante [3].

1.6.1.2 paramètre du matériau

a - Influence de la solubilité des matériaux

Les études [3,4,5,6], concernant les corrélations entre l'endommagement et la solubilité, ont permis de formuler les conclusions suivantes:

- Les métaux mutuellement insolubles, ont une bonne résistance au grippage.
- les métaux mutuellement solubles lorsqu'ils glissent l'un sur l'autre, grippent fortement [3]. Ce grippage n'est vérifié sur tous les alliages durs.
- Les métaux doivent avoir des duretés différentes et ne favorisent pas la formation de solutions solides
- le métal le plus mou ne doit pas s'écrouir pendant le processus de déformation plastique, si l'un des matériaux n'est pas écrouissable et complètement insoluble dans l'autre métal.

En outre l'influence de la solubilité peut être modifiée par les transformations physico-chimiques superficielles [4];

Elles est bien vérifiée dans l'air, dont la formation d'oxydes et son ampleur vis à vis des transformations structurales peut prendre le pas sur les phénomènes de solubilité.

b- interet de la structure cristallographique et son influence sur l'usure par la variation de la temperature

De nombreux métaux métalliques ont une bonne stabilité microstructurale à des températures élevées, alors d'autres métaux se sont beaucoup moins tels que le fer, le cobalt et leurs alliages. Sur la *figure (1-7)* on peut voir que le coefficient de frottement du cobalt varie sensiblement avec la température. Le passage de la structure cubique à la structure hexagonale à 300°C en est la principale cause.

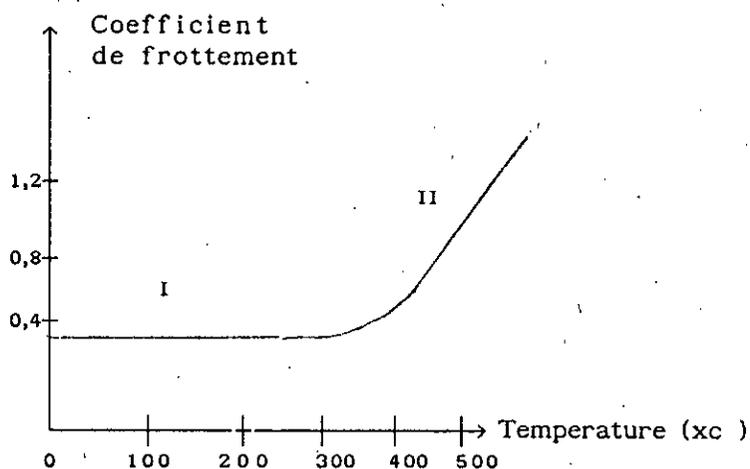


Figure (1.7)

Coefficient de frottement et
taux d'usure en fonction de
la température, dans le cas
du Cobalt [7]

I : cubique a face centre
II : hexagonale (hc)

1.6.2 MECANISME D'ADHESION DU COUPLE DE FROTTEMENT (fonte /acier)

1.6.3. Introduction

De nombreuses études concernant les matériaux polyphasés, montrent l'existence de corrélation entre le nombre de phase, leur répartition et le comportement en usure de ces matériaux.

LANE et ses collaborateurs [8] ont étudié l'effet de la phase perlitique et la distribution des différents types de graphite sur l'usure de la fonte frottée sur de l'acier trempé.

Il ont trouvé qu'une fonte à matrice perlitique lamellaire très fine en présence de graphite lamellaire de type (A) distribué uniformément sur la matrice possède une bonne résistance à l'usure.

Le travail entrepris par LANE et ses collaborateurs a été développé par ANGUS [9] en ajoutant à l'étude, l'effet de la dureté et la proportion de la phase steadite (Fe_3P) sur la résistance à l'usure afin d'optimiser la fourchette de la dureté et du pourcentage de phosphore et son influence sur la résistance à l'usure. Il a trouvé que pour une dureté comprise entre 180-240 HB, avec une teneur en phosphore variant entre 0.7 - 1.4 % P, on obtient les meilleurs résultats.

OBERLE [10] a complété les travaux réalisés par LANE et ANGUS, en ajoutant à l'étude, l'influence des paramètres intrinsèques (E , ν , ϵ ... etc), pour lequel il développe un modèle théorique qui estime un rapport du temps de 10^6 du nombre de dureté Brinell et en module d'élasticité, en montrant l'existence d'une corrélation entre les différents paramètres structurales et celles du nombre de dureté HB et du module d'élasticité E , qui permet d'expliquer le comportement d'usure des fontes grises.

Pour présenter le mécanisme de l'adhésion du couple: (fonte /acier), nous nous sommes ainsi basé sur les deux études faites par OKHOSHI, SAKAI et TAKEUCHI [8, 9, 10] et les travaux réalisés par LANE, ANGUS et OBERLE.

L'approche de TAKEUCHI et OKHOSHI [8,10] consiste à étudier le mécanisme d'usure des fontes perlitiques lamellaires sous forme de pion frottées à sec sur un disque en acier trempé, en faisant varier la charge et la vitesse dans une atmosphère ambiante.

L'observation microscopique des surfaces de glissement et l'analyse des débris d'usure par RX ont permis de déterminer les mécanismes d'adhésion.

le tableau 1.3 rassemble leurs caractéristiques physico-chimiques.

Tableau 1.3 Composition chimique et dureté des pièces d'essai

(%)	composition chimique				
éléments	C	Si	Mn	P	S
Stator	3,34	1,95	0,96	0,268	0,133
Rotor	0,53	0,28	0,49	0,013	0,011
	Condition de traitement thermique			Dureté HV des surfaces de glissement	
Stator	recuit à 550°c, 1 h			247-299	
Rotor	chauffage à 570°c, 1 h trempé à l'huile à 900°c			236-247	

En conclusion, nous constatons que la nature, la forme et la distribution des phases dans la matrice du matériau, en conjonction avec la pression, température et vitesse contrôlent le taux d'usure du couple (fonte/acier) ainsi que leur aptitude à l'usure adhésive.

1.6.4 - FACTEURS INFLUENCANT L'USURE ADHESIVE DU COUPLE (Acier / fonte)

Les principaux facteurs qui influent sur le mécanisme de l'usure adhésive sont :

- La charge (pression)
- La vitesse (vitesse de glissement)

1.6.4.1 Influence des facteurs dynamiques (charge et vitesse)

De nombreux auteurs ont signalé que généralement la fonte a un comportement tribologique qui change sensiblement en fonction de la pression de contact et la vitesse de glissement.

Ce phénomène de changement du taux d'usure en fonction de la pression et la vitesse a été expliqué par OKOSHI [10] et d'autres chercheurs [8,11] en classant les types du mécanisme d'usure en plusieurs étapes appelées respectivement par usure:

- corrosive, mécanique, et thermique.

La présence et l'ordre de ces étapes est strictement en fonction de la pression et de la vitesse de glissement appliquée au couple. Par ailleurs la production de l'usure par oxydation et/ou l'usure corrosive et l'usure thermique a été constaté en premier lieu aux températures assez élevées, à partir de 600°C - 700°C [8].

La figure (1-8) donnée par TAKEUCHI [8,9] et SAKAI [10] montre l'effet de la combinaison de la pression et de la vitesse de glissement sur le taux et la nature d'usure et le comportement des surfaces de glissement.

L'observation microscopique montre pour des points particuliers la succession des différents stades de l'usure : corrosive, mécanique et thermique en fonction de la charge et la vitesse de glissement. Sur la courbe (voir la figure 1-9) on montre par exemple pour $v = 0,3 \text{ m/s}$ et $p = 20 \text{ kg/cm}^2$, qu'il ya des taches foncées dispersées indiquant l'existence de l'usure corrosive et de soufflures entre le graphite confirmant le passage de l'usure mécanique vers l'usure thermique.

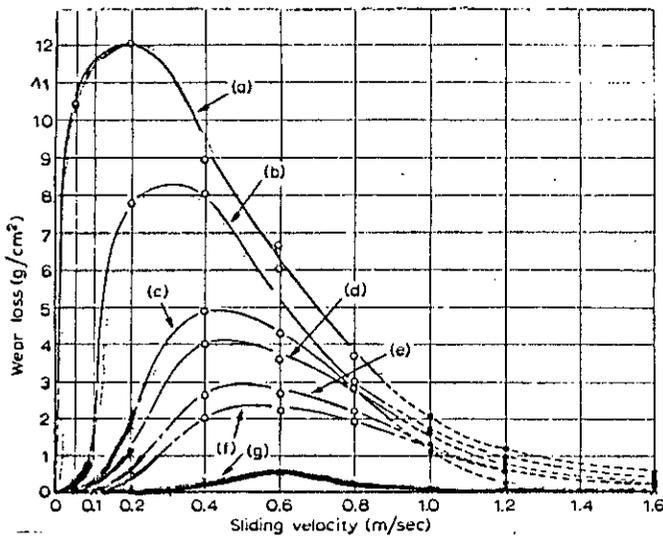


Figure 1.8 : Caractéristiques de l'usure de la fonte sur de l'acier (OKOSHI AND SAKAI [10]). (a) $P = 60 \text{ Kg/cm}^2$; (b) $P = 46 \text{ Kg/cm}^2$; (c) $P = 29 \text{ Kg/cm}^2$; (d) $P = 21,6 \text{ Kg/cm}^2$; (e) $P = 15,9 \text{ Kg/cm}^2$; (f) $P = 12,3 \text{ Kg/cm}^2$; (g) $P = 8,5 \text{ Kg/cm}^2$.

o Usure Mécanique x Usure Corrosive . Usure Thermique

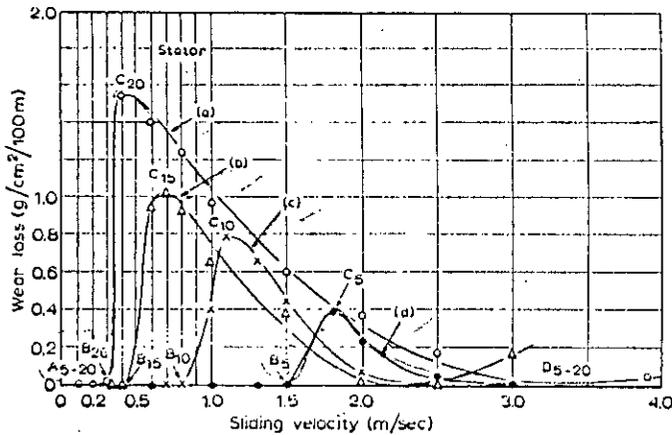


Figure 1.9 : Effet des paramètres dynamiques sur les caractéristiques de l'usure de la fonte sur l'acier [11]

- (a) $P = 20 \text{ Kg/cm}^2$; (b) $P = 15 \text{ Kg/cm}^2$;
- (c) $P = 10 \text{ Kg/cm}^2$; (d) $P = 5 \text{ Kg/cm}^2$

A-B : Déplacement et écoulement plastique et début de l'usure corrosive.

B : Limite de l'usure corrosive

C : Usure adhésive (limite de stable de l'usure)

D : Usure par choc thermique

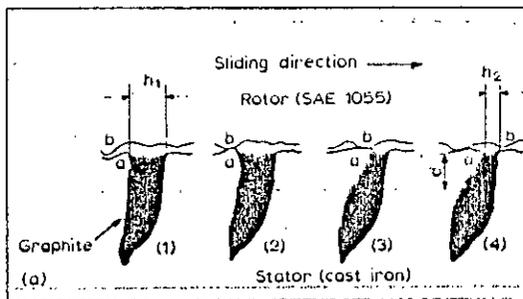
1.6.5 Modèles d'adhésions

Dans le but d'éclaircir le mécanisme d'usure adhésive du couple d'usure: acier / fonte, nous présentons deux types de modèles ou de schématisation du mécanisme d'adhésion:

- Le modèle de TAKEUCHI [8]
- Le modèle de production de particule d'usure [12].

1.6.5.1 Modèle de TAKEUCHI

TAKEUCHI a mis en évidence une méthode d'observation microscopique pour montrer le processus d'adhésion de la fonte grise frottée à sec sur de l'acier trempé. En se basant sur la nature de contact des aspérités des deux matériaux à l'échelle microscopique en considérant les données suivantes une rugosité de surface $R_a = 1 \text{ } \mu\text{m}$, et la particule de graphite, ayant une largeur de $1 \text{ } \mu\text{m}$, avec une profondeur d'avarie de $4 \text{ } \mu\text{m}$ dans la matrice. Dans ce modèle, l'auteur suppose que, quand la surface de glissement a subit plusieurs passes par l'effet de friction, les surfaces de glissement seront adoucies par la chaleur de frottement, qui subséquemment provoque un transfert du matériau local entourant le graphite (matrice) vers la surface du stator (voir la figure 1-10). L'aspérité du point "B" de la surface de glissement du rotor bute contre une autre aspérité "A" appartenant à la matrice et génère des déformations plastiques le long de la direction de glissement (pour respecter les conditions cinétique). Ce phénomène de déformation plastique crée une contrainte de compression s'exercant sur toute la largeur du graphite. Le résultat illustré à la figure 1-10, étape 4, montre que la lamelle du graphite est étranglée et a pour conséquence la réduction de la section du graphite débouchant à la surface de la matrice.



d : Couche de travail
 h_1 : largeur initial du graphite
 h_2 : largeur après essai d'usure

Figure 1-10

(Modèle de Takeushi [8])

1.6.5.2 Modèle de production des particules d'usure

Ce modèle est basé sur l'analyse des surfaces usées et sur la nature et la forme des débris d'usure. Ces particules d'usures sont formées par plusieurs mécanismes d'usure entre autre:

- oxydation [12]
- fatigue [6]

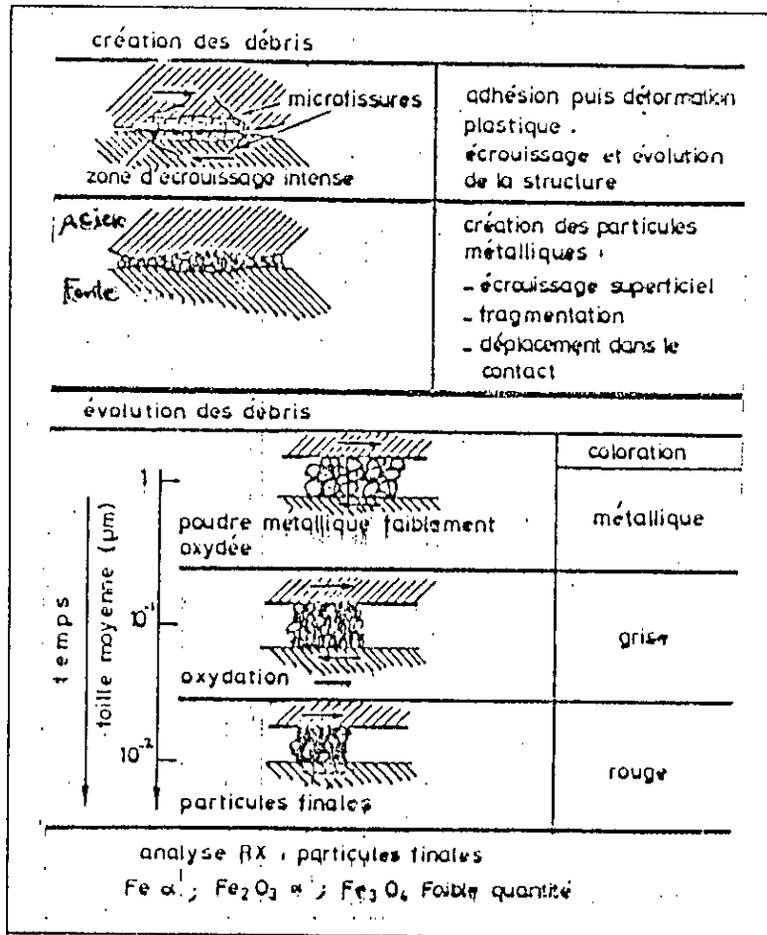
a - Oxydation

L'étude faite sur un acier à 3 % Cr, frotté sur une piste en fonte de dureté 800 Hv [44], fait ressortir les stades suivants dans le mécanisme de formation des débris d'usure :

- 1- transfert du matériau du frotteur sous forme de film sur la piste
- 2 - oxydation de ce film
- 3 - enlèvement du film d'oxyde sous forme de débris d'usure.
- 4 - formation des particules libres entre les deux surfaces à partir de la couche transférée jouant le rôle d'un troisième corps abrasif. Ce mécanisme est illustré dans la figure 1-11, par frottement de deux matériaux ferreux, (acier sur fonte.)

Figure 1-11:

Modèle du mécanisme d'adhésion de deux matériaux ferreux :
fonte/acier
[12]



En conclusion d'analyse des modèles proposés (par TAKHEUCHI et cel cité par BLOUET) nous avons remarqué que dans des conditions où la vitesse est faible, seule l'usure corrosive apparait avec une production de débris d'usure sous forme de poudre corrodée. Cela est confirmé par l'observation microscopique et par l'analyse aux rayons X des différents débris, pris aux points (A,B) indiqué sur la figure cité en 1.9 qui enregistrent un rapport minimum du taux d'usure. Par ailleurs quand cette vitesse de glissement dépasse une certaine limite, appelée: limite inférieure d'usure stable, l'usure corrosive passe à l'usure stable ou adhésive (mécanique). Cette seconde étape de l'usure adhésive est caractérisée par une augmentation appréciable du taux d'usure aux points maximums (C5, C10, C15, C20) et diminution de la nature de débris oxydée, ceux-ci est illustré sur la figure 1.12 qui montre les limites des différentes étapes de l'usure (corrosive , mécanique et thermique) et leurs passage en fonction de la charge et de la vitesse de glissement.

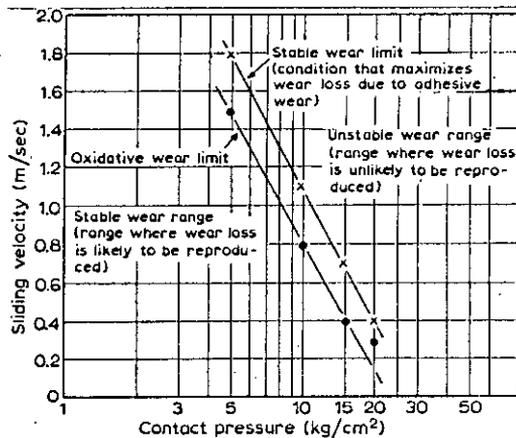


Figure :1.12
Effet des conditions dynamiques (P,V) sur les stades d'usure et la reproductibilité du taux d'usure [11]

Aussi, nous remarquons dans la recherche bibliographie que les résultats trouvés par OKHOSCHI et TAKEUCHI [8 ,10], sont en bon accord avec les résultats de MACKZEI, SMITH [14] et LANE [15] , qui préconisent que l'usure, diminue avec l'augmentation de la vitesse de glissement, jusqu'a une vitesse qui favorise l'existence de l'étape de l'usure thermique, caractérisé par un faible taux de l'usure et par la présence des soufflures entre les particules de graphite. Ces soufflures confirment le passage de l'usure adhésive (usure stable) à l'usure thermique, dû principalement aux phénomènes thermiques au cours de glissement [15].

1.7 USURE ABRASIVE

L'usure par abrasion se définit comme la perte progressive du matériau à sa surface par action mécanique d'un abrasif [16].

Plusieurs modèles ont été proposés pour simuler le mécanisme d'abrasion [16,17,18,19], parmi ceux-ci il ya le modèle simplifié, proposé par RABINOWICZ [16], qui consiste a considéré une matrice de dureté H attaquée par un grain formant un angle α avec l'axe de rayage, illustré sur la figure 1.13

La relation dv/dl , qui donne la perte d'usure par unité de longueur est comme suit (1.2) : [13]

$$\frac{dV}{dL} = \frac{K.P}{3.H} \quad (1.2)$$

$\frac{dV}{dL}$: taux d'usure
 P : pression induite par la particule abrasive
 K : coefficient de l'usure abrasive

- 1 rayure
- 2 angle d'attaque
- 3 pénétrateur
- 4 matrice

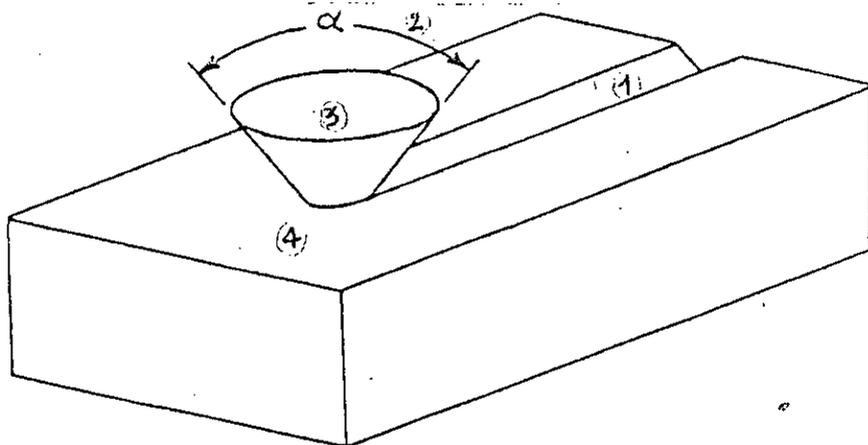


Figure 1-13 : Modèle simplifié de l'abrasion (RABINOWICZ [16]),

On remarque de ces modèles [4,6,16], que, selon le cas, et en fonction d'autres paramètres, notamment la forme des grains et la pression exercée, l'usure est gouvernée soit par un mécanisme de microcoupage ou de labourage. Lorsque un grain abrasif est en contact avec une surface ductile, on observe :

- D'une part l'enlèvement par microcoupage sous forme de micro-copeaux primaires (voir la figure 1-14, a)
- D'autre part la déformation plastique d'une empreinte ou d'un sillon qui n'entraîne pas nécessairement un enlèvement de matière (voir la figure 1-14, b)

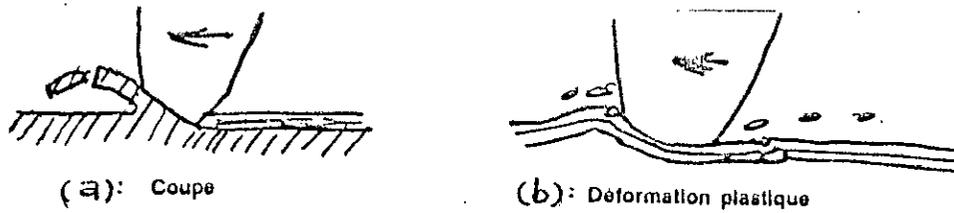


Figure 1-14: Les deux effets principaux de l'usure abrasive [20]

Le degré de pénétration des abrasifs est généralement en fonction des paramètres donnée par l'expression suivante (1.3) (R.LEVEQUE [7]) :

$$U_2 = K_2 \cdot P / H_s \text{ EXP } (N)$$

(1. 3)

P : la charge appliquée
 N : taux de consolidation
 H_s : Nombre de dureté
 K₂ : constante, dépend. du type d'abrasion

D'après l'analyse la plus courante des phénomènes d'abrasion, on distingue deux processus d'abrasion des surfaces :

- L'abrasion de la surface tendre par les aspérités de la surface la plus dure appelée "abrasion deux corps "
- L'abrasion provoquée par des particules dures roulant entre les deux surfaces ou encastrées plus tendre, c'est " l'abrasion trois corps " (voir la figure 1-15)

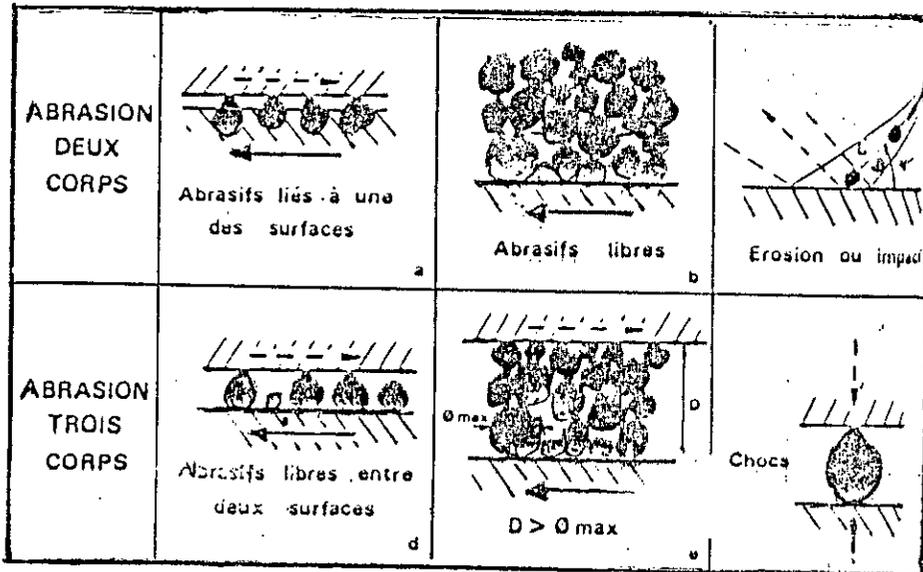


Figure 1-15: Configuration mécanique de l'abrasion (RCHAUT et PAVV [18])

1.7.1 Paramètres influençant l'usure abrasive

1.7.1.1 - Paramètres dynamiques d'abrasion

La sollicitation dynamique est caractérisée par la charge, la pression, ainsi que la vitesse relative des surfaces et des particules abrasives.

a - Influence de la charge

La charge appliquée a intuitivement une influence directe sur le taux d'usure ; elle peut aussi agir sur le mode de sollicitation en fragmentant ou en usant le grain abrasif.

Pour tenter de classer les différents modes de sollicitation qui résultent de la charge appliquée, on distingue souvent :

- *L'abrasion sous forte contrainte*
- *L'abrasion sous faible contrainte*

D'une façon générale, pour les charges faibles et moyennes, le volume d'usure abrasive croît linéairement avec la charge appliquée et avec la distance parcourue [12,21]; le coefficient de proportionnalité d'usure (voir formule citée en 1.3.) dépend de la dureté des surfaces et de la géométrie des aspérités ou des grains abrasifs. (voir figure 1-16)

Pour les fortes charges NATAN et JONES ont montré que, le volume d'usure n'obéit pas à la règle de la fonction linéaire, et ce est dû à l'enfoncement trop profond des particules abrasives dans le frotteur et sont par la suite déchassées sous l'effet du déplacement du frotteur, ce qui entraîne un écrasement des particules abrasives et une diminution de l'usure abrasive du frotteur.

b- Influence de la vitesse

La perte de masse par abrasion augmente légèrement avec la vitesse d'abrasion comme l'indique la figure (1-17).

Cet accroissement est attribué à une baisse des caractéristiques mécaniques sous l'effet de l'échauffement provenant de l'accroissement de la vitesse.

Plusieurs tentatives [22] ont été réalisées pour mesurer précisément la température de contact du couple d'usure et celle de l'abrasif en fonction de la vitesse de glissement. BODWEN et TABOR [2], ont montré que la température de contact pouvait aller jusqu'au 1000°C, et conduire subséquemment à une transformation de phase importante.

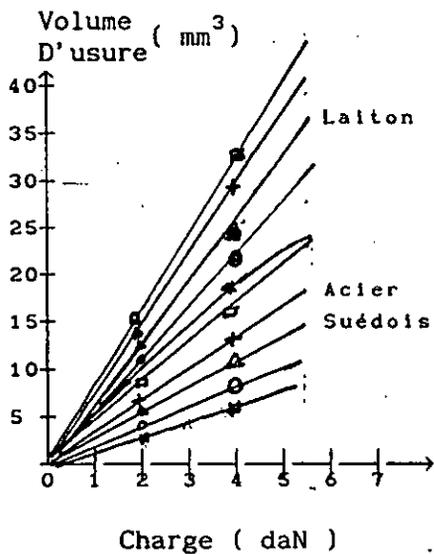


Figure (1-16): Effet de la charge sur la perte de volume par abrasion [23]

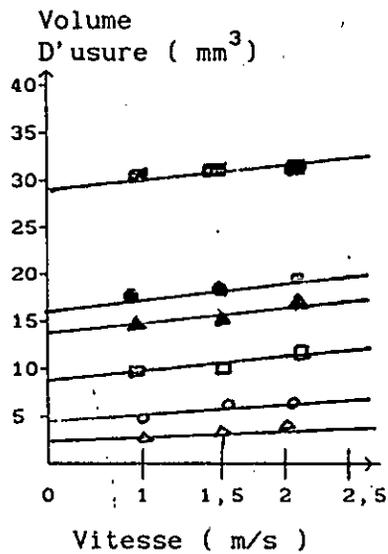


Figure (1-17): Effet de la vitesse de l'abrasion sur la perte en volume de différents matériaux [23]

1.7.1.2 - Paramètres du matériau (METAUX ABRASES)

Les paramètres à prendre en compte sont la dureté et la microstructure des matériaux

a - Dureté

La résistance à l'usure est souvent une fonction linéaire croissante de la dureté (voir la figure 1-18) [18]).

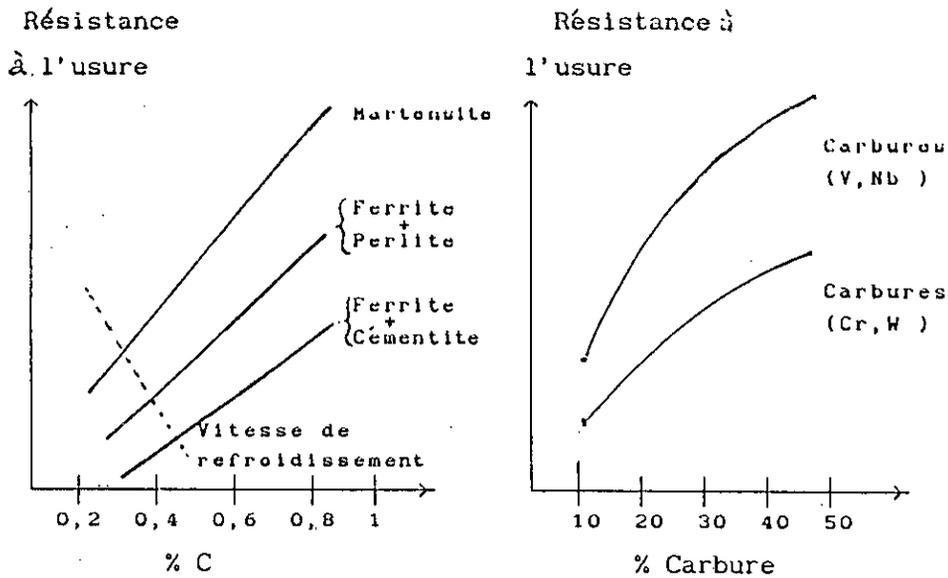


Figure 1-19 a : Influence de la microstructure et du % carbone sur la résistance à l'usure.

[4]

b : Influence de la nature et pourcentage des carbures sur la résistance à l'usure

[18]

1.7.1.3 Paramètres du milieu

- Effet de l'abrasif

Le milieu, est déterminé par le corps abrasif, mais également par l'environnement (Sec, HUMIDE, corrosif) et la température qui peuvent moduler ou amplifier ses effets.

a - Dureté de l'abrasif

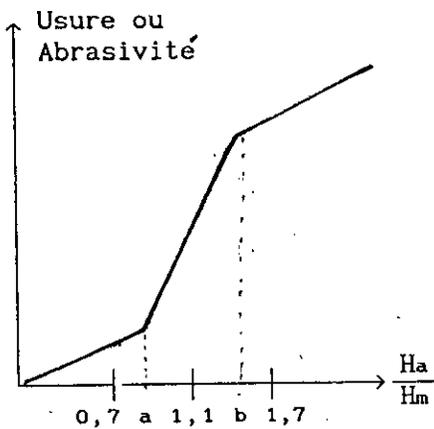
Elle détermine l'aptitude physique du grain abrasif à rayer un matériau. G COULIN [12] a montré ce processus, en traçant le rapport: de la dureté de l'abrasif / dureté du matériau en fonction du taux d'usure correspondant comme c'est illustré à la figure 1-20.

Lorsque la dureté de l'abrasif est très faible par rapport au matériau à rayer, le taux d'usure est par conséquent faible car la surface à abraser offre une grande résistance à la pénétration de l'abrasif. Plus le rapport H_a/H_m tend vers l'unité ou le dépasse jusqu'à un certain seuil, la résistance à la pénétration de la surface usée diminue ce que conduit à une sensible augmentation du taux d'usure. Lorsque $H_a \gg H_m$, le grain abrasif a tendance à s'encastrier dans la surface usée et la probabilité d'avoir un frottement grain sur grain augmente ce qui diminue le taux d'usure.

b - Forme et granulométrie du grain

La taille et la forme des particules abrasifs sont deux facteurs déterminants de l'usure abrasive.

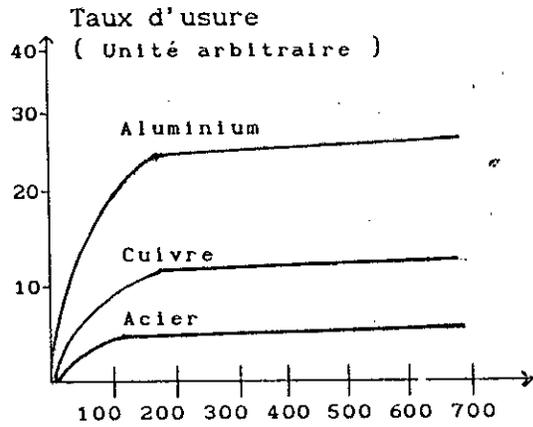
Comme le montre la figure 1-21, on observe généralement une croissance rapide de l'usure avec le diamètre du grain, puis une stabilisation à partir d'une dimension critique généralement voisine à 100 μm .



Rapport de dureté

H_a : Dureté de l'abrasif
 H_m : Dureté du matériau

Figure 1-20: Influence de la nature de l'abrasif [18]



Diamètre moyen du grain abrasif

(μm)

Figure 1-21: Influence de la taille du grain abrasif (μm) [23]

- Effet de l'environnement

La nature de l'environnement et la température jouent un rôle complexe dans l'abrasion par les modifications qu'elles peuvent causer au niveau de la surface exposée (OXYDATION, CORROSION ...etc) et des caractéristiques de contact.

1.7.2 Mécanisme d'usure abrasive de la fonte grise

L'usure abrasive des fontes par abrasion a été abordé par diverses études récentes réalisées au (C E M E F) en collaboration avec des praticiens du forgeage et du laminage [25].

B. Grovanola et G.Zambelli [26] ont étudié en particulier le mécanisme d'usure par abrasion de la fonte grise simulé par une opération de rayage multiple .

Des essais de rayage simple par pénétrateur pyramidal en diamant ont été effectués à diverses charges sur deux types de fonte traitée thermiquement, une fonte fragile (martensitique) et l'autre fonte ductile (perlito- bainitique)

Les mécanismes d'abrasion de la fonte grise observés par rayage au pénétrateur ont été corrélés avec les résultats d'usure mesurés expérimentalement sur papier abrasif [26].

Les essais de pénétration statique et de rayage ont été réalisés généralement avec un *microduromètre Vickers Hv* en diamant pour des charges comprises entre [0,5 - 10 N].

Les mécanismes d'enlèvement observés dans les fontes grises en générale et à matrice bainitique en particulier, de dureté égale ou inférieure à une dureté critique $Hv_{cr} = 600 \text{ daN/mm}^2$; simulés aux phénomènes de rayage et correspondant à ceux observés dans les métaux ductiles, sont les suivants: [25]

- Création d'un sillon par déformation plastique sans arrachement de matière (labourage, voir la *figure 1-22 A*).

- Arrachement de particules sous forme de copeaux (micro-coupage *figure (1-22 B*).

- Refoulement plastique de la matière en avant du pénétrateur et sur les bords du sillon (écaillage *figure (1-22 C*). Le refoulement de la matière dans la fonte grise à graphite lamellaire est favorisé par la rupture du réseau inter-connecté de graphite dans le sillon et à son voisinage immédiat.

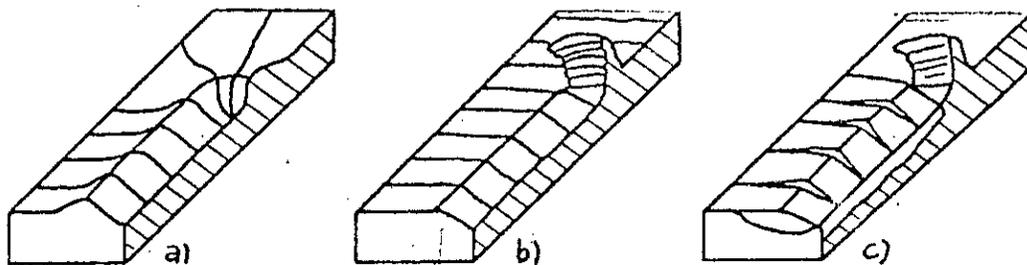


Figure 1-22 : Représentation schématique des mécanismes d'abrasion
 a : Labourage (déformation)
 b : Micro-coupage
 c : Ecaillage.

-Pour la fonte grise martensitique de dureté supérieure à $H_{Vcr} \approx 600 \text{ dan/mm}^2$, le rayage apparaît pour une faible charge appliquée. Une grande partie de l'énergie élastique créée par pénétration est ainsi absorbée par la rupture fragile à l'avant du pénétrateur. Les processus de microfissuration du graphite et l'extrusion en dehors du sillon sont pratiquement non apparants. L'inter-connexion des fissures dans le sillon provoque un arrachement de matière par plaque pour des charges plus grandes. Ce processus est comparable au modèle de fissuration par rayage dans la fonte grise proposé par Zum Gahr [27]. Il montre que le comportement fragile de la fonte à une dureté Vickers HV supérieure $>$ à 600 dan/mm^2 semble être lié à l'existence d'une transition de rupture - fragile mise en évidence par ZUM GAHR [24]. Ce comportement fragile-ductile est montré sur une courbe de la figure 1-23, qui reporte le facteur d'intensité K_{1c} en fonction de la résistance à l'usure pour différents matériaux.

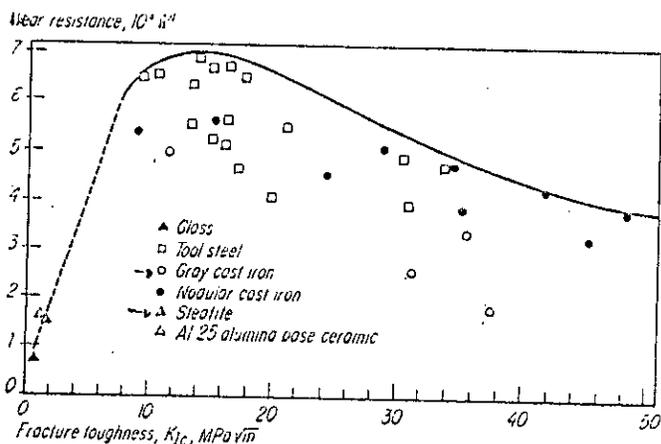


Figure 1-23

Relation :
 entre le facteur
 d'intensité K_{1c}
 et la résistance
 à l'usure de dif-
 férents matériaux

Nous donnons en fin de cette bibliographie un organigramme récapitulatif de tous les paramètres qui influent sur l'usure d'un couple métalliques, illustré à la figure 1.24 ci-dessous.

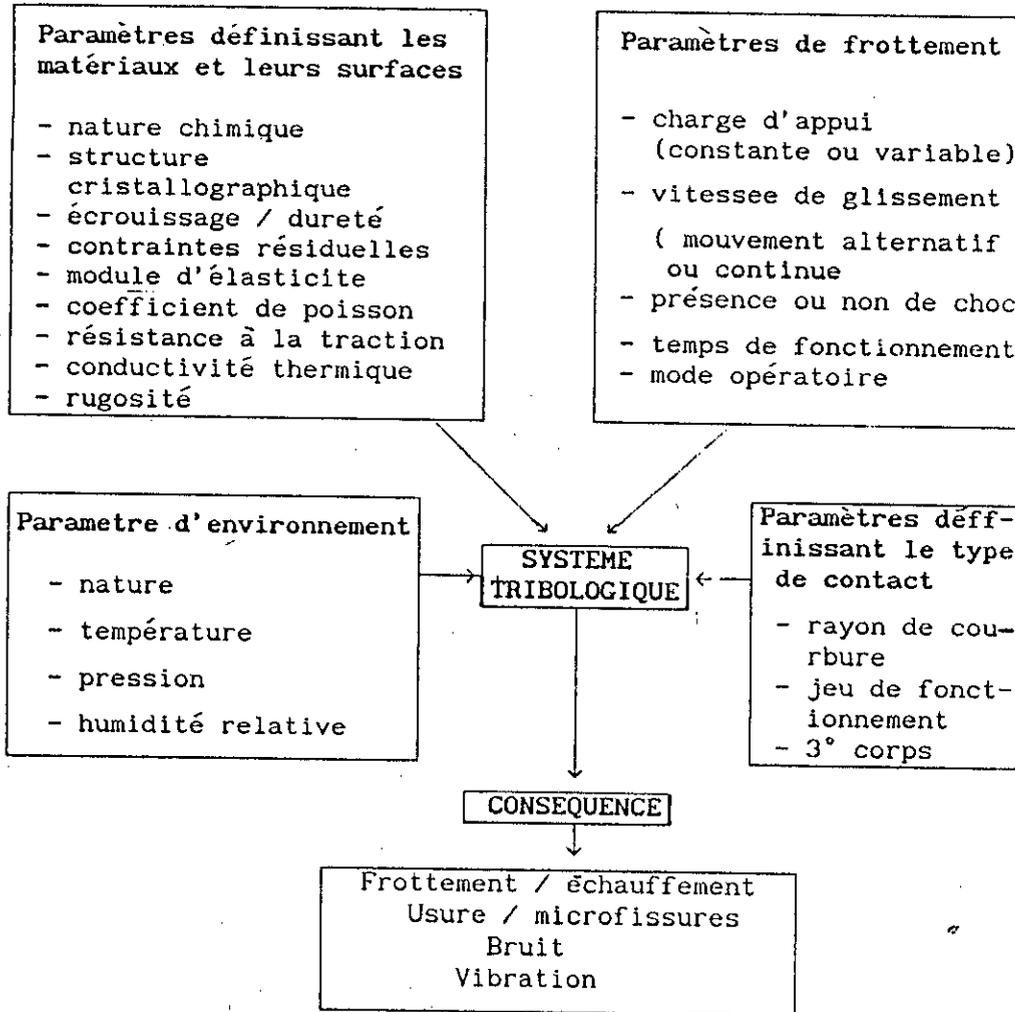


Figure 1.24 Les principaux paramètres d'un système tribologique

1.8 Conclusion

Il ressort de cette étude bibliographique que le couple d'usure et frottement (fonte/acier) doit posséder des propriétés physico-chimiques adéquates qui puissent résister aux conditions de sollicitations ; (thermiques, tribologiques et mécaniques) rencontrées par exemple dans le cas de freinage de la semelle de frein sur la ligne minière. Nous allons donc, au chapitre suivant utiliser ces critères pour faire un choix adéquat des différents types de fonte capables de résister aux conditions d'usure et frottement sévère.

CHAPITRE II

ETUDE ANALYTIQUE

CHAPITRE 2

ETUDE ANALYTIQUE

2- INTRODUCTION

Dans ce chapitre, notre démarche consiste d'abord à faire un rappel sur les caractéristiques tribologiques des matériaux métalliques utilisés, spécialement en freinage, suivi par un bref rappel sur le principe de freinage. Nous évoquerons ensuite la synthèse des travaux abordés dans le domaine de développement des semelles de freins en fonte, qui permettra d'aboutir à une sélection des fontes qui vont être soumises aux essais de simulation expérimentale de l'usure abrasive.

2.1- HISTORIQUE DE L'UTILISATION DE LA SEMELLE DE FREIN

Historiquement, sur les premiers véhicules automobiles les organes de frein étaient en fonte et frottaient sur de l'acier. La semelle en fonte reste toujours le matériau le plus utilisé par bon nombre de réseau ferroviaire.

Il possède un ensemble de propriétés très intéressantes: la fonte est un matériau peu couteux, facile à élaborer et le freinage ainsi obtenu est a peu près insensible aux conditions atmosphériques. Toute fois, les caractéristiques de frottement de la fonte sur l'acier des roues de bandages sont assez particulières.

Des recherches ont été faites depuis de nombreuses années pour déterminer la valeur et les variations de son coefficient de frottement. Dès 1878, DOUGLAS GALTIN, en Angleterre [28] dégagées les principales lois de ce type de frottement. Plus tard, vers 1930, METZKOU en Allemagne [29] et en 1936, PEDELUCQEN en France [30] exécutèrent des tests pour déterminer la variation du coefficient de frottement sur des bancs d'essais industriels qui montraient que dans le cas d'un freinage jusqu'à arrêt complet exécuté avec un effort constant aux semelles de freins, le coefficient de frottement f conserve une valeur sensiblement constante et assez faible depuis le moment où l'effort de freinage est déclenché jusqu'à une vitesse au voisinage de 50 Km/h, ensuite il augmente fortement jusqu'à l'arrêt.

2.2- NOTION DE FREINAGE

2.2.1 - Introduction et définition

Un frein est un transformateur d'énergie destiné à ralentir (*frein de ralentissement*), ou arrêter complètement le mouvement d'un engin (*frein d'arrêt*). Quelque soit le système d'arrêt et son emploi, un frein absorbe une énergie extérieure pouvant être soit une énergie potentielle due à la gravité (*cas des appareils de l'avage*), soit une énergie cinétique (*cas de véhicule*), soit les deux à la fois [31].

L'énergie mécanique est restituée par le frein sous une autre forme qui dépend du système de freinage considéré [31].

Le type de frein à étudier dans notre cas, concerne les freins qui transforment l'énergie mécanique en chaleur par frottement de deux solides, par ralentissement ou arrêt de la machine ou de l'appareil en mouvement.

Les propriétés d'un frein sont caractérisées par un certain nombre de grandeurs:

- L'effort de commande
- La course de commande
- La régularité du frein
- L'indice de commande
- L'efficacité du frein

2.2.2 - Caractéristiques de freinage de la semelle

L'importance de la caractéristique de frottement sur l'efficacité de freinage dépend de plusieurs facteurs mécaniques, métallurgique et tribologique du couple mis en freinage, ainsi que le mode et la nature de freinage.

La figure 2.1 représente la variation du coefficient de frottement f en fonction de l'effort appliqué aux semelles pour des vitesses initiales de freinage différentes. Pour une vitesse de freinage donnée, le coefficient de frottement diminue lorsque l'effort appliqué par semelle augmente. Ceci est corrélé avec l'augmentation de la chaleur au niveau de la semelle au fur et à mesure que la pression exerce sur lui augmente.

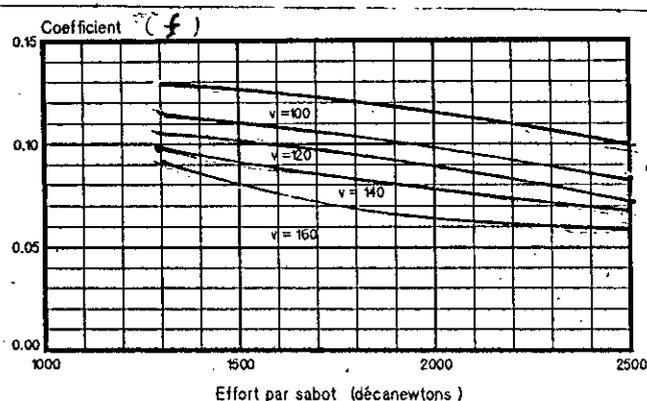


Figure 2-1:

Variation du coefficient de frottement en fonction (P,V)

2.2.3 - Effort de freinage exercé par la semelle de frein

Pour une roue transmettant au rail une charge P subissant l'effort retardateur d'une semelle appliqué en un point de sa circonférence par une force Q , voir la figure 2.2, [30]

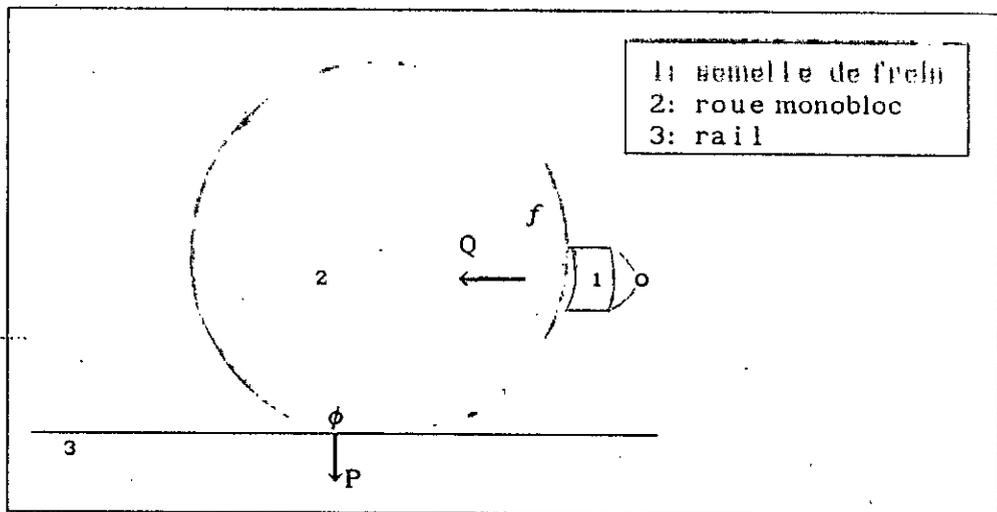


Figure 2.2: Principe du freinage de la semelle de frein

On doit a tout instant avoir la relation suivante (formule 2.1 [30]):

$$Q = \frac{p \phi}{f} - \epsilon \quad (2. 1)$$

ϕ : Coefficient d'adhérence entre roue/ rail

f : Coefficient de frottement de l'acier sur la fonte à un instant donn

ϵ : Un nombre très petit

Le coefficient ϕ varie avec la vitesse mais sensiblement moins que le coefficient de frottement de la fonte sur de l'acier. Il est avant tout fonction de l'état du rail, sa valeur par beau temps peut atteindre 0,20 alors que dans des conditions défavorable (rail gras, humide, présence de feuilles sur le rail) elle peut parfois descendre au dessous de 0,1 auquelle la nature de freinage de la semelle fait appel à l'adhérence entre roue et rail; pour en tirer le meilleur parti il exige de l'effort retardateur Q qu'il soit à tout moment de très peu inférieur a celui qui permet cette adhérence.

2.3 - FONTE GRISE : LE MATERIAU DES SEMELLES DE FREIN

2.3.1 - Généralité

L'usage des semelles de frein est toujours fort répandu dans les chemins de fer. A titre indicatif, le réseau ferroviaire Algérien "S.N.T.F." consomme une quantité en moyenne de 60000 semelles /an pour un coût global de 6 MDA [32]. Alors les chemins de fer Français " S.N.C.F " consomme 700 000 semelles/an par un coût globale de 50 MFF [33].

Leurs propriétés restent adaptées au freinage de nombreux engins et véhicules ferroviaires à travers le monde.

2.3.2 - Les principales caractéristiques mécaniques et métallurgiques de la fonte grise

La fonte grise en générale et la fonte phosphoreuse en particulier, constituant les semelles de frein, se présentent, en réalité, comme un agrégat de constituants divers dont chacun a une influence spécifique sur les propriétés de freinage et sur les caractéristiques mécaniques des semelles (Voir tableau 2-1)

Ces divers constituants sont facilement discernables par un examen micrographique d'une surface polie on observe des lamelles sombres et tendres, de dimensions plus au moins importantes avec une répartition plus moins homogène.

Il s'agit de lamelles de graphite qui crée, certes, des discontinuités dans la matrice, agissent comme lubrifiant solide des semelles sur la table de roulement [34].

L'attaque métallographique de la surface polie, fait apparaitre tout un graphisme dans lequel peuvent être reconnus les aspects spécifiques des constituants suivants: *perlite*, *cémentite*, *ferrite*, *steadite*, et quelques porosités et corps étrangers.

Un examen successif des caractéristiques tribologiques des différents constituants est donné dans le tableau 2-1, montre l'aptitude et le rôle de chaque constituant vis à vis de la résistance à l'usure

Tableau 2-1: Caractéristiques des constituants structurales des métaux ferreux (Acier / fonte) et leurs effets sur les performances tribologiques. [35]

Structure des Constituant	Constituant	Dureté Hv	Effet des structures des constituants sur la résistance à l'usure
Ferrite	-Fer α	50 - 135	faible dureté et faible résistance à l'usure.
	-Fer faib-alli	100- 270	
Austénite	-Fer γ	150- 200	faible dureté et bonne résistance à l'usure sous les chocs
Perlite	- lamellaire	190- 230	bonne résistance l'usure
	- globulaire	160- 190	Faible " " " "
Martensite	Dans l'acier et la fonte	800- 900	une grande dureté et une bonne résistance à l'usure en fonction du % C
Carbure	- Cémentite	1000- 1150	très bonne résistance à l'usure en fonction de la nature morphologique
	- carbure complexe	1100- 1300	
Eutectique dans les fontes	- à base de graphite (Fe + Cr)	130	une bonne résistance à l'usure
	- à base de phosphore (perlite+ Fe ₃ P)	775	" " " "
	- à base de carbure (perlite +Fe ₃ C)	900 -1000	" " " "
Graphite	Dans les fontes	faible	Sert de lubrifiant et réduit le frottement

2.4 - INFLUENCE DES PARAMETRES METALLURGIQUES SUR LA PERFORMANCE DES SEMELLES DE FREIN A L'USURE

2.4.1 - Introduction

Les caractéristiques de l'usure et de frottement des matériaux sont déterminées par la nature de l'interaction entre deux surfaces de frottement en contact.

La nature et le degré de l'interaction entre deux surfaces dépend aussi des propriétés de microstructure et de la composition chimique des surfaces de frottement. L'étude menée par RHEE et AL [35] a déterminé ainsi une microstructure perlitique fine, offre une meilleure résistance à l'usure qu'une microstructure perlitique grossière, alors que la présence du phosphore et d'autres éléments carburigènes dans la microstructure contribuent à accroître la résistance à l'usure abrasive à cause de la formation des phases dures.

2.4.2 Influence du phosphore et la microstructure sur l'usure des semelles de freins

L'élément phosphorique qui donne une particularité à la fonte phosphoreuse modifie profondément le mécanisme de solidification dans le système "fer - carbone" et forme des phases dures qui jouent un rôle primordial dans la résistance à l'usure des semelles de freins dans certaines conditions. Pour éclaircir ceux-ci nous avons déterminé à l'aide de la figure 2-3 qui donne un diagramme d'équilibre FeP-FeC simplifié selon VOGEL [37] toutes les phases dures probables qui jouent le rôle d'un agrégat résistant à l'usure en combinaison du phosphore avec le fer et le carbone et qui peuvent se former par effet d'élévation de la température de la semelle de frein durant le freinage. Parmi ces phases dures à base de phosphore il ya:

- Eutectique ternaire à bas point de fusion (953° c) et contenant 6,9 % P et 2,4 % C en E_1 or, en raison de la faible solubilité du phosphore dans l'austénite, le constituant dit eutectique phosphoreux ou steadite apparait effectivement dans toutes les fontes industrielles sous forme d'un agrégat de phosphure de fer Fe_3P , d'austénite (transformée ultérieurement en ferrite ou en perlite) et, dans certains cas de carbure de fer (tel que Fe_3C). Si, en raison de la graphitisation naturelle, le carbure de fer ne se forme pas s'il est décomposée artificiellement par recuit, l'eutectique phosphoreux ne contient plus que Fe_3P et l'austénite transformée

-Eutectique pseudo-binaire, pour ne pas le confondre avec l'eutectique binaire du système Fe - P (à 10 % P celui à la température 1020°C). La bonne connaissance du double diagramme Fe - C ainsi que la forme générale du diagramme Fe-C-Si stable et Fe- C - P est indispensable pour connaître l'interprétation des propriétés tribologiques essentielles des phases dures constituant les fontes en générale.

On peut admettre que l'influence du phosphore en combinaison avec d'autres éléments dans les fontes industrielles sur l'usure et frottement est déterminant par la composition et la nature des différentes phases eutectiques mentionées par le diagramme d'équilibre FeP-FeC

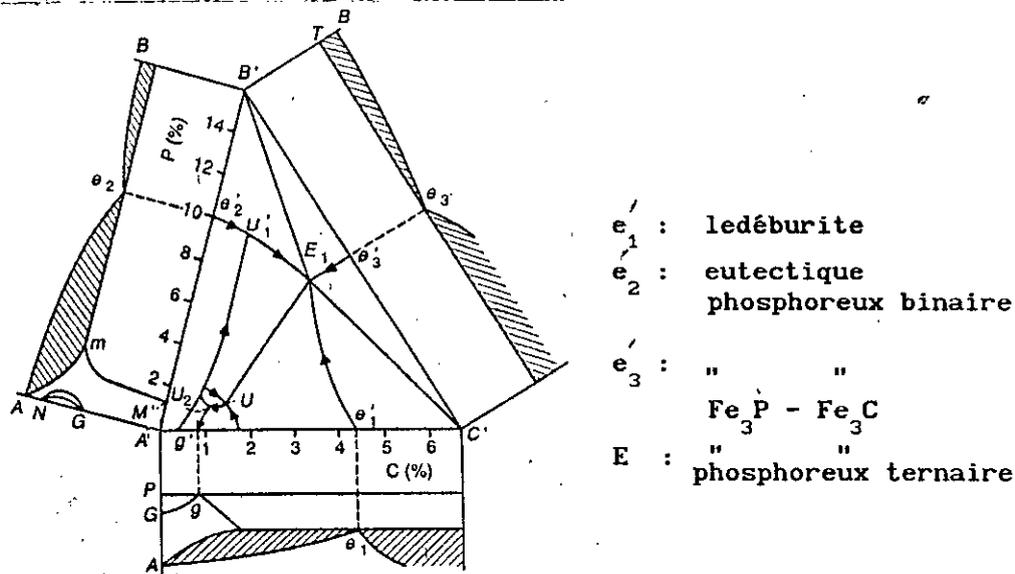


Figure 2.3 Diagramme d'équilibre ternaire Fe P - Fe C simplifié d'après R VOSEZ [37]

Avant que le pourcentage du phosphore dans les fontes qui constituent les semelles de freins ne soit pas normalisé par les organismes internationaux des chemins de fer dans les conditions d'utilisation d'usage normale [38], plusieurs études menées en Europe et en Amérique [22,29,39,40,41] ont réalisé des expériences soit simulées en laboratoire ou sur site industriel utilisant de véritables sabots de frein, pour déterminer, l'effet du pourcentage de phosphore en corrélation avec la nature de la microstructure obtenue et la quantité de phase eutectique présente sur la résistance, voir la figure 2-4

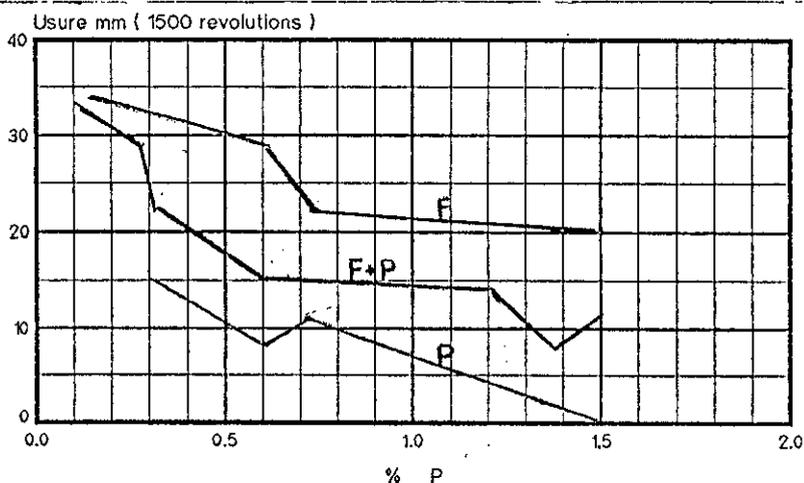


Figure 2.4: Influence de la structure et la teneur en phosphore sur l'usure des fontes grises frottées sur l'acier trempé

L'organisation industrielle Américaine ROUKEL STEEL PLANT FONDRIY [41] ont réalisé des essais sur site industriel sur des semelles de frein à haute teneur en p afin de comparer leur durée de vie aux semelles de frein normalisées par l'Union Internationale des chemins de fer [38].

Plus de 29 variantes de fonte ayant des pourcentages de phosphore différents ont été essayées à % p variable. Les résultats trouvés montrent que les semelles à haute teneur en phosphore possèdent des duretés élevées environs 300 HB qui influent sur la durée de vie des roues par l'usure prématurée des tables de roulements au cours de freinage; En outre ils estiment qu'un compromis entre ces semelles et les semelles normalisées par l'Union Internationale des chemins de fer, permet d'éviter l'usure prématurée des tables de roulements.

2.4.3 - Influence d'éléments d'additions autre que le phosphore sur l'usure des semelles de frein

Le résultat trouvé par l'organisation ROUKEL STEEL PLANT FOUNDRY concernant le compromis entre les semelles normalisées et les semelles à haute teneur a été développé par d'autres chercheurs [41] pour déterminer l'influence de certains éléments sur la performance des semelles de frein envers l'usure, en additionnant une quantité faible de Sn environs 0.1 % à une fonte phosphoreuse de 0.8 % P. La microstructure obtenue est constituée d'une matrice perlitique fine très stable thermiquement dans laquelle est noyé un eutectique phosphoreux, ce type de microstructure permet d'augmenter de manière substantielle la durée de vie des semelles de frein et de réduire sensiblement la production d'étincelles générées au cours de l'opération de freinage prévenant ainsi tout risque d'incendie.

MORETON et POWELL [42] ont réalisé des essais simulés au laboratoire pour étudier l'influence du phosphore en présence d'un faible % de nickel et de chrome dans des conditions atmosphérique suivant: *methan-air, propane-aire, ethyène-aire*, en faisant varier la vitesse et la pression afin de déterminer l'aptitude des fontes à l'usure sous une flamme incendie. Ils concluent qu'un faible taux de chrome (0.5 %) additionné à une quantité encore plus faible de phosphore, augmentent sensiblement la résistance à l'usure dans les conditions étudiées. Les travaux Japonnais [43, 44] ont consisté à étudier l'influence des phases dures (staedite + cémentite) noyées dans la matrice contenant du phosphore et d'autres éléments alliés en faible proportion (Ti, Cr, V, CU....) sur la performance des organes de freins, en fonction de l'effet de la pression de freinage des trains roulants à grande vitesse. Les résultats ont montré que ce type de structure favorise l'augmentation du coefficient de frottement et la diminution du taux d'usure.

Quant aux travaux Russes menées par les chercheurs [45,46,47] sur les semelles de frein en fontes phosphoreuses, contenant des éléments d'alliages tel que le cuivre et l'aluminium, ont montré que, lorsque la quantité ajoutée en Cu et Al était $< 0.14 \%$ (en poids atomique), les performances des semelles étaient améliorées dans la résistance à l'usure abrasive. En remplaçant le Cu et l'Al par du vanadium à des teneurs comprises entre $0.17-0.2 \%$ (en poids atomique) les semelles de frein offraient dans ce cas une meilleure résistance à l'usure thermique.

2.6 - LE CHOIX FINAL DES FONTES A SIMULER SUR MACHINE

Il est facile de remplacer un matériau par un autre pour remédier l'avarie, mais il est difficile de trouver un matériau qui répond aux exigences de performance et de fiabilité et qui tient compte en même temps du coût économique.

Cela nous amène à dire que la recherche d'un compromis entre ces différentes considérations pourra résoudre le problème.

La sélection finale des fontes choisies pour la simulation expérimentale en laboratoire dans ce programme de recherches a été inspiré par les nombreuses recherches qui ont été réalisées dans ce domaine, et qui ont dégagé les types de fontes capables de résister (dans des conditions d'essais réalisées) à l'usure.

Le choix de ces fontes a été dicté par les critères suivants:

- Performance
- Fiabilité (efficacité de freinage)
- Coût économique

Les fontes choisies sont:

A- Fontes grises purement phosphoreuse, comme la fonte normalisée P14 et la fonte P27 renfermant une quantité importante de steadite.

B- Fonte grise US, faiblement alliée (Cr, V, Ti, ...), et une fonte blanche A14, contenant l'élément principale (Mn).

Ces fontes forment des carbures de fer sous différentes formes (globulaire et lamellaire).

C- Fonte grise alliée au (Cr, Cu, P, etc) en formant deux types de phases dures steadite et carbure de fer. Cette fonte est définie par le symbole NH57-4.

L'ensemble de ces nuances étudiées ont été facilement élaborées au four à induction à l'unités de fonderie de Tiarete ou l'évaluation du prix de revient a tenu compte des éléments métalliques qui composent ces matériaux et ce pour mieux apprécier le critère " coût économique "

2.7 - CONCLUSION DU CHOIX

Les études entamées dans ce domaine pour améliorer la durée de vie des semelles de frein en fonte dans des différentes conditions de travail ; ont montré d'une part que l'élément phosphoreux joue un rle prépondérant dans la résistance à l'usure et à l'amélioration de la durée de vie. D'autre part, certains éléments d'additions (Cr, V, Mo,...) forment des phases dures stables qui résistent à l'usure, ainsi que d'autres éléments stabilisent la structure perlitique dans des conditions sévères, comme (AL, Cu, Sn....).

Nous pensons qu'à travers l'étude qui sera entreprise dans les chapitres suivants, nous pouvons déterminer l'aptitude des phases dures qui constituent ces différentes fontes vis à vis de l'usure sévère du site industriel simulé en laboratoire, pour un éventuel remède de l'usure prématurée des semelles de frein rencontrées en ligne minière.

CHAPITRE III

ETUDE EXPERIMENTALE

SUR SITE

CHAPITRE 3

ETUDE EXPERIMENTALE SUR SITE INDUSTRIEL

3 - INTRODUCTION

Tout d'abord, avant de décider la réalisation d'une simulation expérimentale en laboratoire, nous avons pensé à fabriquer un banc d'essai à l'échelle réelle pour simuler le freinage des semelles de frein. Malheureusement pour des raisons purement matérielles et financière, nous n'avons pu réaliser ce projet. Aussi, nous avons effectué des essais sur site industriel sur le train minier afin d'optimiser certains facteurs qui nous orienteront vers une étude de simulation expérimentale, réalisée au laboratoire sur un tribomètre et qui soit la plus fidèle possible.

Ce chapitre consiste donc à faire une étude expérimentale sur site, afin de décrire les techniques expérimentales industrielles qui nous ont permis la réalisation et le contrôle du prototype pour effectuer les essais de freinage du couple sur site industriel. Ensuite nous allons déterminer les ratios d'usure (le taux de la matière enlevé par effet au freinage) du couple, suivi d'une analyse de l'environnement et des surfaces usées.

3.1- DESCRIPTION DU SITE3.1.1-Généralité

L'exploitation minière dans la région Est de l'Algérie nécessite l'utilisation des moyens de transport pour acheminer les minerais vers les industries de transformations.

Il ya deux types de minerais qui sont transportés dans cette ligne minière:

- Minerai de fer, de la mine de "OUENZA" vers le complexe de transformation sidérurgique "EL HADJAR".
- Minerai de phosphate de la région "DJBEL ONK" vers le port de "ANNABA".

Le site industriel, est défini dans notre cas par le travail expérimental à effectuer à l'échelle industrielle (cas du prototype). On considère l'éprouvette d'essai, une semelle de frein qui frotte sur une roue monobloc, circulant en ligne minière.

Cette ligne est implantée dans une région géographique difficile et soumise à des conditions climatiques très sévères.

Une partie de cette région est une zone montagneuse dont le trajet formé par de fortes rampes, pentes et courbes (voir le tableau 3.1) influe énormément sur l'endommagement du matériel roulant.

Tableau 3.1 : L'état topographique de la voie ferrée

train de minerai de fer			train de minerai de phosphate		
Gare de station	Pente	Rampe	Gare de station	Pente	Rampe
Ouenza	8	8	Djbel-Onk	8	8
Ain- Chenia	10	9	Bir- El Ater	8	8
Oued-Keberite	10	5	Bir- Sbeikkia	8	8
M- Daourouche	5	15	El- Ma El Abiof	8	8
Drea	20	0	Tenoukla	21	8
Oued -Chouk	18	0	Tebessa	16	16
Les Tuileries	0	25	Boulhaf-Le Dry	14	2
Souk -Ahras	0	28	Morsott	8	5
Ain- Sennoir	22	25	Sidi Yahia	14	5
Mechroha	22	14	El-Aouinet	11	5
Medjez-Sfa	26	0	Oued-Keberit	10	5
Bouhegouf	20	9	↓	meme chemin que le train du minerai de fer	
Bou-Daroua	7	5			
Drean	9	10			
Oued- Sba	5	6			
Annaba	3	5			

L'autre partie est située dans une zone désertique où les vents de sable sont fréquents et dévastateurs. Ainsi cette ligne ferroviaire, vu sa position géographique et climatique ne permet pas aux trains d'accéder à des vitesses supérieure à 50 Km/H et obligent les trains chargés d'être en freinage continu dans la plus grande partie du parcours. De plus la difficulté du trafic des trains de marchandise est accrue par les charges importantes des wagons:

- 80 tonnes de minerai de fer par wagon
- 60 tonnes de minerai de phosphate par wagon.

Dans ces conditions très agressives, le couple de freinage constitué de la semelle de frein en fonte et de la roue monobloc en acier, utilisé en ligne minière, aura une durée de vie très courte par rapport aux conditions d'utilisation normale. La semelle de frein en fonte subit une usure avancée, en quelques semaines au lieu de quelques mois constatée dans des lignes normales. Quant aux roues monobloc, elles enregistrent depuis quelques années des usures anormales (même chose constatée pour les lignes ferroviaire, dans le sud du pays) rendant très coûteuse leur maintenance et péjorant les performances d'exploitation de la ligne minière.

Nous notons aussi dans notre étude qu'on entend par environnement la présence du corps abrasif entre le couple de freinage dû essentiellement au transport de minerai, et l'augmentation de la température due au freinage continue de la semelle de frein sur la roue.

3.1.2- Analyse du minerai

L'analyse de minerai (composition et dimension des éléments de minerai) de l'Ouenza et de Djbel-onk a été déjà faite par plusieurs études d'exploitation minière. Nous nous sommes intéressé à déterminer les différents types d'oxydes et leurs dimensions granulométrique qui étaient présents dans le minerai et qui contribuent fortement à provoquer l'usure abrasive de la semelle de frein et la roue monobloc du train. Pour cela nous avons pris des échantillons à partir du minerai qui tombe entre la roue et la semelle de frein au cours de freinage. Ces particules de minerai ont été récupéré au moyen d'un bac placé au voisinage du couple de freinage. Cette opération d'analyse de minerai, nous permettra au chapitre suivant de simuler fidèlement l'usure abrasive au laboratoire.

3.1.3- Procédure expérimentale

Pour faire l'analyse de ces échantillons pris à partir des particules de minerais qui tombaient sur la semelle de frein au cours de freinage nous avons utilisé la méthode d'analyse par voie chimique classique pour déterminer la composition chimique des différents oxydes qui contribuent à la dégradation des surfaces de contact. La méthode de tamisage a été employé ensuite pour déterminer la granulométrie moyenne du minerai (voir le paragraphe 3.1.5, décrivant cette méthode)

3.1.4 - Composition chimique

la valeur moyenne de l'analyse chimique a été effectuée sur trois échantillons pour chaque type de minerai (voir les tableaux 3.2 et 3.3). Le résultat d'analyse de chaque type de minerai a donné la composition suivante:

a - Minerai de fer

Le minerai de fer de l'OUENZA est constitué de deux sorte de minéraux: minéraux de fer et minéraux non ferreux

- Minéraux de fer: Se composent des trois principaux minéraux :

HEMATITE, SEDERITE et GEOTITE

HEMATITE: Fe_2O_3 , c'est le constituant majeur dans le minerai (voir tableau 3,2), comme oxyde de fer, se trouve sous plusieurs formes, grande rhomboèdre, noirs brillant et assez anguleux. La dimension des cristaux varie de 1 à 2 mm, se qui donne un minerai dur et homogène.

SEDERITE: $FeCO_3$ se cristallise en rhomboèdre avec une dimension qui varie de 1 à 5 mm, la forme de la particule est assez arrondi, de couleur noire

Tableau 3.2 récapitulatif du Pourcentage des minéraux de fer

Minéraux de fer	Fe_2O_3	$FeCO_3$	$FeO, Fe_3O_4 \dots$
%	55.6	7.5	28

- Minéraux non ferreux : Se compose des minéraux donnés par le tableau 3.3 ci-dessous

Tableau 3.3 : pourcentage des analyses des minéraux non ferreux

Minéraux	Silice	Calcite	mineral(Cu)	Pyrite	Blende
Composition	SiO ₂	Ca Co ₃	Cu ₂ Co ₃ Cu ₃ Sb ₃ S ₃	FeS ₂	ZnS
%	12	2,5	3,7	1,9	4,8

b - Mineral de phosphate

Le mineral de phosphate de DJBEL ONK, est caractérisé par la très grande abondance de phosphite avec une dimension des particules qui varie de quelques µm jusqu'au plusieurs mm. Ses principaux constituants sont :

- Phosphate : Ses particules se trouvent sous forme de nodules, comportent à l'intérieur du fluor en petite quantité.

- La silice SiO₂ et les oxydes : tel que, le fer et l'aluminium (sous forme de corindon Fe₂O₃-Al₂O₃). Ces oxydes sont très durs, brillants et possédant une forme anguleuse

- Carbonate de chaux et de manganèse: (CaCo₃, CaCo₃-MgCo₃)
Ils se trouvent dans le ciment qui entourent les nodules de phosphate

L'analyse chimique du mineral de phosphate à donner la composition suivante : (voir tableau 3.4)

Tableau 3.4 : récapitulatif de l'Analyse chimique du mineral de Phosphate

Minéraux	Andydride Phosphorique	Silice	Al-Fe	Chaux	Mang- anèse
Composition	P ₂ O ₅	SiO ₂	Fe ₂ O ₃ Al ₂ O ₃	CaO	MgO
%	25	13.5	10	47	2.5

3.1.5- Granulométrie

La détermination granulométrique du minerai a été effectuée au moyen d'une méthode d'analyse par tamisage. La méthode consiste à déterminer à l'aide de différents tamis, le poids cumulé en % (c'est la quantité de particules qui passent d'un tamis à un autre) en fonction du diamètre moyen du minerai.

Cette méthode nous a permis de déterminer la taille moyenne des oxydes de minerai. Les échantillons d'analyse granulométrique ont été pris à partir des particules qui tombaient avant usure et d'autres récupérées après usure (les particules récupérées au dessous de la semelle après leurs écrasements par effet de freinage).

Les résultats d'analyse granulométrique des deux minerais illustrés aux tableaux 3.5 et 3.6, ont été reporté sur la *figure 3.1* et la *figure 3.2*, qui donnent le poids cumulé du minerai en fonction du diamètre moyen. Les *figures 3.1* et *3.2* montrent que la distribution granulométrique des particules de minerai avant usure varient de quelques microns jusqu'aux quelques centimètres. Cette variation change pour les échantillons pris après les tests de freinage: en effet nous remarquons une nette augmentation dans les dimensions inférieures à 3 mm et une diminution dans les dimensions supérieures, Ceci est dû principalement au concassage des particules de grande dimension par le choc du freinage de la semelle de frein contre la table de roulement au cours de freinage.

Cette analyse granulométrique (voir tableaux 3.5 et 3.6) faite au laboratoire de l'ENPA, ne tient pas compte des particules de dimension supérieur à > 1 cm qui sont en faible quantité par rapport à celles qui sont illustrées à la *figure 3.1* et *3.2*

Tableau 3.5 : Analyse granulometrique du minerai de fer
(d'après le : LABORATOIRE ENPA)

Classe (mm)	+6,5	-6,5 / +5,6	-5,6 / +4,25	-4,25 / +3,65	-3,65 / +2,63	-2,4 / +1,25	-1,25 / +0,12	-0,12
% Avant le test de fre- inage	4.4	5.6	15	40	20	5.5	1.5	8
% Après le test de fre- inage	8.5	10.5	11.5	32.5	14.5	10.5	6.6	4.3

Tableau 3.6 : Analyse granulometrique du minerai de
phosphate (d'après le : LABORATOIRE ENPA)

Classe (mm)	+7,5	-7,5 / +6	+6 / +5.3	-5,3 / +4,15	-4,15 / +2,80	-2,80 / +1,74	-1,74 / +0,24	-0,24
% Avant le test de fre- inage	6.6	5.6	28	35	15	4.8	2.5	2.7
% Après le test de fre- inage	11.5	4.55	17.5	28.55	16.25	10.5	6.6	4.3

**3.1.6 - Interprétation et conclusion
des résultats d'analyse de minerai**

L'analyse chimique du minerai nous a permis de constater, d'une part que les éléments les plus abondants et les plus abrasifs sont: les oxydes de fer et la silice.

D'autre part l'analyse granulometrique des mineraux, montre qu'une grande partie des particules qui participent à la dégradation par abrasion des surfaces frottantes se trouve généralement à une dimension située à 3,5 mm environ.

En outre, Ces deux constatations (type et dimension moyenne des oxydes) nous permettent de simuler en laboratoire, l'environnement du site d au phénomène d'abrasion du minerai.

Figure 3.1 Distribution des particules de minerai de fer

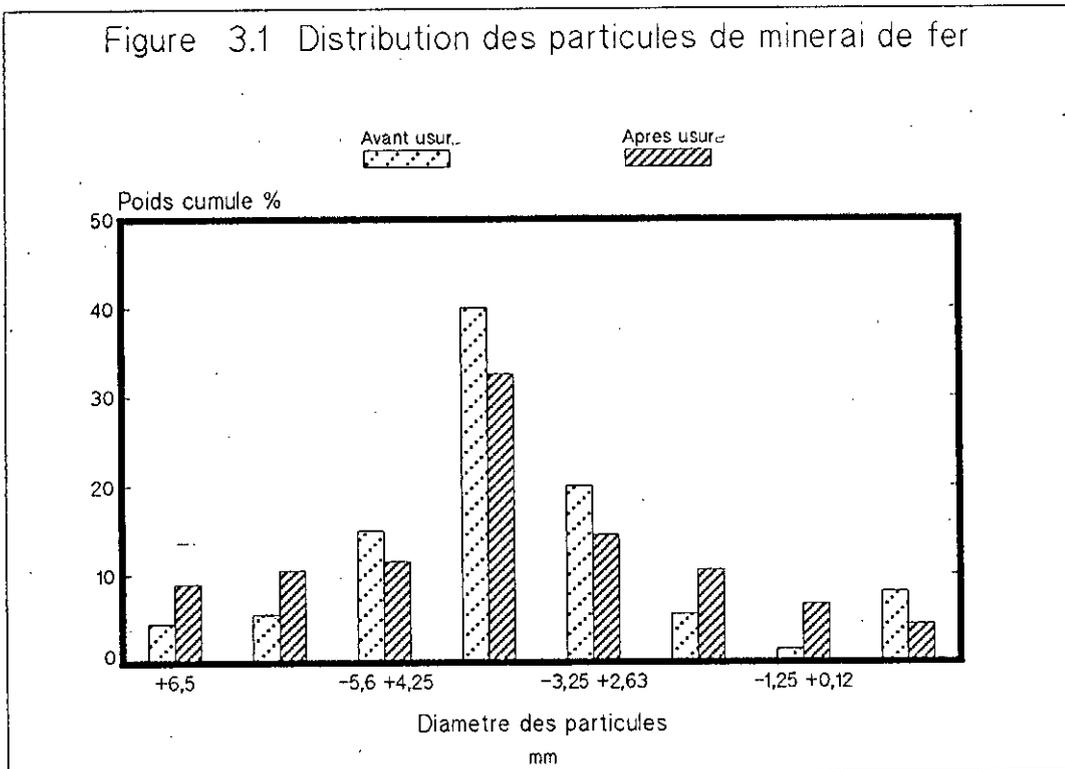
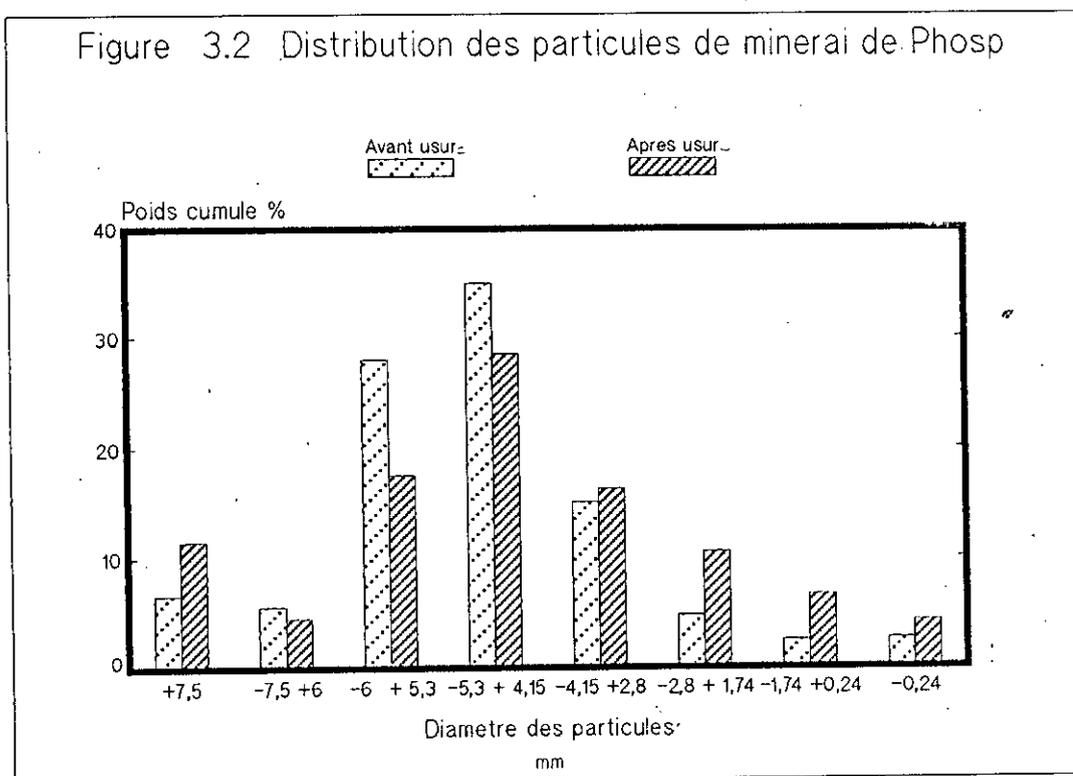


Figure 3.2 Distribution des particules de minerai de Phosp



3.2- DESCRIPTION DU COUPLE DE FREINAGE UTILISE EN SITE:

(semelle de frein / roué monobloc)

Le couple de freinage tel que le montre la *figure 3.3*, utilisé en site industriel (*en ligne minière*) est constitué de la semelle de frein en fonte et la roue monobloc en acier. Cette photo a été prise à partir du train minier au cours de freinage.

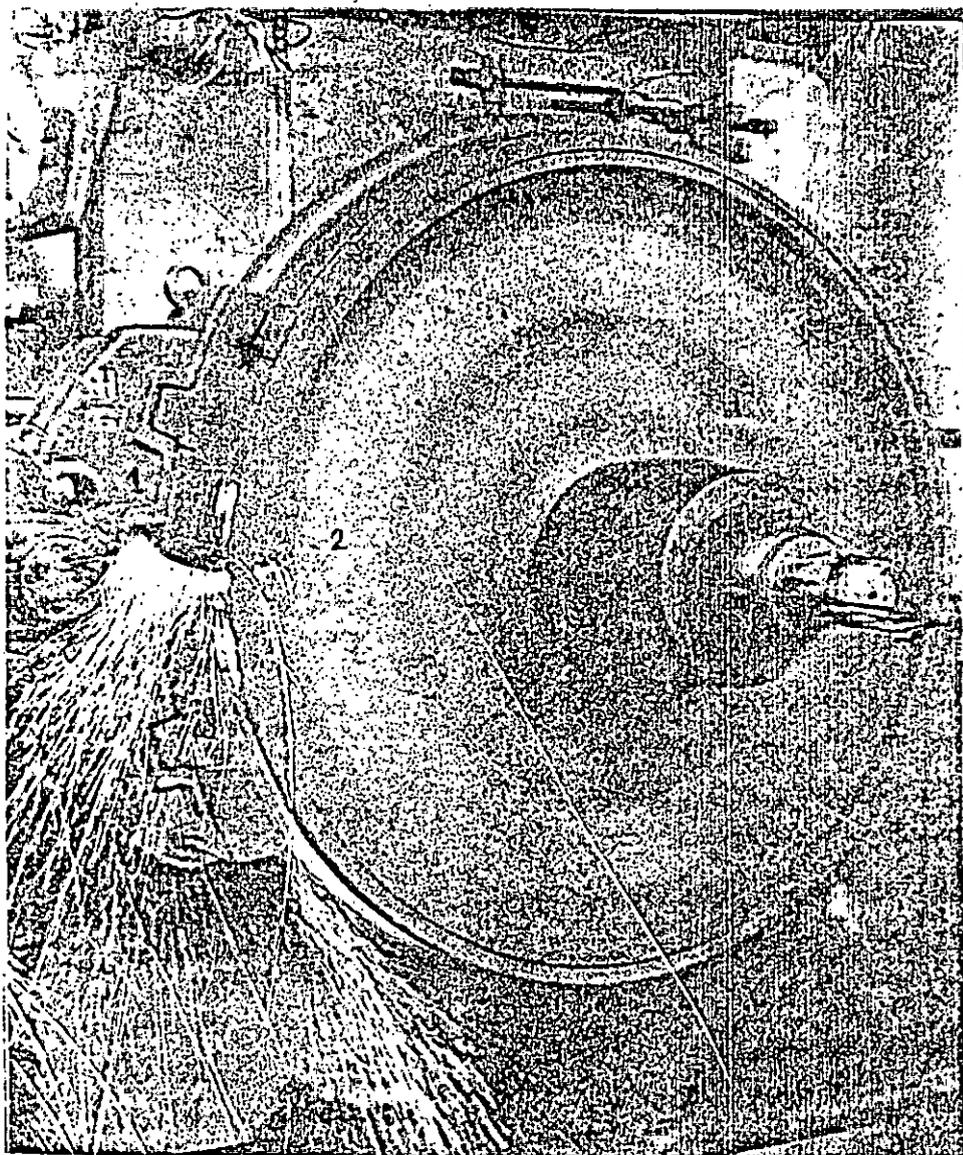


Figure 3.3 :Photo du couple de freinage prise du train en cours de freinage (sur site industriel: ligne minière)

- 1 : Semelle de frein
- 2 : Roue monobloc

3.2.1 Les conditions d'utilisation du couple de freinage

Le couple: semelle / roue, utilisé par le train dans la ligne minière est caractérisé par les états suivants:

- Un excès de la charge, en moyenne de 10 tonnes / roue
- La Présence de particules abrasive logées entre la semelle de frein et la roue monobloc, provenant du minerai transporté par le train, qui jouent le rôle d'un troisième corps abrasif, dans un environnement sec en été et humide en hiver.
- Le tracé sinueux et difficile de la voie ferroviaire comme il a été signalé précédemment oblige l'opérateur a freiné durant le 2/3 du parcours (180 km). En conséquence, un dégagement de chaleur important est généré au niveau du couple: semelle / roue. La température augmente à des intervalles suffisamment importants (800° - 900° C) pour provoquer des changements de microstructure mis en contact. Ces gradients thermiques sont responsables de l'apparition de fissures au niveau des roues.

3.3 - Terminologie

Afin de faciliter au lecteur la compréhension des termes propres aux Chemins de Fers utilisé dans notre mémoire, nous donnons un schéma terminologique illustré à la figure 3.4

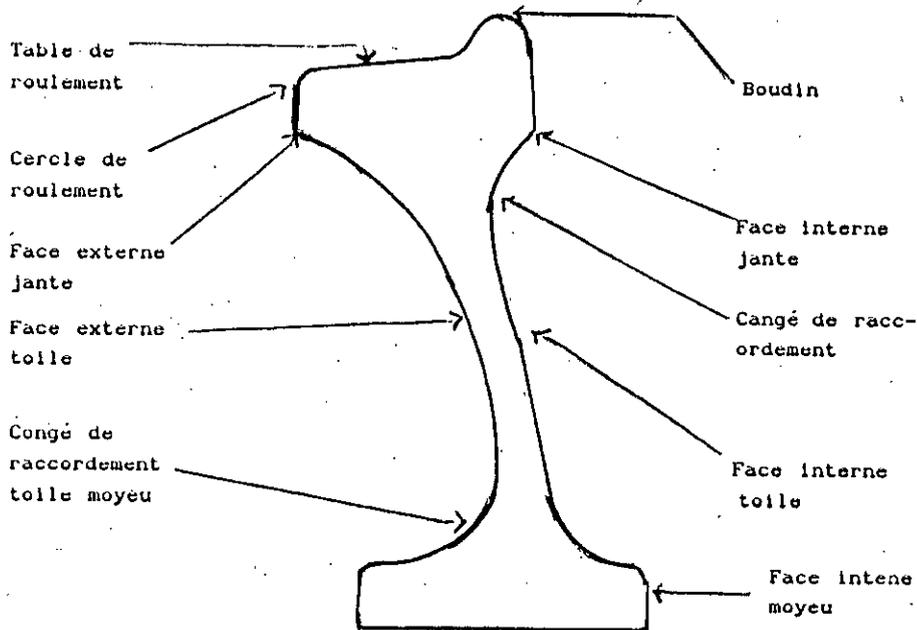


Figure 3.4: Schéma décrivant les termes terminologique (profil d'une roue monobloc)

3.4 - Description des moyens de contrôle des caractéristiques mécaniques et physiques de la semelle de frein sur site

Le présent mode opératoire expérimental en site est régi de la spécification technique de l'Union International des Chemin de fer [38]. Nous nous sommes inspirés pour décrire tous les moyens de contrôle des caractéristiques physico-chimique du couple de freinage à utiliser en site industriel.

Le contrôle des caractéristiques physico-chimiques (*dureté Brinell HB, résistance au choc K et aspect de la texture*) du couple de freinage en site, permet de vérifier la conformité du produit après l'élaboration et avant l'utilisation en site industriel. Nous insistons essentiellement dans ce mode opératoire sur le contrôle des caractéristiques des semelles de frein.

3.4.1- Dureté Brinell

La prise des mesures de dureté a été faite sur le long des faces latérales de la semelle éprouvette (voir *figure 3.5*). Avant toute mesure, un meulage de la surface de 2 mm de profondeur a été pratiqué par meule. L'essai de dureté est pratiqué à l'aide d'un appareil *duromètre* utilisant une bille de 10 mm sous une charge de 3000 Kg, conformément à la recommandation ISO / R 286. La valeur moyenne de la dureté est obtenue par l'expression suivante 3.1

$$HB = \sum_{i=1}^{10} HB_i / N \quad (3.1)$$

HB_i : dureté au point i

N : nombres de mesures

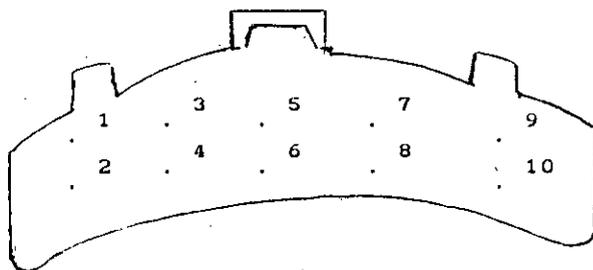


Figure 3.5: Les positions de prise de dureté Brinell de la semelle éprouvette.

3.4.2- Résistance au choc procédure expérimentale

L'essai doit être conduit dans les conditions ci- après:

- par suite de la forme des semelles, la panne du mouton doit être terminée par une partie cylindrique inclinée conforme au croquis voir figure 3.6. La semelle est posée sur deux appuis distants de 160 mm fixés à la chabotte; elle doit être placée de tel sorte que les appuis soient symétriques par rapport à son plan transversal médian.

Avant de commencer l'essai on s'assure que :

- Les appuis sont serrés à fond et sans jeu dans leurs logements
- La semelle repose sur les appuis
- les extrémités de la semelle ne repose pas sur la chabotte.

En outre les semelles doivent être convenablement ébarbées et dessablées, affranchies de tout jet de coulée, évent et masselotte, exemptes de tout défaut, visible au non, pouvant nuire au montage ou à l'emploi.

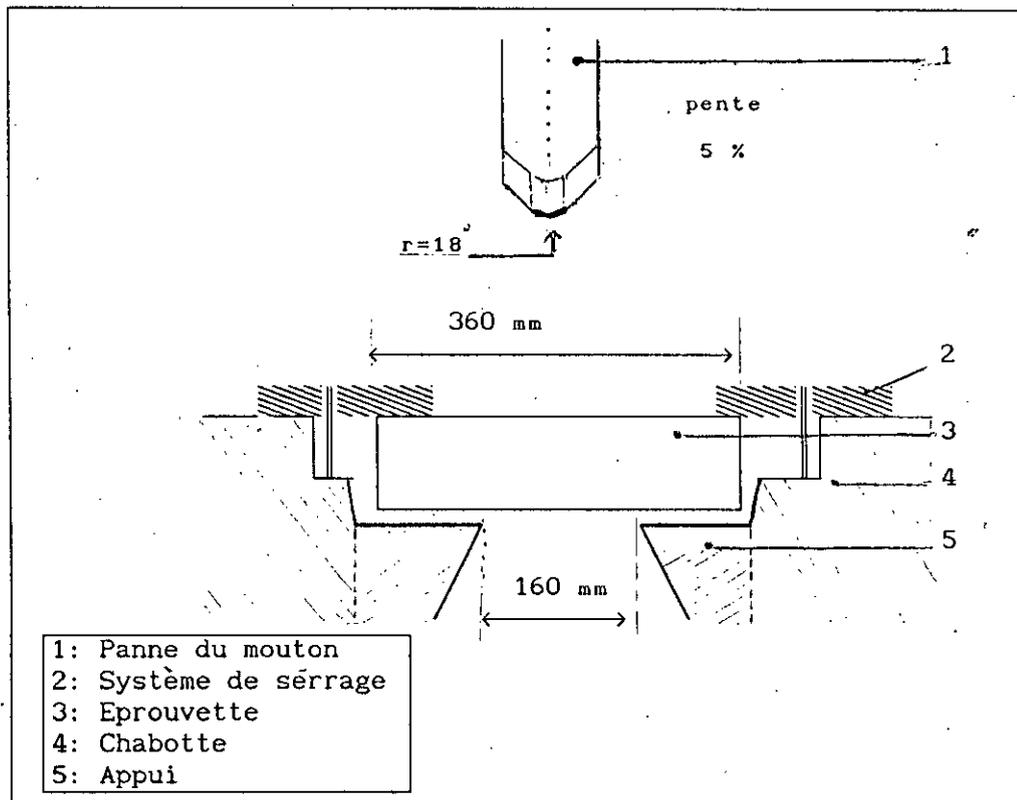


Figure 3.6: Croquis d'essai de choc mécanique

3.4.3 - Verification de la texture

Le faciès de rupture d'une éprouvette rompue à l'essai au choc est analysée à l'aide d'un microscope stéréographique de marque OLYMPIA. Selon la norme (UIC) la cassure doit présenter une texture de teinte grise, homogène, sans cavité notable pour les fontes phosphoreuses. La dimension maximum des cavités qui sera tolérée est de 10 mm de diamètre.

En plus la surface totale des cavités ne doit pas dépasser 5 % de la section de cassure.

3.5 - ETUDE D'EXPERTISE DU COUPLE UTILISE EN SITE INDUSTRIEL

Avant d'entamer les essais de freinage pour déterminer certains paramètres indispensables pour la simulation, une étude sur le mode de fabrication des semelles de frein a été réalisée auprès des unités nationales (A :FERPHOS ; Annaba, B:DECRO ;Oran et C:HAMMA ; Alger) qui alimentent la ligne minière en semelles de frein, afin d'acquérir certaines informations capitales.

Par exemple pour vérifier si les entreprises nationales respectent la normes de fabrication et connaître le mode d'élaboration, ...etc. Ensuite nous allons contrôler les caractéristiques physico-chimiques et géométriques des différentes semelles (l'unité A:FERPHOSE, l'unité B:DECRO et l'unité C: HAMMA) par le biais des moyens de contrôle définis en 3.4. La nécessité et l'utilité de ce travail sert en premier lieu à faire un diagnostic sur les différents types de semelles de frein utilisée en ligne minière et de chercher les causes probables de l'usure prématurées des semelles de freins dans cette ligne minière. Les résultats de cette expertise faite sur les semelles de frein est illustré au tableau 3.8

Pour nous permettre de comparer les résultats d'expertise, aux normes internationales nous présentons le tableau 3.7: qui résume les différentes caractéristiques physico-chimiques de la norme UIC utilisée pour les semelles de frein [38].

Tableau 3.7: Caractéristiques physico-chimique de la Norme-UIC pour le contrôle des semelles de frein

Composition chimique					Caractéristiques mécaniques	
C	Si	Mn	P	S	Dureté HB	Résistance au choc selon la norme UIC
3	1.7	0.6	0.9	<	200 - 260	K = 0,7 - 0.79
a	a	a	a			
3.5	2.1	0.9	1.1	0.15		

Tableau 3.8: Défauts structuraux et mécaniques rencontrés dans les semelles de freins des unités A, B et C

A					B					C				
M A C R O G R A P H I E														
Rugueux Cavité externe Excès de soufre					Existence de soufre					Cavité Soufre Armature non conforme à la pièce				
M I C R O G R A P H I E														
Existence de ferrite en excès (à cause du taux élevé de silicium)					Phase trop hétérogène (F, P, Ce,...) Absence de Fe ₃ P					Excès de ferrite Existence de faible quantité Fe ₃ C Taux faible de Fe ₃ P par rapport à la norme UIC				
D U R E T E														
HB = 280 La dureté dépasse la limite supérieur de la Norme {200- 260}					HB = 170 La dureté n'atteint pas la limite Inf					HB = 190 La dureté est voisine de la borne Inf				
C O M P O S I T I O N - C H I M I Q U E (%)														
C	Si	Mn	P	S	C	Si	Mn	P	S	C	Si	Mn	P	S
3,5	2,5	0,44	0,8	0,2	2	0,68	0,3	0,32	0,1	2,7	1,2	0,7	0,4	0,2

A: PHERPHOSE (ANNABA), B: DECRO (ORAN), C: HAMMA (ALGER)

En outre, nous avons mené une étude comparative entre l'usure des roues monobloc utilisées en ligne minière et celles des roues utilisées dans le sud du pays. En se basant sur les études de statistique et de fiabilité [48] réalisées par le bureau d'étude des chemins de fer (unité d'Alger).

L'étude consiste à faire une comparaison de la durée de vie des organes (telle que la roue) utilisés dans le nord et le sud du pays, et de voir l'influence de l'environnement ainsi que la nature des voies ferrées sur l'usure du couple de freinage. Cette étude de comparaison sert aussi, comme un outil pour la comparaison des résultats du site industriel avec ceux obtenus en laboratoire. Le tableau 3.9, reprend les principaux endommagements relevés sur les roues dans la ligne minière lors de cette étude.

Tableau 3.9: Récapitulatif de l'étude comparative de la durée vie des roues monobloc (voie normale, étroite et ligne minière)

Caractéristiques de la roue monobloc	Voie Normale (Nord du pay/)	Voie étroite (Sud du pay)	Ligne Minière (site)
-Durée de vie de la roue en Km	.. 543 840 KMS	235 664 KMS	300 130 KMS
-Durée de vie de la roue en mois	.. 57 mois	23 mois	24 mois
-Diamètre initial de la roue	.. 1016 mm	965 mm	920 mm
-Diamètre final de la roue	.. 926 mm	865 mm	850 mm
-Épaisseur max du bandage	.. 90 mm	90 mm	90 mm
-Taux d'usure a reprofilé durant le service de maintenance	.. 30,20 %	73 %	69 %
<u>VITESSE D'USURE</u>			
-Table de roulement (avec reprofilage)	8,27 mm/100000 KMS	19,09 mm/100000 KMS	18.2mm/100000 KMS
-Boudin (sans reprofilage)	2,48 mm/100000 KMS	13,87 mm/100000 KMS	11.3mm/100000 KMS
<u>AVARIES</u>			
- Boudin	-	-Usure de boudin et du rail en courbe due à l'inadéquat. devers vitesse des deux roues	" " "
- Table de roulement	-	-Creusement rapide et reduction du champignon du rail	

Remarques :

- Voie normale : voie ferré existante dans le Nord du pays
- Voie étroite : voie ferré existante dans le Sud du pays
- Devers vitesse: vitesse de rotation des deux roues sur un même axe d'essieu
- Creusement: perte de matière en profondeur de la table de roulement
- Reprofilage: correction de la côte par le tour après un certains parcours
- Ep Max du bandage: c'est l'épaisseur max à utiliser par la roue en service (épaisseur obtenue par trempe superficielle après la fabrication de la roue)

3.5.1 - Résultats d'expertise du couple de freinage

- Semelle de frein

Les différents défauts structuraux et mécaniques des semelles de frein fabriquées par les différentes unités: "A" PHERHOSE Annaba, "B": DECRO et "C": HAMMA Alger sont donnés par le tableau 3.8. On remarque la non conformité des semelles de frein, utilisées actuellement sur site industriel par la SNTF, par rapport aux normes de l'Union International de Chemin de fer [38]

Ceci prouve que les unités chargées de la fabrication des semelles de frein ne respectent aucunement les procédures de fabrication exigées par la norme UIC.

Ainsi les différents défauts apparus et leurs fréquences dans les semelles de frein sont loin de la qualité exigée par la UIC (Union International des Chemins de fer). Ces défauts, tels que:

- porosités, soufflures, rugosité excessiveetc
- sont les premiers responsables de certains incidents rencontrés en ligne minière tels que:
- l'incendie du système de freinage suite aux étincelles provoquées par le sabot de frein au cours de freinage
 - rupture brutale de la semelle de frein qui entraîne un dérapage du train de la voie ferrée
 - l'usure prématurée des semelles de freins

3.5.2 - Conclusion de l'expertise

A la lumière de cette étude d'expertise, nous concluons que la durée de vie des roues utilisées en sud et à la ligne minière, est la moitié de celle des roues utilisées en ligne normale. Les principales causes de ce phénomène sont l'agressivité exceptionnelle des conditions climatiques (écart important de la température entre la nuit et le jours), de l'environnement (abondance des particules abrasives provenant du minerai ou du sable) et enfin du relief lui même (pente, rampe, courbe ..etc).

Ajoutez à cela, l'utilisation de matériau, composant les semelles de frein, non conforme aux normes internationales donc inadéquat pour les conditions extrêmement sévères dans lesquelles travaille le matériel roulant. Cela nous amène dès les paragraphes suivants à élaborer des semelles normalisées (en composition chimique et en caractéristiques mécaniques soumises aux contrles définis en 3.4), afin de déterminer les causes probables de leur usure prématurée.

3.6- ELABORATION DES EPROUVETTES DE SEMELLES DE FREIN

Généralement les semelles de freins sont coulées en fonte de la deuxième fusion. Les procédés de fabrications sont laissés généralement au choix des fournisseurs (CUBILO, FOUR ARCetc...) et c'est là que réside l'art du fondeur. L'action est également déterminante dans la manière de conduire le four et d'effectuer les coulées, car avec une même composition initiale de fonte liquide on peut obtenir des structures différentes, en fonction de la température de coulée, dans la constitution des moules et du temps de refroidissement.

L'élaboration dans notre cas se limite en premier lieu sur trois types de semelles de frein en fonte phosphoreuse P6, P10 et P14 (voir le tableau 3.10) pour effectuer des essais de freinage afin de vérifier d'une part l'aptitude à l'usure des fontes normalisées (P10, P14) par les chemins de fer, sur la ligne minière. D'autre part pour déterminer l'influence du phosphore sur la durée de vie des semelles de frein à: 0.6 % P, 1 % P et 1.5 % P; ainsi de définir rigoureusement certains paramètres servant la simulation expérimentale.

Tableau 3.10: Compositions chimiques des semelles de frein a elaborer

%	C	Si	Mn	P	S
Type de fonte					
Fonte U. I. C (P14)	3,2	1,09	0,99	1,5	0,09
Fonte AFN (P10)	3,18	1,25	0,85	1,01	0,12
Fonte (P6) non normalisee	2,3	1,60	0,61	0,62	0,20

- Semelle non normalisée: P6

Les semelles P6 appelées semelles non normalisées (du point de vue composition chimique et caractéristiques mécaniques) possèdent généralement un pourcentage de phosphore $\approx 0.6 \%$ (d'après l'expertise faite sur les semelles fabriquées par les unités nationale (A: PHERPHOSE, B: DECRO, et C: HAMMA)).

Le choix de cette teneur, sert à déterminer l'influence du pourcentage de phosphore (à faible pourcentage de phosphore) sur la durée de vie des semelles de frein en ligne minière, par rapport aux semelles normalisées.

- Semelles normalisées par (S.N.C.F, U.I.C) P10 et P14

Ces deux types de semelles ont été normalisées par les organisations suivantes:

-Semelle u.i.c de 1,5 % P et un nombre de dureté HB compris entre 200-260 HB exigé par l'Union International de Chemin de Fer, [38].

-Semelle s.n.c.f qui a fait l'objet d'une étude récente d'optimisation du pourcentage de phosphore à 1 % P, et de dureté comprise entre 200- 260 HB [33].

Le choix de ces deux fontes normalisées sert principalement à voir la limite d'utilisation des semelles de frein normalisées par ces organismes (UIC, SNCF) dans la ligne minière.

Quant aux essais de freinage sur site sur les fontes choisies dans le CHAP II, se fera après le choix de meilleurs produits (en fonte) adéquat à la ligne minière, au moyen d'une simulation expérimentale réalisée au laboratoire dans les chapitres suivants pour une éventuelle comparaison des résultats (site et laboratoire).

3.6.1 Méthode d'élaboration

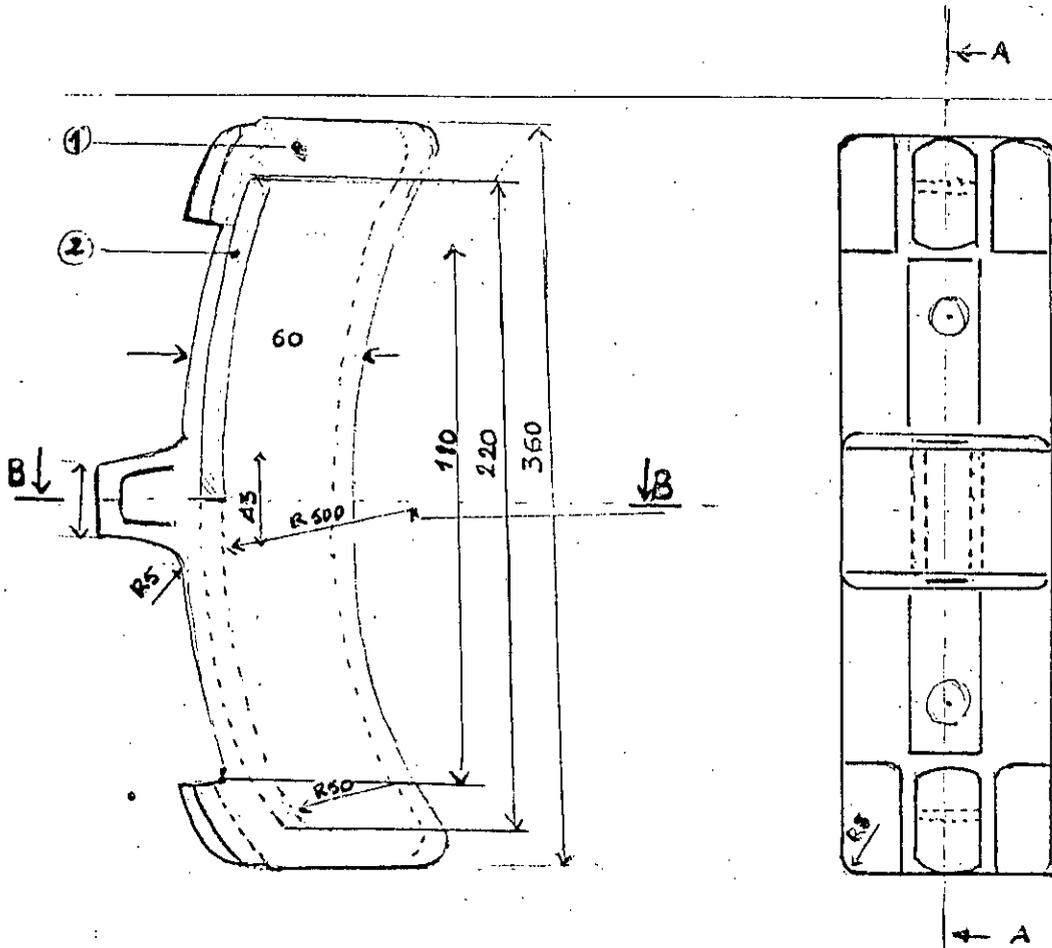
Vu le manque des moyens d'élaboration (four archaïque ...etc) et l'insuffisance des appareils de contrôles des caractéristiques physico-chimique des semelles de frein (exigés par la norme UIC définie en 3.4), auprès de la SNTF et aux niveaux des unités qui alimentent la ligne minière en semelles de frein, nous avons choisie L'Ecole de Formation des Fondeurs (COMPLEXE DE FONDERIE DE TIARET) pour réaliser notre élaboration pour des raisons suivantes:

- L'existence des fours semi- industriel à induction de capacité d'une tonne, efficace pour élaborer des pièces d'essais à l'échelle 1.

- L'existence des appareils de contrôle (défini en 3.4 et exigé par la norme UIC) des caractéristiques physiques et mécaniques des semelles de frein après leurs fabrications

La méthode d'élaboration, consiste à mettre à l'intérieur du four à induction une quantité (700 -800 kg) de la fonte de base ft25 avec une addition de ferro-alliages pour ajuster la composition du lit de fusion. Les fontes normalisées P10 , P14 obtenues pour les essais de freinage possèdent une matrice perlitique avec présence de phases eutectiques. Toutefois une faible proportion de ferrite peut exister dans la structure finale (voir figure 3.8).

Selon les formes, dimensions et tolérance des semelles donnés par le dessin de la figure 3.7, nous avons confectionné des dizaines de semelles de frein, pour les trois types de fonte P6, P10 et P14.

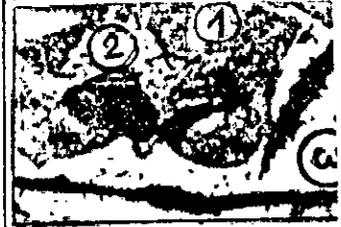


1: matière en fonte 2: matière en acier (armature)

Figure 3.7 Schéma de l'éprouvette utilisée sur site industriel

3.6.2 - Caractérisation microstructurale de la semelle de frein

Après une attaque chimique par le nital des échantillons découpé des semelles de frein (P6, P10 et P14), on trouve que les structures de ces fontes illustrées à la figure 3.8 : montre les différentes phases constituant les fontes phosphoreuses avec la nature de distribution du graphite.

	MATRICE	TYPE DE GRAPHITE	N. FONTE
x350			<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">P6</div> x 200 Graphite de type B
x400			<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">P10</div> x 200 Graphite de type A
x400			<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">P14</div> x 200 Graphite de type A

Graphite de type A : graphite sous forme lamellaire
 Graphite de type B : graphite sous forme de rosette

1 : Perlite 2 : Steadite (Fe_3P) 3 : ferrite

Figure 3.8: Micrographie des fontes utilisées dans les essais de freinage sur site industriel.

On remarque de la figure 3.8 qu'il ya une présence de ferrite (3) en excès dans la fonte P6 avec une distribution de graphite en forme de rosette (constaté qu'il est moins résistant à l'usure par rapport au graphite lamellaire de type "A" [9]). Ainsi qu'une distribution uniforme des phases perlitiques (1) et eutectiques phosphoreux (2) dans les structures P10 et P14. Le graphite dans ces fontes (P10, P14) possède la forme lamellaire de type "A", ceci est conforme à la norme AFN et UIC

3.6.3 - Caractérisation microstructurale de la roue

D'après la norme *AARM-107*, norme Américaine donnée par Général Motors "GM", le métal de la roue, est un acier mi-dur faiblement allié au manganèse. Sa composition chimique est donnée au tableau 3.11 "A". Pour vérifier la conformité du matériau de la roue nous avons déterminé à l'aide d'un spectromètre, la composition chimique sur des échantillons découpés d'une roue usée. Le résultat d'analyse est illustré dans le tableau 3.11 "B": qui montre que la composition (B) répond à la norme exigé par *AARM-107*

La *figure 3.9*, montre que la structure de la jante des roues se compose de multitude de phases: bainitique, martensitique, perlitique et ferritique. Cette structure composite est due principalement au traitement thermique superficiel appliqué à la roue monobloc après la fabrication.

Tableau 3.11: Composition chimique de la roue

A: donné par la norme (*AARM-107*)
 B: obtenue par analyses spectrales sur des échantillons decoupé d'une roue monobloc usée.

ele- ment	C	Si	Mn	S	Cr	Ni
A	0.57	<	0.8	<	-	-
%	0.67	0.05 ^a	0.85	0.05 ^a		
B	0.63	0.03	0.79	0.01	0.3	0.09
%						

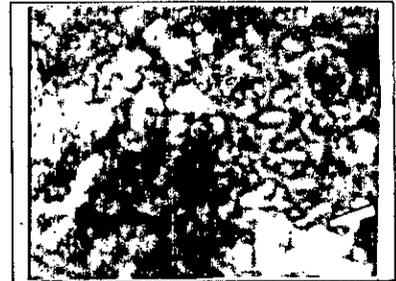


Figure 3.9:

L'état structurale de la roue (pris à partir de la jante d'une roue)

3.6.4 - Caractérisation mécanique du couple: semelle /roue

A l'aide des appareils de contrôle des semelles de frein défini en 3.4, on détermine les caractéristiques mécaniques (Dureté HB et résistance au choc) de chaque type de fonte. Les résultats sont illustrés dans les tableaux 3.12, 3.13, 3.14, 3.1

Dureté Brinell: HB

En appliquant l'expression (3.1) pour déterminer la valeur moyenne du nombre de dureté Brinell. Les résultats illustrés dans le tableau 3.12: montrent que les fontes P10 et P14 sont en accord avec la norme UIC et AFN. Ces normes, exigent des duretés de fontes types phosphoreuses situées à l'intérieur de l'intervalle 200 -260 HB, dans le cas contraire la semelle est rejeté. C'est le cas de la semelle P6 qui possède un nombre de dureté Brinell < à 200 HB.

Tableau 3.12: Résultats de dureté Brinell des semelles de frein

Semelle	P6		P10		P14	
	ϕ (mm) de l'em- preinte	HB durete Brinell	ϕ (mm) de l'em- preinte	HB durete Brinell	ϕ (mm) de l'em- preinte	HB durete Brinell
1	44 / 10	187	42 / 10	207	41.4 / 10	213
2	44 / 10	180	42 / 10	207	40.2 / 10	215
3	44.6 / 10	182	42.5 / 10	201	40.8 / 10	220
4	44.5 / 10	183	42 / 10	207	41.2 / 10	215
5	44.4 / 10	184	44 / 10	197	41.7 / 10	210
6	44.8 / 10	180	42 / 10	207	41.2 / 10	215
7	44.8 / 10	180	42 / 10	207	40.8 / 10	219
8	44 / 10	187	42 / 10	207	41.2 / 10	215
9	44 / 10	187	42 / 10	207	41.4 / 10	213
10	44.8 / 10	180	42 / 10	207	41.2 / 10	215
HB moyenne	183 HB		205 HB		215 HB	

Les résultats typique du chocs mécaniques des semelles de frein

Le premier coup de mouton correspond au travail de choc indiqué au tableau 3.13: Ensuite on augmente l'épaisseur de la semelle éprouvette, suivant les indications du tableau 3.13, jusqu'à la rupture de la partie en fonte. Nous rappelons que l'utilité de l'essai sert à vérifier la conformité du produit élaboré et de déterminer la résilience des semelles de frein à n'importe quelle épaisseur. Cette épaisseur représente l'épaisseur de la semelle durant le freinage. A la fin des essais de choc, les semelles ne doivent pas se rompre pour le premier coup et ne doit pas provoquer la cassure de l'armature qui doit plus, rester adhérenté aux parties rompues de la semelle (l'armature doit rester adhérente aux parties rompues même pour les coups suivants à différentes épaisseurs) .

Le travail ayant donné lieu à la rupture indiqué au tableau 3.13

Tableau 3.13: Résultats du travail au choc mécanique des semelles

Semelle	P6		P10		P14	
	<49 mm	> 49 mm	< 49 mm	> 49 mm	< 49 mm	> 49 mm
1 ^{er} Coup (daj)	0.16	0.35	0.19	0.38 *	0.18	0.36
Coup suivant (daj)	0.35	0.67	0.38	0.74	0.36	0.72

A partir de ces résultats de l'essai de choc mécanique on remarque que la résilience des semelles de frein P10,P14 répond à la norme UIC. La semelle de frein P6 devait avoir normalement une résilience plus élevée, mais on constate le contraire pour les épaisseurs supérieures >à 49mm , cela est à l'origine de l'excès de soufflures dans la semelle. La présence de ces soufflures sont dues essentiellement à la teneur de Soufre % S très élevée (voir tableau 3.10).

Le tableau 3.14: englobe les résultats finaux des contrôles mécaniques des semelles de frein réalisés à l'Ecole de Fonderie de Tiaret.

Tableau 3.14: Caractéristiques mécaniques des semelles

Caractéristiques Type de Fonte	HB	K (daJ)	R _r (daN/mm ²)
P14	215	0,72	22,7
P10	205	0,74	20,2
P6	183	0,67	17,18

HB:

dureté
Brinell

K: Résistance
au choc
mécanique

R_r: Résistance à
la rupture

Les caractéristiques mécaniques de la roue sont effectuées à partir des éprouvettes découpées de la roue usée. Les résultats sont illustrés au tableau 3.15

Tableau 3.15: Caractéristiques mécaniques de la roue

	HB	R _r (daN /mm ²)	K Joule	A%
NORME	241 - 341	80 - 100	> 4	12 - 15
EFFECTUEE	300- 320	65	6,2	15,2

La valeur moyenne de la dureté est de 310 HB. Cette valeur moyenne a été calculée après 5 mesures prises sur la jante de la roue.

La résistance au choc (K =6,4) a été déterminée sur une éprouvette que nous avons élaborée. Nous remarquons que les caractéristiques HB et K qu'ils sont conformes à la norme ARR-107. La résistance à la rupture R_r est un peu différente que celle qui est donnée par la norme AARM-107, cela est dû normalement au mode de découpage par chalumeau au cours de fabrication des éprouvettes de traction.

Ces éprouvette ont subi un traitement thermique par l'effet de découpage au chalumeau, qui a changé leurs résistances à la traction réelle.

3.7- ESSAI DE FREINAGE

3.7.1 - Introduction

L'essai consiste à frotter les différents types de semelles de frein P6, P10 et P14 sur une roue monobloc en ligne minière. Le but principal de cet essai est de déterminer toutes les informations de variations des mécanismes qui se produisent durant le service, afin de mettre une évidence à la simulation expérimentale ; et d'analyser les contraintes qui agissent sur le couple de freinage.

Cette partie de l'étude permet aussi à la fin des essais d'analyser les particules incrustées dans les surfaces de contacts. Cela pour une éventuelle comparaison avec les particules trouvées par analyse chimique du minerai.

Les trois types de semelles élaborées, qui vont être soumises aux essais de freinage en ligne minière sont les suivants :

- P6 : Semelle non normalisée
- P14: Semelle normalisée selon la norme "U.I.C 832" [38]
- P10: Semelle normalisée selon la norme " S.N.C.F " [33]

3.7.2.- Procédure expérimentale en site

L'opération de l'essai de freinage du couple en site industriel comporte les étapes suivantes :

- 1 - Calage de roues percé sur la jante (le perçage des roues servira l'étude de l'influence de la température en paragraphe suivant), dans un axe d'un wagon
- 2 - Montage des semelles de frein de différents type de fonte sur un wagon d'essai (environ, une dizaine de semelles pour chaque type de fonte).
- 3 - Prise de température immédiatement après l'arrêt complet du train. La localisation des points de mesure a été défini précédemment.
- 4- Récupération des semelles de frein après un parcours de 500 KM
- 5- Vérification de l'état de roue à la fin de chaque essai de 500 Km

3.7.3 - Moyen d'analyse des résultats

L'analyse des résultats d'essais de freinage consiste à déterminer le taux d'usures des semelles de frein mises en essai et à caractériser les surfaces usées du couple de freinage.

- La mesure de la perte de matière après le freinage de la semelle de frein se fait à l'aide d'un gabarit confectionné dans les ateliers de SNTF de l'Unité d'Alger pour mesurer l'épaisseur enlevé par la semelle de frein. Ensuite on contrôle l'aspect externe et interne (porosité, cavité, fissure...etc.) de la semelle de frein par les techniques macrographiques

- La caractérisation des échantillons découpés à partir du couple de freinage dans des zones bien particulières, se fait par l'observation microscopique - optique et électronique à Balayage (M.E.B) et par analyse à la diffraction aux RX, ainsi que par des prises de mesures de microduretés à l'aide d'un microduremètre de marque TEST WELL M 11 Nx 406

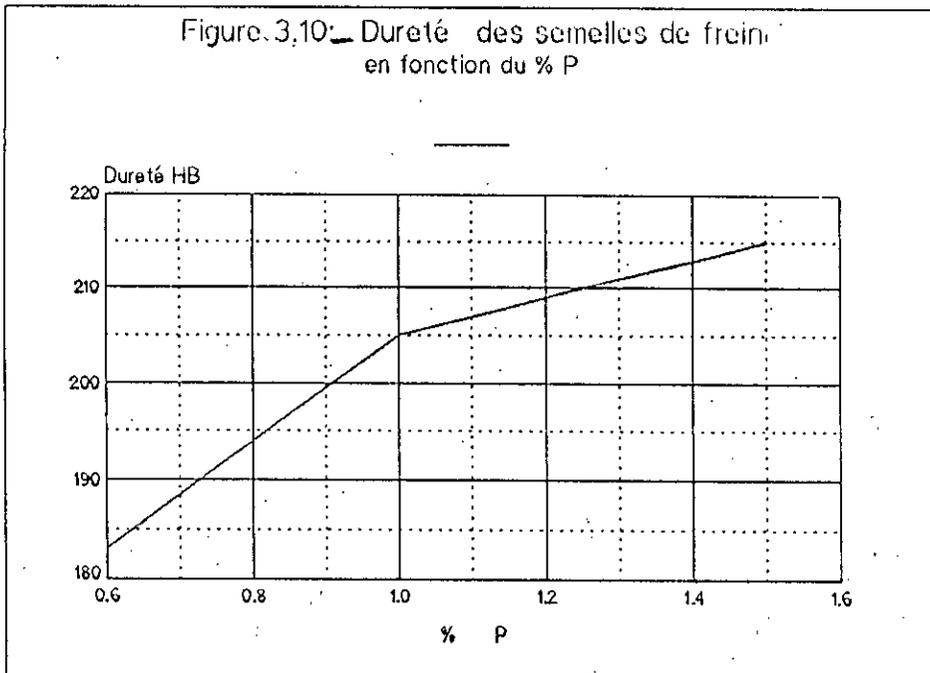
3.7.4 - Présentation et discussion des résultats des essais de freinage

Pour interpréter les résultats de l'essai de freinage en terme du taux d'usure W et de durée de vie, nous avons varié principalement dans l'étude, les deux paramètres suivants:

- le pourcentage de phosphore % p
- la dureté HB de la fonte

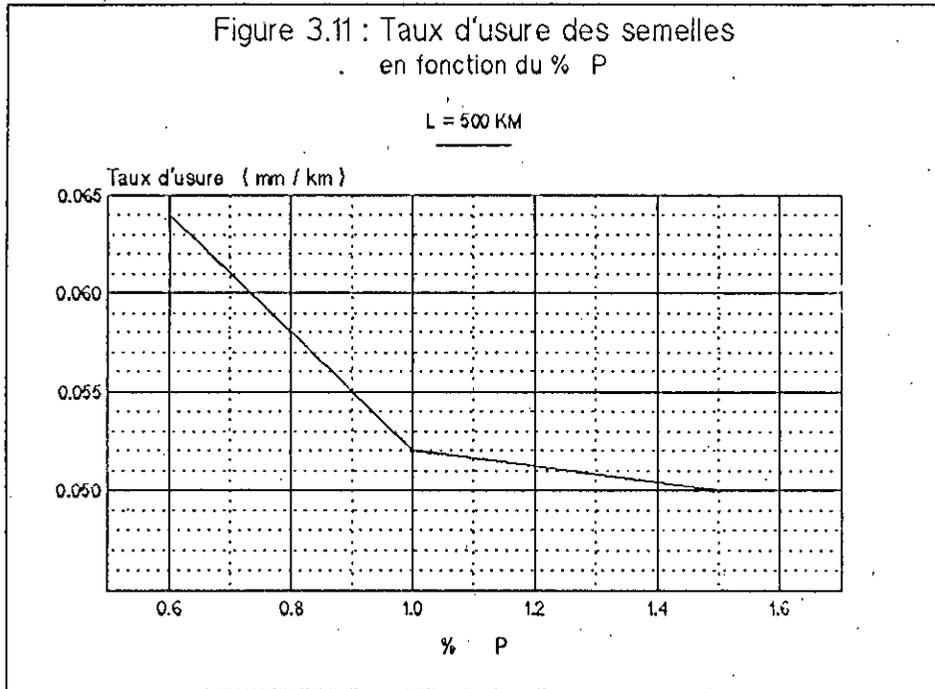
Les résultats de l'essai sont regroupés dans le tableau 3.16

Figure. 3.10: Dureté des semelles de frein
en fonction du % P



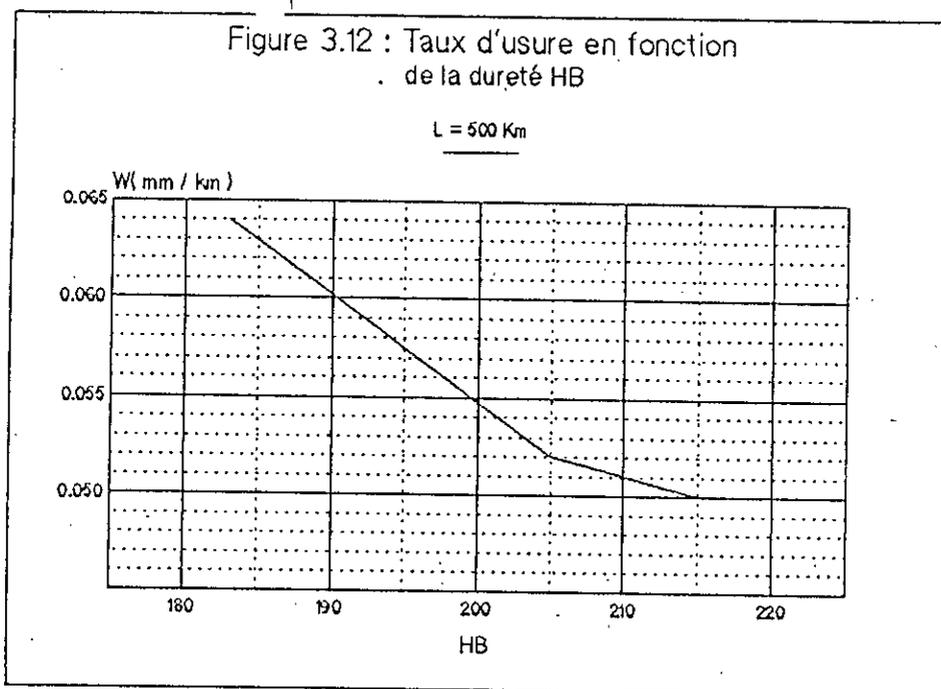
Les courbes donnant le taux d'usure après un parcours moyen de 500 km en fonction du pourcentage de phosphore et de la dureté HB de différentes fontes P6, P10 et P14 sont représentées respectivement par les figures 3.10 et 3.11

La figure 3.11 représente la variation du taux d'usure en fonction du % des différentes fontes testées. Le taux d'usure est relativement élevé lorsque on teste une fonte avec un bas pourcentage de phosphore. Au fur et à mesure qu'on augmente le % de P, le taux d'usure diminue sensiblement et par conséquent la durée de vie des semelles de frein est améliorée



La figure 3.8 qui regroupe les micrographique des fontes testées ci-haut permet de corréler la résistance à l'usure aux microstructures des fontes P6, P10 et P14. L'explication de l'usure avancé de la semelle de frein P6 est due essentiellement à l'existence de ferrite en excès et à la nature du graphite en forme de rosette qui est moins résistant à l'usure. Contrairement au fontes P10 et P14 qui contiennent moins de ferrite et plus de phase résistant telle que la perlite et la steadite à basse température, ainsi que la nature de graphite lamellaire de type A, résistent beaucoup mieux à l'usure que les semelles P6.

La figure 3.12 qui donne le taux d'usure en fonction de la dureté HB a une même allure que la courbe figure 3.11. Cela est expliqué par le fait qu'il existe une de relation entre le pourcentage de phosphore, la dureté HB, le taux d'usure et la microstructure. Nous remarquons à cet effet l'influence du phosphore qui devient remarquable lorsque l'augmentation de la dureté HB s'approche à une dureté de 200 HB et le pourcentage de P est supérieur à > 1



On explique cette dépendance aussi à l'existence du passage de l'état ductile définie par la dureté inférieure à 200 HB de la semelle P6 (possédant des structures beaucoup plus ductiles telles que la ferrite) à l'état fragile dû à l'augmentation de la dureté par effet d'addition en phosphore supérieur à > 1 et par la présence de la structure perlitique et eutectique phosphoreux [45].

Quant aux figures 3.13 et 3.14 donnant la durée de vie des semelles de frein en semaines en fonction du pourcentage de phosphore et de la dureté HB, confirment que l'usure est très prononcés pour les semelles de frein P6 qui contiennent un pourcentage de phosphore inférieur à < 1 et de dureté inférieure à < 200 HB. Cette durée très courte représente en réalité la durée de vie des semelles de frein utilisées couramment par la SNTF en ligne minière (d'après l'expertisé des semelles de frein faite sur site, voir 3.5). La limite de l'usure, des semelles de frein P6 à été signalé après un parcours de 300 km environs. Par contre les deux autres semelles normalisées P10 et P14, ont une durée de vie un peu plus élevée que celles des semelles non normalisées. Leur limite d'usure, est atteinte après un parcours de 380 KM environ.

Figure 3.13: Durée de vie en fonction du % P

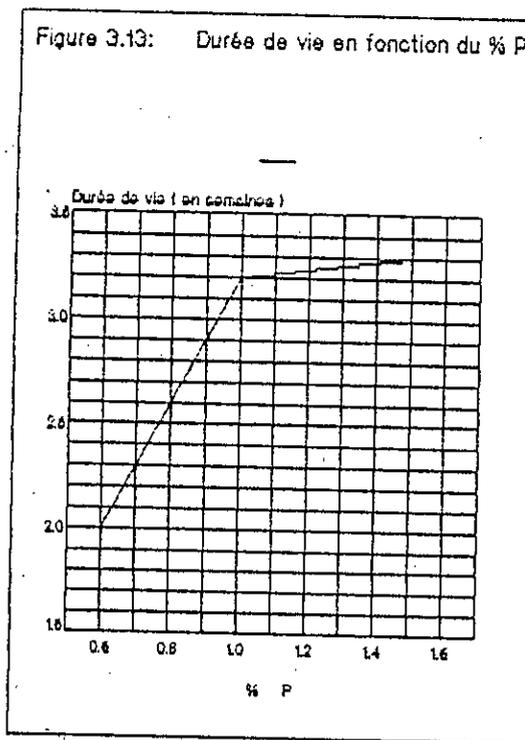
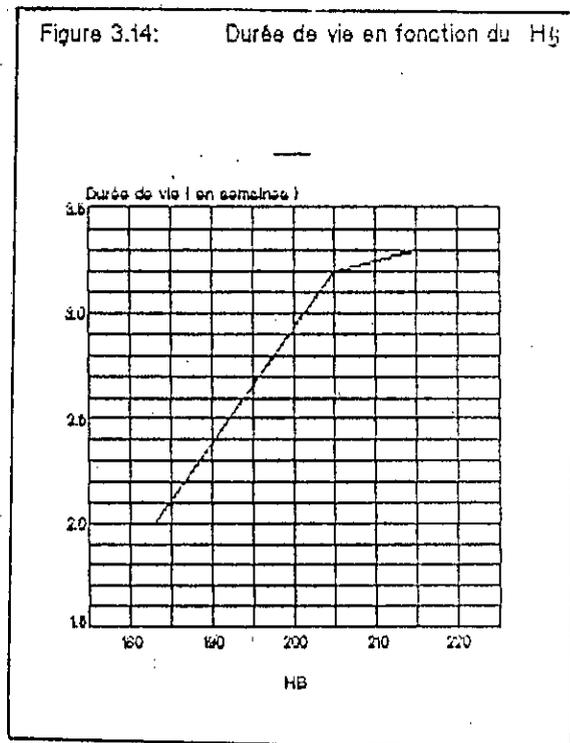


Figure 3.14: Durée de vie en fonction du HB



3.7.5 -Conclusion des essais de freinage

L'usure prématurée ou/et la durée de vie très courte des semelles de frein en ligne minière existe toujours malgré l'emploi des semelles de frein normalisées (P10 et P14) en essai

Nous remarquons aussi à partir des différentes courbes du taux d'usure que les semelles alliées uniquement en phosphore ne répondent pas aux exigences climatiques, géographiques de la ligne minière. Ce résultat nous amène en chapitre suivant d'approcher notre étude de simulation expérimentale en laboratoire par des fontes alliées choisies en CHP II. On se réfère à la fonte normalisée P14 [38] pour dégager un matériau adéquat comparable à celui-ci.

3.8 - ANALYSE DES SURFACES USEES APRES ESSAI DE FREINAGE

Nous avons analysé après les essais de freinage, les particules incrustées dans les surfaces de contacts du couple de freinage à l'aide du microscope électronique à balayage (MEB: type CAMEBAX PL: 6-3) et diffractomètre aux rayons -X, Pour identifier le type de particules qui participent à la dégradation des surfaces (pour une éventuelle simulation, en laboratoire).

L'analyse par diffraction aux RX a été effectuée à l'aide d'un diffractomètre à compteur de type "crg" muni, soit d'une anticathode au cobalt travaillant en rayonnement monochromatique ($\text{CoK}_{\alpha} = 1,7889 \text{ \AA}$), soit d'une anticathode au cuivre ($\text{CuK}_{\alpha} = 1,545 \text{ \AA}$) et la Microsonde de Castaing: elle est utilisée pour les analyses quantitatives ponctuelle, de manière à caractériser les particules qui ne peuvent être distingué par microscope. Les échantillons sont rendus conducteurs par pulvérisation cathodique sous vide d'une tige de carbone.

Après une préparation métallographique des échantillons découpées dans des zones particulières de semelles de frein, nous avons procédé à l'aide d'un microscope optique pour déterminer la taille moyenne des particules incrustées. Nous avons utilisé la méthode par comptage du nombre de grain [49] pour déterminer la moyenne des particules incrustées dans la surface. Le résultat de la mesure a donné une dimension moyenne de 2.5 μm de la particule incrustée. Les mesures ont été prises sur plusieurs échantillons

La photo de la figure 3.15 prise par le M.E.B montre clairement la présence d'une particule abrasive incrustée dans la surface de la semelle de frein en fonte normalisée P10. Les mêmes genres de particules ont été retrouvées dans les semelles de frein en fonte P14.



Figure 3.15: Image typique des surfaces des fontes normalisées montre l'incrustation de particules abrasives sur une semelle P10

L'analyse de cette particule par diffractogramme montrée par le spectre (voir figure 3.16), indique que la particule est de nature siliceuse, incrustée spécialement dans les phases ferritiques, steadite et à la place des cavités laissées après l'arrachement du graphite. La vérification des phases préférencie en incrustation à été fait: par la prise de microdureté dans l'entourage de la particule, à l'aide d'un microduromètre (type : Test Well M 11 Nx 406)

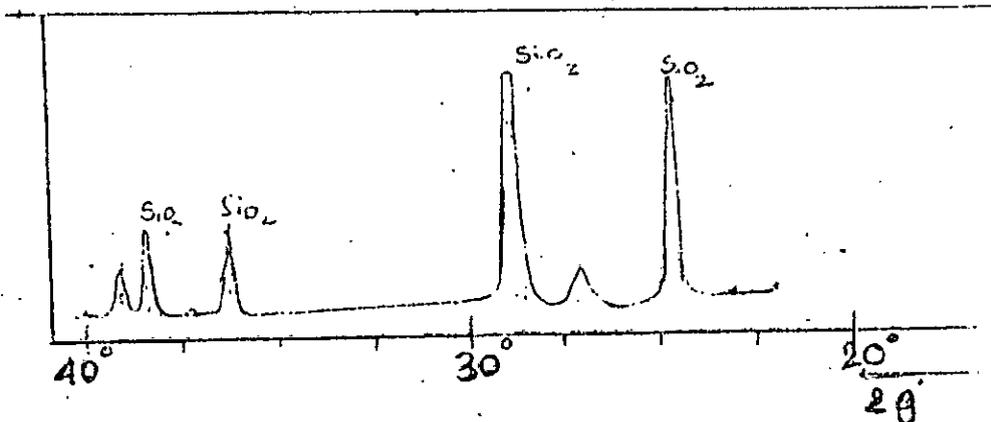


Figure 3.16: Diffractogramme de la surface usée de la particule (RX)

Aussi, après les tests de freinage effectués en site industriel, nous avons relevé sur les tables de roulement certains endommagements provoqués par les semelles de frein. Nous remarquons tout d'abord sur la figure 3.19, un dépôt de ferrite mélangée à de grains abrasifs déposés sur la table de roulement. Le dépôt de ferrite sur la table de roulement est constaté surtout par le freinage des semelles de frein en fonte P6 qui possèdent un excès de ferrite sur leurs structures micrographiques (voir la figure cité en :3.8)



Figure 3.19:
Les types
d'endommagement
relevés sur la
roue après les
essais de freinage

A : Dépôt de ferrite

L'identification de la nature de la matière déposée par la semelle de frein a été effectuée par l'observation microscopique et par la prise de microdureté sur un amas déposé sur la table de roulement.

En outre nous remarquons aussi sur la figure 3.20: des écaillages provoqués essentiellement par la semelle de frein composé de la fonte P14 sur certaines parties de la table de roulement. Cela est indiqué par la figure 3.20 qui montre une partie de la table de roulement écaillée.



Figure 3.20:

Les types d'endommagement relevés sur la roue après les essais de freinage

B: Ecaillage

L'effet principal de l'écaillage constaté par le freinage des semelles de frein P14 sur la table de roulement, revient à l'usure abrasive provoquée par les particules de l'environnement et amplifiée par l'écart important de la température développée par la semelle P14

A travers cette analyse faite sur les surfaces usées du couple de freinage nous concluons que l'effet principal de l'usure abrasive est provoqué essentiellement par les particules de silice, d'oxyde de fer (l'hématite...ect) et d'autres oxydes secondaires qui se trouvent dans les minerais.

3.9 - ETUDE DE L'EFFET DE LA TEMPERATURE

Cette partie de l'étude sert à étudier l'influence de la température générée au cours de l'opération de freinage, sur la surface de contact du couple de freinage et son évolution à l'intérieur de la roue monobloc.

3.9.1 - Procédure expérimentale

Dans l'atelier de maintenance et de renouvellement des roues usées des wagons (à Sidi B. Abbes: ville Ouest d'Algerie) nous avons percé six trous sur la jante de chaque roue neuve prise comme éprouvette d'essai. Ces trous reçoivent les thermocouples après chaque freinage du train, pour suivre l'évolution de la température en surface et à l'intérieur de la roue. L'enregistrement de la température se fait à l'aide d'un dispositif possédant un capteur de température de type (SILICUM-DIODE). Les trous percés sont illustrés sur la figure 3.21, qui montre sur une coupe, le profil d'une roue monobloc et l'endroit de l'emplacement des thermocouples.

Le choix des positions de l'emplacement des thermocouples dans les trous percés dans la roue a été basé sur une étude faite à l'université de l'ILINOIS [50]. Elle consiste à étudier l'influence de l'effet de la température générée par l'opération de freinage. Ainsi dans cette étude, différentes natures de semelles frein ont été utilisées pour étudier l'influence de la température de freinage à haute vitesse.

Pour chaque type de semelle de frein utilisée (P6, P10 ou P14), les mesures de la température de la roue ont été prises dans les positions indiquées sur la figure 3.21.

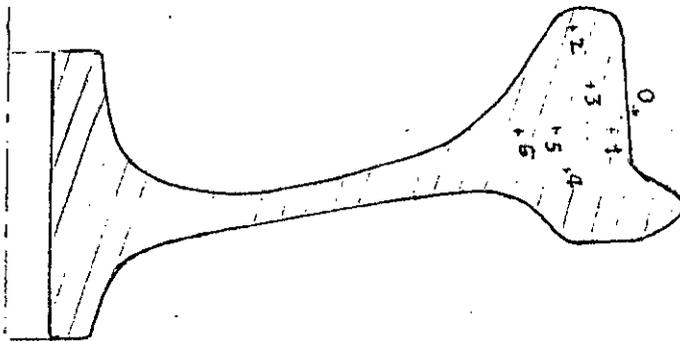


Figure 3.21 :

L'endroit d'enfouissement des thermocouples dans la jante de la roue

Ainsi, pour les points 0, 1, 3 et 5, les prises de température sont effectuées comme suit:

Après un temps de marche du train de 5 mn, le freinage est mis en action jusqu'à l'arrêt complet. Les thermocouple sont insérés immédiatement dans les trous respectivement 0, 1, 3 et 5. On attend un moment pour s'assurer que la roue est refroidie à l'aide d'un lubrifiant (le lubrifiant est constitué de 98 % d'eau déminéralisée, 1% d'alcool isopropylique, 0.5 d'huile s 966 0.5 % de monoléate sorbitan polyoxyéthylène [51]) et on recommence cette opération au moins quatre fois.

Les points 2, 6 étant éloignés des zones surchauffées, le temps de marche a été augmenté à 15 min pour s'assurer que la température soit mesurable. La procédure de prise de température reste cependant la même que celle décrite précédemment.

3.9.2 - Discussion des resultats

Pour la même pression de freinage, les températures indiquées par le détecteur montrent que la semelle de frein à haute % de P (P14) est portée à une température relativement plus élevée que les semelle à bas % de P (P6) et la semelle intermédiaire (P10). Cela est expliqué par le fait que les semelles à haute teneur en P contiennent une plus grande quantité de l'eutectique phosphoreux. Il s'avère que la phase (Fe_3P) est moins stable et moins réfractaire à haute température que d'autres microstructures qui composent les semelles de frein [30].

Les figures (3.22, 3.23, 3.24, et 3.25) représentent la distribution des températures à l'interface (point 0) et à l'intérieur de la jante (1, 3 et 5) durant l'essai de freinage de différents types de semelles de frein en fonction du temps moyen de freinage. Cette élévation de température était initialement plus élevée avec les semelles P10 et P6 mais après un temps de freinage de 15 mn, ces températures sont devenues plus élevées avec les semelles à haute teneur en phosphore P14. Nous expliquons cela par la nature de l'eutectique phosphoreux qui est plus résistant et plus réfractaire à basse température, constaté pour les temps inférieur à < 15 min.

Figure 3.22 Variation de la température en surface de contact

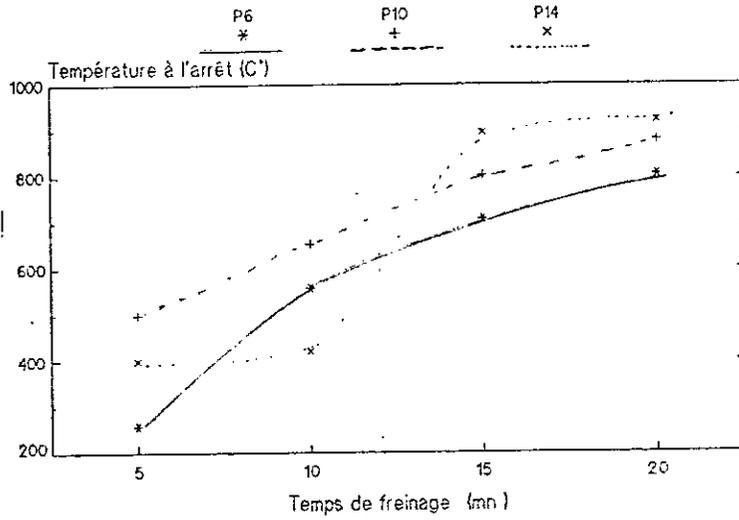


Figure 3.23 : Variation de la température dans la jante

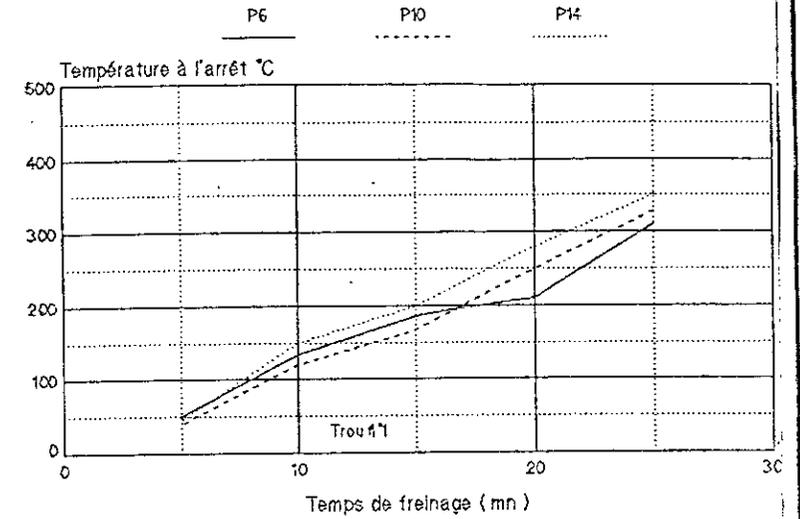


Figure 3.24 Variation de la température dans la jante de la roue

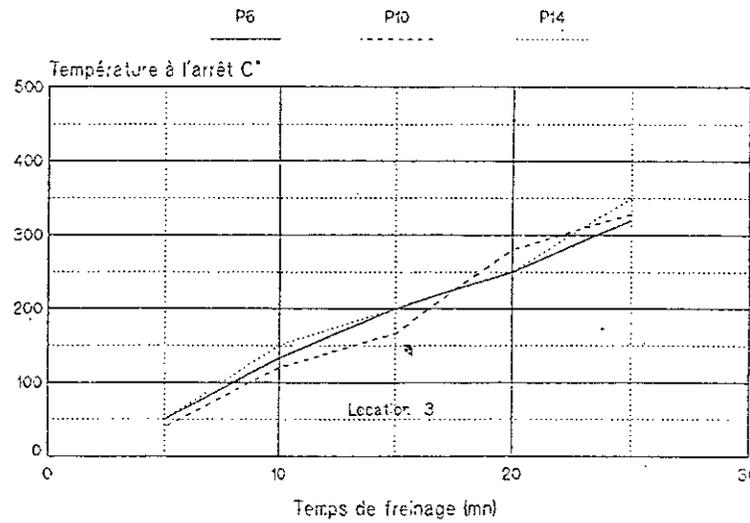
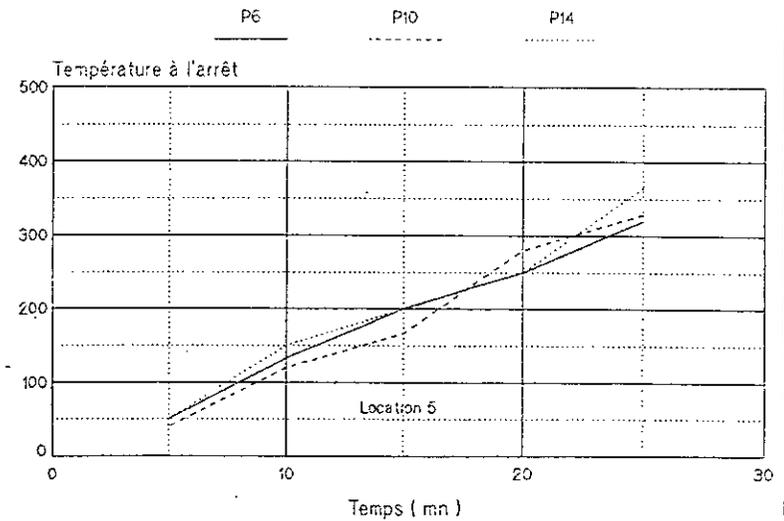


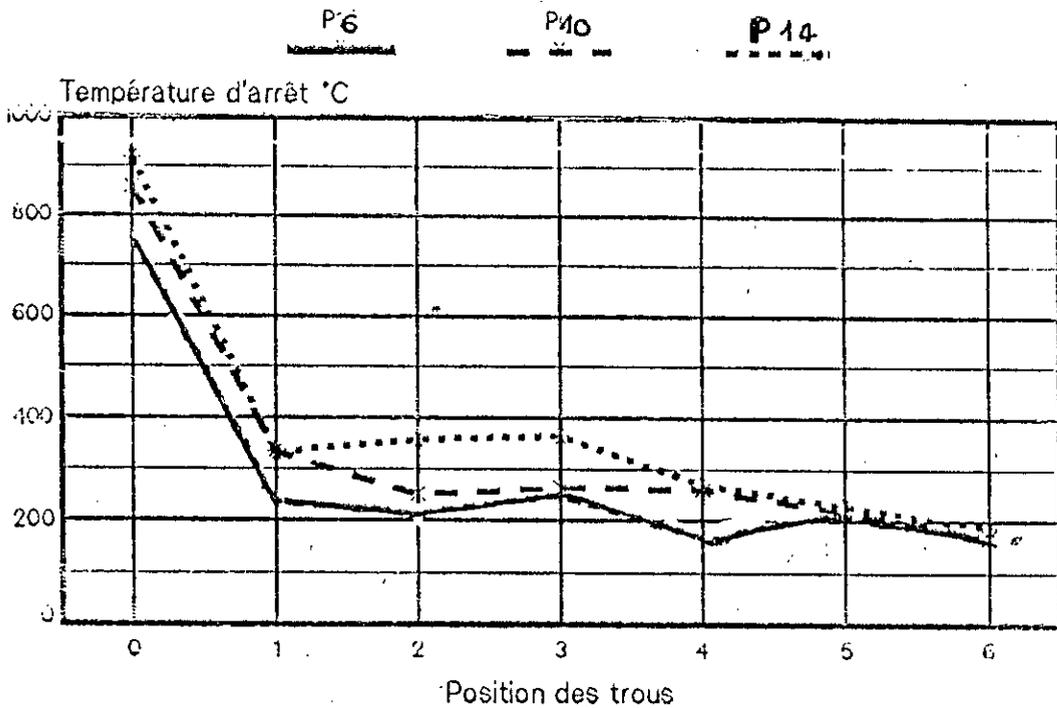
Figure 3.25 Variation de la température dans la jante de la roue



Par contre après un temps supérieur à > 15 min la température de la semelle de frein s'approche à la température de fusion de l'eutectique phosphoreux, et cela provoque un dégagement de chaleur qui fait élever en plus la température des semelles de frein P14.

Les résultats précédents sont confirmés par la figure 3.26 qui donne la distribution de la température en fonction des différents points (0, 1, 2, 3, 4, 5 et 6) chauds pour une durée moyenne de freinage de 15 min.

Figure.3.26:Influence du type de semelle de frein sur la température de la jante t = 15 mn



La figure 3.26 montre que les semelles à haute teneur en phosphore développent aussi plusieurs points chauds aux températures élevées que les semelles à faible pourcentage de phosphore. A travers de cette étude nous concluons que parmi les causes de développement de points chauds par les semelles à haute teneur en P, se trouve, la nature et la proportion de la phase eutectique dans les semelles de frein.

3.10- CONCLUSION

L'étude entreprise sur site industriel nous a permis d'une part de confirmer que les semelles fabriquées localement par les entreprises nationales, ne sont pas conformes aux normes internationales et que l'usure prématurée existe toujours avec un degré moins prononcé malgré la normalisation des semelles mises en essai en ligne minière ; Ainsi que les semelles contenant plus de phosphore influent beaucoup plus sur la dégradation par usure des tables de roulement parce qu'elles génèrent des températures plus élevées.

Et d'autre part l'analyse chimique de minéral de fer et de phosphate transporté par les trains, ainsi que l'analyse des particules incrustées en surface, ont montré que les particules les plus prépondérante et plus agressives, sont les oxydes de fer tel que l'hématite: Fe_2O_3 et la silice SiO_2 .

Ce résultat nous permettra de réaliser dans les chapitres suivants une simulation expérimentale de l'usure et frottement du couple de freinage : semelle/ roue, par un couple, de type, pion sur disque placé sur un tribomètre rotatif, pour lequel nous simulons l'environnement par un abrasif contenant l'oxyde de fer et la silice pour une éventuelle comparaison des résultats et de choix du produit adéquat à utiliser sur site industriel.

CHAPITRE 4

SIMULATION EXPERIMENTALE

4 - INTRODUCTION

L'objet de ce chapitre, consiste à réaliser une étude de simulation expérimentale. Dans un premier volet, nous procéderons à la description des méthodes et des modes opératoires pour réaliser la simulation du frottement et l'usure du couple de freinage semelle/ roue. Les matériaux en fontes, que nous avons élaborés seront testés au cours de ces essais pour évaluer leur performance en usure

Dans un deuxième volet, nous évoquerons l'aspect thermique des fontes par une étude thermoanalytique qui permet de simuler le comportement thermique des différentes phases qui constituent les fontes mise en essai, dû au chauffage des semelles de frein au cours de freinage sur site industriel.

4.1 - DESCRIPTION DES DISPOSITIFS DE SIMULATION4.1.1-DESCRIPTION GENERALE DE LA MACHINE DE SIMULATION DE L'USURE DU COUPLE DE FREINAGE (TRIBOMETRE : FROTTEMENT- USURE)

La machine sur laquelle nous avons réalisé notre simulation expérimentale, a été proposé par le professeur DOWSON de l'université de LEEDS de type pion sur disque comme le montre la figure (4-1)

La partie principale figure (4-1) est constituée par un tour à entraînement par courroie d'un moteur triphasé de 750 W possédant 14 vitesses (2) allant de 25 tr/mn à 2150 tr/mn.

L'éprouvette sous forme de disque (3) peut être fabriquée à partir de n'importe quel matériau. Elle est portée par un axe (4) en acier trempé qui est vissé sur le nez de la broche du tour et supporté par un dispositif à ressort provenant de la poupée mobile du tour. Cette disposition est adoptée pour tenir compte des modifications de longueur de l'axe provenant des variations de températures.

Les échantillons (5), sont montés sur les deux porte échantillons (6) en bronze de 8 mm de diamètre, portés par deux douilles vissées à leur tour sur le piston d'un vérin hydraulique chargé (7). L'étanchéité sur le piston est réalisée par un joint torique et un écran extérieur le protège de la saleté ou des débris. Les vérins hydrauliques en bronze d'aluminium, sont montés sur des pivots et l'huile sous pression arrive par des tuyaux souples. Une prise fermée par un bouchon sur le dessus de chaque cylindre permet la mise à l'air libre de circuit hydraulique. Les cylindres sont à leur tour montés sur un chariot (8) qui repose lui même sur une glissière solidaire du banc d'essai du tour (9) le chariot peut se déplacer librement dans une direction perpendiculaire à l'axe de la broche du tour.

4.1.1-1 MESURE ET REGULATION

La machine d'essai d'usure et de frottement peut mesurer les paramètres suivants :

coefficient de frottement, charge appliquée, vitesse de rotation et température.

a- Coefficient de frottement : On voit donc bien que si on appuit le frotteur sur le disque pendant qu'il est en rotation, une force tangentielle provenant du frottement entre les frotteurs et le disque s'exercera sur le chariot. On mesure, cette force tangentielle, grâce à un système comportant une jauge de contrainte électronique et un transducteur (10) porté par un carter; le signal provenant du transducteur est transmis à un enregistreur à stylet permettant ainsi un enregistrement continue de la force tangentielle de frottement. La lecture de cette force est assurée aussi par une capsule manométrique ou " statimètre ", contenant un récipient souple étanche de forme annulaire relié par un tuyau souple blindé à un manomètre qui se trouve sur un panneau à droite du banc de la machine (10), gradue en Newton-force.

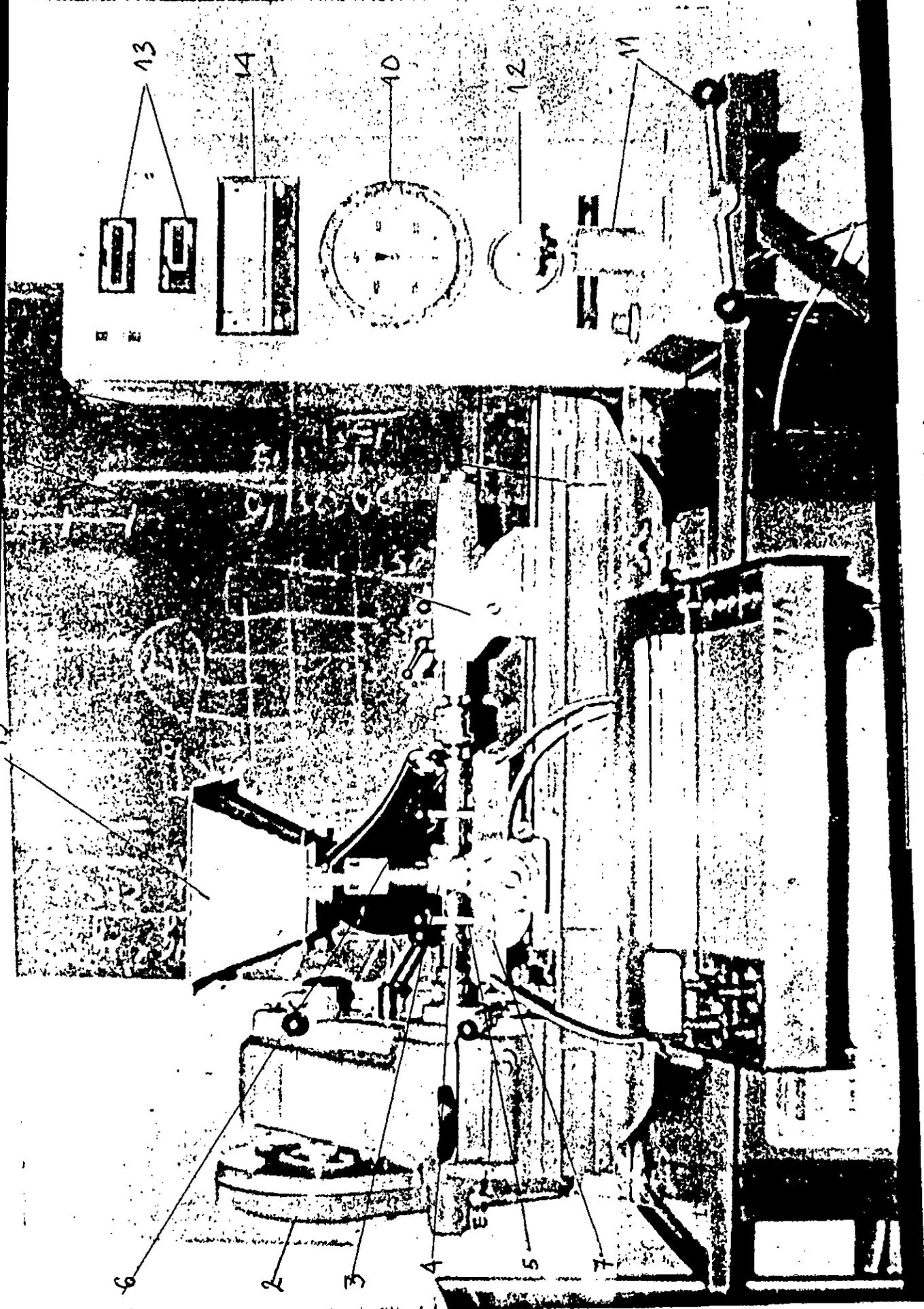


Figure 4.1: Machine d'essai Vue générale

b- La charge : est appliquée par un dispositif hydraulique (11) à poids variable en pression et de contrôle. Un piston de précision qu'on peut charger avec des poids pouvant donner une pression allant jusqu'à 15 bars. Un manomètre disposé sur la partie droite (12) du banc de la machine.

c- La vitesse : de rotation du disque, ainsi que le nombre total de tours sont mesurés, soit à l'aide d'un tachymètre et d'un compteur manuel présenté à l'extrémité gauche, soit par un compteur digital qui indique le nombre de tours par minute, ou bien le nombre total des tours. (13)

d- Un thermocouple : de type (TCL 15 / 10A) dont le fil est flexible, placé en surface de contact et un autre à l'intérieur du disque, pour mesurer l'évolution de la température du couple pignon / disque. La lecture de la température est assurée au moyen d'un capteur électronique digital. (14)

4.1.1-2 Modifications portées à la machine de frottement, usure

Les modifications portées sur la machine, se limitent à l'adaptation des pièces d'essais à la simulation et la confection d'un système de distribution de l'abrasif. La modification portée aux éprouvettes d'essais consiste à changer la forme et la dimension des pions, afin de les adapter à nos types d'essais.

La confection d'un système de distribution (15) des particules abrasives, consiste à installer un réservoir qui a la forme d'un entonnoir relié à un tube en cuivre qui permet la distribution des particules d'usure sur les surfaces de contact, son débit est contrôlé à l'aide d'un robinet.

4.1.1-4 Description du simulateur d'usure et frottement

Le dispositif de la figure 4-2 a été adapté pour répondre aux besoins spécifiques de freinage du couple de frein en ligne minière. Il doit donc :

- Reproduire les conditions sévères rencontrées sur le site industriel (freinage de la semelle de frein en fonte sur la roue en acier dans un environnement agressif et sous une charge de dix tonnes et une vitesse moyenne de 50 km / h ...etc) et maintenir celles-ci pendant le déroulement des essais.
- Etablir un environnement similaire à la ligne minière
- produire un tribosystème permette afin d'atteindre les pressions et les vitesses auxquelles est soumis le couple sur site industriel. Le dispositif de frottement et d'usure doit être capable de produire les paramètres d'environnement déterminés sur site industriel et les paramètres dynamiques qui vont être calculés dans le paragraphe de calcul de similitude

4.5.1

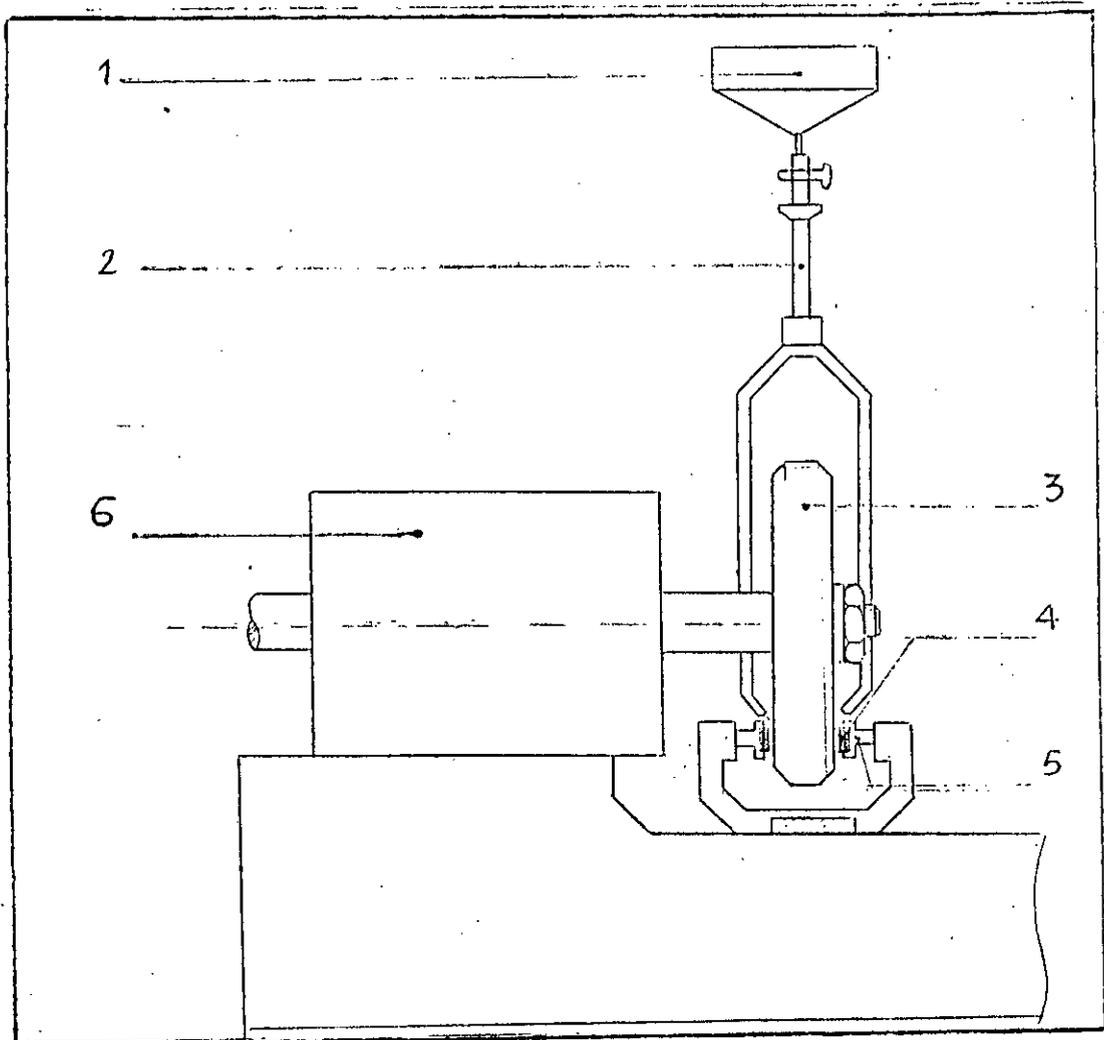


Figure 4-2: Machine d'essai schéma de principe
(simulateur)

- 1 : Réservoir contenant l'abrasif
- 2 : Circuit de distribution de l'abrasif
- 3 : Disque simulant la roue monobloc
- 4 : Eprouvette pion simulant la semelle de frein
- 5 : Porte chantillon pion
- 6 : Moteur entraînant le disque

4.1.2- DESCRIPTION DU DERIVATOGRAPHE EN VUE DE SIMULER
L'EFFET D'ECHAUFFEMENT DES SUFACES DE GLISSEMENT
DES SEMELLES DE FREIN

Le dérivatographe de type couplage avec ATD (Analyse Thermique Différentielle) illustré dans la figure 4-3 a été réalisé par exemple pour étudier le comportement thermique de petits échantillons métalliques sous vide à 1200 ° C. Le dilatomètre est à poussoir et est muni de deux tubes de silice parallèles (9) :

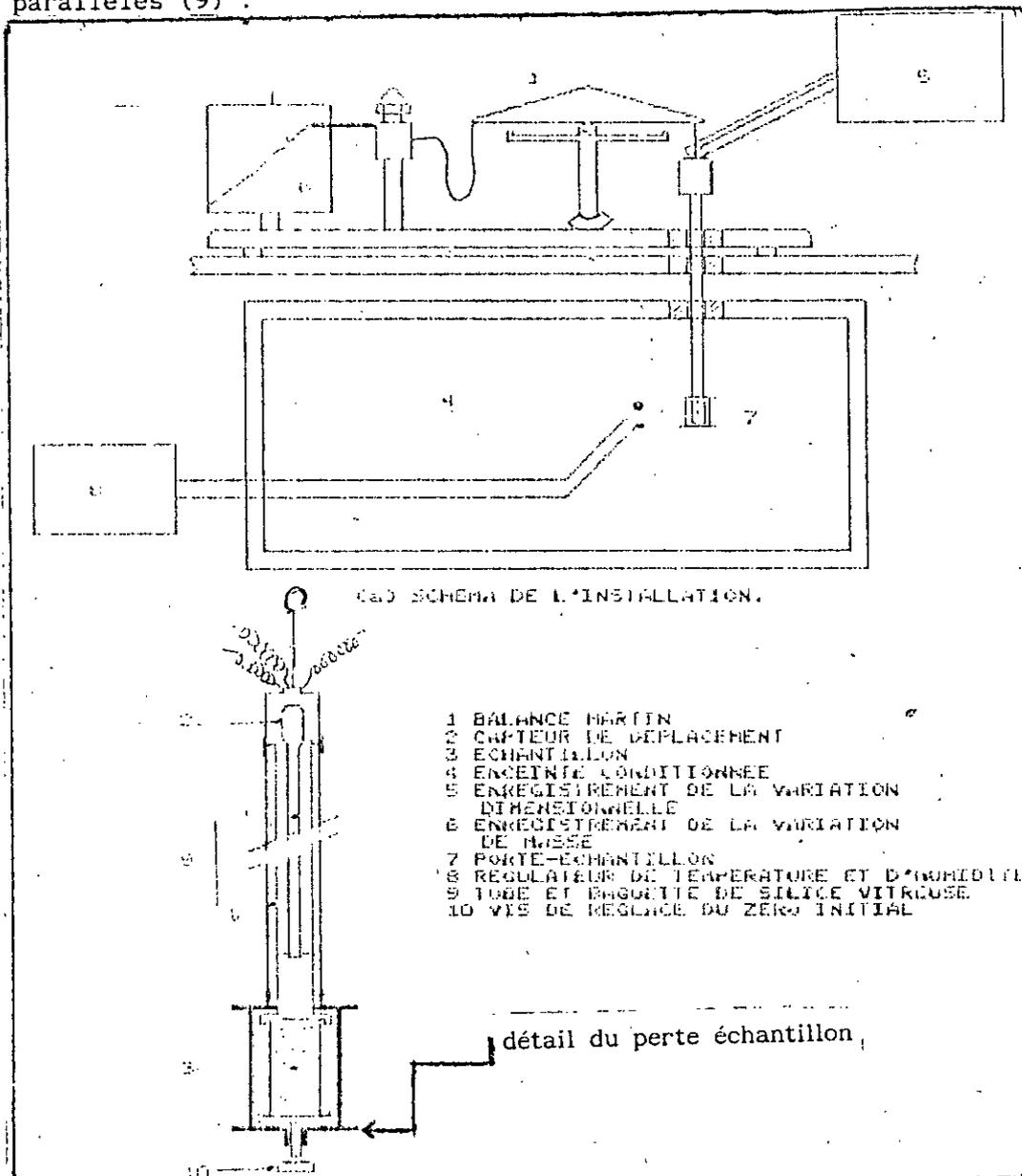


Figure 4-3: Schéma de principe de dérivatographe

Le premier (9.a) contient l'échantillon (3) pour les mesures de dilatation d'échantillon placé dans un petit trou central, la soudure du couple thermo-électrique. Une soudure identique est placée à la même profondeur, dans le deuxième tube (9.b) dilatométrique, dans un bloc de référence.

L'enregistrement, (5) de la courbe ATD se fait de la façon classique en même temps que la courbe dilatométrique. Un capteur (2) utilisé pour la détection de l'évolution dimensionnelle de l'éprouvette disposée verticalement (3), et une balance enregistreuse pour l'enregistrement des pertes de masse (6) le système porte échantillon (7) capteur (2) étant solidaire d'un bras de cette balance, l'alimentation du capteur est assurée par l'intermédiaire de fils de cuivre de faible diamètre, bobine en spirale pour ne pas entraîner d'action pondérale parasite sur la balance. L'essai de séchage est réalisé dans une enceinte qui offre les possibilités de réguler la température (4) et le degré hygrométrique de l'air. L'obtention simultanée de l'ATD de la dilatométrie et l'analyse thermique d'émanation (ATE) permettent d'obtenir des informations intéressantes sur les modifications de structures et d'état de surface lors du traitement thermique des solides

4.2.1. Application de la méthode ATD
L'essai de séchage est réalisé dans une enceinte qui offre les possibilités de réguler la température (4) et le degré hygrométrique de l'air. L'obtention simultanée de l'ATD de la dilatométrie et l'analyse thermique d'émanation (ATE) permettent d'obtenir des informations intéressantes sur les modifications de structures et d'état de surface lors du traitement thermique des solides

4.2.2. Application de la méthode ATD
L'essai de séchage est réalisé dans une enceinte qui offre les possibilités de réguler la température (4) et le degré hygrométrique de l'air. L'obtention simultanée de l'ATD de la dilatométrie et l'analyse thermique d'émanation (ATE) permettent d'obtenir des informations intéressantes sur les modifications de structures et d'état de surface lors du traitement thermique des solides

La description de la microstructure métallographique et la nature et distribution de graphite de la figure 4.5 sont résumées dans le tableau 4-2 : ci-dessous

Tableau 4-2: constituant structural des fontes mises en essai

Fonte	Graphite Norme AFNOR		Matrice	Dureté HB
	Distribut°	Grosseur		
P14	1 A	3 - 4	Perlite fine, plage de ferrite entourée du graph- -ite ,eutectique phosphoreux Fe_3P	215
A14	-	-	perlite, petits carbures de cémen- tite Fe_3C coalesce et peu de $(Fe Mn)_3C$	250
P27	1 A	3 - 4	Perlite très fine plage de ferrite entourée de graph- ite, larges ilots d'eutectique	230
US	1 A	5	perlite fine cémentite, carbu- res de fer	265
NH57-4	1 A	5	perlite fine ilots d'eutectique phosphoreux, carbures de fer	240

4.3 - Préparation des éprouvettes d'essais

Les éprouvettes mises en essai pour la simulation expérimentale sur une machine de frottement et usure (Tribomètre) sont de type pion en fonte simulant la semelle de frein et disque en acier simulant la roue monobloc

4.3.1- Eprouvette pion

Les éprouvettes, ont été usinées à partir des fontes ci-dessous élaboré à L'ECOLE DE FONDERIE DE TIARET "CFT"

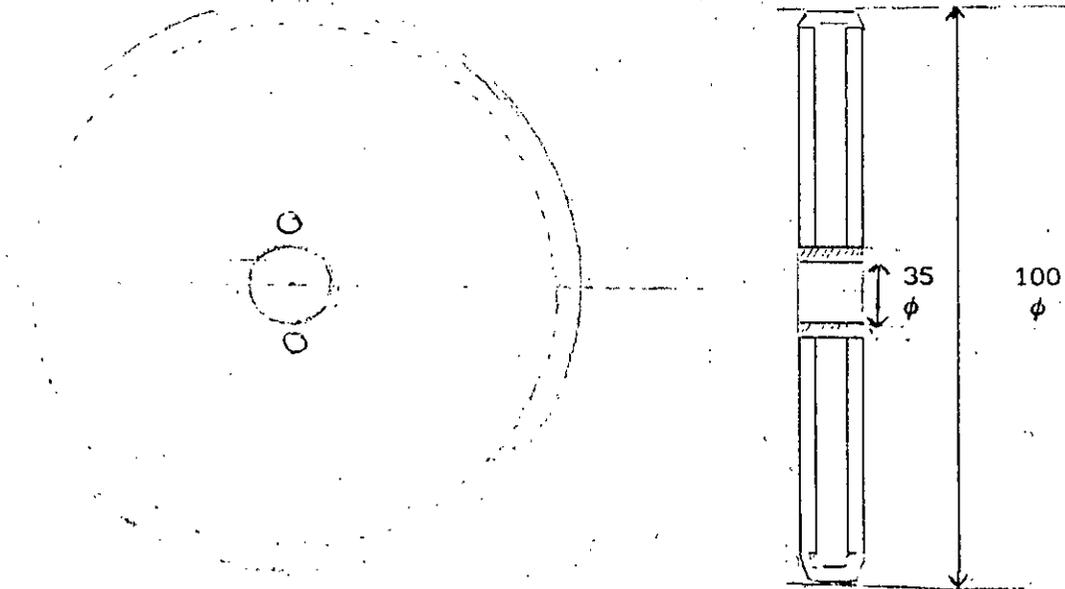
P14, P27, A14, US, et NH57-4

Les caractéristiques physico-chimiques sont données par les tableaux 4-1, 4-2. Ces éprouvettes illustrées à la *figure 4-7, a*, ont une forme de plaquette de dimension (10 x5 x 6) mm montées sur un porte échantillon (voir *figure 4-6, a*) qui permet d'exercer une pression de contact sur une surface polie de manière à présenter un état de surface de rugosité inférieur de $1\mu\text{m Rms}$

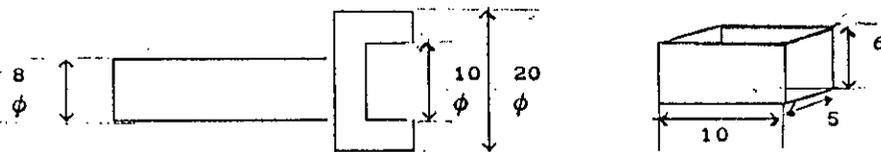
4.3.2- Eprouvette disque

Les disques ont été confectionnés à partir de l'acier de composition chimique et caractéristiques mécaniques similaires à celle des roues monobloc utilisées sur site industriel (voir tableau cité en 1-1). Cette éprouvette a un diamètre de 100 mm et 20 mm d'épaisseur. Elle est percée au centre de la pièce d'un trou de 35 mm de diamètre (voir la *figure 4-6: b*)

L'éprouvette disque subit un traitement thermique dans un four électrique de type (Hareas), la température de chauffage est 880°C pendant 20 mn suivi d'une trempe à l'huile pour avoir une dureté comprise entre (300 - 350) HB à la surface de la pièce; Enfin à l'aide d'une rectifieuse plane, la surface est polie jusqu'à atteindre une rugosité inférieure à $1\mu\text{m Rms}$



a : Epreuve disque



- Porte chantillon

- Echantillon

b : - Epreuve plan

Figure 4-6 : Epreuves d'essais

MODE OPERATOIRE D'ESSAI EN SIMULATION EXPERIMENTALE4.4. - MODE OPERATOIRE DE SIMULATION DE
L'USURE DU COUPLE DE FREINAGE

Cette étude a pour but principal de tester la résistance abrasive des différentes fontes élaborées (voir tableau 4.1). Le résultat obtenu sera comparé à la fonte de référence P14. L'étude a permis aussi de déterminer les causes néfastes, de la dégradation des fontes, et de déterminer les principaux paramètres qui influent sur la résistance à l'usure abrasives de ces matériaux. Pour atteindre ces objectifs, on ajoute entre les surfaces frottantes des particules abrasives sous des conditions dynamiques similaires à celles du site industriel.

4.4.1- PRINCIPE D'ESSAI

A l'aide de la machine d'essai de frottement-usure (tribomètre) nous avons procédé à la détermination des paramètres suivants :

- Coefficient de frottement
- Taux d'usure.
- Température du couple au cours de freinage.

a - Coefficient de frottement : Par la relation 4-2 suivante

$$f = \frac{F_t}{F_N}$$

(4-2)

F_t : force tangentielle
(force mesurée)
 F_N : force normale
(force appliquée)

La force tangentielle est mesurée par le transducteur au moyen d'un signal enregistré sur une table traçante et la force normale est appliquée par l'expérimentateur.

b - Taux d'usure : à l'aide d'une balance électronique possédant une précision de $\pm 0,0001g$, on pèse le poids des échantillons " Pion en fonte " avant et après chaque essai afin de déterminer le taux d'usure par la relation (4.3) [43]

$$W_p = \frac{\Delta m}{P.f.L} \quad (4.3)$$

Δm : différence de poids avant et après essai (g)
 P : force normale (N)
 f : coefficient de frottement L : distance de glissement (m)
 W_p : taux d'usure du pion (g / j)

La distance de glissement se calcule par la relation (4.4) :

$$L = 2.\pi .r.Nt \quad (4.4)$$

r : rayon du disque à partir du point d'application du pion
 Nt : nb de tour du disque

La détermination de la perte de poids sur le disque se calcule à partir de la formule (4.5) suivante:

$$\Delta m = \rho.V = \rho . 2.\pi .r. A.B \quad (4.5)$$

r : rayon de la couronne
 A : profondeur moyenne d'usure
 B : épaisseur moyenne d'usure .

Les paramètres A, B et r se déterminent directement à partir du disque après essai et qui représentent en réalité la profondeur et l'épaisseur de la rayure. Ces paramètres sont mesurés à l'aide d'un appareil métrologique de marque *Controlab*

Le taux d'usure du disque sera donc donné par la relation : (3.6) [43]

$$W_D = \frac{\Delta m_D}{P.f.Nt} \quad (4.6)$$

W_D : Taux d'usure du disque
 Δm : perte de masse
 P : force normale
 f : coefficient de frottement
 Nt : nb de tour du disque

La mesure de la température de la surface de contact (T₀) et à l'intérieur du disque (T_{1/2}) est assurée à l'aide d'un thermocouple à affichage électronique digital. Elle nous permet d'étudier l'évolution de la température en fonction des paramètres dynamiques.

autres paramètres mis en évidence dans notre étude
 H_V : dureté vickers, R_A : rugosité partielle, R_t : rugosité totale et microstructureetc, se détermine à l'aide des appareils de mesure suivants :

- Microduremètre vickers (de type Test Well M 11 Nx 406)
- Profilométrie (Talisreur de type lectronique, marque Philips)
- microscope optique (de marque OLYMPIA),
- microscope électronique à Balayage (M.E.B de type CAMEBAX PL: 6-3)

4.5 - Optimisation des paramètres de la simulation expérimentale

Pour optimiser les paramètres opératoires mis en évidence dans la simulation expérimentale, nous avons déterminé d'une part, à l'aide d'un calcul de similitude /ou théorie des maquettes [52], les paramètres dynamiques qui reproduisent fidèlement les conditions réelles du site industriel. D'autre part, par l'exploitation des résultats de l'étude effectuée sur site industriel (voir Chapitre III) pour simuler l'environnement.

4.5.1- Simulation des paramètres dynamiques

4.5.1-1 Introduction au calcul de similitude

La similitude: c'est une méthode d'étude de phénomène physique, utilisant des maquettes ou des modèles dimensionnés reliés aux grandeurs vraies (cas du prototype) par un rapport de similitude géométrique λ [52]

$$\lambda = \frac{\bar{l}}{l} = \frac{\text{grandeur réduite (modèle)}}{\text{grandeur originale (prototype)}}$$

4.5.1-2 Calculs des paramètres dynamiquea - Calcul du coefficient de réduction dimensionnel K_L

C'est un rapport dimensionnel de réduction entre le prototype (roue: sur site industriel) et le modèle (disque: en laboratoire)

$$K_L = \bar{L} / L$$

\bar{L} : Diamètre de la roue (mm)
 L : Diamètre du disque (mm)

pour $L \approx 1000$ mm et $\bar{L} \approx 100$ mm on aura K_L est égal
 $K_L = 100 / 1000 = 1/10$

b - calcul de la vitesse de réduction

Le coefficient de réduction de vitesse K_v est donné par l'expression du rapport de deux coefficients K_L et K_t [52]:

$$K_v = K_L / K_t$$

K_L : coefficient de réduction dimensionnel
 K_t : coefficient de réduction temporel

Généralement quand le rapport de réduction dimensionnel est de l'ordre 1/10, le coefficient de réduction temporel K_t est égal à $K_t = 1/3$. Dans notre cas il représente le rapport de réduction du temps à simuler sur disque sur le temps de freinage total sur la roue, comme le montre l'expression suivante: [52]

$$K_t = \bar{t} / t$$

\bar{t} : temps à simuler sur machine
 t : temps total de freinage sur site

pour $t \approx 100$ mn sur site industriel, le temps à simuler sur

disque sera égal à $\bar{t} = K_t \cdot t = 1/3 \cdot 100 = 35$ mn

et le coefficient de réduction de vitesse K_v est égal à :

$$K_v = \frac{1/10}{1/3} = 3/10$$

Donc la vitesse de réduction V se calcule à l'aide du coefficient K_v avec $V \approx 50 \text{ km/h}$ d'où V est égal : $\bar{V} = \dots V_v = 1/3 \dots 50$

$$\bar{V} = 15 \text{ Km/h}$$

c - Calcul de la pression (force normale à appliquer)

La relation (4.7) [52], définie ci-dessous permet de calculer la force normale \bar{F}

$$K_F = \frac{K_m \cdot K_L}{K_t^2}$$

K_F : coefficient de réduction de la force normale

(4-7)

avec : $K_F = \frac{\bar{F}}{F} = \frac{\text{force normale à simuler sur machine}}{\text{force de freinage sur site industriel}}$

K_m : rapport de masse (roue - disque)
(ou rapport en terme de moment d'inertie J)

$K_m = \frac{\bar{m}}{m}$, est de l'ordre de 1/1000 avec $\bar{m} \approx 0,4 \text{ kg}$ du disque et $m \approx 350 \text{ kg}$ de la roue monobloc

On remplace les différents coefficients de réduction dans l'expression donnée en (4-7), le coefficients de réduction de force sera égale à : $K_F = \frac{1/1000 \cdot 1/10}{(1/3)^2} = 9/10000$ $K_F = 9 / 10000$

$K_F = \bar{F} / F$ avec F : force de freinage en site. Pour calculer cette force F nous avons utilisé la formule (2.1) citée dans le Chapitre II [30]

$$F = \frac{P \cdot \varphi}{f} - \epsilon \quad (2.1)$$

P : charge appliquée sur la roue = 100000 N

φ : coefficient d'adhérence = 0,12

f : coefficient de frottement = 0,15

ϵ : constante très petite. ≈ 0

NB : ces valeurs ont été données sur site industriel par l'unité d'exploitation de chemin de fer de Annaba (UEMRA). On remplace ces valeurs dans la formule (2.1) pour déterminer F la force de freinage sur site industriel

$$F = \frac{100000 \cdot 0.12}{0.15} = 80000 \text{ N .}$$

la force normale de simulation sera calculéepar:

$$\bar{F} = K_F \cdot F = 80000 \cdot 9/10000 \text{ d'ou } F = 72 \text{ N}$$

Les calculs de similitude, sont résumés aux tableaux 4.3. ci-dessous, montrant l'intervalle de variation des paramètres dynamiques (p et v) et le temps d'application t.

Tableau 4.3 : résumé les paramètres opératoires dynamiques

F (N)	50 - 72 - 110
V (m/s)	2 - 4.2 - 9
t (mn)	35

Le tableau 4-3 : comporte trois valeurs pour chaque paramètre dynamique, les valeurs centrales représentent les valeurs de base calculées par la théorie de similitude (72 N et 4.2 m/s) et les deux autres valeurs extrêmes représentent les valeurs min et max de la machine d'usure et frottement.

4.5.2- Simulation de l'environnement (milieu)

Le type de l'abrasif et la taille ont été choisi suite à l'étude effectuée sur site industriel.

a- Type d'abrasif :

Plusieurs type d'abrasifs ou d'oxydes peuvent entrer entre les surfaces de contact du couple de freinage, en contribuant à la dégradation des surfaces, avec un degré d'agressivité relative de chaque type d'oxyde.

L'analyse de minerai et celle des surfaces de glissement (voir Chapitre III) nous ont montré que les éléments les plus agressifs et les plus présents dans l'incrustation en surface sont: L'oxyde de Fer: Fe_2O_3 et la silice: SiO_2 .

b- Granulometrie

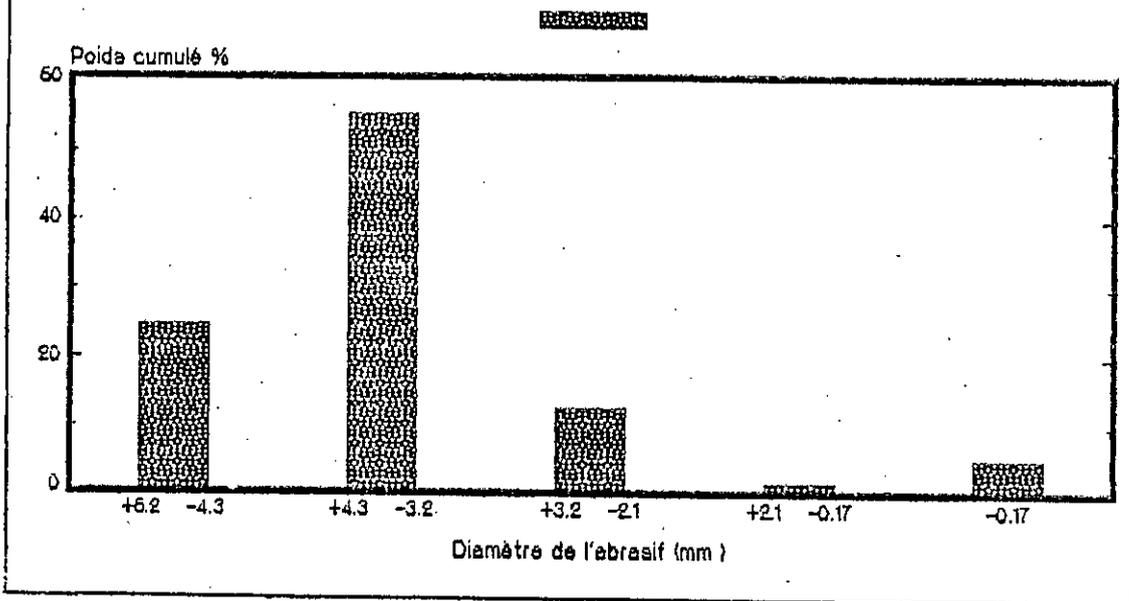
Sur la base de l'analyse granulométrique faite sur des échantillons pris sur le site industriel (voir Chapitre III), nous avons choisi 3,5 mm comme diamètre moyen des particules abrasifs à simuler. Nous avons procédé au tamisage (cité en chapitre III 3.1.5) pour sélectionner la granulométrie de l'abrasif utilisé dans les essais de simulation de l'usure abrasive. Cet abrasif est excessivement dur et possède une couleur d'origine, marron foncé à grenat clair. Ces caractéristiques physico-chimiques et mécaniques sont reportées dans le tableau 4.4 ci-dessous:

Tableau 4.4 : caractéristique de l'abrasif

Composition de l'abrasif d'essai	70 % Fe_2O_3 et 20 % SiO_2
HV Fe_2O_3	700
HV SiO_2	1000

La distribution granulométrique de l'abrasif cité en tableau 4.4 est illustrée dans la figure 4.7, qui donne en fonction du diamètre des particules abrasives, le poids cumulé. Le diamètre moyen des particules de l'abrasif est environ égal à 3,5 mm

Figure 4.7 : Distribution des particules abrasives
 $70\% \text{Fe}_2\text{O}_3 + 20\% \text{SiO}_2$



En fin de cette étude d'optimisation nous donnons le tableau 4.5 ci-dessous résume les paramètres essentiels à varier dans notre étude de simulation expérimentale

Tableau 4.5: récapitulatif des paramètres d'étude de la simulation

1 - Les charges appliquées ou les pressions moyennes : $50 < F_{\text{moy}} < 110 \text{ N}$ ou $1 < P_{\text{moy}} < 2 \text{ MPa}$
2 - Les vitesses de glissement ou nombres de tour du disque $1 < V_{\text{moy}} < 10 \text{ m/s}$ ou $500 < \frac{Nt}{\text{min}} < 50000$
3- Les temps d'applications ou de maintiens $t_{\text{maint}} < 35 \text{ mn}$
4 - L'environnement : $70\% \text{Fe}_2\text{O}_3$ et $20\% \text{SiO}_2$ et $3,5 \text{ mm}$ de diamètre moyenne

4.6 -SIMULATION DE L'EFFET D'ECHAUFFEMENT DES COUCHES DE GLISSEMENT DES SEMELLES DE FREINS DANS LE DERIVATOGRAPHE

4.6.1 -Etude thermocinétique

Le chauffage et le refroidissement cyclique des semelles de frein dû au freinage, nécessite une étude sur le comportement des phases dures en fonction de l'évolution de la température de chauffage, telles que : l'eutectique phosphoreux Fe_3P , cémentite Fe_3C et d'autres carbures de fer.

Pour étudier les transformations chimiques des phases qui peuvent être observer dans le processus de l'échauffement sur les couches superficielles des semelles de freins, nous avons réalisé une analyse thermique sur les échantillons de différentes fontes testées dans les essais d'usures et frottements. Ces fontes sont classées en deux catégorie suivantes :

- I - fonte phosphoreuse : P6, P10, P14, P27
- II - fonte alliée : US, A14, NH57-4

La première catégorie des fontes sert à étudier principalement le comportement de la phase eutectique phosphoreux à différent pourcentage de phosphore. La deuxième catégorie sert à étudier essentiellement le comportement de la cémentite et d'autres carbures de fer formés par les éléments d'additions.

Les expériences sont réalisées par un dérivatographe sur un intervalle de température compris entre 500 à 1000° C qui correspond au travail réel des semelles de frein sur site industriel.

4.6.2 -PRINCIPE D'ESSAI

Pour tracer les courbes d'analyses thermiques (dilatométriques) de variation dimensionnelle et pondérales, nous avons usiné des éprouvettes cylindriques des différentes fontes avec une dimension 40 x 15 x 15mm. Les éprouvettes sont introduites ensuite dans le dérivatographe donné par la (figure 4.4 4.1.2). Le résultat d'analyse est enregistré sur un papier millimétrique

PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS
DE SIMULATION EXPERIMENTALE

4.7 - RESULTATS ET DISCUSSION DE L'ETUDE DE SIMULATION
DE L'USURE ET FROTTEMENT DU COUPLE DE FREINAGE

4.7.1 Etude de l'usure abrasive du couple d'essai

Notons tout d'abord, que notre approche de simulation expérimentale de l'usure abrasive consiste en générale dans l'étude de la variation de certains paramètres opératoires tels que la pression et la vitesse, tout en gardant les autres paramètres fixes tels que le temps d'application, la nature de l'environnement (granulométrie de l'abrasif, températureetc). Les différentes fontes que nous avons élaboré (citées au tableau 4.1) sous forme de pion viennent frotter sur un disque en acier, durant 30 à 35 mn pour des pressions et vitesses variables et sous l'effet de l'abrasif. Cela est illustré à la figure 4.8 qui montre le dispositif d'abrasion à trois corps (pion / disque /abrasif)

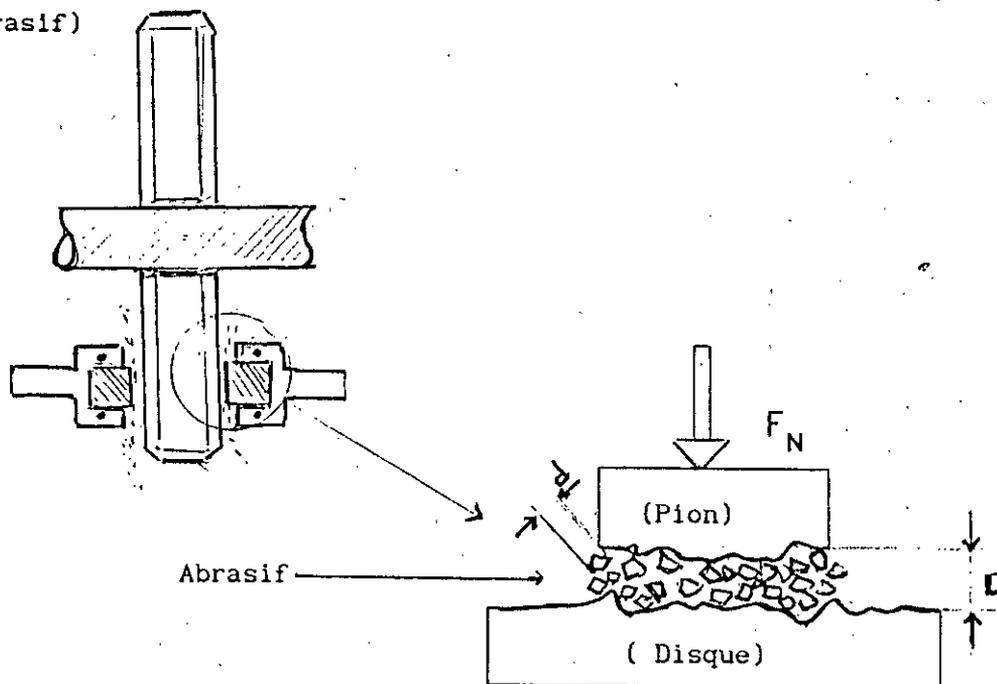


Figure 4.8 Schéma du dispositif d'abrasion à trois
corps voie sèche. ($D > d$).

Ces essais nous permettent de comparer les taux d'usures des fontes citées en tableau 4.1 à la fonte P14 (fonte de référence) utilisée sur site industriel

Les résultats d'essais d'usure abrasive sont illustrés aux figures 4.9, 4.10, et 4.11. Ces figures donnent le taux d'usure des différentes fontes en fonction de la pression de contact et de la vitesse de glissement du pion sur disque et montrent en générale qu'elles développent à faible vitesse un taux d'usure beaucoup plus important qu'à grande vitesse. Ce comportement est surtout remarqué sur les fontes phosphoreuses (P14, P27), qui enregistrent un taux d'usure très élevé dans l'intervalle de vitesse ($1 < V < 5$ m/s) relativement aux fontes alliées (A14, US et NH57-4). Pour expliquer l'augmentation rapide du taux d'usure à faibles vitesses nous faisant appel au mécanisme du frottement et d'usure des fontes grises ordinaires frottées sur l'acier trempé, donné par TAKHASCHI et SAKAI [8,10]. Ces chercheurs considèrent que la nature du taux d'usure (régime: modéré ou sévère) est en fonction de la vitesse et de la pression. Ils constatent (pour les fontes ordinaires) la présence de l'état de régime sévère à faible vitesse qui entraîne un taux d'usure élevé. Ensuite l'usure passe à l'état de régime modéré, caractérisé par un faible taux d'usure aux grandes vitesses. Ce régime sévère constaté dans notre cas à faible vitesse (≈ 2 m/s) est traduit par une augmentation rapide du taux d'usure des fontes, en particulier les fontes phosphoreuses (P14, P27) (voir figure cit en haut)

Sur la figure 4-10 qui donne le taux d'usure en fonction de la vitesse et à pression égale à 74.32 N, nous remarquons l'augmentation rapide du taux d'usure puis une diminution du taux d'usure des fontes phosphoreuses (P14, P27) dans l'intervalle de vitesses comprise entre [1 et 5] m/s. L'intervalle représente la fourchette de variation de la vitesse de rotation de la roue au cours de freinage sur site industriel.

Figure 4.9: Essai d'usure abrasive des pions
 $P = 53.09 \text{ N}$

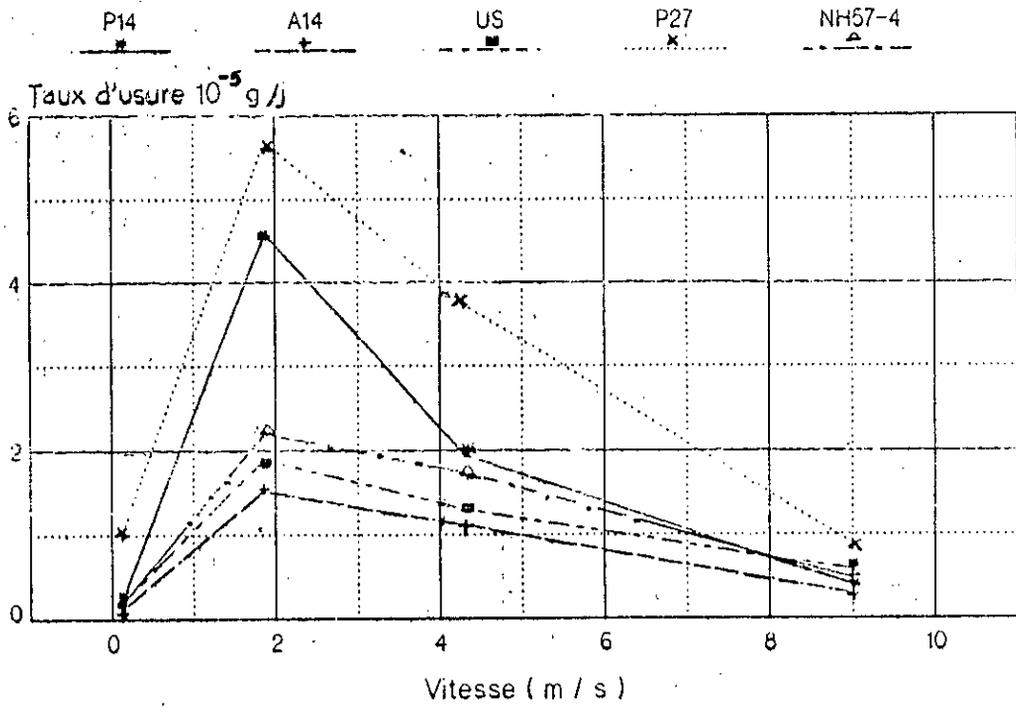


Figure 4.10: Essai d'usure abrasive des pions
 $P = 74.32 \text{ N}$

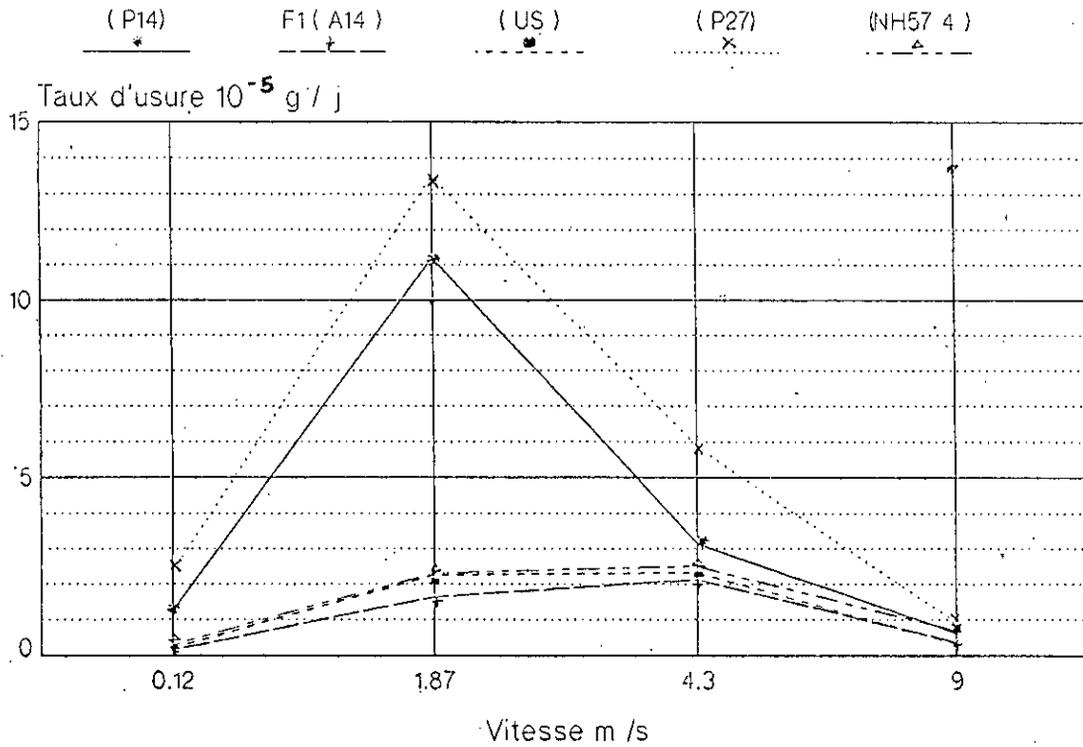
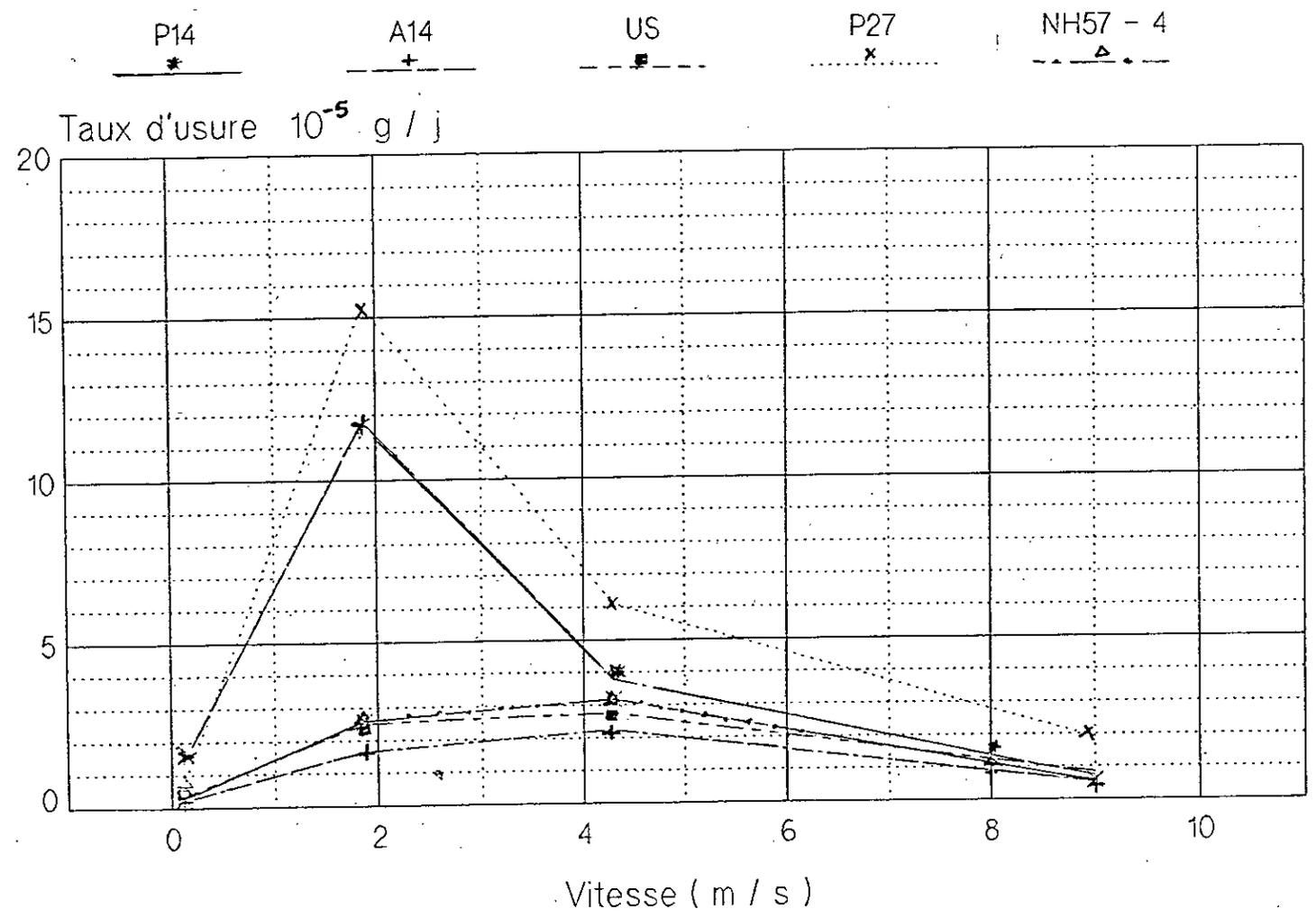


Figure 4.11: Essai d'usure abrasive des pions
P= 106.18 N



Nous expliquons l'augmentation brutale dans le taux d'usure des fontes phosphoreuses d'une part, par le phénomène du changement dans l'état d'usure. Cela comme il a été mentionné précédemment, le taux d'usure élevée à faible vitesse est dû au passage des fontes phosphoreuses du régime modéré (vitesse inférieur à $< 1\text{m/s}$) au régime sévère à (vitesse supérieur à $> 1\text{m/s}$) $V \approx 2\text{ m/s}$ et $P = 74,32\text{ N}$, ensuite il revient en régime modéré à vitesse supérieur $> 5\text{ m/s}$. Le résultat du taux d'usure élevé à faible vitesse des pions ($V \approx 2\text{ m/s}$) est confirmé par la diminution du taux d'usure du disque. Cela est expliqué par le transfert de la matière qui se fait du pion vers le disque

D'autre part nous expliquons cette augmentation brutale dans le taux d'usure des fontes P14 et P27 par la détérioration des différents constituants de ces fontes ou la steadite subit une fusion locale dans la fonte, à cause de son bas point de fusion qui atteint les températures de travail des semelles de freins en site industriel [50]. Ce phénomène de la détérioration de la fonte, dû à la fusion de la steadite Fe_3P , est confirmé par le taux d'usure développé par la fonte P27. La fonte P27 contient une plus grande proportion d'eutectique phosphoreux et par la suite enregistre un taux plus élevé en perte de masse que la fonte P14. Ce comportement de la steadite vis à vis des conditions d'usure et frottement simulant le site industriel est montré par une micrographie typique prise sur des échantillons de P14 et P27 après les tests d'usures illustrés à la figure 4.12

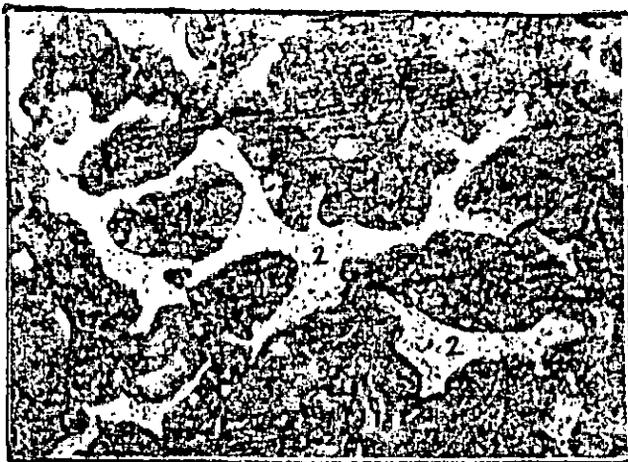


Figure 4.12:

L'état morphologique de la structure des fontes phosphoreuses après les tests d'usure

- 1: Perlite
 - 2: ilots d'eutectique phosphoreux
- ($\times 500$)

La structure micrographique (*illustre en haut*) de la surface usée prise après l'essai d'usure, montre la globulisation de la perlite qui a pris la place des plages initiales occupées par la steadite. Cela est comparé à la micrographie prises avant les tests d'usures (cité en *figure 3.8 3.6.2*). Cet état de la structure explique la fusion de la steadite qui a entraîné un traitement thermique de globulisation de la perlite au cours de l'usure [53]

Les fontes A14, US se comportent de la même façon pour les petites et grandes vitesses mais enregistrent un taux d'usure beaucoup moins important que les fontes phosphoreuses sur l'intervalle de vitesse et pression qui simule le site industriel. Cela est essentiellement due à la nature des carbures mis en solution et carbures de fer dans les fontes. Ces carbures possèdent de meilleures caractéristiques mécaniques et thermiques qui permettent aux fontes de résister aux incrustations des particules abrasives et aux arrachements de la matière.

Quant à la fonte NH57-4 qui contient les deux types des phases dures (*staedite et cémentite*) elle présente un compromis entre les fontes P14, P27, et le reste des fontes A14 et US. Se compromis est traduit par une diminution dans le taux d'usure et augmentation dans le prix de revient. Ce résultat permettra plus tard de choisir la fonte adéquate sur le plan technologique et le plan économique.

4.7.2 - Etude de l'usure à sec du couple de freinage

Afin de montrer l'agressivité de l'environnement et en particulier celle des particules abrasives, nous avons réalisé des essais de frottement à sec sur la fonte phosphoreuse P14 prise comme fonte de référence et le disque en acier. Les résultats du taux d'usure à sec sont comparés aux essais d'usures abrasives. Cela est illustré aux *figures 4-13, 4-14* qui donnent le taux d'usure en fonction du temps d'essai à $V = 2$ m/s et $P = 74,32$ N. Nous remarquons que le taux d'usure des pions à l'état abrasif est environ trois fois plus grand que le taux d'usure à l'état sec. Par ailleurs le taux d'usure des disques à l'état abrasif n'est que le double du taux d'usure à l'état sec.

Figure 4.13: Essai d'usure du plan (P14)

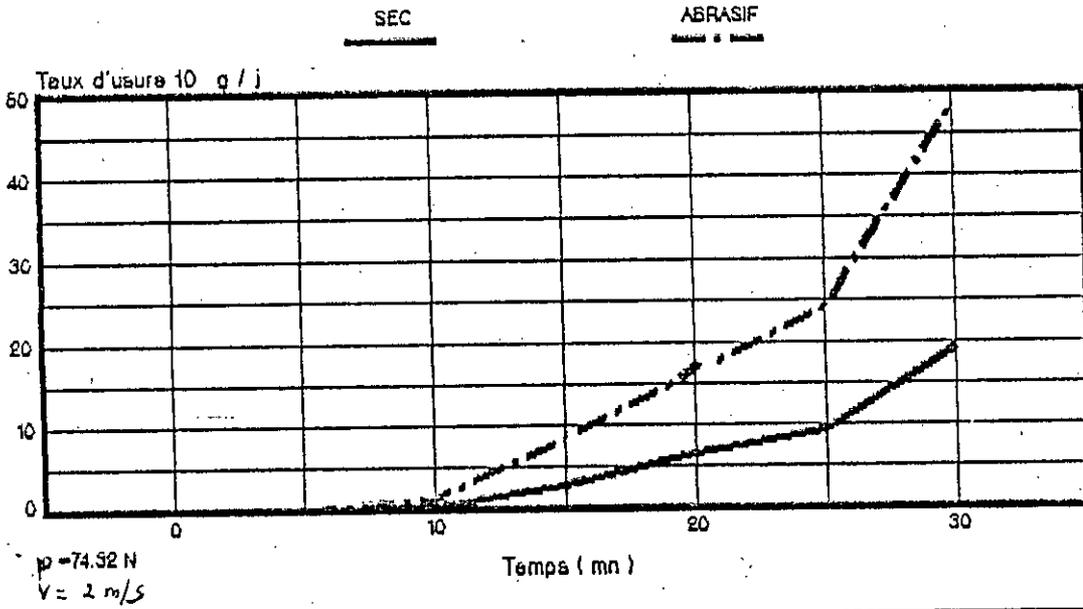
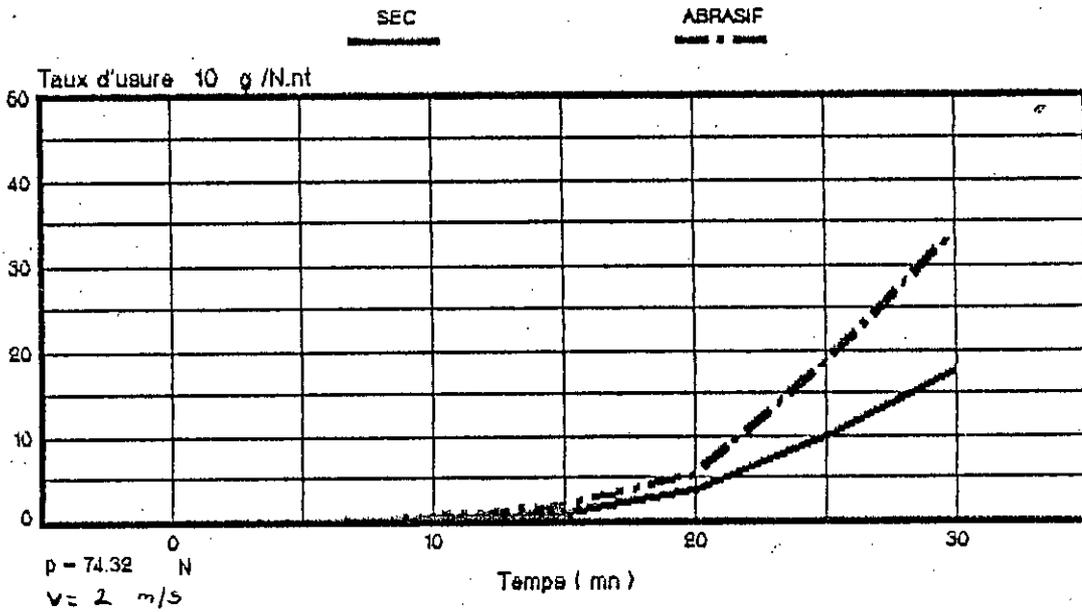


Figure 4.14: Essai d'usure du disque



Pour voir cette influence de l'environnement pour les autres conditions dynamiques sur l'usure du pion en fonte (P14) et le disque en acier, nous avons déterminé le taux d'usure à différentes pressions et vitesses. Cela est illustré dans les figures 4-15, 4-16. Nous remarquons ainsi toujours, l'existence d'une proportionnalité de l'usure entre l'état sec et l'état abrasif du disque en acier et le pion en fonte.

En plus nous avons fait une comparaison de nos essais d'usure effectués à l'état abrasif avec celle des essais effectués par de nombreux auteurs [40,42,43,44,46,54] à l'état sec. Le résultat de comparaison de nos essais à l'état abrasif et à l'état sec P14, ainsi que le résultat de l'étude effectuée en site industriel (voir Chapitre 3 3.5) nous a permis de tirer la corrélation suivante (4.8.)

$$W_{Abrf} = K \cdot W_{Sec} \quad (4.8)$$

- W_{Abr} : Taux d'usure à l'état abrasif
- W_{sec} : Taux d'usure à l'état sec
- K : Facteur de proportionnalité $\left(\begin{array}{l} K = 2 - 3 \text{ pour pion} \\ K = 1,5 - 2 \text{ pour disque} \end{array} \right.$

Cette étude nous a permis de conclure qu'une des raisons principale de l'usure prématurée du couple semelle / roue, sur site industriel par rapport au couple utilisé sur ligne normale est due à la présence des particules abrasives dans l'environnement. Ce qui peut expliquer l'influence de l'ambiance sur la dégradation du matériau. Cette ambiance (abrasif et augmentation de la température) provoque une usure prématurée des semelles de frein sur site industriel.

Figure 4-15: Comparaison du taux d'usure de la fonte P14 à l'état sec et abrasif

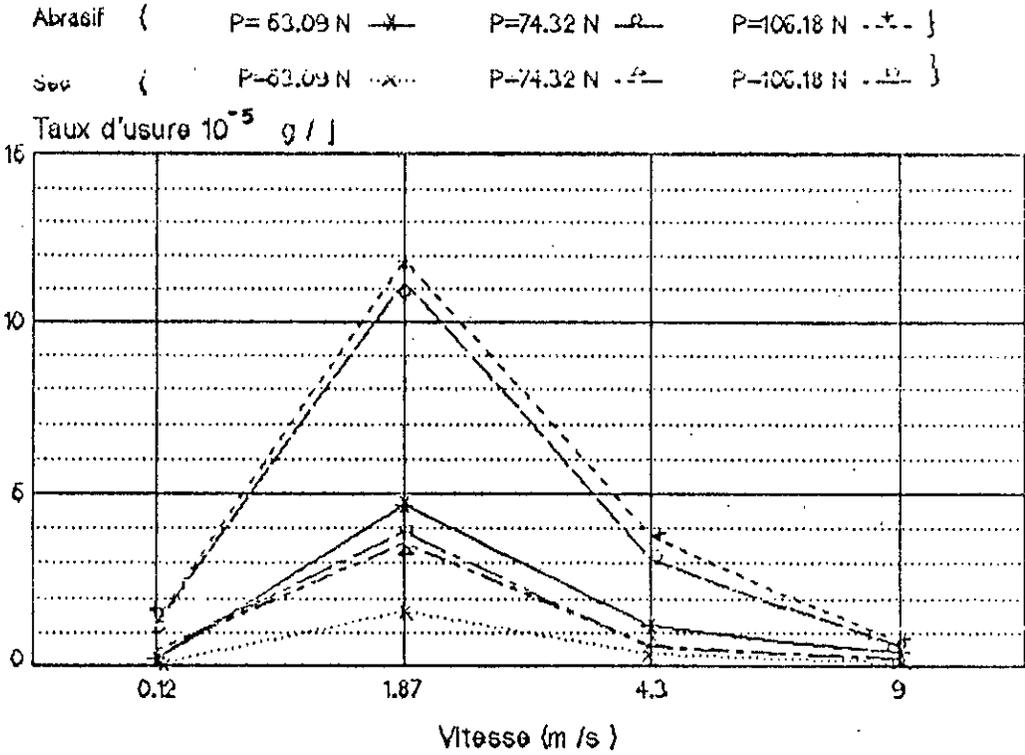
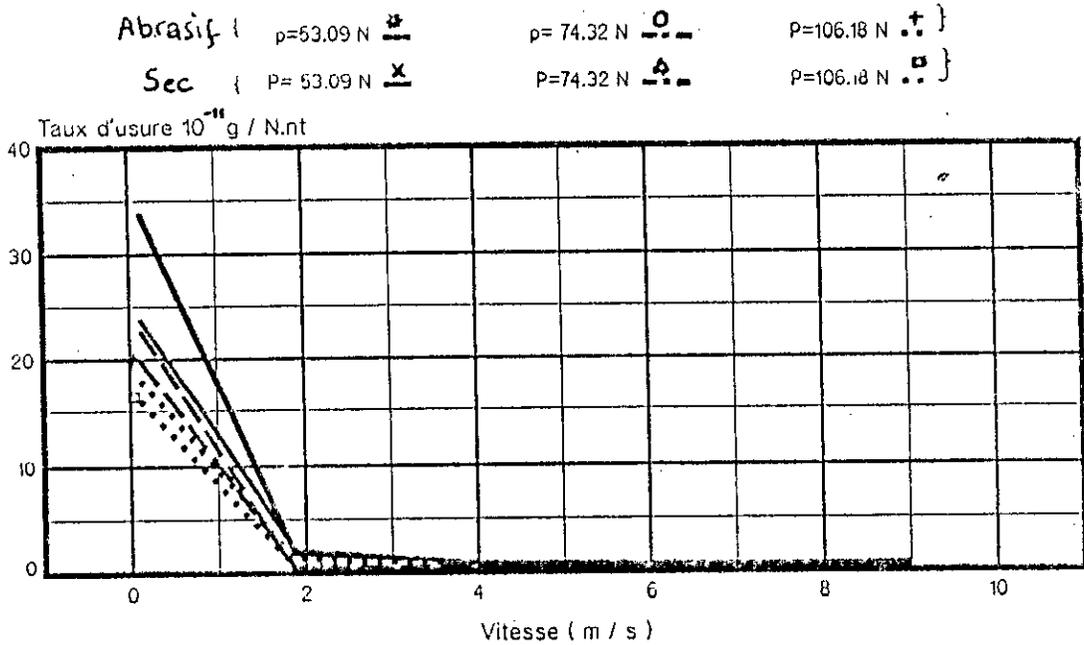


Figure 4.16: Essai d'usure du disque



4.7.3 - Coefficient de frottement

L'évaluation des coefficients de frottement a été faite à partir du rapport des valeurs moyennes entre la force tangentielle et verticale. Pour chaque détermination de ces forces, nous avons utilisé respectivement la moyenne de trois enregistrements. Nous avons pris comme valeurs du coefficient de frottement le rapport de celle du coefficient correspondant à la moyenne de la partie horizontale du profil (voir figure 4-17) sur la force normale appliquée sur le pion. Les oscillations correspondent au mouvement alternatif du pion sur le disque.

Nous constatons par ailleurs que la forme typique de l'enregistrement des profils (mesure de la force tangentielle) représenté sur la figure 4-17 avait une forme périodique constante en fonction du temps puis elle augmente brusquement à une température d'environ 350°C . Il a été observé [22] que le frottement de l'acier contre la fonte prend un régime sévère à partir de cette température qui indique un changement du mécanisme d'usure.

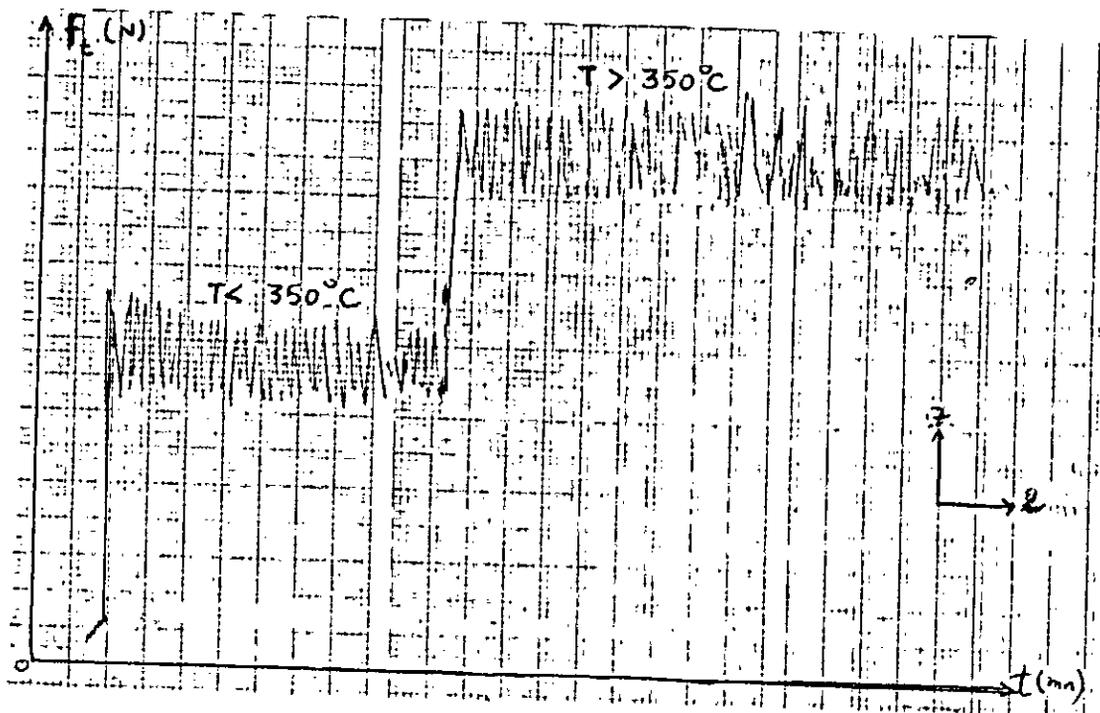
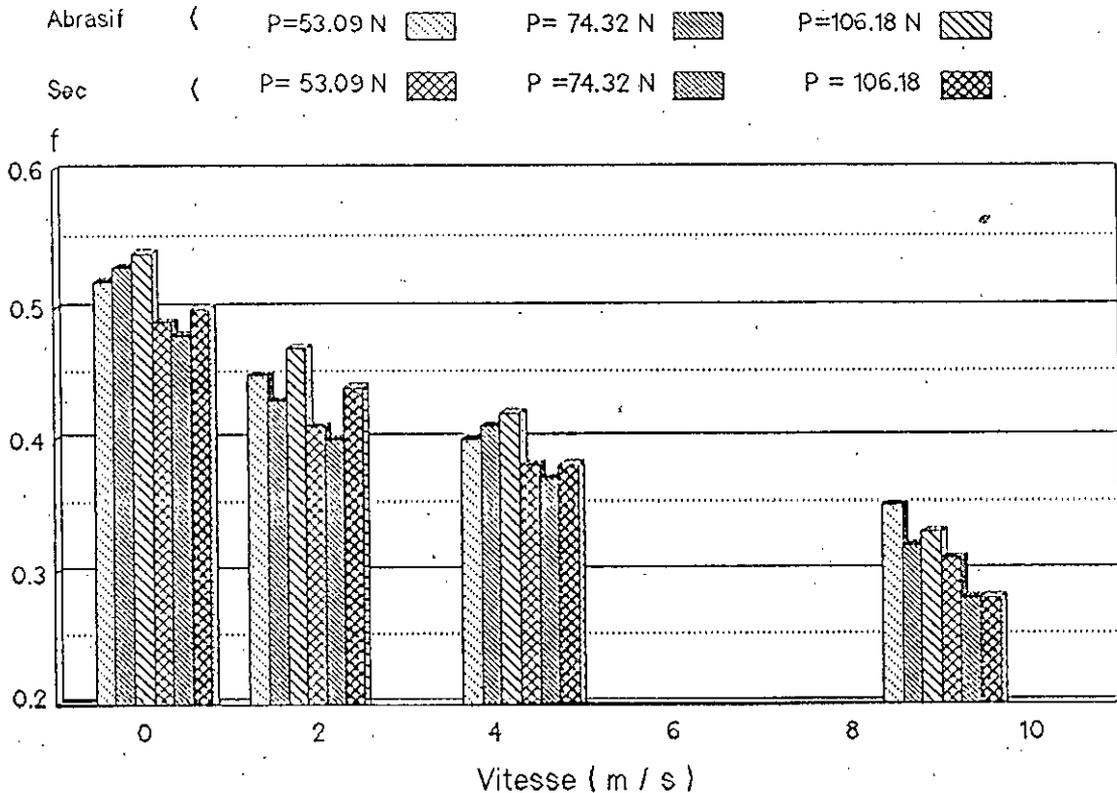


Figure 4-17 : profil typique de l'enregistrement de la force de frottement tangentielle à $P=74.32\text{ N}$, $V=2\text{ m/s}$

Les résultats obtenus, (voir figures 4.18, 4.19, 4.20) indiquent que ces coefficients de frottement sont presque identiques et possèdent des courbes de même allure. Ils diminuent avec la vitesse. Leur valeur en fonction de la vitesse est généralement située entre 0,6 - 0,2 pour l'intervalle de vitesse étudié.

Tout d'abord si nous comparons la variation du coefficient de frottement en fonction de la pression et de la vitesse à l'état sec et à l'état abrasif, nous remarquons de la figure 4-18 que le coefficient de frottement à l'état abrasif est un peu plus grand que le coefficient de frottement à l'état sec. Cela peut s'expliquer par la présence des particules abrasives (SiO_2, Fe_2O_3) incrustées en surface et qui se déplacent librement entre les surfaces du couple. Ces particules possèdent des duretés plus grandes que l'acier et la fonte et par conséquent une augmentation dans le coefficient de frottement du système acier/fonte/abrasif due essentiellement aux rayures des particules d'oxydes à la matière des deux surfaces.

Figure 4.18: Comparaison du Coefficient de frottement (à Sec et Abrasif) de la fonte P14



Quant aux coefficients de frottement des différentes fontes, leurs résultats obtenus, (voir figures 4-19, 4-20) indiquent que les coefficients de frottements des fontes alliées (A14, US et NH57-4) sont améliorés par rapport à la fonte de référence P14 pour des vitesses \neq de l'intervalle [1 -3] m/s, ce qui peut expliquer, leurs meilleures caractéristiques de frottement et d'usure.

Par conséquent l'appréciation du pouvoir du frottement ne pourrait être un facteur déterminant pour la sélection des fontes. Cela est montré par la fonte P27 qui possède un coefficient de frottement élevé, mais enregistre un taux d'usure très élevé. Enfin nous remarquons que le coefficient de frottement n'avait pas de corrélation entre ses valeurs et celles du taux d'usure.

Figure 4-19 :Variation du coefficient de frottement
 $P = 74.32 \text{ N}$

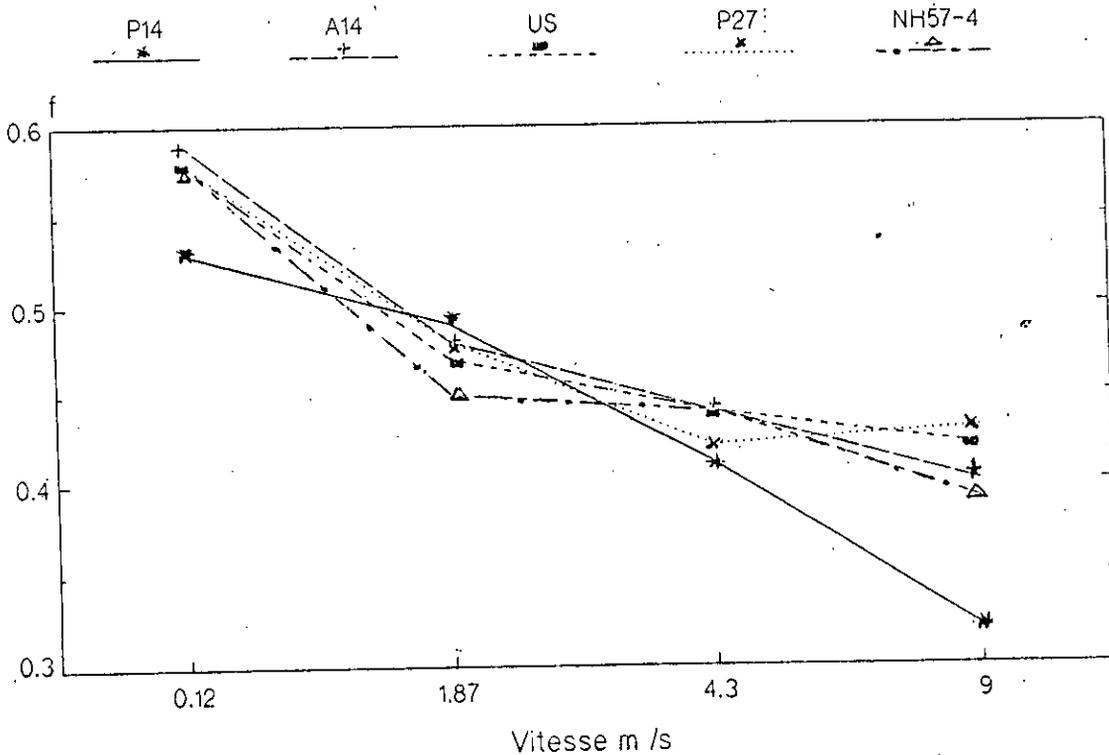
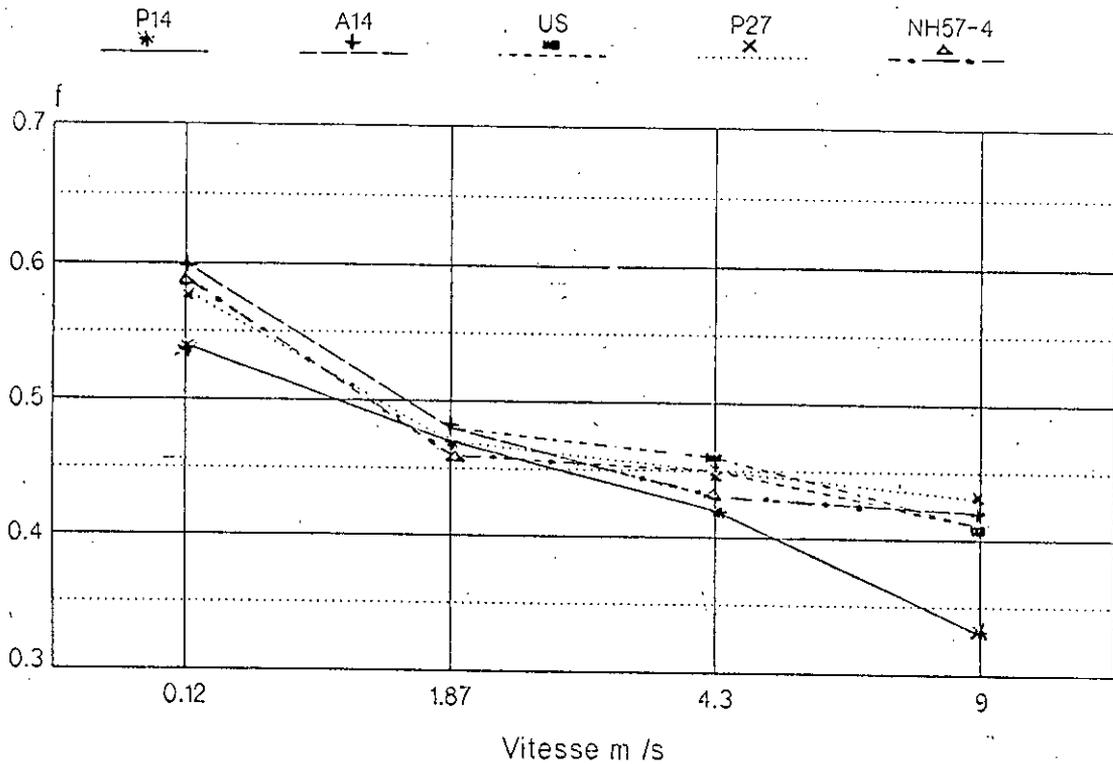


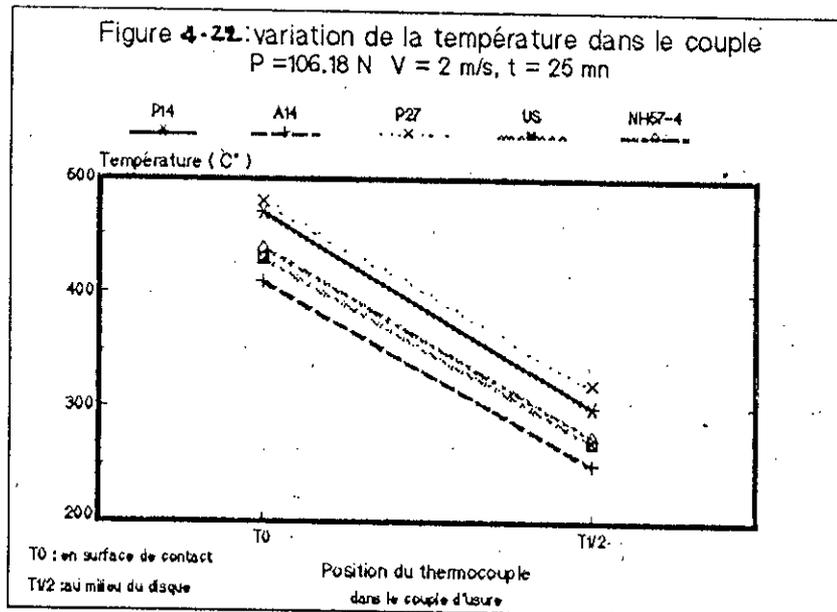
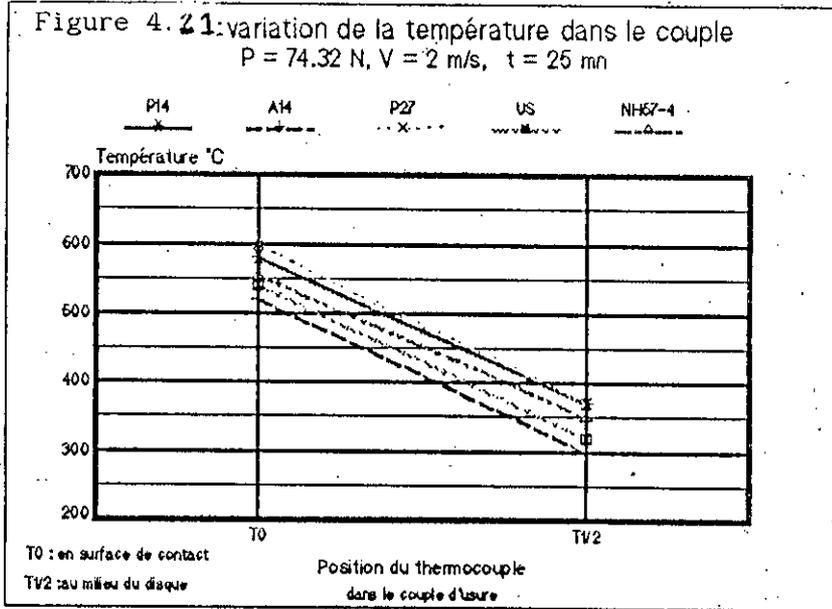
Figure 4-20 Variation du coefficient de frottement
 $P = 106.18 \text{ N}$



4.7.4 - Influence de la température

La lecture de la température au niveau de la surface de contact et à l'intérieur du disque au cours du test d'usure, nous a permis d'étudier la variation de la température en fonction des paramètres dynamiques (P et V) et son influence sur l'usure du matériau du couple. Cette étude nous a permis aussi de comparer les résultats des mesures des températures obtenues sur site industriel à celles mesurées au laboratoire

Vu la nature du dispositif de la lecture de température que nous avons à notre niveau, les résultats des températures illustrées dans les figures 4-21, 4-22 ne sont pas parfaitement exactes.



Ces courbes 4-21, 4.22 donnent la variation de la température au niveau de deux points T_0 et $T_{1/2}$ relevées après un essai de 20 mn. Elles montrent que les fontes phosphoreuses P14 et P27 enregistrent des températures plus élevées que d'autres fontes mises en essai, avec un dégagement important de la chaleur de la fonte P27 qui contient un taux élevée d'eutectique phosphoreux par rapport à la fonte P14. Cela pourrait s'expliquer par la nature et le comportement de l'eutectique phosphoreux envers la température élevée crée par l'effet de la pression et la nature de l'ambiance qui entraînent des microfusions localisées dans la zone de l'eutectique phosphoreux, qui favorise à son tour un dégagement important de la chaleur endothermique due principalement à la fusion de cette phase et par conséquent une augmentation plus élevée de la température en surface de contact et à l'intérieur du disque.

Notons aussi que l'augmentation de la température par la fonte contenant une haute teneur en phosphore a été constaté dans les essais effectués sur site industriel.

Nous remarquons ainsi, pour les fontes qui ne contiennent pas d'eutectiques phosphoreux (A14, US) où celle qui contient peu d'eutectique (NH57-4) elles enregistrent des températures plus basses que les fontes purement phosphoreuses. Ceci peut s'expliquer par le comportement des microphases qui résistent beaucoup mieux à la température élevée que la steadite qui possède des caractéristiques réfractaires médiocres, telles que la température de fusion qui est très basse par rapport aux températures de fusion des carbures.

En conclusion nous pouvons dire que le taux élevé de phosphore dans les fontes grises génère une température importante à la surface de contact et à l'intérieur du disque par l'effet d'usure et frottement, contrairement aux autres éléments qui forment des composés, possédant des caractéristiques réfractaires qui limitent cette évolution dans la température.

4.7.5 - Propriétés Mécaniques

4.7.5.1 - Influence de la température sur la microdureté des fontes

Le phénomène d'usure provoque souvent des augmentations de températures au niveau des surfaces mises en contact. Ces variations de température, selon leur grandeur, causent à leur tour des changements microstructuraux au niveau des surfaces de contacts, tel que l'oxydation, fusion locale,.... etc. Par conséquent, le comportement mécanique des matériaux lui aussi est affecté. A cet égard, nous avons traité thermiquement les différentes fontes à des températures variables pendant 20 mn dans un four électrique puis refroidit à l'air ambiant, afin d'étudier le changement possible des propriétés mécaniques (nombre de dureté) en fonction des microstructures.

La figure 4-23 illustre la microdureté vickers en fonction de la température des différentes fontes. Elle montre que la dureté de certaines fontes comme P27 et P14, diminue notablement avec la température, par contre pour les fontes NH57-4 et US, leurs duretés diminuent jusqu'à la température 400°C puis il y a une remontée rapide à cette température. Nous expliquons cette augmentation dans la dureté vickers par la nature des éléments d'additions, alliées a ces fontes qui vont se précipiter à une certaine température pour donner des microphases et/ou des précipités durs qui à leurs tour vont augmenter la microdureté HV.

En outre de ce fait que ces fontes ont donnée un faible taux d'usure par rapport aux fontes phosphoreuses elles pourront aussi expliquer qu'elles ont subit un traitement thermique durant les essais d'usure et par conséquent, elles vont précipiter des composés durs qui vont augmenter considérablement la dureté de la fonte. Ces composés résistent mieux à l'usure abrasive et diminuent le taux d'usure du matériau.

L'augmentation de la proportion des carbures dans la matrice se traduit par une augmentation de la dureté de la fonte. Cette hypothèse est confirmée par les résultats de microduretés effectuées avant et après le traitement thermique des fontes illustré à la figure 4-24.

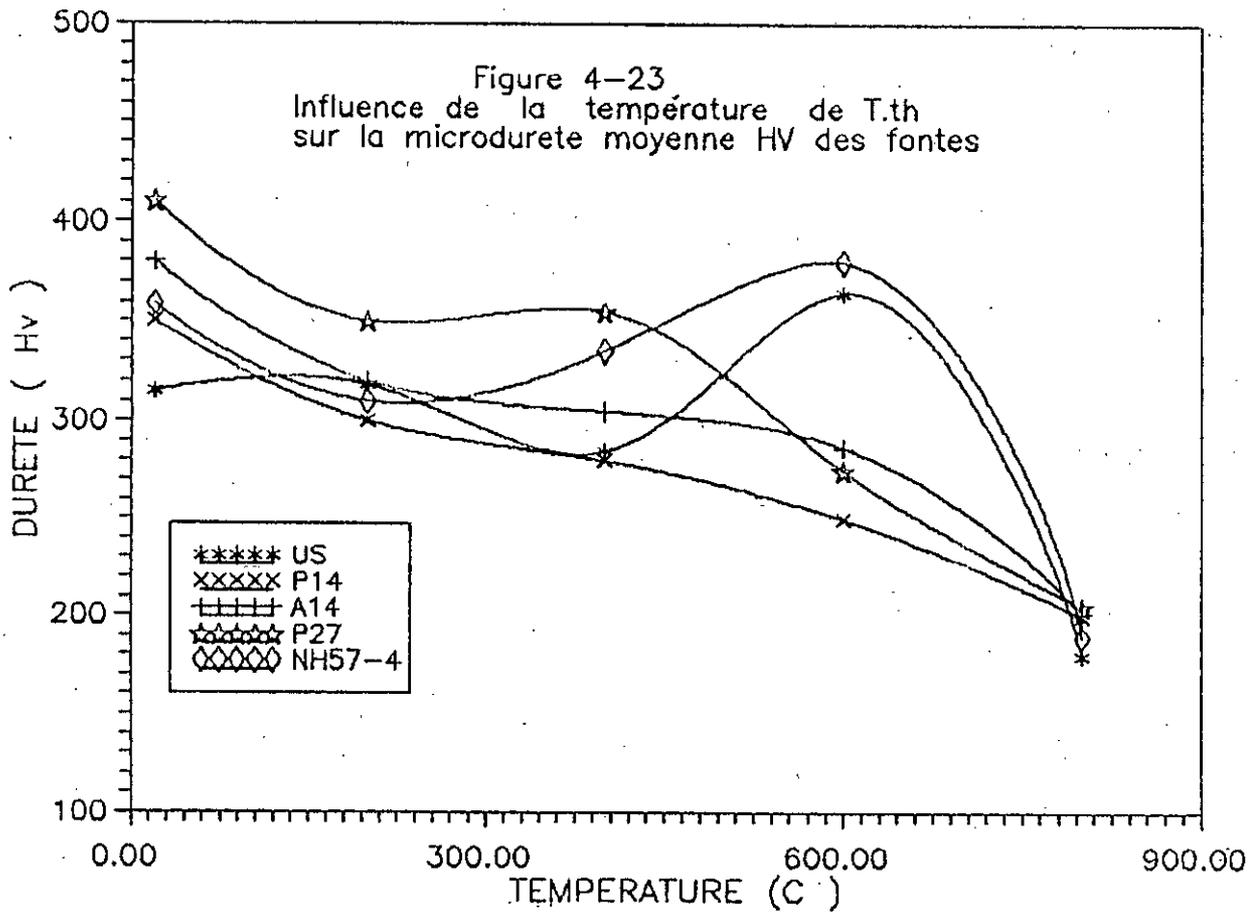
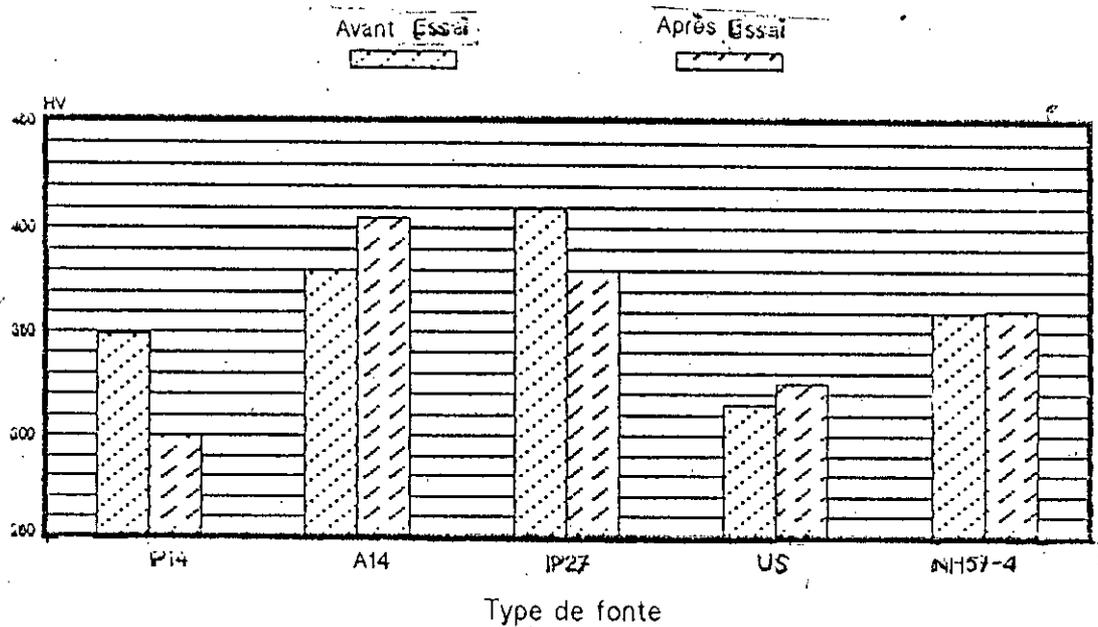


Figure 4-24: Microdureté HV moyenne sur un pas de 0.5 mm
P = 74.32 N V = 2 m/s t = 30 mn



Nous constatons que les fontes qui contiennent que la phase steadite telle que P27 et P14 , leurs duretés diminues après les essais, par contre les autres fontes qui contiennent des carbures de fer et des précipités durs et stables leurs duretés augmentent après les tests d'usures, ceux-ci pourrait s'expliquer par la bonne tenue à l'usure des carbures de fer et des différents précipités formés par traitement de chauffage durant les tests d'usures.

5.6 Etude de l'état des surfaces usées

La figure 4-25 résume les principaux résultats relatifs au comportement des surfaces à l'abrasion des différentes fontes mises en essai.

L'aspect typique des surfaces usées relevé après un essai de 20 mn sous une pression de 74,32 N et une vitesse de 2 m/s, (situation qui représente les conditions sévère des fontes)

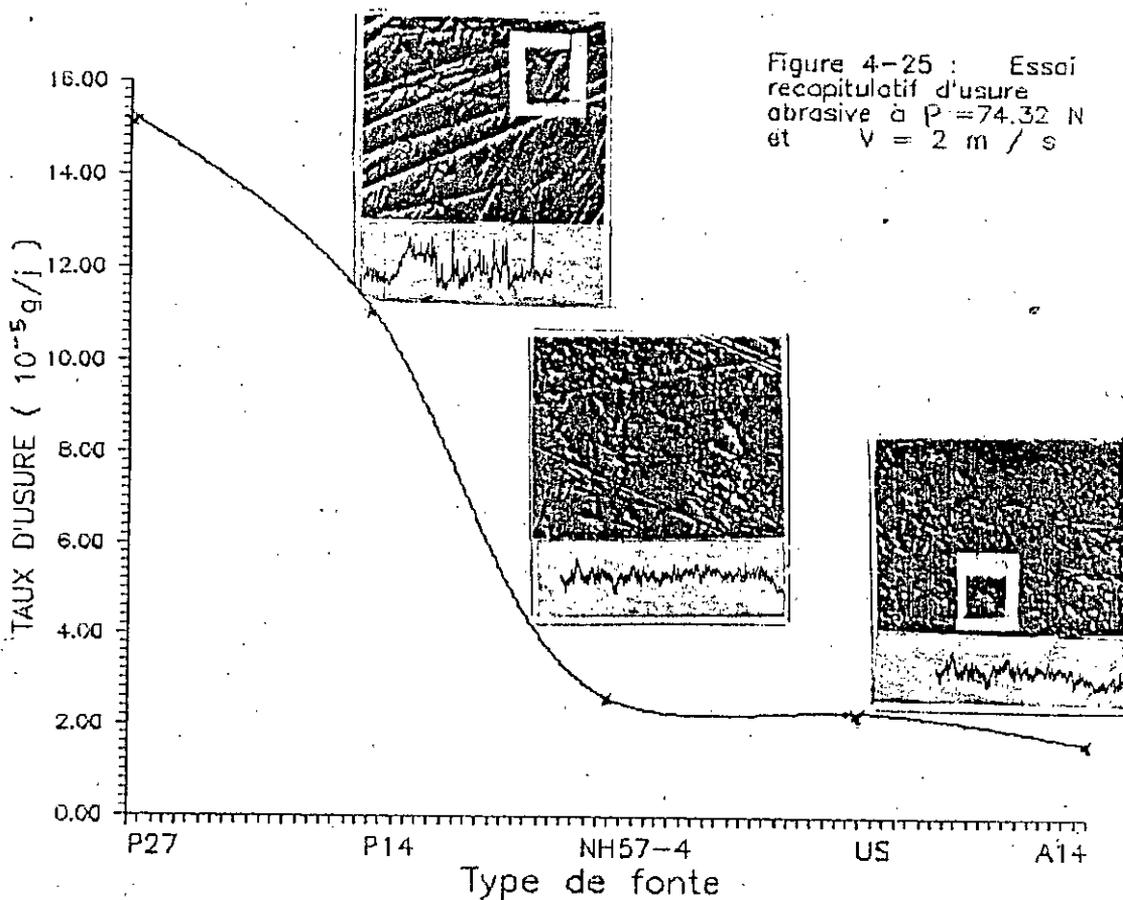


Figure 4-25 : Essai recapitulatif d'usure abrasive à P=74,32 N et V = 2 m / s

On observe pour toutes les fontes des sillons avec des bourrelets latéraux associés aux enlèvements de matière à la rencontre de deux sillons et aussi des zones déformées par des indentations multiples. Aussi en remarque que le pourcentage relatif: sillon / indentation et la qualité de sillon, change d'une fonte à l'autre, en fonction des paramètres qui influencent la résistance à l'abrasion. Les fontes contenant plus de carbures de fer (A14 et US) possèdent moins de rayures contrairement aux fontes phosphoreuses (P27 et P14) qui apparaissent fortement déformées avec des rayures multiples et les écoulements plastiques sont beaucoup plus importants.

De même l'augmentation de la rugosité de la surface favorise l'incrustation momentanée des particules abrasives. Ceci peut même expliquer l'importante variation du taux d'usure et des paramètres caractéristiques de la surface des fontes phosphoreuses.

Les plages encadrées sur la figure 4-25 sont agrandies dans la figure 4-26 montrent la différence de la morphologie de l'écoulement plastique selon les plans considérés: Les plages de phases dures ou eutectiques présentent un aspect lisse avec peu de déformation plastique. Il s'avère que le processus d'enlèvement de matière est dû principalement aux rayures multiples, les plages moins dures étant fortement déformées avec des rayures plus prononcés

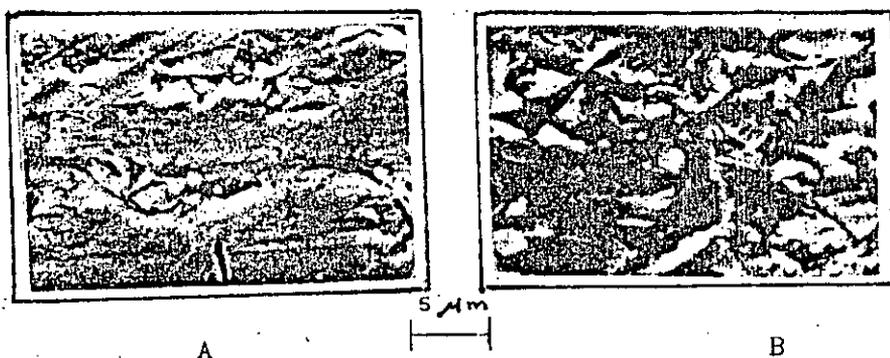


Figure 4-26 : L'état morphologique d'écoulement plastique après un essai de 30 mn

a) Plage peu déformée b) Plage fortement déformée

En générale un carbure peut enlever plus facilement une particule abrasive de son logement occasionnel. Cela montre que la présence des carbures dans les fontes, donne un état de surface qui contient moins de sillon. Leur résistance à l'abrasion est tributaire de la nature des carbures de fer: plus ils sont stables, plus leur résistance s'améliore.

Aussi, la taille relative entre la particule abrasive et la zone perlitique exposée à l'action de l'abrasif est importante et peut influencer vivement la résistance à l'abrasion. Cette taille est réduite par un pourcentage volumique des carbures comme il apparaît schématiquement sur la figure 4-27

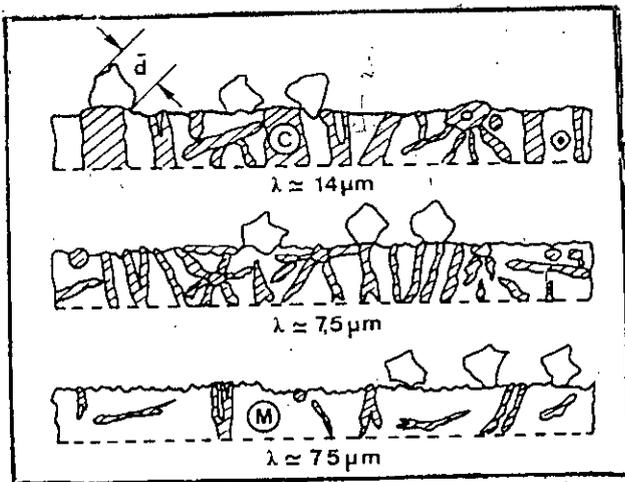


Figure 4-27:

représentation schématique du concept de la taille entre les particules abrasives et les carbures

[55]

Pour voir le comportement d'usure abrasive des carbures mis en évidence dans les fontes en particulier la fonte A14 qui possède une meilleure résistance à l'usure par rapport à la fonte de référence P14, nous avons utilisé la microscopie électronique (M.E.B) pour analyser la surface usée de cette fonte. La méthode de préparation métallographique est décrite par WATSON et MUTTON [56], illustrée à la figure 4-28, A. Cette méthode consiste à préparer une surface usée chanfreinée à 20° de la surface telle que indiquée à la figure 4-20 et de la microstructure adjacente.

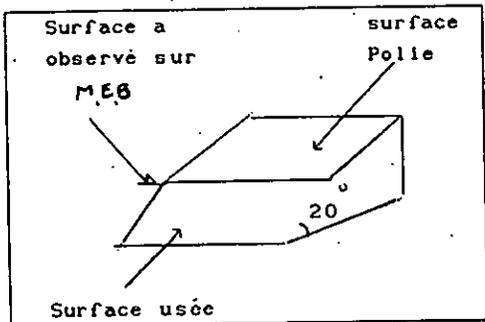


Figure 4-28, A: Principe schématique de la technique d'observation des surfaces usées sur microscopie électronique.

M.E.B [56]

B: Micrographie prise au " M.E.B " montrant l'aptitude à la résistance à l'usure des carbures ($\times 1500$)

La photo métallographique illustrée sur la figure 4-28,B montre que les carbures de cémentite et de manganèse de cémentite (le carbure $(Fe Mn)_3C$ se forme dans les fontes à partir d'un pourcentage de 2 % Mn [57]) possèdent moins de sillons par rapport aux phases d'eutectiques phosphoreux. Cela est expliqué par leur grande dureté qui est supérieure à celle de l'abrasif. Ce résultat peut aussi expliquer la bonne tenue des carbures de fer à la résistance au labourage

4.7.7 - Analyse des particules incrustées

Le degré d'action de la particule abrasive est en fonction du rapport entre la dureté des microstructures et celle de la rainure et /ou en indentation produite par la particule abrasive [39]. Lorsque les particules sont en contact avec la matrice, la fonte ne contribue pas à la résistance à l'abrasion puisqu'elles peuvent être soit enfoncées dans la matrice soit enlevés complètement comme partie d'un coupeau. Néanmoins, s'ils sont en contact avec les phases dures, tels que les carbures de fer elles agissent comme des barrières à l'action des particules abrasives.

La résistance à l'abrasion est à priori proportionnelle à la quantité et à la taille des carbures, ceci étant vrai lorsque les conditions tribologiques imposées ne produisent pas de fissuration ni d'écaillage des carbures [27].

Pour vérifier ce phénomène, nous avons analysé les particules incrustées en surface de glissement de la fonte P27 afin de déterminer la nature, la taille et le mode d'enlèvement de matière. La détermination de la nature chimique des particules incrustées en surface a été réalisée à l'aide de la microsonde du M.E.B. La figure 4-29 représente la surface usée de la fonte P27, montre la présence de particules de silice en petite quantité, enfoncées dans la matrice en grande quantité, par rapport aux particules d'oxydes de fer qui possèdent une grande taille

- 1: Oxyde
de fer
- 2: Silice
- 3: Empreinte
de lamelle
de graphite
- 4: Lamelle
de graphite
en bonne
état.



x (1200)

Figure 4-29 Nature des particules abrasives incrustées observées sur le microscope électronique (M.E.B)

4.7.8 Conclusion

la conclusion de cette partie de l'étude de simulation expérimentale montre que les fontes respectivement A14, US et NH57-4 possèdent des caractéristiques tribologiques (taux d'usure, coefficient de frottement etc...), mécaniques et thermiques meilleures que les fontes phosphoreuses. La cause principale de l'usure prématurée des fontes phosphoreuses (P14, P27) sur site industriel est due à la fusion locale de l'eutectique phosphoreux.

4.8 PRÉSENTATION DES RESULTATS DE SIMULATION DE L'ÉCHAUFFEMENT DES COUCHES DE GLISSEMENT DES SEMELLES DE FREIN

4.8.1 INTRODUCTION

Pour nous permettre d'expliquer les résultats des essais effectués sur un dérivatographe, sur les deux catégories de fontes citées en 4.6.1, nous présentons les différentes études effectuées dans ce domaine.

Dans la première catégorie concernant les fontes phosphoreuses il y a plusieurs études qui ont été faites [58,59] pour simuler le comportement des différentes phases de la fonte et en particulier, l'eutectique phosphoreux aux températures de fonctionnement des semelles de frein.

Pour simuler les processus qui se déroulent dans les fontes phosphoreuses des semelles de frein par l'échauffement dans le régime de freinage, des recherches thermoanalytiques [58] ont été réalisées sur l'eutectique phosphoreux à l'aide d'un dérivatographe à des intervalles de températures comprises entre 20° à 1360°C. Les échantillons de l'eutectique phosphoreux ont été élaborés sous forme de poudre de (1 g), mélangés dans des creusets de fusion (de type: alundum) ensuite ils les ont fait fondre dans l'atmosphère d'argon.

Après la cristallisation dans un milieu inerte le produit élaboré a été chauffé jusqu'aux températures de fonctionnement des semelles de frein. L'analyse des données obtenues montre que l'échauffement de l'eutectique phosphoreux dans l'argon en absence des processus d'oxydation (dans l'air), est linéaire et l'effet endothermique fixe le point de fusion de l'eutectique phosphoreux à 945° C. Par contre sous l'effet de l'échauffement oxydé, qui correspond aux conditions réelles de travail des semelles au moment de freinage à l'air ambiant le début de fusion de l'eutectique phosphoreux se déplace vers de plus basses températures inférieures à 900° C, accompagné d'une violente augmentation de la masse de l'échauffement.

Cette baisse dans la température de fusion est reliée à l'oxydation du Fe_3P et la ferrite (Fe_α) qui compose l'eutectique phosphoreux, et à la formation de nouveaux oxydes possédant une température très basse par rapport à Fe_3P

En plus à des températures supérieures à $> 900^\circ\text{C}$ et à la fin du processus d'oxydation il se produit une décarburation intensive du phosphore qui accélère la décomposition et la fusion du triple phosphore eutectique.

D'autres auteurs [60] se sont intéressés à la cristallisation optique, pour étudier le processus d'oxydation de l'eutectique phosphoreux en fonction de la température. A cet effet ils ont fabriqué des lames minces après un échauffement linéaire suivi d'un refroidissement rapide, de telle manière que la partie oxydée et le métal de base soit séparé par un plan de coupe. La microstructure du Fe_3P après l'échauffement oxydé se compose de deux phases : composante de ferrite Fe_α et le Fe_3P aciculaire. La partie de l'eutectique phosphoreux oxydé après l'échauffement supérieur à 1000°C se compose en trois zones:

- Intérieure: limitée par le métal
- Centrale
- périphérique.

Dans la zone intérieure qui est située près de la base métallique, plusieurs oxydes ont été formés tels que:

- les phosphates de fer de composition variable $\text{Fe}_3(\text{Po})_4$ et FePo_4
- la magnétite Fe_3O_4 de forme arborescente/ou (dendritique).

La zone périphérique de la partie oxydée du phosphore eutectique est représentée par une couche continue d'hématite (Fe_2O_3).

Peu d'études, ont été réalisées dans le dérivatographe ou autres appareils pour simuler le comportement des phases dures formées par les éléments d'addition (≠ du phosphore), visi à vis de l'intervalle de température de chauffage (simulant la température de travail des semelles de frein).

Ce cas, est présenté dans notre étude par les fontes de la deuxième catégorie (A14, US et NH57-4) qui contient les éléments d'addition suivants: Cr/V/Ti/Mn/... etc

4.8.2 - INTERPRETATION DES RESULTATS D'ANALYSES DILATOMETRIQUES

Les courbes d'échauffements des différentes fontes effectuées sur le dérivatographe sont représentées aux figures 4-30, 4-31

Ces courbes ont montré l'existence d'un processus d'oxydation des différentes phases qui constituent les fontes. La variation d'échauffement de ces courbes est assez remarquable par les effets de décomposition du phosphore eutectique.

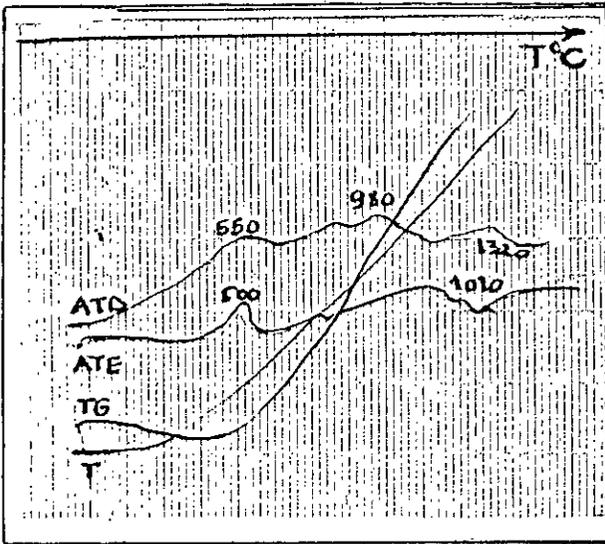
Les transformations thermiques dans les fontes ont été réalisées dans un intervalle des températures comprises entre (560° - 1000°)C, correspondant au travail des semelles de frein dans le régime de freinage [50], à l'aide d'une comparaison entre les courbes d'échauffements ATD et ATE.

4.8.2.1-Présentation de la première catégorie des fontes

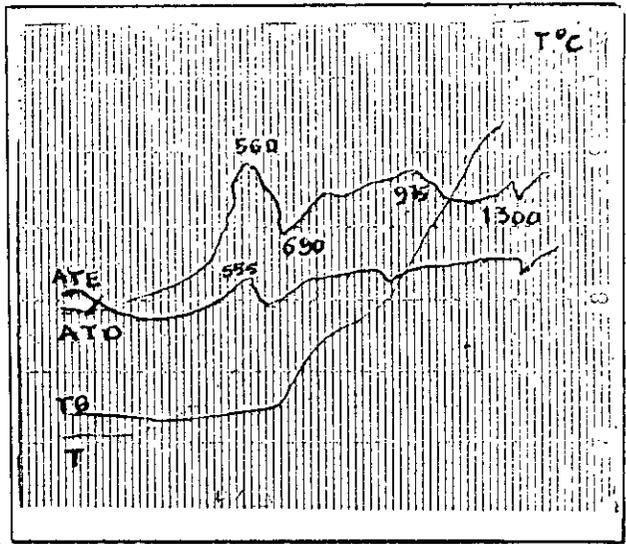
Les premiers effets exothermiques dans l'intervalle 555° C-600° C correspondent aux vitesses maximales d'oxydation du fer. Ces vitesses diminuent par la suite par effet d'une formation d'une couche d'hématite Fe_2O_3 qui arrête l'oxydation du fer. Ce phénomène est clairement mis en évidence par les courbes ATD de la figure 4-30 qui montrent une diminution graduée de la masse des fontes phosphoreuses aux environs 600 -700° C

Pour les températures subséquentes, des changements structuraux se produisent: décomposition de la phase perlitique, transformation paramagnétique du fer défini par le point de Curie, mentionné par un petit effet endothermique à pente douce sur les courbes ATA sous la température 760°C.

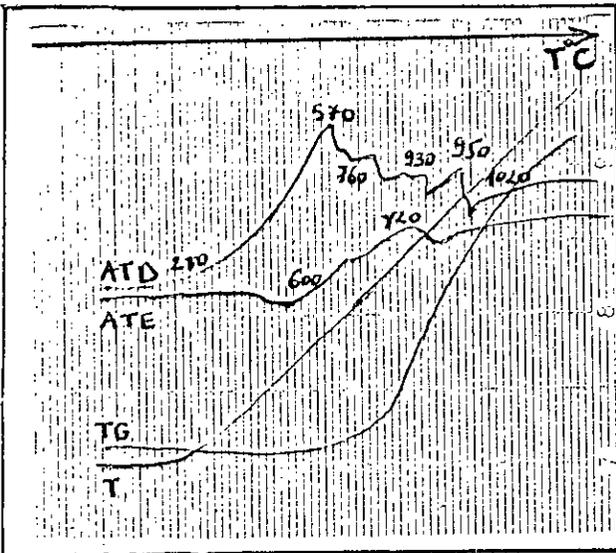
L'augmentation par la suite de la température sur les courbes d'échauffement ATD et ATE se traduit par une diminution pondérale et dimensionnelle. Cela est due à la décomposition du phosphore eutectique triple et en même temps à l'oxydation du phosphore de fer avec la formation des phosphates [37,61]. Cette oxydation est accélérée ensuite avec l'augmentation de la quantité du phosphore par diffusion.



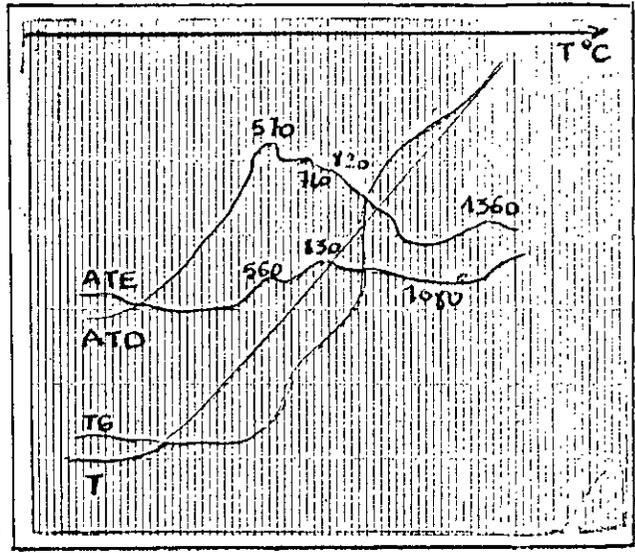
a : fonte (P6)



b: fonte (P10)



c: fonte (P14)



d: fonte (P27)

ATD: Courbe de variation pondérale
 ATE: courbe de variation dimensionnelle
 TG: courbe de variation de gaz dans l'enceinte
 T : courbe de variation de la température

Figure 4-30 : Analyse dilatométrique des fontes phosphoreuses

Contrairement aux fontes phosphoreuses P10, P14 et P27 qui ont enregistré un effet exothermique (diminution en masse), la fonte P6 ne marque pas cet effet exothermique (voir *figure 4-30, a* : courbe ATD). Nous expliquons cela par la proportion très faible de la phase eutectique phosphoreux existante dans la matrice de la fonte. Cet effet exothermique constaté réellement au moment où l'énergie est suffisante pour commencer la décomposition de l'eutectique phosphoreux. A partir de ce dernier résultat nous remarquons que la dimension d'effet exothermique se trouve dans une relation directe par rapport à la quantité du phosphore dans la fonte.

Aux températures 960 -980°C pour les échantillons contenant plus de 2 % de phosphore, les effets exothermiques caractérisés par une fusion d'eutectique phosphoreux pseudo-double ($Fe_3P-\alpha Fe$), qui se traduisent par un vif début de fusion à 880°C et se termine par une décomposition du phosphore eutectique accompagné d'une fusion à 980°C dans l'échantillon de la fonte (voir la *figure 4-31, d*).

A partir des résultats des études faites sur le comportement des volumes des couches d'oxydes superficielles du métal des fontes phosphoreuses (avec une teneur supérieure à 2% P [58]) et les résultats de notre étude faite sur le dérivatographe on constate que, d'une part l'eutectique phosphoreux joue un rôle essentielle dans la formation des couches superficielles des semelles de frein, qui possèdent des natures élevées de stabilité en grippage à basse température [54]]. Mais d'autre part la température élevée auquel est soumise la semelle de frein, facilite l'accélération de l'effondrement de la matière, et ce, suite à la décomposition et à la fusion de l'eutectiques phosphoreux à des différents dérivés par oxydation aux températures de travail sévères.

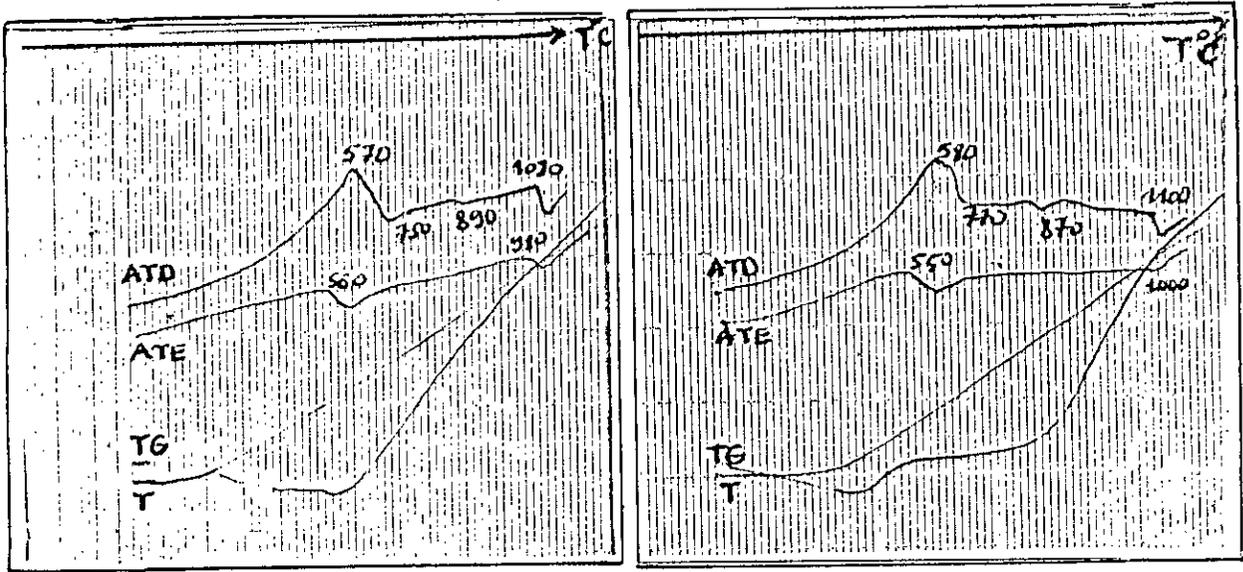
4.8.2.1 - Interprétation de la deuxième catégorie des fontes

Dans la deuxième catégorie des fontes A14, US et NH. 57-4. constituées des carbures plus dures et plus stable que l'eutectique phosphoreux, nous constatons dans la figures 4-31 qui donne les courbes dilatométriques pondérales et dimensionnelles obtenues à l'aide d'un dérivatographe, qu'il y a les mêmes phénomènes exothermiques trouvés dans les fontes phosphoreuses dans l'intervalles 500 - 670° C, avec un petit décalage du point de Curie entre 770° -780°C. Au delà de cette température nous remarquons qu'il y a une nette augmentation dans la courbe dilatométrique, puis une stabilité dans la forme jusqu'à une température élevée d'environ 1000°C. Cette stabilité dans l'allure des courbes peut s'expliquer par l'absence de l'effet exothermique constaté dans les fontes phosphoreuses dû à la fusion et à la décomposition en plusieurs formes de l'eutectique phosphoreux, ainsi qu'à la stabilité des carbures aux changements de phases durant l'augmentation de la température qui simule la température de travail des semelles de frein sur site industriel. Ces fontes se comportent comme des matériaux réfractaires et stables aux températures supérieures à > 900° C notamment la fonte A14 et US qui gardent cette stabilité aux températures plus élevées (voir la figures 4.31, a, c). De ces faits nous pouvons expliquer leur bonne tenue à la résistance à l'usure abrasive par rapport aux fontes phosphoreuses.

5.1.3 Conclusion

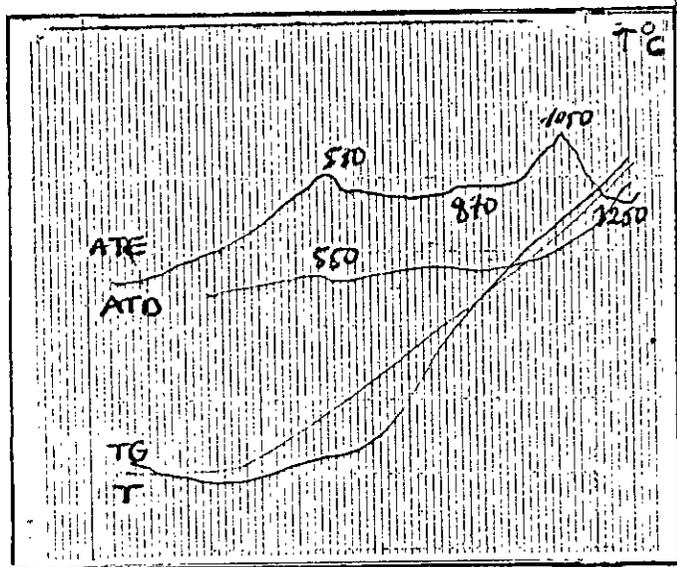
L'étude des propriétés thermiques de différentes fontes, en fonction de la température et du comportement tribologique des phases microstructurales a permis de tirer les conclusion suivantes:

- la perte de matière, est due à l'effondrement de la steadite
- la mauvaise tenue de la steadite à l'usure abrasive à chaud
- une meilleure tenue des carbures de fer à l'usure abrasive à chaud.



a: fonte (US)

b: fonte (NH57-4)



c: fonte (A14)

Figure 4-31 : Analyse dilatométrique des fontes (A14, US, NH57-4)

CONCLUSION GENERALE DE L'ETUDE DE SIMULATION

L'étude des propriétés (taux d'usure, Coefficient de frottement, température, microstructure et état de surface etc...) pour différents paramètres dynamiques (P et V) en présence d'une ambiance abrasive, ainsi que l'étude d'analyse dilatométrique a permis de montrer que:

- la présence de l'abrasif, augmente le taux d'usure du simple au triple pour le pion, et du simple au double pour le disque
- à 350°C il y a un changement dans le mécanisme d'usure
- l'augmentation du % P augmente le taux d'usure et développe des températures beaucoup plus élevées.
- l'élévation de la température a une influence sur la fusion locale des fontes phosphoreuses telle que la steadite
- La précipitation des carbures aux cours du freinage dû à l'augmentation de la température de contact augmente la proportion globale des carbures dans la matrice dans la fonte.
- la présence des phases dures et réfractaires en petite quantité, améliore la résistance à l'usure.

Globalement, les meilleurs résultats sont obtenus pour les fontes (tel que A14, US) qui contiennent des phases dures stables et possèdent des performances réfractaires en températures élevées et résistent mieux contre l'agression des particules abrasives.

4.10- COMPARAISON DES RESULTATS D'ESSAI EFFECTUES EN SITE PAR RAPPORT AUX ESSAIS DE LABORATOIRE

Les conditions expérimentales et le mode opératoire, des essais effectués sur site industriel et en laboratoire sont pratiquement les mêmes, c'est à dire: l'environnement et les conditions dynamiques de freinage du couple: semelle / roue utilisé en ligne minière, sont simulés en laboratoire par l'usure abrasive d'un pion en fonte sur un disque en acier. La comparaison des matériaux testés dans les deux cas (site et laboratoire) se limite dans les fontes phosphoreuses et la fonte A14 testée après la réalisation de la simulation expérimentale.

Cette comparaison sera basée sur certains paramètres opératoires tels que : *L'abrasivité, la température et le taux d'usure*

4-1- Influence du milieu abrasif sur la durée de vie des organes

Les figures 3-15, 3-17 citées dans le CHA III 3-8 donnent la structure métallographique prise à partir des surfaces usées (observé sur microscope électronique à balayage MEB) sur site industriel. Elles montrent l'influence des particules abrasives, qui jouent le rôle d'un troisième corps qui dégradent le matériau par l'incrustations des particules abrasives dans les surfaces molles et l'arrachement de la matière du couple d'usure.

Nous avons trouvé dans le cas du site industriel que les particules de silice et d'hématite jouaient un rôle fondamental dans la dégradation de la matière des semelles de frein et des roues du train. Par ailleurs sur les fontes utilisées en essai de simulation expérimentale, nous avons constaté que le même phénomène d'incrustation et d'arrachement trouvé sur site industriel sur les surfaces usées se répète sur ces fontes, notamment les fontes phosphoreuses (P14 et P27).

Ces dernières fontes possédaient un comportement similaire aux fontes P6, P10 et P14 mises en essai sur site industriel (voir figure 4-29 4-7-7 CHAPITRE IV).

Sur les autres fontes (A14,US et NH57-4) les surfaces usées possédaient moins d'incrustation et d'arrachement de particules. Cela, comme nous l'avons expliqué auparavant, est dû à la nature microstructurale et comportement de ces fontes face à l'abrasion.

La comparaison de dégradation du matériau entre la roue utilisée sur site industriel et le disque simulé en laboratoire, a permis de montrer que la durée de vie des roues utilisées en voie normale (c'est à dire sans la présence des particules abrasives) est le double que celle des roues utilisées en voie étroite y compris la ligne minière (présence de sable et de minéral comme troisième corps abrasif voir 3-5 CHA III). Ceci est comparable aux tests d'usures en laboratoire qui montrent que le taux d'usure abrasive des disques varie de 1,5 à 2 fois plus grand que l'usure à sec. (voir 4-7-2 CHA IV)

4-2- Influence de la nature des matériaux sur la température du couple d'usure

Les essais effectués sur site industriel sur plusieurs semelles de freins contenant un taux variable de phosphore avec une microstructure différente, ont montré que les semelles à haute teneur en phosphore dégagent une chaleur importante au cours du frottement et usure. Ces semelles vont à leur tour augmenter la température au niveau de la semelle de frein et à l'intérieur de la roue (voir la figure 3-22 CHA III). Ce même résultat est confirmé en frottant plusieurs fontes sur un disque en acier, en remarquant que les fontes phosphoreuses en particulier et la fonte NH57-4 (contenant les deux types de phases dures: Steadite et les carbures de fer) dégagent une chaleur plus importante que les fontes qui ne contiennent pas l'eutectique phosphoreux. L'effet de la chaleur fait augmenter la température en surface de contact et à l'intérieur du disque (voir figure 4-21. CHAP IV).

Cette augmentation de la température dans le couple d'usure contribue énormément à la dégradation des matériaux par usure abrasive [6].

4-3 - Comparaison des taux d'usure des fontes

Avant de réaliser l'étude de simulation expérimentale en laboratoire, nous avons testé sur site industriel trois types de semelles en fontes phosphoreuse ayant différent taux de phosphore (P6, P10 et P14). Nous constatons que la fonte subit une usure prématurée, malgré la normalisation de la composition des fontes mises en essai, telles que la fonte phosphoreuse équivalente à P14 utilisée couramment sur site industriel et la fonte P10 qui contient une quantité de phosphore moins élevée. Après les essais de simulation réalisés au laboratoire, nous avons essayé sur site industriel la fonte à haute teneur en phosphore P27, ainsi que la fonte A14 pour comparer le taux d'usure. La comparaison du taux d'usure est limitée pour les fontes (P14, P27 et A14) et cela est due à la disponibilité de la fonte grise élaboré par El Hadjar. Cette fonte élaboré par El Hadjar contient un taux élevé en manganèse qui nous a permis de confectionner des semelles de freins à l'échelle réelle. Par contre la cause principale qui a empêché la réalisation des essais de freinages sur site industriel pour les fontes NH57-4 et US, est due à la non disponibilité des éléments d'alliages en grande quantité. La mauvaise tenue des fontes phosphoreuses à l'usure abrasive signalée dans les essais de simulation est confirmé par l'essai de freinage de la semelle P27 qui a développé un taux d'usure plus élevé et une grande agressivité des semelles sur les roues que la fonte de référence P14. En outre ont montré que la fonte A14 de la semelle de frein se maintenait en service jusqu'à 7 semaines alors que l'utilisation de la semelle de frein P14 sur site industriel ne durait que 2 à 3 semaines

Les résultats que nous avons obtenu nous permettent de sélectionner le meilleur produit à utiliser sur site industriel en se basant fondamentalement sur le travail de simulation expérimentale.

Conclusion générale

V CONCLUSION GENERALE

Ce travail a porté sur la mise au point d'un produit servant l'organe de freinage d'un train sur une ligne minière. Le but est d'améliorer les performances tribologiques des semelles de frein. Cette étude devait donc avoir une double approche scientifique et technologique. Dont cet esprit nous avons d'abord sélectionné les matériaux et le milieu à simuler en laboratoire par l'intermédiaire d'une étude théorique et une étude sur site industriel. Notre étude a donc comporté deux grandes parties qui contiennent chacune plusieurs phases essentielles.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à étudier les différents paramètres intrinsèques et extrinsèques des matériaux qui influent sur les principaux types d'usure, en particulier l'usure du couple acier/fonte. Cette étude théorique nous a permis de montrer que le couple d'usure doit acquérir des propriétés (Physiques, chimiques, mécaniques, ...etc) adéquates qui puissent être adaptées aux conditions de sollicitation rencontrées sur le site industriel (usure abrasive, choc thermiqueect).

Dans un deuxième temps nous avons orienté notre travail au moyen d'une étude analytique, comprenant l'influence des paramètres internes (rôle des éléments d'additions dans la formation des phases dures dans les fontes tels que Mn, Cu, Ti, V, P, Cr ..etc.) des matériaux sur la performance des semelles de frein, afin de déterminer des fontes capables de prévenir ou de diminuer la dégradation des matériaux simulant la semelle de frein au laboratoire.

Cette étude analytique nous a permis de dégager quatre fontes de microstructures différentes:

- les deux premières A14 et US contiennent des phases dures en carbures de fer de nature différente (lamellaire et globulaire)
- les deux autres, l'une P27, contient une seule phase dure en eutectique phosphoreux et l'autre fonte NH57-4, contient deux types de phase dure, eutectique phosphoreux et carbure de fer en proportion différente

Dans un troisième temps nous avons effectué des tests de freinage sur trois types de fontes phosphoreuses contenant un taux variable de phosphore sur le site industriel, pour déterminer :

- le comportement des matériaux envers le freinage en conditions sévères
- la nature du milieu constituant le site industriel qui doit être simulé au laboratoire.

Ainsi, nous avons déduit que :

- les semelles subissent toujours des usures prématurées malgré la normalisation de la composition chimique des fontes phosphoreuses.
- le comportement néfaste des semelles à haute teneur en phosphore sur l'élévation de la température à l'intérieur de la roue a amplifié l'endommagement du couple de freinage par usure.
- le milieu se limite dans notre cas dans l'abrasion à chaud des principaux oxydes d'hématite et silice en différente proportion.

Il s'avère de ces résultats que notre approche en simulation expérimentale consiste à prendre la fonte P14 normalisée comme étant un produit de référence et que l'oxyde d'hématite mélangé avec la silice comme des particules abrasives à chaud en simulant le site industriel.

A partir des résultats obtenus, dans les deux premiers chapitres, concernant le choix des fontes à simuler en laboratoire et celles des résultats de la formulation du milieu et du matériau de référence obtenus à travers l'étude effectuée sur site industriel, nous avons dans un quatrième temps établi une simulation expérimentale sur la machine pour étudier le comportement de l'usure abrasive à charge et vitesse variable des quatre fontes choisies, comparativement à la fonte de référence utilisée sur site industriel. Nous avons déterminé que :

- la cause principale de l'usure prématurée des fontes phosphoreuses et en particulier la fonte de référence P14 utilisée sur site industriel est due au mauvais comportement de la steadite Fe_3P vis à vis des conditions sévères du site industriel.

- les conditions de dégagement de la chaleur et l'augmentation de la température amènent la phase eutectique à se ramollir et se détacher par fusion.

- la présence des particules abrasives incrustées dans les phases molles au cours de l'augmentation de la température, facilitent le grippage et l'arrachement de la matière, ce qui résulte à la fin à l'effondrement du matériau mis en jeu.

comparativement à la fonte phosphoreuse de référence P14, les fontes A14 et US contiennent des carbures durs et stables, ont montré :

- une bonne résistance à l'agressivité des particules d'oxydes de fer et de silice, en se comportant comme des barrières à l'incrustation des particules et l'arrachement de la matière
- une meilleure propriété réfractaire résistant au choc thermique dû à l'augmentation de la température par l'effet de frottement
- un meilleur coefficient de frottement et un bas taux d'usure
- en générale, une meilleure résistance à l'usure abrasive à chaud.

Vu le bon comportement de certaines fontes et le mauvais pour d'autre à l'usure abrasive à chaud, nous avons tenté dans un cinquième et dernier temps dans un but plus fondamental d'obtenir des informations sur les mécanismes de transformation des différentes phases constituant ces fontes, sur un intervalle de température qui simule l'intervalle de température de travail des semelles de frein sur site industriel. Nous avons donc, au moyen des courbes dilatométriques obtenues sur un dérivatographe couplé, montré d'une part que les fontes phosphoreuses contenant des taux variables de phosphore avaient une grande instabilité à partir de la température 560°C due aux décompositions de la steadite sur plusieurs formes dans l'intervalle 560°C - 800°C et à la fusion à partir 800°C , et d'autre part, nous avons trouvé que les courbes dilatométriques des fontes contenant des carbures de fer, avaient une stabilité dans l'intervalle de 500°C - 1000°C qui représente l'intervalle de température de travail réelle des semelles de frein au cours de freinage sur site industriel.

Ces résultats ont permis de confirmer et d'expliquer l'effet néfaste de la steadite en grande quantité dans les fontes en frottement et usure abrasive à chaud et d'approuver le bon comportement des carbures de fer dans les fontes en usure abrasive à chaud.

D'un point de vue technologique, après confirmation des tests d'usure et frottement des matériaux en laboratoire suivant son comportement vis à vis des caractéristiques physico-chimique, thermique et tribologique, nous avons essayé sur site industriel la fonte A14. Cette fonte a donné satisfaction puisqu'il y a une nette augmentation dans la durée de vie.

En effet, le changement des semelles en fonte P14 utilisée sur site industrie se faisait tous les 2 à 3 semaines, alors que la fonte-A14 se maintenait en service jusqu'à 7 semaines.

Malheureusement les fontes (US, NH57-4) qui ont donné de bons résultats au laboratoire par rapport aux fontes phosphoreuses n'ont pas été essayé sur site industriel. Ceci est dû à la non disponibilité des éléments d'addition en grande quantité qui aurait permis l'élaboration des semelles à l'échelle réelle

Nous recommandons donc d'une part pour compléter cette étude sur le plan fondamental de réaliser:

- des essais de freinage sur site pour les deux fontes qui restent (US, NH57-4) afin de les comparer avec les résultats de laboratoire

- une étude détaillée au aboratoire sur couple d'usure, en faisant varier la nature du matériau disque et celle du pion dans les conditions similaires au site industriel.

D'autre part sur le plan pratique nous recommandons:

- de remplacer la rainure d'attachement de la semelle de frein en fonte par une autre en acier liée à l'armature de la semelle de frein, afin de diminuer la fragilité de la semelle et d'éviter le détachement brusque par rupture de la semelle au cours de freinage

- de substituer le matériau métallique par un autre non métallique tel que le compositeetc

- de travailler en dehors des vitesses critiques $\left(\begin{array}{l} V < 2 \text{ m/s} \\ V > 4 \text{ m/s} \end{array} \right.$ pour éviter le taux d'usure élevé.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] N. Bacha
TH. MASTER en Sci-des Mat/ Université de Sherbrooke, 1986
- [2] (F.P) BODWEN ; (D) TABOR
Mechanical Wear, Bruwell. Amer. Soc. Metals, Janv 1950 Chap VII
P:117-120
- [3] (N.C) Welhs
The dry wear of steels. The general pattern of behavior, Phil. Trans
Rov Soc London série A257 1965 P 37-70
- [4] (A.) JOUAN
Aspects des surfaces frottantes suivant les modes de dégradation
et d'usure TRAIT. THERM. // 1987 P:87-96
- [5] (E.) HOULLE; (L.) PERODEAU; (J) LOT; (L) BRANTUS; (R.) DAEMEN
Le rechargement anti-usure, présentation de trois cas
industriels. SOUDAGE TECHNIQUE ET CONNECTION 1978 P : 183 -198
- [6] J. BRENOT ; J. SAVERNA ; J.M SCHISSELER ; J.P. CHOBOUT
Aspect métallurgique de la résistance de quelques alliages à
l'abrasion à chaud ou à 20 ; INDUS. MINE. MINE. CARR 198 P:24-30
- [7] R. LÉVEQUE
l'amélioration de la résistance à l'usure par le couple matériau
traitement thermique T. TH 1987 P : 33 - 40
- [8] E. TAKEUCHI
The Mechanisms of Wear of Cast Iron In Dry Sliding WEAR, 11, 1968
- [9] E. TAKEUCHI
The mechanism of sliding wear of lubricated flake graphite cast
iron. WEAR, 15 1970 P : 201 - 208
- [10] OKOSHI ; SAKAI
Mechanisms of wear cast iron in dry sliding. Wear 1970, P:201-212
- [11] S.C. LIM ; F. ASHBY ; J.H. BRUNTON
The effects of sliding conditions on the dry friction of
materials. ACTA METALL, 37; 1989 P : 767 - 772
- [12] G. COLIN
Les mécanismes de l'usure et de frottement; T. TH 1987 P: 79-86
- [13] I. GUILLOT ; G. ARMANET ; Ph. FLUZIN
Comportement à haute température : oxydation / usure, des aciers
inoxydables. MEM. ETUD. SCIEN. REV DE METAL ; Sep 1989 p : 489
- [14] J. J. STOBO
Comments on " the unlubricated Wear of cast irons ".
WEAR. 65 1980 P : 131 - 133
- [15] V. BANKARUSAMY and KISHORE
Wear of Gray Cast iron. WEAR: 86, 1983 P : 173 - 175
- [16] (T. H) KOSEL; (N.F). IOR
Abrasive Wear in multiphase microstructure
J. MATER. ENERGY. SYST 1981 vol 3P : 7 - 27
- [17] J-BLOUQUET
Etude de l'usure abrasive à trois corps en site, au banc sur
tribomètre alternatif, des fontes et des aciers à cylindres
des moteurs diesel utilisés en environnement saharien ;
TH. DOCT-ING SCI MATER/INST SUP DES MATES ET CONST MECA 1987
- [18] A. JOUAN
Aspect des surfaces frottantes suivant les modes de dégradation
et d'usure ; T TH 1987 P : 87 - 96

[19] BIASOLIE DE MILLO

Structures Métallurgique et caractérisation de l'abrasion
des alliages de fontes blanches au chrome
TH DOCT -ING /GRONOBLE I.N.P/1983

[20] (T.) HISAKADO ; (S.) NARAHASHI

Mechanisms of solid contact and formation of wear
particles in boundary lubrication, 2 contact between a hard
disk (FCD60) and a softer pin (CFRM). JOURNAL OF JAPAN SOCIETY
OF LUBRICATION ENGINEERS):28, 1983 P : 663-670

[21] S. SCHISSTER

Les deuxième journées de l'abrasion ; METAL et CONST.MACA JUILLET
AOUT 1972 P:35 -43

[22] (D.M.) ROWSON

THE INTERFACIAL SURFACE TEMPERATURE OF A DISC BRAKE;
WEAR . 1978 P : 323 - 328

[23] J. BLOUET

Usure ; TECH. de L'ING vol: M1980 , 1988

[24] J.M.SCHISLER ; JP CHOBOUT ; P.BRENOT

L'austénite dans les fontes à graphite sphéroïdale traité
thermiquement et son rôle dans l'abrasion. T. TH 1987 P :

[25] JOSE

Structure métallurgique et caractéristique de l'abrasion des
fontes blanches au chrome ; THES. DOCT-ING 198

[26] (B) GIOVANOLA ; (G) ZAMBELLI

Mécanisme d'usure par abrasion et microstructure de la fonte
grise ; Mem.Etud. Scie.Rev Métallurgie. 1982 P : 375 -380

[27] (K.-H) ZUM GHAR

How Microstructure Affects Abrasive Wear Resistance
MET. PROGR. 1979 VOL :116 P.:46 - 52

[28] (B. J) CHAPMAN ; (G.) MANNION

J. FOUNDRY TRADE. Titanium-bearing cast irons for automotive
breaking applications ; 1982 P : 235 - 237

[29] GIESSEREIFOSCHUNG

Einfluss von phosphor und schwefel in bremskloetzen aus guesseisen
auf der reifenbildung der reifen von scheinenfahrzeugen (DUTSCH)

[30] QUILLET

Encyclopedie des sciences industrielle ; QUILLET

[31] A. BIAZILLO

Le freinage: Tech-Ing vol: M1250 1989

[32] SNTF

Influence de l'effet de l'ensablement sur le matériel roulant.
Document d'un séminaire 1991

[33] S. FALLA ; G. MAGER

Les Semelles de frein en fonte grise phosphoreuse.REV.GE DE CHE
DE FER, vol 108 ;1989 P : 43 - 45

[34] JJ.CAUBE

Théorie et pratique industriel de frottement ; 1973.

[35] RABINOWICZ

Wear, friction and lubricated Handbook of tribology 1986

[36] S.K. RHEE and R.T DuCHAME

The friction surface of gray cast iron brake rotors
WEAR, 1973 P : 271-273

[37] P.BROQUET

Fontes Spcialiles allies. TECH.DE L'ING.Tr-Met 1988

[38] U.I.C

Spécification technique pour la fourniture de semelle de fonte phosphoreuse ; 832 R, 1979

[39] B.WEAVING

Environmental considirations in the selection of friction materials for rail applications. C172/79, 1979 P : 159 - 165

[40] S/ Shri S.Chaubey, K.S. Singh, M.N.Roy and A.K.Bhakat

Development of Better Wear Resistant Material for Brake Shoes of Locomotive and Wagons. J. of Inst-Indian Foundrymen P : 199-203

[41] R.BLICKENS DERFER ; H.TYLCZAK

Laboratory Tests of Spalling, Breaking, and Abrasion of Wear-resistant Alloys Used in Mining and Miniral Processing
INT.BU.OF.MINES,PGH, PA 1985 P : 1 - 17

[42] G.MORETON ; F.POWELL

An evaluation of brack material for underground locomotives
C349/84, 1984 P : 149-156

[43] (T.) TSUJIMURA ; (S.) MANADBE

High speed friction characteristics of several cast iron for Brake shoes- Imono/Imono : Journal of the Japan Foundrymens' Society ; 1988 P : 98- 103

[44] (K.) TAKASAWA ; (T.) TSUJIMURA ; (S.)YURI

Friction and wear caractéristique of several cast irons containing hard phases dures.. Imono/Imono : Journal of the Japan foundrymens' Society 1985 P : 516 - 521

[45] P.SULEA

Cercetari de laborator si experimentari in exploatare privind comportarea sabotilor din fonte modificate cu continut ridicat de fosfor pentru vehicule de sina. CERCET MET:6 ; 1964 P : 79 -93

[46] (T.V.) LARIN ; (G.R.) TRANKOVSKAYA

Einfluss von Legeirungszusaetzen Auf Das Gefuege Und Die Reibeigenschaften Von Gusseisen- ; Liteno Proizvod. (Russe) 1985 P : 9 - 10

[47] (I) KOSOVINC

Abrasiva Obbraba Sive Litinne Z Lamelarnim Grafiton in Daodatkom fosforja ; METAL. ZB. 1982, P : 39 - 50

[48] SNTF

Etude comparative des roues utilisée en nord et en sud, 1990

[49] J. BARRALIS .G. MAGER

Précis de métallurgie AFNOR NATHAN, 1986

[50] H.R. WETENKAMP; B.J .ECK

The influence of brake shoes on the température of weels in railroad service J. of Uni-Illinois P:31-35 1980

[51] (T.A.) LIBSCH ; (S. K.) RHEE

Microstructurale change in semimetallic disc brake pads crated
by low temperature dynamometer testing Wear 1978 P : 203 - 212

[52] H.L LANGHAAR

Analyse dimensionnelle, théorie des maquettes ; 1961

[53] JUNJI SUGISHITA ; SYONOSHIN FUJIYOSHI

The effect of cast iron graphite on friction and Wear performance
WEAR, 68 1981 P : 7 - 20

[54] (W.J.) OCONNOR ; (T. A) SPEDDING

Running-in Wear a gray cast iron and the effect of laser
Transformation hardening. Tomlinson ; TRIBOLOGIE INTERNATIONAL
1988 P : 302 - 308

[55] (M.) MOORE

The influence of matériel properties on abrasive particule
contact and volume Wear. Metallurgia 1980 P : 1 - 7

[56] (J.D.) WATSON ; (P.J) METTON

Metallographic Observations of Wear Mechanisms
J. Australas. Inst. Metals; Austral.; 1976 P:182-186

[57] (S.) BHATTACHARYYA ; (F. C) OCK

Abrasive Wear of Engineering Materials by Mineral and Industrial
Wastes. WEAR.46, 1978 P :1 - 18

[58] L.A BASHAEVA ; T.V LARIN

Comportement dilatométrique de l'eutectique phosphoreux
J. Liteinoe Proizvod, P : 7-8 1986 (Russe)

[59] F.WILSON ; T.EYRE

Effect of matrix structure and hardness on the Wear
characteristics of gray cast iron. WEAR 14 1968 P : 107 - 117

[60] S.PARENT-SIMONIN ; J.CLAUD-MARGERIE

FONDERIE.319 1973 P :15 - 27

[61] I. MMINKOFF

The physical metallurgie of cast iron ; A Wiley inerscience
publication, 1983