République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES ET METALLURGIE
ENSMM-annaba-

DÉPARTEMENT SCIENCE ET GÉNIE DES MATÉRIAUX

Mémoire de fin d'études

INGENIEUR

Etude comparative de matériaux travaillant à l'usure.

(Magna404, Spherotene, Fonte Au Cr)

Présenté(e) par : - LAOUBI MOUIZ LIDIN ALLAH.
- CHOUICHI ABDELMOUMEN.

Encadré(e) par : - Pr. M. ZAHZOUH

Membres du jury : - **Pr**. H.CHADLI Président.
- **Dr**. N.MATOUGUI Rapporteur.

Juin 2017

Remerciement

Nous remercions tout d'abord le grand puissant Dieu qui nous a éclairé le chemin pour réaliser ce modeste travail.

Nos remerciements très particuliers s'adressent à notre encadreur monsieur **M.ZAHZOUH** enseignante à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines et de la Métallurgie, pour avoir acceptée, malgré ses charges pédagogiques, de nous orienter pour réaliser ce travail.

Nous tenons à remercier les membres de jury, monsieur **Hassen CHADELI** directeur de l'ENSMM d'ANNABA et madame **Nedjoua MATOUGUI** qui ont acceptés de juger notre travail, malgré leurs nombreuses obligations.

Nous tenons à remercier monsieur **Mohamed LABAIZ** professeur à l'université de BADJI MOKHTAR d'ANNABA, et madame **LEMBOUB Samia** qui ont contribué à l'amélioration significative de ce mémoire.

Un grand merci aux personnes d'ALFEL, en particulier monsieur **Abdelatif BOURAIOU** pour son accueille, et très particulièrement aux personnes du département technique, monsieur **LAHOULA Salah**, monsieur **KHALASSI Tarek**, pour leur gentillesse et leurs aides.

Mes remerciements vont également à tous les membres du laboratoire de l'école ENSMM madame **MEDAH**, monsieur **NADIR**, madame **ZEDOURI**, monsieur **HICHEM**,

Nous tenons à remercier particulièrement notre chère ami et collègue **LEMRABET Hamza.**

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail A Mon Père qui m'a toujours guidé et soutenu.

A Ma Mère qui a était toujours à mes cotés.

A Mes petites sœurs.

A mes chers amis « L'binom, rouj Amar, Rochdi, Nouh et Anis… etc»

Et

A tous mes copains de l'ENSMM.

Abdelmoumen.

Je dédie ce travail à

Ma famille

Mes chers parents, en témoignage d'un grand sacrifice et d'un grand amour,

Mes beaux frères et à mes très chers Zaghlol et Hanouch,

Mes chers tantes et oncles.

Mes amies l'binom, Rouj, Chawi, Gerba3i, Delali, Yocef, Hamza, Dib Et Rami …etc.

Mes chers colegues : Fateh, Dey, Bouthaina, Nasra … etc.

Mouiz

Résumé :

Ce travail porte sur l'étude du comportement au frottement et à l'usure des matériaux de rechargement sur outil de malaxeur de sable. Trois types de matériaux ont été étudiés, deux, de type commerciale MAGNA404, et SPHEROTENE et un troisième matériau de substitution qui est la fonte au chrome.

Préalablement l'étude des conditions de travail de l'outil s'avère nécessaire afin de déterminer les efforts auxquels est soumis le bras du malaxeur. La sollicitation la plus dominante est l'usure par frottement provoquée par les grains de silice. Outre sa dureté spécifique le grain de silice induit des contraintes élevées et localisées de par sa petitesse et sa forme géométrique.

L'étude comparative du comportement au frottement et usure des matériaux prévoit deux types d'essai, par indentation Vickers afin de déterminer la dureté et par perte de masse afin d'estimer le comportement tribologique et déterminer le coefficient de frottement. Ce dernier constitue un élément d'appréciation rigoureux de la résistance à l'usure.

Les résultats obtenus trouvent leurs interprétations à partir de la composition chimique des matériaux, le mode de dépôt ou d'élaboration, de la structure métallographique en relation avec les traitements appliqués, de la nature de l'interaction matériau-pion. De ce fait, une caractérisation à l'échelle microscopique s'impose.

Globalement les résultats obtenus montrent que le rechargement en SPHEROTENE a un meilleur comportement à l'usure que le rechargement en MAGNA404 utilisé actuellement par l'entreprise ayant respectivement une dureté de l'ordre de 1200HV et 700 HV et une perte de masse de 1,9 mg et 8.6mg . La fonte au chrome quant à elle présente un comportement bien meilleur que les deux autres matériaux sa dureté est de 1100HV et présente une perte de masse de 2,1 mg.

Les matériaux de rechargement sont d'un coût exorbitant et leur mise en œuvre impose des frais supplémentaires en énergie, en main d'œuvre, et en temps d'immobilisation des installations ce qui constitue une charge financière relativement importante pour l'entreprise. De prime abord la fonte au chrome s'avère la solution la mieux adaptée tant d'un point de vue comportement à l'usure et au frottement que du faible coût de la matière première. Un atout majeur quant à son utilisation réside dans la possibilité d'élaborer l'outil en une seule pièce et au niveau de l'unité. Toutefois cette proposition devrait faire l'objet d'une étude plus approfondie dans le cadre de travaux de recherche ultérieurs.

Abstract:

This work deals with the study of the friction behavior and the wear of the materials of reloading on tool of sand mixer. Three types of materials were studied, two of commercial type MAGNA404, and SPHEROTENE and a third substitute material which is chromium-based cast iron.

It is necessary beforehand to study the working conditions of the tool in order to determine the forces to which the mixer arm is subjected. The most dominant stress is the friction wear caused by the silica grains. In addition to its specific hardness, the grain of silica induces high stresses and localized by its smallness and its geometrical shape.

The comparative study of friction behavior and material wear provides for two types of tests, by Vickers indentation to determine hardness and mass loss in order to estimate the tribological behavior and determine the coefficient of friction. The latter constitutes a rigorous element of appreciation of the wear resistance.

The results obtained find their interpretations from the chemical composition of the materials, the mode of deposition or elaboration, the metallographic structure in relation to the applied treatments, the nature of the material-pawn interaction. As a result, microscopic characterization is required.

Overall, the results obtained show that the SPHEROTENE recharging has a better wear behavior than the MAGNA404 recharging currently used by the company with a hardness of the order of 1200HV and a loss of mass of 1.9mg. Chrome casting has a much better behavior than the other two materials, its hardness is 1100HV and a loss of mass 2.1 mg.

The recharging materials are of an exorbitant cost and their implementation imposes additional costs in terms of energy, manpower, and downtime, which is a relatively large financial burden for the company. At first glance, chromium casting is the most suitable solution, both from the point of view of wear and friction behavior and the low cost of the raw material. A major asset in its use lies in the possibility of developing the tool in one piece and at the unit level. However, this proposal should be the subject of further study in subsequent research.

Liste des figures

Figure 1.La Hiérarchie D'alfel 4
Figure 2. Exemple de produits d'ALFEL 5
Figure 3.L'intérieur De Malaxeur. 8
Figure 4.Dessin Technique Pour Le Bras De Malaxeur 9
Figure 5.Facies De Rupture D'un Outil Endommagé. 9
Figure 6.Mouvement D'un Corps Sur Autre. 12
Figure 7.Évolution de la force de frottement au cours du temps [5] 12
Figure 8.Quelque exemple d'évolution de la force de frottement au cours du temps 13
Figure 9.Schéma décrivant une usure par frottement [9] 15
Figure 10.Abrasion à deux corps 16
Figure 11.Abrasion à trois corps fermée : (a) D<Dmax grain et (b) D>Dmax grain 17
Figure 12.Abrasion à trois corps ouvert 18
Figure 13.Courbes isocontraintes pour un contact rugueux 20
Figure 14.Phénomène De Dilution 22
Figure 15.Le pourcentage de dilution décroît du fait de la superposition des couches [2] 24
Figure 16.Diagramme de phase du système W-C 25
Figure 17.Influence du manganèse sur la soudabilité. [16] 31
Figure 18.teneur de cobalt (volume%) 32
Figure 19.Cycle thermique des trempes et revenues réalisés. 38
Figure 20.polisseuse et papier abrasive 39
Figure 21. Tribométrie pion-plan 42
Figure 22. Tribomètre Bille-Disque et Pion-Disque 43
Figure 23.Dispositif utilisé pour l'usure par frottement. 44
Figure 24. Dispositif de frottement des surfaces planes 44
Figure 25.Micrographie du rechargement (MAGNA404), grossissement 45
Figure 26.Profile de la micro-dureté 46
Figure 27.Evolution du coefficient de frottement du MAGNA404 en fonction de la distance 47
Figure 28.Microscopique du rechargement SPHEROTENES, grossissement 48
Figure 29.Microstructure MEB des WC dans les grains sphériques 49
Figure 30.Observation avec le MEB de la partie de rechargement SPHEROTENES 50
Figure 31.Courbe du micro-durete SPHETORENE 50

Figure 32. Courbe de coeff. de frottement du SPHETORENES en fonction de la distance 51
Figure 33. Microstructure de la fonte au chrome. a) avant trempe, b) après trempe 52
Figure 34.Coeff. de frott. de la fonte au chrome avant traitement en fonction de la distance 54
Figure 35. Courbe de coeff. de frott. de la fonte au chrome après traitement. 54
Figure 36.histogramme des coefficients de frottement 55
Figure 37. Traces d'usure des trois échantillons après l'essai de tribologie 56
Figure 38.histogramme de la perte de masse 57
Figure 39. Les micro-duretés des 3 types. 58
Figure 40.histogramme des 3 échantillons. 58

Liste des tableaux

Tableau 1.Groupe socioprofessionnel d'ALFEL 4
Tableau 2.Type de produits fabriqués par l'entreprise 6
Tableau 3.La composition chimique de l'acier utilisé pour les bras de malaxeur 8
Tableau 4.composition chimique du sable de moulage 10
Tableau 5.Quelque valeur de coefficient de frottement [5] 13
Tableau 6.Propriétés physiques et mécaniques de tungstène et de carbure de tungstène. [15] 26
Tableau 7. Manque de pénétration. 26
Tableau 8. Manque de fusion. 27
Tableau 9. Morsures et caniveaux. 27
Tableau 10.Porosités-causes et solutions 28
Tableau 11.Fissuration –causes et solutions- 28
Tableau 12.composition chimique de la fonte au chrome 37
Tableau 13.paramètres de l'essai de tribologie 43
Tableau 14.resultats de la micro-durete MAGNA404 45
Tableau 15.résultat de la dureté MAGNA404 46
Tableau 16. Résultat De La Dureté SPHEROTENES 49
Tableau 17.résultat de la micro-dureté de SPHEROTENES 50
Tableau 18.résultat de la dureté SPHEROTENE 51
Tableau 19.résultat de la dureté de la fonte au chrome avant traitement 52
Tableau 20. La dureté de la fonte au chrome traitée 53
Tableau 21.résultat de la micro-dureté de la fonte au chrome avant traitement 53
Tableau 22. Micro dureté de la fonte au chrome traitée 53
Tableau 23.résultat de coefficient de frottement pour les 3 échantillons 55
Tableau 24.resultat du perte de masse 56
Tableau 25.Prix des matériaux par kg 59
Tableau 26.Cout Des Solution Proposées 59

Table de matière

Dédicace
Remerciements
Résume
Liste des Figures
Liste des Tableaux
Introduction Générale..... 1
Préambule: presentation de l'enterprise……...3

CHAPITRE I : Analyse de l'endommagement des outils de malaxeur de sable de moulage rechargés en WC

I.1 Outils de malaxeur 8
I.1.1 Caractéristiques mécaniques 9
I.1.2 Généralités sur le sable 9
I.2 Usure des outils 11
I.2.1 Généralités sur la tribologie 11
I.2.2 Généralités sur le frottement 11
I.2.3 L'usure 13
I.2.4 Différentes formes d'usure 14
I.3 Procédés de rechargement 21
I.3.1 Généralités 21
I.3.2 Principaux domaines d'application 23
I.3.3 Paramètres liés au rechargement 23
I.3.4 Nature des matériaux d'apport 24
I.3.5 Les défauts de rechargement 26
I.3.6 Rechargement MAGNA 404 28
I.3.7 Rechargement au SPHEREOTENE 32
I.3.8 Choix des matériaux de substitution 33

CHAPITRE II :TECHNIQUES EXPERIMENTALE

II.1 Introduction 37
II.2 Préparation des échantillons 37
II.2.1 Mode opératoire du rechargement 37
II.2.2 Gamme du traitement thermique de la fonte 37

II.3 Métallographie 38
II.3.1 Polissage 38
II.3.2 Nettoyage et attaque chimique 39
II.3.3 Microscopie optique 39
II.3.4 La microscopie électronique à balayage (MEB) 40
II.4 Caractérisation mécanique 40
II.4.1 Essai de dureté 40
II.4.2 La micro-dureté 40
II.4.3 Essai de tribologie 41
II.4.4 Usure par frottement(perte de masse) 43

CHAPITRE III :RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1 Cas du rechargement MAGNA404 45
III.1.1 Observations métallographiques 45
III.1.2 Micro-Dureté Vickers 45
III.1.3 La dureté 46
III.1.4 Essai tribologique 47
III.2 Cas Du rechargement Spherotenes 48
III.2.1 Observation métallographiques 48
III.2.2 Observation MEB 49
III.2.3 Dureté Vickers 49
III.2.4 Dureté 51
III.2.5 Essai de tribologique 51
III.3 Cas de la Fonte au Chrome 52
III.4 Etude Comparative Du Comportement Des Differents Echantillons **55**
III.4.1 Coefficient de frottement 55
III.4.2 La perte de masse 56
III.4.3 La dureté et la micro-dureté 57
CONCLUSION : 60
Références

INTRODUCTION GENERALE

L'endommagement des pièces mécaniques par usure abrasive présente plus de 50% des cas. Ces dernières années des efforts considérables ont été consentis pour mieux appréhender le problème en termes d'estimation, de contrôle et de prévention de dégradation. Il a été mis au point une panoplie de tests appropriés. En raison de la diversité des problèmes industriels ces derniers ont connu une évolution rapide [1]. Cependant, malgré les progrès considérables enregistrés à ce jour les mécanismes d'usure restent toujours difficiles à modéliser. Parallèlement la compréhension, à différentes échelles tant macroscopiques que microscopiques, des mécanismes d'usure a été développée. Récemment, plusieurs travaux de recherches mettent en exergue la relation microstructure-propriétés-mécaniques-usure abrasive. Les résultats obtenus sont souvent spécifiques à une configuration et à des conditions de sollicitations déterminées.

Les conséquences de cette dégradation peuvent prendre diverses formes. Si la particule abrasive est une protubérance ou une aspérité de forme régulière et que sa pénétration est suffisamment faible, l'abrasion consiste alors en une déformation plastique sans enlèvement de matière. En revanche, si la particule présente des angles vifs, convenablement orientés par rapport au sens de glissement, l'abrasion est analogue à un processus de type coupe. [1]

Parmi les procédés utilisés pour lutter contre les phénomènes de l'enlèvement de la matière et l'usure, se trouve la technique du rechargement, c'est un procédé connu, régulièrement choisi et utilisé dans la fabrication industrielle de constructions soudées. A l'origine, cette technique était une des rares options pour assembler les matériaux nobles et quelques alliages exotiques. Les résultats obtenus dépendaient dans une large mesure de la qualification, de la dextérité et de l'expérience du soudeur qui devait réaliser l'opération.
Au fur et à mesure de l'évolution des dispositifs électroniques, la maîtrise du procédé de rechargement a progressé ouvrant ainsi la voie à des applications aussi nombreuse que diverses.

En effet, bien que particulières, les opérations de rechargement nécessitent la même finesse pour obtenir des résultats satisfaisants. Ainsi, la fiabilité du contrôle du procédé, la répétitivité, l'aptitude à souder dans toutes les positions, la gestion presque indépendante du métal d'apport et la facilité de mécaniser les séquences permettent de garantir la qualité des rechargements. La maîtrise des dilutions constitue un gage supplémentaire du bon comportement des dépôts en service. [2]

Malgré les avancées technologiques et l'automatisation des procédés de rechargement cette option demeure couteuse et énergivore. Une solution alternative réside dans la possibilité de remplacer la technique de rechargement par un matériau de moindre coût et répondant aux exigences d'utilisation. Une étude comparative du comportement à l'usure des produits de rechargement et de la fonte au chrome a été menée dans cette optique.

Ce mémoire s'articule autour de quatre parties, la première partie se propose d'analyser l'endommagement des bras d'origine et des produits de rechargement type MAGNA 404. Différentes causes d'endommagement ont été énumérées et répertoriées.

La deuxième partie s'intéresse au phénomène d'usure par le biais d'une synthèse bibliographique.

Dans la troisième partie des généralités sur le procédé de rechargement ont été abordé en rapport avec le rechargement et les paramètres y afférents.

La partie expérimentale se charge de l'étude comparative d'un point de vue comportement mécaniques des produits de chargement MAGNA404 et SPHEROTENE et la fonte au chrome résistante à l'usure.

PREAMBULE : Présentation de l'entreprise

1-appellation et acronyme :

Nom de l'entreprise : Algérienne des fonderies d'EL-HARRAC

ALFEL – FILIALE GROUPE FONDAL

- **Objet social** : production et commercialisation de produits de fonderie (Pièces moulées en fonte et métaux non ferreux); Étude et conception d'outillage, fabrication de pièces Diverses sur demande.
- **Statut** : société par action (SPA).
- Capital social : 870.000.000.DA.
- **Siège social** : 3/5, route de Baraki EL-HARRACH, Alger
- **Capacités de production** : fonderie fonte, 5.000 T /An. , fonderie bronze, 200 T/An.

Elle dispose d'un ensemble d'infrastructures (terrain de 18.150 m² dont 9.177 m² bâti) et d'un personnel qualifié qui lui permet d'assurer une réponse aux divers besoins de la Clientèle.

2- Historique :

- 1945 : construction de l'entreprise par les colons français sous le nom de BECCARSL.
- 1950 : création de la fonderie d'el Harrach sous l'appellation d'unité industrielle africaine UIA.
- 1974: Nationalisation des unités des fonderies El Harrach.
- 1980 : initialisation du projet de modernisation.
- 1987 : individualisation et mise à disposition de crédit.
- 1983 : Transfert à ENF (entreprise nationale de fonderie).
- 1994 : Arrêt total de production et démarrage de modernisation de l'unité.
- 1999 : filialisation des unités sous fonderie El Harrach et démarrage de la production de la filiale.

3- Structure organisationnelle :

L'organigramme de l'entreprise :

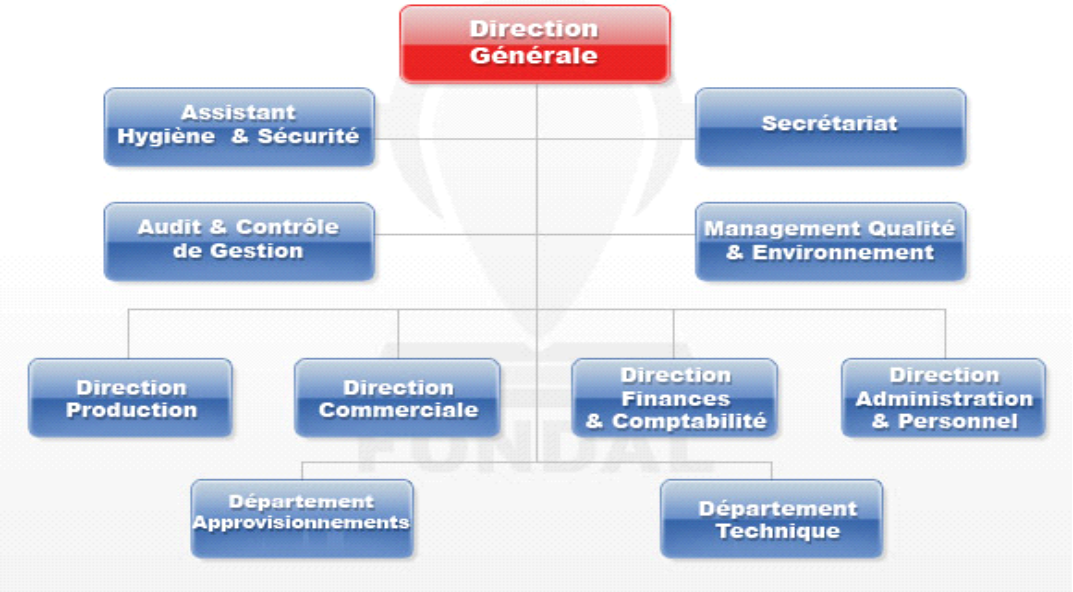


Figure 1. La Hiérarchie D'alfel

Elle compte un effectif de 180 agents, reparti par groupe socioprofessionnel :

Groupe	Nombre	%
Exécution	124	69 %
Maîtrises	20	11 %
Cadres	36	20 %
Total	180	100 %

Tableau 1. Groupe socioprofessionnel d'ALFEL

4-ALFEL et le Système Management Intégré

Le Système Management Intégré (Qualité - Environnement – Sécurité et Santé au Travail) mis en œuvre au niveau de la Filiale ALFEL est basé sur les principes des normes et référentiels suivants :

- Qualité : ISO 9001 v. 2008
- Environnement : ISO 14001 v. 2004
- Sécurité et Santé au Travail : OHSAS 18001 v. 2007

5-Produits fabriqués par l'entreprise :

ALFEL vise toujours l'amélioration continue de ses processus de fabrication et de prestation de service, afin d'accroître la satisfaction de ses clients. Grâce à des nouveaux équipements et à la technologie développée, permet d'acquérir les segments des marchés locaux et extérieurs dans les créneaux suivants :

- Secteurs Voirie et Embellissement urbain
- Secteurs Electrique et Télécommunications
- Secteurs Agricole et Hydraulique
- Secteurs Transport et Automobile
- Secteurs BTP et Carrières
- Autres secteurs divers.

Exemples de produits :

Figure 2. Exemple de produits d'ALFEL

Quelques données sur les produits :

Désignation	Type	Poids	Prix unit.HT	Prixunit.TTC
Regard de chaussé a tampon rond	600x600	40	8700,00	10179,00
Regard de chaussé avec charnière	850x850	89	14240,00	16660,80
Regard de trottoir a tampon rond	1050x1050	180	38640,00	45208,80
Grille plate avec cadre	700x700	150	25500,00	29835,00
Grille d'arbre circulaire	500x1240	90	12000,00	17901,00
Tète de bouche à clé	Eau	6	1800,00	2106,00
Tète de bouche à clé	Gaz	18	4900,00	5733,00

Tableau 2. Type de produits fabriqués par l'entreprise

6- Moyens matériels d'ALFEL

- Fusion assurée par 2 x Four MF à induction à creuset, type FS 50 de 5T
- Moulage Fonte assuré par 2 lignes automatiques haute pression (1400x1000 et 800x600), capacité de 35 moules/h.
- Moulage MNF assuré par 1 ligne en mottes à joint horizontal, dotée d'un système de régénération de sable à résine furanique de 3 Tonnes /h.
- Sablerie automatique de 100 T/H de sable à vert, dotée d'un malaxeur intensif de 10 T/H.
- Noyautage à Procédés Co2, Huile de lin, Ashland.
- Laboratoire (Spectrométrie, Métallographie, Chimie, Sable, Essais physiques).
- Parachèvement (Grenaillage, Ebarbage, Soudage, Finition. Peinture).
- Modelage (Bois, Métallique).
- Autres (Energétique, Manutention, Transport, Machines-outils, Chaudronnerie

7- Les ateliers de l'entreprise:

- Atelier de modelage (bois et résine)
- Atelier de noyautage (procédé Co2, huile de lin)
- Atelier de fusion assuré par 2 x Four MF à induction à creuset de 5t
- Atelier de moulage assuré par 2 chaines de moulage haute pression ,automatique ,châssis 1400x1000 et 800x600,capacité 10 et 35 moule/h.
- Installation de parachèvement (grenaillage, ébarbage, soudage, finition).
- Installation de sablerie automatique de 100t/h de sable à vert dotée d'un malaxeur intensif de 10t/h.

CHAPITRE I : Analyse de l'endommagement des outils de malaxeur de sable de moulage rechargés en WC

I.1 Outils de malaxeur

I.1.1 Généralités :

Depuis des années, l'entreprise se trouve face au problème d'usure des bras du malaxeur.

Figure 3.L'intérieur De Malaxeur**.**

Ces outils sont soumis à des forces de frottement avec les grains de sable (SiO2), avec une vitesse de rotation de l'ordre de 500 tr/min, ce qui provoque l'enlèvement de la matière au niveau des bras après une durée de vie qui ne dépasse pas en termes de quantité les 3500t, sachant que le malaxeur travail environ 20t/j.

L'entreprise utilise pour la fabrication des outils les aciers faiblement alliés dont la composition chimique et les caractéristiques mécaniques sont montrés ci-dessous :

Elément	**C**	**Mn**	**Cr**	**Si**	**Cu**	**Mo**	**V**	**P**	**S**	**Ni**
%	0,15	1,24	0,0796	0,23	0,0365	0,0038	0,0026	0,0525	0,008	0,0317

Tableau 3. La composition chimique de l'acier utilisé pour les bras de malaxeur

I.1.2 Caractéristiques mécaniques :

Les principales caractéristiques mécaniques sont :

Limite d'élasticité : >680. Mpa

Résistance à la traction : >750. Mpa

Allongement % (A) 12.

Dureté : > 89 HV

Le schéma représenté à la figure 4 présente la forme et les cotes de l'outil, la partie fléchée indique la zone d'attaque de l'outil.

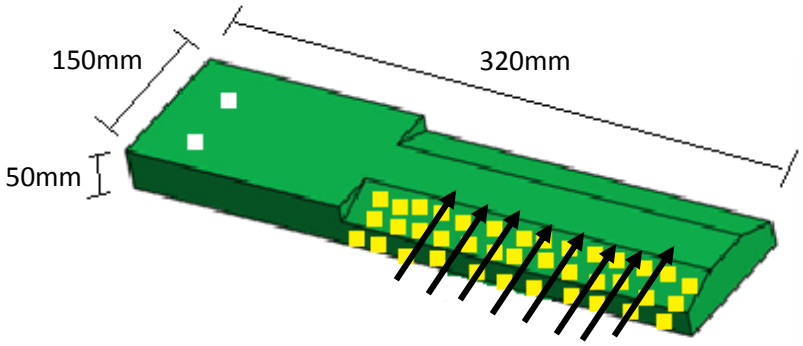


Figure 4. Dessin Technique Pour Le Bras De Malaxeur

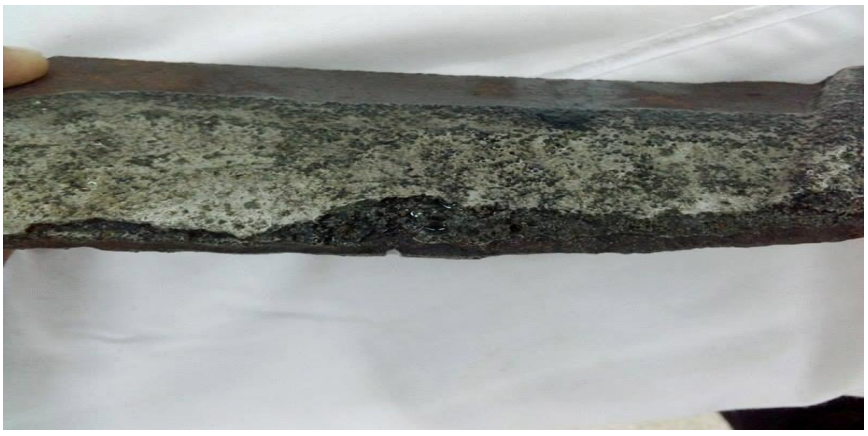


Figure 5. Facies De Rupture D'un Outil Endommagé.

I.1.3 Généralités sur le sable :

De façon générale Le dioxyde de silicium est le composé chimique de formule SiO2, c'est un minéral très abondant dans l'écorce terrestre (55% en masse). La majorité de la silice

naturelle est cristalline. On la trouve sous des formes très variées comme par exemple le quartz (dans le sable, le grès, le granit, les roches magmatiques…...), la trydimite ou la cristobalite, mais elle peut aussi être synthétique. On la retrouve en tant que matériaux de structure pour améliorer les propriétés mécaniques, ou en tant que support de catalyseurs.

La grande dureté et les propriétés abrasives des gels de silice et des poudres justifient leur intérêt en tant qu'agent renforçant. En effet, la capacité à résister à l'abrasion, à la rayure ou à la déformation permet d'augmenter les applications, notamment dans le domaine de la mécanique [3]

I.1.3.1 Caractéristiques du sable de moulage :

a) Composition du sable de moulage

Matière	Taux
Sable neuf	0.5 à 5 %
Bentonite	0.1 à 1 %
Noir minéral	0.1 à 0.5 %
H2O	Humidité ≤ 4%

Tableau 4.composition chimique du sable de moulage

b) Propriétés mécaniques :

- Résistance à la traction humide 0.2 à 0.25 N/cm².
- Résistance à la traction > 3 N/cm²
- Résistance au cisaillement > 5 N/cm²
- Perméabilité> 80
- Aptitude au serrage (compressibilité) 38 à 42%
- Diamètre moyen D (mm) = 0.25.

Ayant une grande dureté par rapport aux outils de malaxeur, le sable de moulage provoque des contraintes ponctuelles sur ces derniers, ce qui cause leur endommagement et usure que ce soit par abrasion, frottement ou par fatigue.

I.2 Usure des outils

I.2.1 Généralités sur la tribologie :

La tribologie est présente dans la plupart des activités humaines et son domaine depuis ces cinquante dernières années c'est largement développé Pour souligner l'importance de la tribologie. Il faut noter que dans les pays développes, les pertes par frottement et usure représentent entre 3.5et 4% du PIB et que dans une automobile moderne plus de 25% de la puissance affichée du moteur est perdue en frottement. Enfin selon une étude récente du CETIM, 80% des avaries des pièces mécaniques commencent en surface ; ainsi la surface est actuellement une réelle butée technologique. [4] d'où l'intérêt accordé à ce phénomène.

I.2.2 Généralités sur le frottement :

La compréhension des phénomènes qui gouvernent le frottement et l'usure est en pleine évolution. Les travaux ne se limitent plus à la simple étude des matériaux massifs mais se focalisent sur les interfaces souvent appelés troisième corps c'est à dire sur les matériaux crées au contact, pendant l'opération de frottement. Si, sur le plan mécanique, les schémas pour l'usure et le frottement présenté depuis quelques années présentent moins d'incohérence qu'auparavant. Ils ne sont, toutefois, pas complets et ne peuvent être exprimés, théoriquement. Il existe plusieurs lois d'usure qui reposent sur des concepts partiels et ne rendent donc pas compte de la réalité expérimentale.

Il existe, par contre, une seule loi de frottement qui est couramment utilisée, c'est la loi de Coulomb qui traite des conditions aux limites et qui n'a jamais été vérifiée expérimentalement.

L'expérience permet d'établir certains faits concernant ce phénomène.

- La force de frottement est proportionnelle à la force qui presse les deux surfaces l'une contre l'autre.
- La force de contact est indépendante de l'aire apparente de contact.
- La force de frottement cinétique est indépendante de la vitesse relative des deux surfaces.

Considérons un corps solide de forme parallélépipédique, déposé sur un plan horizontal et supportant une charge normale F. Appliquons lui, progressivement, une force F parallèle au plan afin de le mettre en mouvement et faire passer progressivement sa vitesse (v) de la valeur 0 à la valeur V (voir schéma ci-dessous). [5]

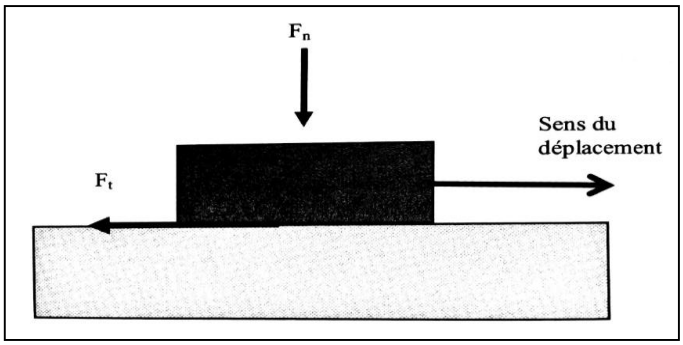


Figure 6. Mouvement D'un Corps Sur Autre.

Ce déplacement va provoquer l'apparition. Dans le plan, d'une force de frottement, dirigée dans le sens inverse du glissement et qui s'oppose à lui. On peut voir sur la figure suivante l'évolution de cette force en fonction du temps.

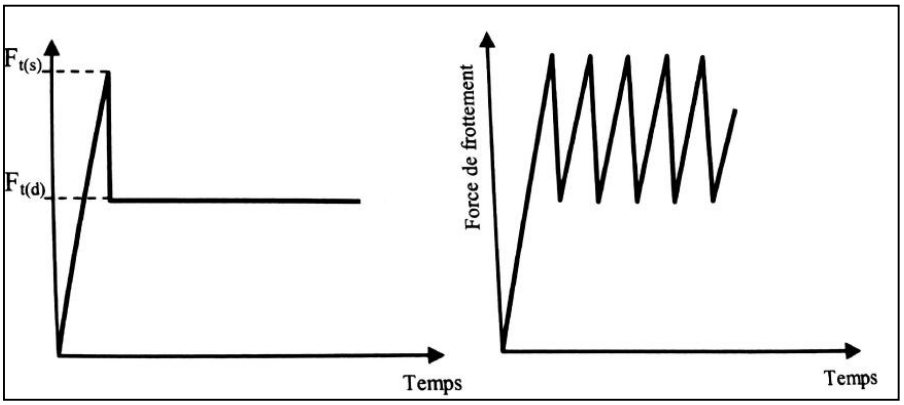


Figure 7.Évolution de la force de frottement au cours du temps [5]

On distingue le coefficient de frottement statique (.t, pour lequel Ft = Fus)) du coefficient de frottement dynamique (gd, pour lequel Ft=Ft(d).F t(s) et Ft(d) sont définis sur la figure :

- Ft(s) est la force maximale qu'il faut exercer pour mettre en mouvement le solide
- Ft(d) est la force appliquée pour entretenir le mouvement :

$$\mu = \frac{F_t}{F_n}$$

Suivant la nature des matériaux et les conditions de sollicitation, divers comportements peuvent être observés (voir figure ci-dessous) Ils résultent des transformations chimiques, topographiques ou structurales des surfaces en frottement (oxydation, transformation allotropique, transformation de phases, cristallisation, diffusion, fusion, polissage, arrachement de matière). [5]

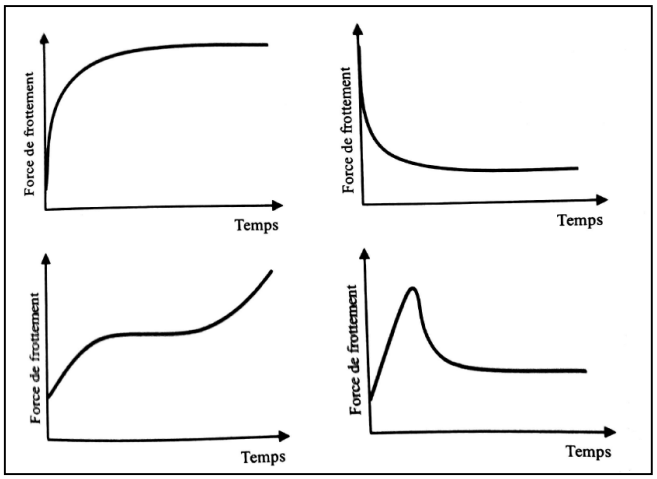


Figure 8. Quelque exemple d'évolution de la force de frottement au cours du temps

Matériaux	**Coefficient de frottement**
Métal contre métal le vide (≤10-7pa)	≥ 3
Métal contre métal a l'aire	0.2 à 1.5
Polymère contre polymère a l'aire	0.05 à 1
Métal contre polymère a l'aire	0.05 à 0.5
Métal contre céramique ou céramique contre céramique à l'aire	0.2 à 0.5
Métal contre métal en présence d'un lubrifiant solide	0.05 à 1
Métal conte métal en présence d'une huile de lubrification	0.1 à 0.2
Lubrification en régime hydrodynamique	0.01 à 0.005

Tableau 5. Quelque valeur de coefficient de frottement [5]

I.2.3 L'usure

Le phénomène d'usure a été étudié sous plusieurs volets. De manière générale, les modes de dégradations par usure peuvent être considérés comme la résultante de trois mécanismes mettant en œuvre l'adhésion, l'abrasion et la délamination. Dans tous les cas, les modes de dégradation conduisent à une perte de matière [6]

La définition de l'usure la plus large, qui est connue depuis les dernières 50 années, inclue la perte de matériaux à partir d'une surface et le transfert de ce matériau d'une surface

vers une autre surface. Cependant une définition générique de l'usure a été proposée en tant qu'une perte progressive de matière à partir de la surface opérationnelle d'un corps et étant le résultat d'une sollicitation au niveau de la surface. L'usure est aussi un endommagement d'une surface, qui, généralement induit une perte de matière progressive suite aux sollicitations relative entre cette surface et une substance [7].

L'usure est un mécanisme très complexe où la surface réelle de contact comparée à la surface apparente de contact est très petite car elle est uniquement limitée aux points de contact entre les surfaces en mouvement. La charge appliquée aux surfaces sera transmise à travers ces points de contact et les forces locales peuvent être grandes. Dans un contexte globale (large) de l'usure, les propriétés intrinsèques de la surface du matériau telles que la dureté, résistance, ductilité,...etc., sont des facteurs importants de la résistance à l'usure mais d'autres facteurs tel que la finition de la surface, la lubrification, la charge, la vitesse de corrosion, la température et les propriétés de la surface opposée sont également importants à prendre en considération.

I.2.4 Différentes formes d'usure de l'outil de malaxeur :

Le phénomène d'usure a été étudié en prenant en considération les différents types de contacts qui peuvent avoir lieu entre les matières. [8]

Il est nécessaire de rappeler les modalités d'usure des outils de malaxeur en contact avec le sable de moulage, c'est à dire les différents mécanismes de l'usure et les différentes formes d'usure des outils

I.2.4.1.1 Usure par frottement

Le frottement est fonction de la zone de contact réelle entre les deux surfaces ainsi que de la nature et de la force de l'interaction. Le frottement est attribué à l'accrochage réciproque des aspérités présentées par les surfaces en frottement. Le frottement s'exerce suivant un plan (voir figure ci-dessous) sur lequel viennent affleurer les aspérités tronquées appartenant aux deux surfaces. Il est préférable que les duretés des métaux en présence ne soient pas trop différentes, ce qui n'est pas le cas dans les outils de malaxeur ayant une dureté inférieure à celle de la silice. Si l'un des métaux était très dur comparativement à l'autre, l'usure du métal mou se poursuivrait indéfiniment. [8]

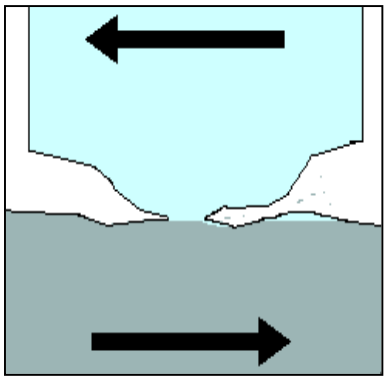


Figure 9. Schéma décrivant une usure par frottement [9]

I.2.4.2 Usure par déformation plastique

La pointe de l'outil peut subir une déformation permanente et un effet de fluage, sous l'action de la grande vitesse de rotation du malaxeur et la haute pression dans la zone de contact outil-sable.

I.2.4.3 Usure abrasive :

L'abrasion présente le mode principal et majeur de l'usure de bras de malaxeur, ce mécanisme est engendré par des particules préexistantes (matériaux granulaires) dans notre cas il s'agit du sable de moulage.

On distingue ainsi suivant l'application, différents types de configuration, de sollicitation et de milieu. L'étude de ces différents paramètres et leurs influences est apparue intéressante pour comprendre et maîtriser l'usure abrasive.

I.2.4.3.1 Configurations de contacts

Les contacts réels sont généralement complexes. Selon la configuration mécanique on distingue :

- l'abrasion à deux corps,
- l'abrasion à trois corps fermée,
- l'abrasion à trois corps ouverte. [1].

I.2.4.3.2 Usure abrasive à deux corps

L'usure abrasive à deux corps est un processus d'usure par déplacement et/ou enlèvement de matière de la surface en frottement d'une pièce mécanique sous l'action d'aspérités dures fixes. [10]. Une aspérité de la surface la plus dure raye la surface la plus tendre.

L'abrasion à deux corps concerne certains secteurs, gros consommateur d'énergie et de matières ou encore les techniques d'enlèvement de matière volontaire, que l'on veut

maîtriser. Pour ces raisons alliées à une mise en œuvre expérimentale ou une modélisation mathématique plus simple, les problèmes d'abrasion à deux corps ont fait l'objet d'études nombreuses et approfondies.

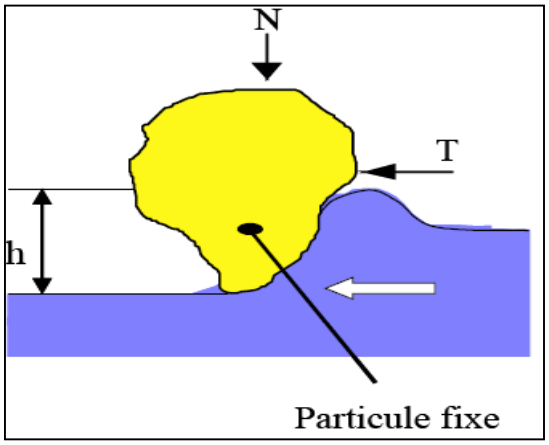


Figure 10. Abrasion à deux corps

Elle est surtout connue pour ses aspects négatifs. Elle présente toutefois un aspect positif recherché dans de nombreux procédés d'usinage (machine à outil, polissage). [1]

I.2.4.3.3 Abrasion à trois corps fermée

L'usure abrasive à trois corps fermée est générée lorsqu'on frotte deux surfaces avec interposition d'abrasifs libres. Dans les configurations d'abrasion à trois corps, il faut distinguer deux cas.

- la distance entre les surfaces est du même ordre de grandeur que la dimension des grains abrasifs (D≤ Dmax grain).
- la distance entre les surfaces est supérieure à la dimension des grains (D>Dmax grain).

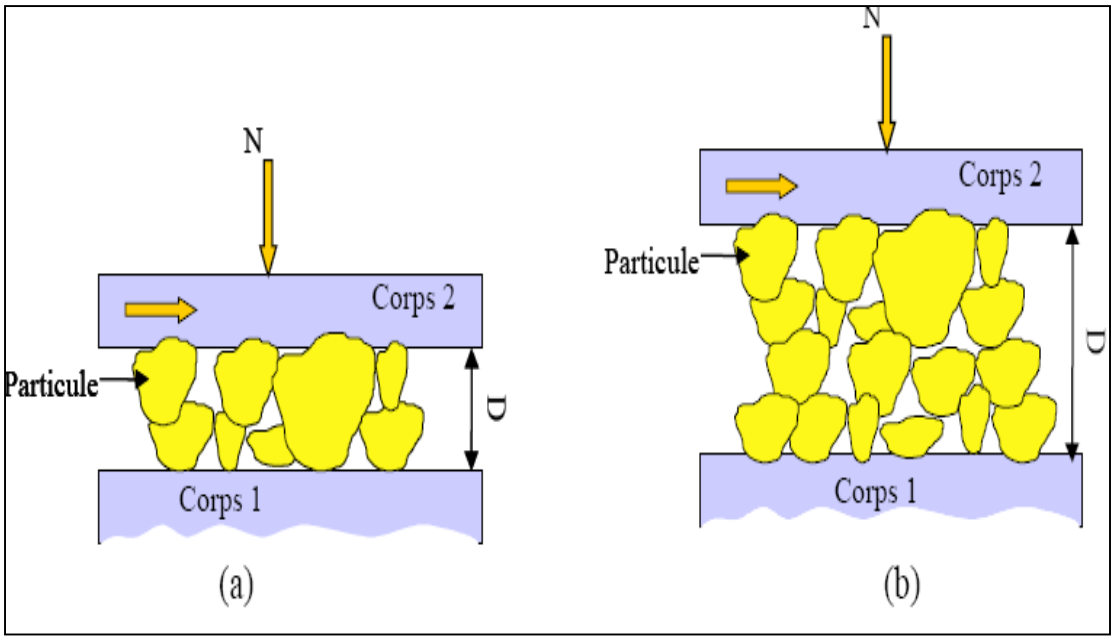


Figure 11. Abrasion à trois corps fermée : (a) D<Dmax grain et (b) D>Dmax grain

Dans le premier cas D≤Dmax grain, les deux surfaces sont également exposées à l'abrasion et le comportement de chaque surface réagit sur l'autre. L'incrustation de particules dures dans une surface tendre ou leur imbrication dans une surface dure écaillée peut transformer le processus en une abrasion à deux corps. Le phénomène de broyage peut être aussi observé avec ses effets secondaires sur la sollicitation : élimination des arêtes vives, ou au contraire, formation de nouvelles arêtes actives selon la sollicitation et le mode de fragmentation du grain. Dans cette configuration les deux surfaces subissent immédiatement les chocs éventuels qui peuvent les détériorer de façon importante si le granulat est dur et peu fragile.

Dans le second cas où D > Dmax grain, les propriétés mécaniques d'une surface n'ont plus d'incidence directe sur l'autre, l'abrasion ne peut être localisée que sur une seule des surfaces. Le comportement rhéologique du corps à l'interface devient alors prépondérant. [1]

I.2.4.3.4 Abrasion à trois corps ouverte

Dans le cas de l'abrasion à trois corps, si une seule surface intervient dans le processus de frottement, on parle d'usure abrasive à trois corps ouverte. Ce type de configuration est souvent rencontré dans le cas de matériaux granulaires en contact avec un solide. (bras/sable)

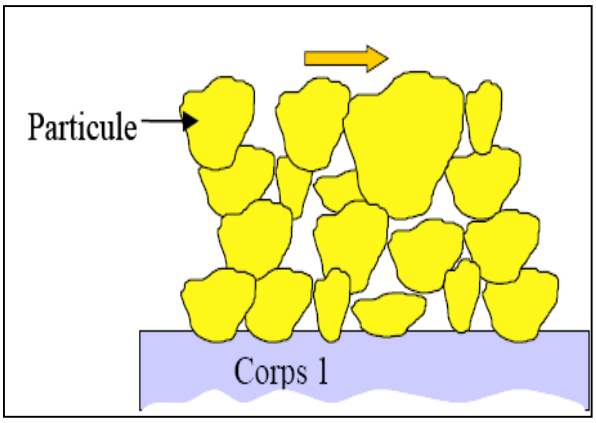


Figure 12. Abrasion à trois corps ouvert

Les configurations mentionnées supposent toutes la présence de corps abrasifs. Les contacts réels sont généralement plus complexes et la coexistence de l'abrasion à deux et trois corps est souvent rencontrée. C'est suivant les mouvements relatifs des particules abrasives qu'on peut avoir soit une abrasion à deux corps, soit une usure abrasive à trois corps. Si les particules glissent sans rotation par rapport à la surface alors on parle d'usure abrasive à trois corps. Si les particules ont des mouvements de rotation par rapport à la surface, alors on parle d'usure abrasive à trois corps. Les mouvements relatifs des particules abrasives dépendent à la fois de leur géométrie, de leurs propriétés mécaniques, des conditions de sollicitation et des propriétés des interfaces. [1]

I.2.4.3.5 Paramètres caractéristiques de l'usure abrasive

Outre la configuration mécanique du contact, l'usure abrasive dépend de plusieurs paramètres de sollicitation. L'identification et les critères de l'usure abrasive sont basés sur :

- les paramètres de sollicitation : fortes ou faibles contraintes,
- les caractéristiques du milieu : corps abrasif et ambiance.

a) Paramètres de sollicitation

La sollicitation d'un contact est caractérisée par la pression de contact et la vitesse de glissement relative surfaces / granulat abrasif.

On considère les trois grandes classes suivantes de sollicitations :

- **abrasion sous très fortes sollicitations** : fortes à très fortes contraintes et très fortes concentrations de contraintes, avec chocs éventuels d'intensité élevée.
- **abrasion sous fortes sollicitations :** fortes contraintes et fortes concentrations de contraintes, chocs éventuels d'intensité limitée. Cette classe est souvent désignée par abrasion au meulage,

- **abrasion sous faibles sollicitations :** faibles contraintes et faibles concentration de contraintes, chocs éventuels accidentels. [1]

b) Paramètres du processus d'abrasion

Les acteurs des processus d'abrasion sont essentiellement :

- **le corps abrasif :** l'usure abrasive dépend fortement de la dureté, de la géométrie, de la résistance à l'usure et du mode de fragmentation des abrasifs. En effet, la dureté est importante puisqu'elle détermine l'aptitude physique du grain à rayer un matériau plus tendre. En revanche, la forme du grain a une influence évidente sur son agressivité en combinaison avec sa dureté. Mais également sa résistance à la rupture qui pourra favoriser l'arrondissement du grain ou au contraire la création de nouvelles arêtes vives selon le mode de fragmentation. [1]
- **l'environnement** : l'environnement comprend essentiellement l'humidité et la corrosivité du milieu. Les effets de l'humidité sont négligeables dès que la vitesse d'usure est importante et concerne un volume du matériau supérieur à celui qui est susceptible d'être modifié par une oxydation ou un échauffement superficiel. En revanche, si l'intensité de l'usure est faible (abrasion sous faibles charges ou avec des grains fins ou sphériques), les propriétés du milieu et de la couche superficielle sont très influentes. [11].
- **la température :** la température peut influencer la résistance à l'usure abrasive et suivant ses effets une diminution ou augmentation de la résistance. [1]

I.2.4.4 Usure par délamination (fatigue des surfaces) :

En tenant compte la grande vitesse, et pression dont les bras sont soumis, on peut penser au problème de la fatigue de surface, en tant qu'un mode secondaire d'endommagement de ces outils.

La dégradation par délamination est un processus qui comprend cinq étapes dans les systèmes à mise en charge cyclique : la transmission des charges, la déformation, l'amorçage et la propagation de fissure, enfin, la formation de particules d'usure. Ce mode de dégradation encore appelé fatigue de surface est souvent le résultat de trois facteurs qui contribuent à l'endommagement :

- des facteurs mécaniques, en liaison avec la géométrie du contact, la courbure des surfaces, le taux de glissement, la pression de contact, la rugosité de surface et les conditions de lubrification ;

- des facteurs physico-chimiques, avec la nature de l'atmosphère ou du lubrifiant dans le contact et la compatibilité des surfaces antagonistes ;
- des facteurs métallurgique, avec la structure des solides en contact et la stabilité de cette structure dans les conditions de chargement cyclique, la dureté superficielle, l'état inclusionnaire, la nature et la distribution des contraintes résiduelles.

L'amorçage de fissures peut se faire, soit en surface, soit en sous couche, en fonction du type de sollicitations (roulement pur ou roulement glissement) et leur propagation peut se fait vers la surface ou en sous couche pour contribuer à créer un égrènement ou écaillage.

Par ailleurs, même dans le cas du roulement pur, le chargement cyclique des surfaces rugueuses entraine une modulation sinusoïdale de la contrainte appliquée ainsi que le montrent les courbes ci-dessous. [12]

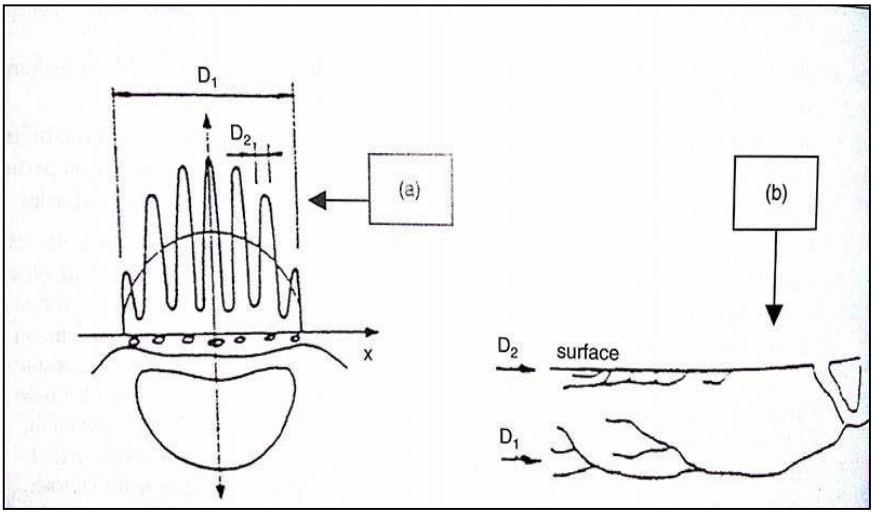


Figure 13. Courbes isocontraintes pour un contact rugueux

Courbes iso-contraintes pour un contact rugueux : apparition sous la surface de points fortement sollicités en cisaillement. Noter la forte charge d'application sur les pics de rugosité (a) qui va générer des amorçages de fissures prés de la surface (b), alors que la charge moyenne va plutôt solliciter les sous couches [12]

Pour remédier à ce problème l'entreprise a adopté la technique du rechargement des bras de malaxeur avec des cordons de type commercial MAGNA404. Ce procédé a amélioré les propriétés mécaniques des outils et permis De prolonger leur durée de vie du simple au double (environ 6000t en termes quantitatif).

Cette technique consiste à projeter sur une surface préalablement préparée un produit fondu ou ramolli par une source de chaleur au moyen d'une torche appropriée. Les dépôts sont donc

formés de couches successives de lamelles écrasées qui se chevauchent, avec un taux d'aplatissement compris entre 3et 7 mm. [13]

I.3 Procédés de rechargement

I.3.1 Généralités

Il s'agit d'une technique de recouvrement de surface par apport de métal de même nature ou de nature différente de celle du métal constituant le substrat. Cet apport peut être réalisé sur des surfaces déjà dégradées pour effectuer une répartition (rechargement curatif) ou sur une pièce neuve (rechargement préventif). La technique de rechargement s'apparente au soudage ; elle peut être mise en œuvre, soit en une seule étape, soit en deux étapes distinctes (dépôt-refusion), le matériau d'apport étant d'abord déposé sur la surface par enduction ou toute autre technique de revêtement, puis fondu. La conséquence de la fusion du métal d'apport est que le revêtement obtenu est composé à la fois du matériau d'apport et de la partie du substrat qui a été fondue en cours d'opération. Le rapport entre la quantité du métal du support fondu et la quantité totale de métal formant le bain de fusion est appelé taux de dilution.

Le rechargement permet la réalisation de dépôts épais (au-delà de 5mm) pour la réparation comme pour le renfort localisé de pièces fortement sollicitées, avec le souci d'une multifonctionnalité : par exemple résistance à la corrosion et à l'usure en liaison avec une bonne ténacité.

Cette technique utilisée sans trop de difficultés sur des substrats aptes à la soudure, essentiellement des aciers dont la teneur en carbone n'excède pas 0,4% de carbone et des alliages cuivreux. Pour des aciers alliés, il est préférable de prendre les précautions d'usage de pré et post chauffage pour éviter tout risque de fissuration de la zone affectée thermiquement. [13]

La recharge étant en général plus dur et moins élastique que le métal de base, il peut s'ensuivre des tensions au niveau de la zone de contact, il est préférable de prévoir un rechargement en deux ou plusieurs couches de dureté croissantes vers l'extérieur.

La difficulté réside dans la maîtrise du taux de dilution pour garantir le mélange chimique des dépôts.

Dans le cas général, le principe de dilution caractérise le résultat obtenu après réalisation d'un dépôt sur un support d'une autre nuance.

En effet, les alliages utilisés pour être déposés par rechargement sont répertoriés pour la spécificité de leur analyse chimique et leur capacité à répondre aux sollicitations externes.

Dans la majorité des cas, les performances ne sont garanties que dans un état hors dilution, c'est-à-dire avec une analyse chimique correspondant à la classification de la nuance.
Cependant dans le cadre de l'opération de soudage, le produit d'apport est entièrement fondu et déposé sur le métal de base (substrat) lui-même en fusion sous l'impact de l'arc. Le mélange qui est issu du métal d'apport et du métal de base caractérise le taux de dilution résultant de l'opération de rechargement.

La recherche du compromis entre la fusion d'un minimum de métal de base tout en garantissant la qualité de l'accrochage avec le dépôt reste la difficulté majeure dans la définition des modes opératoires pour garantir l'équilibre entre la compacité et l'analyse chimique du dépôt.

Le pourcentage de dilution est à l'image de la modification de la composition chimique de l'alliage de rechargement résultant du mélange avec le métal de base fondu, ou d'une couche ayant été déposée antérieurement.

A noter que pour une maîtrise normale du soudage, un dépôt en deux couches est couramment considéré comme un dépôt hors dilution. La troisième couche, lorsque requise, constitue une réserve d'épaisseur utile lorsque les contraintes de service sont combinées avec Des usures mécaniques des dépôts. [2]

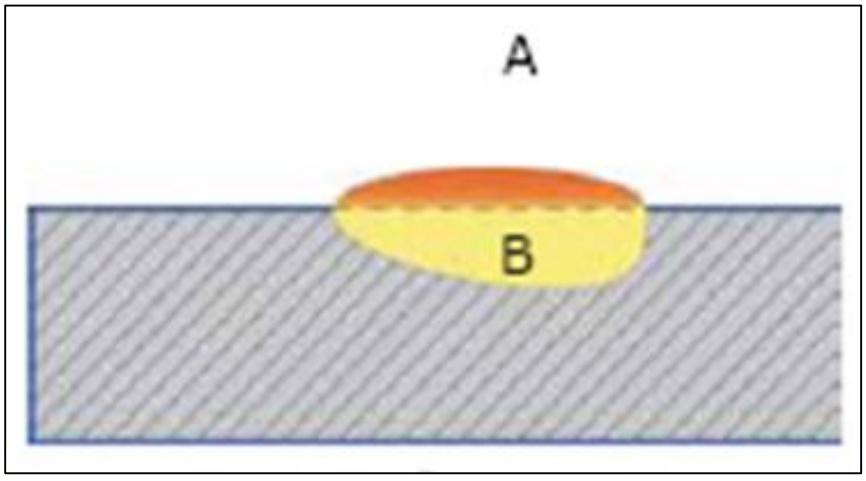


Figure 14.Phénomène De Dilution

Calcul de pourcentage de dilution [2]

$$\boldsymbol{dilution}\ \% = \frac{\boldsymbol{B}}{\boldsymbol{A} + \boldsymbol{B}}$$

I.3.2 Principaux domaines d'application :

L'industrie aéronautique constitue un des domaines privilégiés du procédés de rechargement et projection à chaud avec notamment les trains d'atterrissage, les composants à forte sollicitations mécaniques, les aubes de turbines, les passages de gaz pour composants stationnaires ou en rotation, ainsi que la réalisation de barrières thermiques. L'industrie mécanique constitue le deuxième grand secteur d'application avec réalisation de dépôts résistant à l'usure sur poulies de guidage et cabestans de tréfilage, rouleaux tensioneurs dans les installations de galvanisation ou de recuit en continu sur produits plats, aubes de ventilateurs et de compresseur et des plans de joints mécaniques, ainsi que sur des malaxeurs de pates abrasive.[13]

I.3.3 Paramètres liés au rechargement :

Les paramètres essentiels utilisés dans le rechargement sont, soit ceux ayant un impact direct sur l'énergie de soudage, soit ceux en relation avec le contrôle du taux de dépôt.

Ci-après les principaux paramètres qui peuvent influencer la qualité du rechargement :

- **Vitesse de soudage :**

Une augmentation de la vitesse (les autres paramètres restant constants) réduit la largeur du cordon donc diminue la surface de contact entre le bain et le support. Cette augmentation se traduit également par une modification de la géométrie des cordons qui, à taux de dépôt constant, ont tendance à épaissir le dépôt.

- **Courant de soudage :** L'utilisation d'un courant élevé garantit la performance pour optimiser le taux de dépôt**.**
- **Tension de soudage :** Une diminution augmente la pression d'arc et, par conséquent, a tendance à augmenter la dilution dans des proportions plus importantes. Il est préférable de considérer ce paramètre pour ajuster les conditions de maîtrise de bain plutôt que de considérer une influence directe sur la dilution.
- **Température de préchauffage :** Le préchauffage est prescrit pour des raisons métallurgiques dans l'optique de limiter les vitesses de refroidissement pour réduire les risques de formation de structure fragile.
- **Nombre de couches :** La dilution en première couche entre le métal d'apport et le métal de base ne permet pas, généralement, de garantir les propriétés escomptées pour le revêtement. [2]

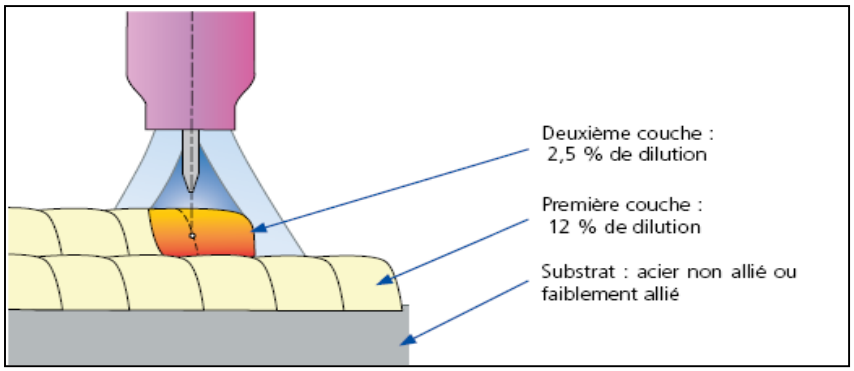


Figure 15. Le pourcentage de dilution décroît du fait de la superposition des couches [2]

I.3.4 Nature des matériaux d'apport

Les matériaux d'apport appartiennent à trois familles : les alliages métalliques, les carbures avec le liant métallique (cermets) et les céramiques (oxydes). Ces matériaux peuvent être véhiculés dans la source d'énergie sous forme de baguettes frittées, de fils, de poudres enrobées dans une gaine de plastique ou de poudre libre entrainée par un gaz inerte. Dans le cas des poudres, la granulométrie moyenne est comprise entre 30 et 150 µm, elle dépond de la source d'énergie et du temps de vol de la particule après interaction avec le milieu.

Les alliages métalliques sont en général projetés par flamme ou arc soufflé, les cermets par flamme à haute vélocité ou canon à dénotation et les céramiques par plasma qui est la seule technique susceptible d'atteindre de hautes températures. Le dépôt se construit couche par couche par empilement de particules portées à l'état pâteux et suivant les conditions opératoire. [13]

I.3.4.1 Les carbures de tungstène :

a- Propriétés structurales :

Le carbure de tungstène est composé d'un alliage de tungstène et de carbone qui est obtenu par réactions chimiques. Puisque son point de fusion est d'environ 2800°C, il est impossible de le mettre en forme par fusion [14]. La formation des revêtements durs en WC et un processus très complexe, à cause de l'existence de plusieurs phases avec la dépendance de la structure et la composition de ces phases avec les paramètres du procédé suivi.

Le domaine de définition du WC est établi dans le diagramme d'équilibre binaire W-C présenté à la figure ci-dessous. Le système W-C présente trois composés :

- Un carbure WC de structure hexagonale simple, et presque stœchiométrique.
- Un carbure WC1-x de structure cubique à face centrée CFC.
- Un carbure W2C de structure hexagonale.

Le diagramme de phase montre que le mono-carbure α-WC est la seule phase thermodynamiquement stable dans le système W-C à température ambiante. Alors que les phases β-WC1-x où 0.34<x

La (figure15) montre que la solubilité de carbone dans la phase α-W pure est très limitée alors que la phase W2C présente relativement un grand intervalle d'homogénéité de la teneur en carbone allant de 25,5 % jusqu'à 34 % à 2715 °C. Les phases W2C sont obtenues comme des produits intermédiaires pendant la production du composé WC. [15]

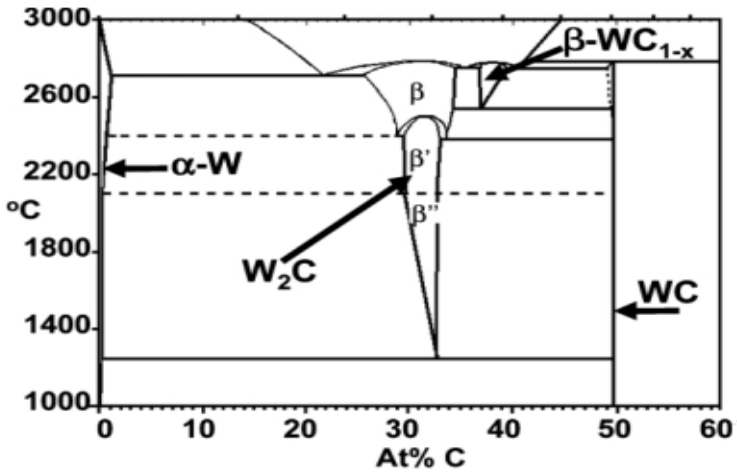


Figure 16. Diagramme de phase du système W-C

c) Caractéristiques et applications

Le carbures de tungstène est un matériau dur et très stable à haute température, il est caractérisé par une dureté relativement grande atteignant 2200 Kg/mm² et 3000 Kg/mm² observée pour les deux carbures WC et W2C respectivement. Ces composés sont extra durs par rapport au métal de base W (360 Kg/mm²), avec une température de fusion élevée d'environ 2800 °C.

Ce matériau réfractaire est largement utilisé comme revêtement dans plusieurs applications industrielles et technologiques. Le tableau suivant représente les propriétés physiques et mécaniques de tungstène et de carbure de tungstène.

Grâce à son module d'élasticité extrêmement important, son bas coefficient de dilatation thermique et sa résistance à l'usure exceptionnelle, le carbure de tungstène est couramment utilisé pour le revêtement des outils de coupe. Sa stabilité thermique et chimique est très avantageuse pour la fabrication de composants à haute température dans les domaines aéronautique et nucléaire. Les carbures de tungstène sont utilisés aussi comme des couches

résistantes à la corrosion, à l'érosion et à la rayure pour de bijoux. Ce matériau est également exploité comme revêtement de roulements. [15]

Propriétés	Tungstène	Carbure de tungstène
Formule moléculaire	W	WC
Structure cristalline	Cubique centre	Hexagonale simple
Paramètre de mille	a=3.165 Å	a=2.9065 Å c=2.8366 Å
Dureté (kg/mm2)	**360**	**2200**
Point de fusion (°c)	3680	2870
Module de Yong(GPa)	407	720
Conductivité thermique (W.m-1.K-1)	174	84.02
Coefficient de dilatation thermique (10-6.K-1)	4.59	5.2
Densité (g/cm3)	19.3	15.8
Résistance mécanique (MPa)	-	**4250-6833**

Tableau 6. Propriétés physiques et mécaniques de tungstène et de carbure de tungstène. [15]

I.3.5 Les défauts de rechargement :

a- Manque de pénétration :

Ce défaut engendre un rétrécissement de la section du métal de la soudure et constitue une amorce de rupture

Causes probables	Solutions
Mauvais diamètre	Choisir le diamètre en fonction de l'épaisseur et de la configuration du joint
Paramètres de soudage inadaptés	Augmenter la vitesse du fil Diminuer la tension

Tableau 7. Manque de pénétration**.**

b- Manque de fusion :

Dans ce cas, le métal de base est non fondu, ce qui crée un manque de liaison entre le métal déposé et le métal de base. Le manque de fusion diminue la section efficace de la soudure. Le collage peut être latéral, entre passes ou à la racine de la soudure. Ce type de problème risque

de survenir si le courant de soudage est trop faible ou si la vitesse est trop grande. Un bon préchauffage des pièces épaisses permet de prévenir ce défaut. Aussi, il peut être très difficile à repérer même avec les rayons X puisqu'il n'a que deux dimensions.

Causes probables	**Solutions**
Mauvais diamètre	Dégraisser Avant de Souder
Energie de soudage insuffisante Vitesse de soudage excessive en regard de l'énergie	Augmenter la vitesse de fil et le voltage Réduire la longueur du stick out Diminuer la vitesse de soudage
Mauvaise technique de soudage	Position de torche inadaptée

Tableau 8. Manque de fusion**.**

Une morsure est un défaut caractérisé par le creusage ou une insuffisance du métal de base sur une partie du cordon. Un caniveau traverse une grande part du métal de base en raison d'une trop grande chaleur du métal d'apport par rapport à l'épaisseur ou à la densité du métal de base. Un courant trop fort ou une vitesse d'avance trop élevée favorise l'apparition de caniveaux. Un mauvais angle de soudage de même qu'une longueur d'arc incorrecte peuvent aussi être à l'origine de ce type de défaut.

Causes Probables	**Solutions**
Vitesse de soudage trop élevée	Réduire la vitesse
Rapport Intensité / Voltage trop Elevé	Diminuer le voltage / Augmenter l'intensité

Tableau 9. Morsures et caniveaux**.**

c- Porosités :

On distingue trois mécanismes susceptibles de donner naissance à des porosités dans le métal fondu :

- L'instabilité du capillaire gazeux dans le cas des soudures effectuées au moyen des procédés à haute densité d'énergie.

- Une suppression gazeuse sans la racine du cordon.
- Une teneur en gaz dissous dans le métal liquide supérieur à la limite de solubilité dans le métal solide à la température de solidification.

Causes Probables	Solutions
Pièce ou fil contaminé	- Enlever les éléments tels que la graisse, rouille, peinture…. - Utiliser des fils “propres”
Vitesse trop élevée provoquant un refroidissement trop rapide	- Réduire la vitesse

Tableau 10.Porosités-causes et solutions

d- Fissurations :

La fissuration à froid apparaît généralement des heures voire même des jours après l’opération de soudage. Elle se produit dans le cordon ou dans la ZAT et elle est causée par l’hydrogène bloqué dans la soudure et/ou par des contraintes résiduelles internes.

Les fissurations à chaud se forment à haute température à la fin de la solidification. Elles sont toujours larges suite à la contraction du métal au cours du refroidissement

Causes Probables	Solutions
Fissuration à chaud	- Adapter le choix du produit d’apport - Limiter l’énergie de soudage
Fissuration à froid	- Préchauffer / Post-chauffer - Diminuer l’apport d’hydrogène

Tableau 11. Fissuration –causes et solutions-

I.3.6 Rechargement MAGNA 404

a- Description :

Alliage formulé pour résister à l'abrasion et à l'échelle extrême et différente types d'usure. Il se compose d'un tube en acier rempli de carbure de métal broyé particules spéciales en alliage cobalt-tungstène. Cette électrode est recouverte d'un revêtement de flux contenant des stabilisants chimiques spéciaux arcs et des matériaux d'alliage avec le tuyau en acier pour améliorer la résistance de la matrice.

b- **Qualité des produits :** il s'agit d'un tube en acier rempli de particules de carbure de tungstène. Certaines entreprises font leur aussi bon marché qu'ils peuvent en utilisant seulement une petite quantité de carbures dans chaque tube. Magna 404 est constitué d'un tube en alliage spécial au lieu d'un tube en acier doux, complètement rempli de carbure de tungstène vierge de qualité spéciale.

c- **Mode d'application :** Magna 404 peut être appliqué en utilisant bien avec chalumeau oxyacétylénique ou à soudage électrique. La zone de combustion intermédiaire de la flamme doit être de 3 fois plus long que le cône intérieur. Métal de base chaude jusqu'à ce qu'il atteigne un rouge cerise terne.

- Prix : 3000 DA/kg
- Epaisseur du dépôt : de 3 à 10mm : optimale 5 mm.
- Composition : 30% de carbure de Tungstène.
- Dureté des Carbures : 800 HV
- Tolérances générales : ± 0.2 mm.
- Type de liant : Cobalt.

Malgré l'amélioration remarquable dans les caractéristiques mécaniques et la durée de vie des outils, ces cordons ne répondent pas aux besoins de l'entreprise surtout du point de vue cout.

I.3.6.1 Analyse des causes de l'endommagement

1- **Les contraintes résiduelles :**

a) **les contraintes résiduelles directes :** Elles sont dues à un empêchement à la libre dilatation dans le joint soudé. Les parties restées froides s'opposent à la dilatation et au retrait du métal.

b) **Les contraintes résiduelles de bridage :** Elles naissent à chaque fois que les éléments à souder sont bridés en position ou en raison de la conception de l'ensemble. Nous ne pouvons les éviter totalement mais il est possible de les réduire en adoptant des séquences de soudage qui retardent le bridage des éléments.

c) **Les contraintes résiduelles parasites :** Elles sont extérieures à l'opération de soudage, elles s'exercent sur le joint pendant l'opération (exemple : masse de l'ensemble en porte à faux). Il est possible de les éviter en adoptant des dispositions en conséquence (exemple : soutien de l'ensemble pour éviter l'effet de flexion.)

d) **Les déformations liées aux phénomènes de retrait :** L'étude détaillée d'un ensemble soudé nous permet de déterminer au regard des« Mécanismes de retrait » le type et le sens prévisible des déformations. Le raccourcissement de la zone soudée peut s'expliquer comme étant la conséquence d'une force dite « de retrait » La ligne d'application de cette force se trouvant au centre d'inertie de la surface où sont concentrées les contraintes résiduelles de traction [16]

2- La soudabilité :

C'est Facilité avec laquelle un matériau ou des matériaux peuvent être soudé(s) pour produire un joint acceptable. [17]

Un matériau métallique est dit soudable dans une certaine mesure par un processus donné et dans un but donné, lorsqu'une liaison métallique continue peut être obtenue par soudage en utilisant un processus adapté, de manière que les joints satisfassent aux exigences spécifiées du point de vue de leurs propriétés locales et de leur influence sur la construction dont ils font partie. [18]

- **Influence des éléments d'addition sur la soudabilité (cas des aciers du malaxeur)**

Les éléments d'addition les plus importants entrant dans la composition des aciers sont : le manganèse, le nickel, le chrome, le molybdène car ils tendent à augmenter le pouvoir trempant du métal.

La figure suivante met en évidence l'influence du manganèse sur la soudabilité, ainsi un acier à 0,2 % de C + 1,5 % de manganèse à une soudabilité analogue à un acier à 0,35 % de carbone.

Tous les éléments qui suivent favorisent le pouvoir trempant de l'acier mais également :

Carbone : Nécessaire pour accroître la résistance à la rupture et la dureté.

Manganèse : Neutralise la fragilité engendrée par les sulfures (composition du soufre avec un autre corps).

Nickel : Il améliore la dureté et la résistance à la traction.

Chrome : Il augmente la résistance à la corrosion et à l'oxydation.

Molybdène : Il accroît la résistance à chaud et à l'abrasion [19]

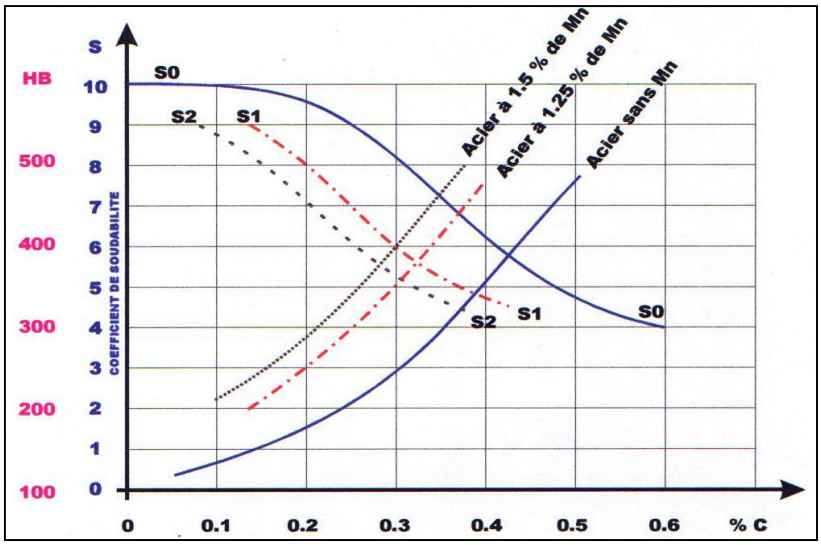


Figure 17.Influence du manganèse sur la soudabilité. [16]

En comparant les données bibliographiques avec la composition chimique de l'acier utilisé, on peut dire que les bras de malaxeur présentent une très bonne soudabilité, et l'enlèvement de la partie rechargé ne peut être à cause du mauvais accrochage entre le dépôt et l'outil.

3- La qualité du cordon de soudure :

Les mécanismes principaux de l'endommagement des WC sont

- Perte des propriétés mécaniques du liant et possibilité de micro-glissement des carbures de tungstène entre eux.
- Déformation plastique et microfissuration inter granulaire des grains de WC [20]

Lorsque le carbure WC est soumis au frottement, on assiste tout d'abords à l'usure référentielle de la phase liant, suivie par la fraction et l'arrachement des grains de carbure.

La dureté, ainsi à l'usure du matériau, dépondent fortement du taux de la phase liante. Ajoutons enfin que la résistance du WC à l'usure est améliorée par addition d'autres carbures, tels que TiC, TaC et NbC. [21,22]

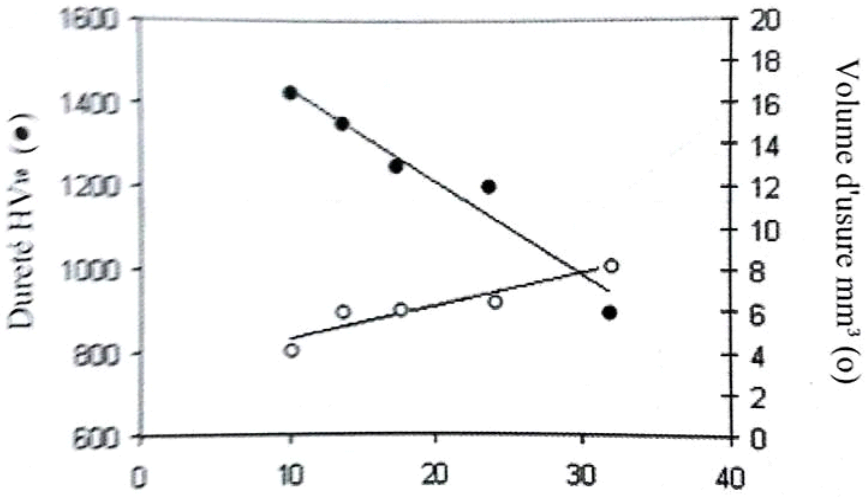


Figure 18.teneur de cobalt (volume%)

Variation de la dureté et du volume d'usure du cermet WC-Co en fonction du pourcentage de la phase liante. Le tribomètre utilisé est de type patin contre cylindre, et la charge appliqué est de 40N [23].

En comparent ces données avec les caractéristiques du cordon MAGNA404 on peut dire que ce dernier possède une composition chimique qui peut causer son endommagement en contact avec un matériau assez dure comme la silice.

Afin de trouver une autre solution, des rechargements avec les cordons sphérotène ont été effectués à titre expérimental dont nous avons la charge de cautériser.

I.3.7 Rechargement au SPHEREOTENE

a- Caractéristiques :

Cordons souples à base de Carbure de Tungstène**.** Constitué d'un fil d'âme, de petit diamètre en Nickel et d'un revêtement épais composés de grains de Carbure de tungstène et d'un alliage à base de Nickel. À base de grains, de Carbure de Tungstène fondu, sphériques.

- Dureté du carbure : jusqu'à 2300HV/2500HV.
- Dépôt : de 2 à 7 mm (5mm optimale).
- Composition : + de 60 % de carbure de Tungstène, avec un liant à base de nickel

b- Applications

Pour blindage des aciers non alliés et faiblement alliés ou d'aciers moulés ayant max. 0,5%C, au-delà il peut y avoir des défauts de liaison.

Dans la technique de résistance à l'abrasion ; pour blindage d'outils et de pièces de machines utilisées dans les exploitations minières, constructions de routes, constructions de puits, forage profonds etc.

c- Mode opératoire :

- **substrat :** la recharge avec Sphérotène peut se faire sur tous les aciers non alliés ou faiblement alliés ainsi que pour les fontes d'acier dont la teneur en carbone n'excède pas 0,5%. Si la teneure en carbone est nettement supérieure à cette limite, il peut résulter des défauts d'accrochage et une moindre résistance aux chocs. La dureté de substrat doit être telle que la recharge ne puisse la pénétrer au moment des efforts.
- **Préparation des pièces :** il faut veiller à ce que les surfaces à recharger soient débarrassées de toute trace de rouille, calamine, graisses et autres impuretés. Il est recommandé de procéder à un nettoyage mécanique de la surface (sablage, meulage, etc.…) afin qu'elle soit nette et permettre un accrochage parfait de la recharge.
- **Procédure** : sphérotène se soude à l'autogène. Il n'est pas nécessaire de préchauffer des petites pièces (les outils de malaxeur). Les pièces plus grandes pour lesquelles la température de la surface nécessaire à un bon accrochage (soit 850°C) ne peut pas être atteinte au moment du soudage, doivent être préchauffées à 500-600°C dans un four ou avec une torche.
- **Traitement postopératoire :** le rechargement avec Sphérotène est insensible à un refroidissement rapide. Il n'est pas nécessaire de le soumettre à un traitement particulier. Il est possible de recuire la pièce rechargée sans dommage pour le revêtement. Par contre, il faut éviter un refroidissement brutal par de l'eau.

I.3.8 Choix des matériaux de substitution :

Le choix d'un couple de matériaux pour une application tribologique ne peut se faire de façon satisfaisante que si les conditions de sa mise en œuvre sont parfaitement connues. Ces conditions englobant la géométrie et la pression de contact la nature du mouvement des corps antagoniste la vitesse du déplacement relatif la nature et l'épaisseur du corps interpose à l'interface et l'ambiance dans la quelle le système est plongé (température humidité espèces chimique réactives).

Les problèmes de tribologie sont de nature pluri discipline puisqu'ils font appel aussi bien à la mécanique du contact et à la physique des surfaces qu'à la chimie des matériaux et des interfaces c'est la raison pour résoudre un problème de tribologie il est nécessaire a chaque fois d'analyser minutieusement le problème pose pour y apporter la solution adapte. L'une des règles de sélection des couples de matériaux est la règle dite de **« compatibilité**

tribologique » cette règle stipule que des matériaux insolubles entre eux seront peu ou pas adhésifs l'un vis-à-vis de l'autre et constitueront un bon couple frottant. Cette règle doit être utilisée avec discernement et beaucoup de précautions car elle n'est pas toujours vérifiée et ce principalement pour deux raisons :

La solubilité est une propriété volumique des matériaux alors que le frottement fait intervenir principalement les caractéristique de surface telle que la dureté la structure cristallographie l'énergie de surface et la topographie.

Le critère de solubilité ne tient pas compte des transformations chimique (oxydation transformation de phase formation de nouveaux compose etc.) et structurales (transformation allotropique recristallisation écrouissage) qui peuvent se produire au cours du frottement et modifier considérablement les propriétés superficielles des matériaux antagonistes**.** [23]

I.3.8.1 Les alliages ferreux

Cette famille de matériaux comprend les aciers et les fontes en faisant varier la composition et en choisissant des traitements thermiques et thermomécaniques adaptes on peut obtenir un vaste choix de propriété et de caractéristique mécaniques et physico-chimiques. Dans la majorité des cas lorsqu'ils sont destines a des applications tribologiques les alliages ferreux subissent au préalable des traitements de surface visant à améliorer leurs caractéristique superficielles et sont généralement mis en œuvre en présence d'un lubrifiant.

I.3.8.1.1 Les aciers

Les différentes phases présentes dans l'acier ont une résistance à l'usure et des propriété mécanique très différentes les unes des autres la ferrite l'austénite et la perlite sont des phases relativement molles (dureté comprise entre 100 et 300hv) et offrent une faible résistance à l'usure. D'une manière générale on évite l'utilisation de matériaux a structure homogène (ferrite ou austénite), et on préfère la perlite ou une structure ferrite-perlitique avec précipitation de carbures durcissant les phases dures telles que la martensite et la bainite (dureté comprise entre 800 et 1000hv) sont particulièrement adaptées a la lutte contre l'abrasion [25, 26].

La microstructure de l'acier retenue pour une application donnée devra tenir compte du type de sollicitation auxquelles sera soumise la surface du matériau et du type l'usure qu'elle risque de subir. Dans le cas de l'usure abrasive on privilégiera la dureté [27], alors qu'en cas d'impacts on cherchera plutôt une microstructure conférant au matériau une certaine ductilité. Lorsqu'il y'a risque d'usure adhésive, on évitera en particulier de faire frotter des surfaces

antagonistes possédant la même microstructure (ceci est particulièrement vrai pour les phases homogènes).

Les caractéristiques mécaniques de l'acier sont sensiblement améliorées par l'addition de chrome molybdène vanadium manganèse et nickel. L'ajout de petites quantités (1 a 4%) de ces éléments permet d'affiner la microstructure et de conférer au matériau une dureté et une résistance a l'usure plus élèves [26].

Certains aciers sont plus riches en tel ou tel élément qui leur confère des propriétés spécifiques c'est le cas d'aciers au manganèse qui peuvent contenir jusqu'à 15% de cet élément. Grace a leur bonne résistance a la corrosion et a leurs caractéristiques mécaniques remarquables, en particulier leur haute ténacité ces aciers sont particulièrement mis en œuvre dans les broyeurs aussi bien dans les carriers que dans les cimenteries ou les mines ils ont également utilisée pour la fabrication des rails de chemin de fer de l'outillage etc.

a- Les fontes

Ces matériaux se caractérisent par une bonne aptitude au frottement et une excellente résistance à la fatigue. On distingue la fonte blanche dans laquelle le carbone est présent sous forme de cémentite, de la fonte grise ou le carbone se retrouve principalement sous forme de graphite lamellaire (font GL) ou sphéroïdal (fonte GS) la fonte blanche est dure et présente une très bonne résistance a l'usure abrasive. Elle est toutefois fragile et difficile a usiner la fonte grise est plus ductile, présente une excellente usinabilité et une bonne résistance a l'usure. Elle se caractérise également par une certaine aptitude à amortir les chocs et les vibrations et à supporter aussi bien la fatigue thermique que la fatigue mécanique. Elle est largement utilisée dans les blocs moteurs, les vilebrequins ou encore les engrenages, ou toute pièce soumise a des contraintes cycliques. La présence de carbone graphique contribue à réduire le frottement à la surface de la fonte grise. Toutefois, sa mise en œuvre nécessite souvent une bonne lubrification. [23]

I.3.8.2 Fonte au chrome résistante à l'abrasion :

Les fontes à haute teneur en chrome constituent une classe de matériaux dont l'élaboration devrait être considérée à part par rapport aux fontes ordinaires. Elles occupent une bonne place dans le marché comme elles sont largement utilisées dans les domaines miniers, cimentier, industries chimiques ainsi que dans d'autres domaines où la résistance à l'usure est souhaitée. Les éléments carburigènes favorisent la formation de plusieurs types de carbures

tels que : M3C, M7C3, M23C6, M2C, M6C et MC. La présence de ces carbures alliés dans la microstructure permet un bon comportement à l'usure. [8]

Le pourcentage de carbone vari entre 1.2 et 5%. Le pourcentage de chrome vari entre 12 et 32%. Ce type de matériaux n'atteint sa plus grande résistance contre l'usure qu'après un traitement thermique effectué entre 900 et 1050°C avec refroidissement à l'air ou en mode accéléré. La structure est composée d'un taux important de carbure de chrome dans une structure de base martensitique. Ce type de matériaux possède une ténacité relativement basse, et pour une utilisation optimale, il faut absolument prendre en compte ce facteur. En d'autre terme cela veut dire qu'il ne faut pas employer cette fonte en la soumettant à pliage, et pour cela bien souvent il faut prendre garde à la planéité du support sur lequel se fixera de telle pièce. Bien souvent la face d'appui d'une pièce sera usinée par rectification, car toutes les autres opérations d'usinage seront très difficiles pour cause de dureté élevée.

Pour certain type d'alliage une trempe sera nécessaire pour améliorer l'usinabilité, ainsi qu'un recuit pour atteindre la dureté finale souhaitée. [28]

Notre choix s'est porté sur cette dernière, non seulement pour les caractéristiques dont elle dispose, mais pour la facilité du procédé de fabrication, par coulé en mono bloque, prenant en considération que la fonte est le matériau principale de l'entreprise, son utilisation apportera un prix de revient important pour l'entreprise.

.

CHAPITRE II : PARTIE EXPERIMENTALE

II.1 Introduction

Les essais sont effectués sur 3 types de matériaux MAGNA 404, Sphérotène, et la fonte au chrome trempée. La caractérisation porte sur:

- L'analyse chimique,
- L'étude métallographique.
- La caractérisation mécanique (dureté, comportement tribologique usure par abrasion ou perte de masse).

Les compositions chimique des trois matériaux a sont les suivant :

a) **Matériaux de rechargement MAGNA 404 :** 30%WC, 60%Co, 10% Fe.

b) **Matériaux de rechargement Sphérotène :** 60%WC, 35% Ni, 5% Fe.

c) **la fonte au chrome :**

C	Cr	Si	Mn	P	S	Ni	Mo
2,35	**13,63**	**0,7**	**0,45**	**0,05**	**0,061**	**0,3**	**0,1**

Tableau 12.composition chimique de la fonte au chrome

II.2 Préparation des échantillons

II.2.1 Mode opératoire du rechargement :

a) **Préparation des pièces :** les échantillons doivent être bien nettoyés de toute impureté. Au niveau de l'entreprise ALFEL, le nettoyage a été effectué par grenaillage.

b) **Procédure :** Vu la petite taille des échantillons, il n'était pas nécessaire de passer par le préchauffage pour atteindre la température 500-600°C.

- La surface doit être horizontale pour éviter l'écoulement.
- Le dépôt se fait à un seul sens pour éviter la surchauffe du produit de dépôt.
- La tension de soudage appliquée est 120 A.
- Epaisseur de dépôt : 5mm.

II.2.2 Gamme du traitement thermique de la fonte

Les traitements thermiques sont accomplis d'après le cycle ci-dessous.

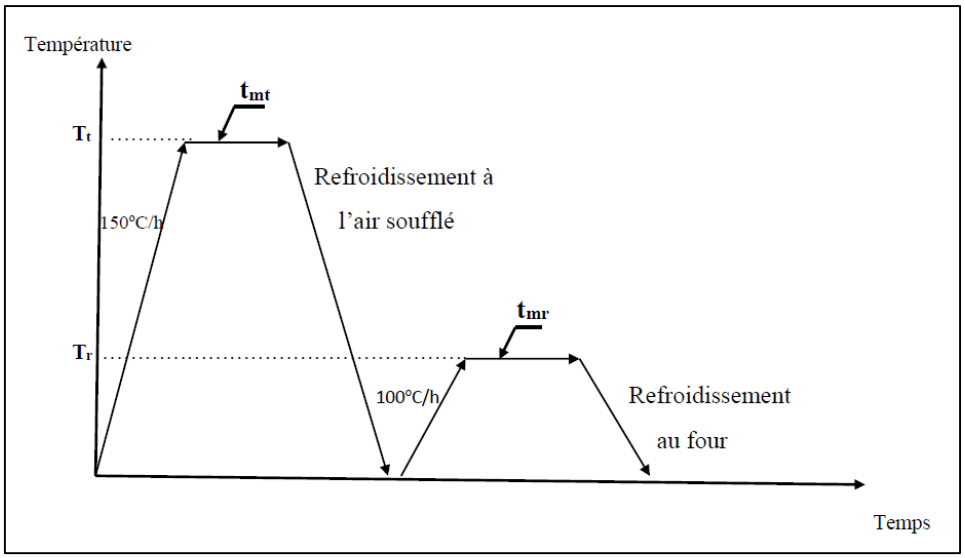


Figure 19. Cycle thermique des trempes et revenues réalisés.

- T_t : Température de trempe (950°C).
- T_r : Température de revenu 250°C.
- t_{mt}: Maintien isotherme à la température de trempe, ce temps estimé à d/2+20 minutes.
- t_{mr}: Temps de maintien à la température de revenu, il est d'une heure pour 25 mm.
- Le maintien à la température de trempe est en fonction des dimensions des pièces ; il doit être suffisamment prolongé jusqu'à l'achèvement des transformations.
- La vitesse de refroidissement à l'air soufflé est d'environ 40°C à 60°C/minute.
- La vitesse de refroidissement au four est de l'ordre de 100°C/h.

II.3 Métallographie :

II.3.1 Polissage :

Les échantillons ont subi un cycle de polissage réalisé sur une polisseuse (150-300tr/mn), lubrification continue par jet d'eau pour éviter tout échauffement local suite au frottement, en utilisant des papiers abrasifs (sic) de différentes granulométries : 120, 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 et 4000. Les papiers ont été utilisées successivement dans l'ordre décroissant de la granulométrie en prenant soin de tourner l'échantillon de 90 afin d'éliminer les rayures laissées par le polissage précédent sur chaque papier, on maintient en contact l'échantillon pendant 2 a 3 minutes. Pour la finition nous avons utilise une suspension d'alumine Al_2O_3 dispersée

Figure 20.polisseuse

II.3.2 Nettoyage et attaque chimique :

Les échantillons sont polis sont rincés à l'e distillé, séchés à l'air chaud puis nettoyer à l'éthanol.

L'attaque chimique se fait à l'aide de réactif qui permet de différencier les différentes phases, et de révéler les joins des grains, cette méthode consiste à trempé la face à attaquer dans le réactif choisi pendant un temps convenable.

Le bains d'attaque utilisés sont :

- **Le Nital (4%)** pour les substrats, dont la composition chimique est : 4ml d'acide nitrique, 100ml d'éthanol, durée de l'attaque environ 40 secondes.
- **Le Murackami** pour les carbures de tungstène, ayant la composition chimique : - 1 volume d'acide nitrique, 2 à 3 volumes chlorhydrique, 2 à 3 volumes de glycérine. Durée de l'attaque : pendant 4-5mn à T ambiante.

II.3.3 Microscope optique

Dans le but de mettre en évidence les microstructures, nous avons effectue l'examen métallographique des surfaces polies au microscope optique« NIKON ».

II.3.3.1 Principe

Le principe du microscope optique repose sur la réflexion de la lumière par les échantillons métalliques et l'agrandissement des images effectué par un jeu de lentilles disposées dans les objectifs et les oculaires. Une source lumineuse émet une lumière focalisée grâce à un condenseur et éclaire l'échantillon pour donner une image agrandie grâce à la lentille objectif. Un miroir permet de transformer l'image sur l'oculaire et sur la caméra. L'étalonnage de mesure des dimensions réelles après agrandissement est effectué au moyen d'une réglette,

fournie avec le microscope, de 1 mm de taille, divisée en 100 subdivisions. La figure suivante montre le schéma de principe du microscope optique utilisé.

II.3.4 Le microscope électronique à balayage (MEB) :

La caractérisation par la microscopie électronique à balayage (MEB) est la plus utilisée parmi les autres techniques de microscopie parce qu'elle ne nécessite aucune préparation préalable de l'échantillon qu'on veut analyser.

II.3.4.1 Principe de fonctionnement :

En relation avec le mode de diffusion des électrons par l'échantillon, le MEB fournit des images de manière séquentielle en balayant la surface de matériau par un faisceau d'électrons. L'impact d'un faisceau d'électrons sur la surface d'un échantillon engendre une émission des électrons secondaires et rétrodiffusés. Ces derniers sont détectés dans des détecteurs. Une image est obtenue en relation avec l'intensité du courant électrique produit en chaque point de la surface. La topographie de l'échantillon est ainsi obtenue.

Les différentes particules émises : électrons secondaires, rétrodiffusés et photons X permettent une polyvalence d'analyse (une analyse en fluorescence X, une analyse en composition chimique…etc.).

II.4 Caractérisation mécanique

II.4.1 Essai de dureté

La dureté d'un matériau est une propriété mécanique représentant la résistance à la Pénétration d'un indenteur dont la forme dépend du procédé d'indentation choisi. Pendant l'essai de dureté, il se forme une empreinte d'indentation entourée d'une zone déformée plastiquement. Plus la dureté n'est élevée, plus l'empreinte et la zone déformée sont réduites. La déformation plastique est le résultat de microdéformations intervenantes à l'échelle de la maille cristalline à partir des défauts microstructuraux comme les précipités, les atomes en insertion ou en substitution et les dislocations.

Dans notre étude nous avons utilisé la dureté Vickers HV sous faible charge de 1 kg le tableau ci-dessus résume les valeurs de profile de dureté sur les types des échantillons.

II.4.2 La micro-dureté :

Faits sous très faible charge, les essais de micro-dureté permettent des mesures très localisées (sur environ 100 µm2). À l'aide d'un appareillage on peut par exemple déterminer la dureté d'une phase donnée dans un échantillon polyphasé ou celle d'un échantillon de différent couche de profile.

La micro-dureté étant fortement dépendante de la microstructure de notre échantillons et surtout des zones qui sont formés.

Le temps de pénétration pour la micro dureté Vickers est environ de 10 secondes. Nous avons pris plusieurs mesures pour chaque constituant structural sous une charge de 50 grammes forces. Cette méthode consiste à appliquer une force et mesurer ensuite l'empreinte.

On peut alors trouver la dureté de Ludowick-Vickers avec la formule:

$$H_v = \frac{P}{M} = \frac{\frac{P}{d^2}}{1.8544} = 0.189 \times \frac{P}{d^2}$$

II.4.2.1 Principe :

L'essai consiste à mesurer l'enfoncement rémanent d'un pénétrateur sous forme pyramidale en diamant à base carrée. L'angle entre deux faces opposées est de 136 °. Après l'application d'une charge sur la surface à examiner, on mesure les deux diagonales d1 et d2 de ce carré. On obtient la valeur d en effectuant la moyenne de d1et d2. C'est d qui sera utilisé pour le calcul de la dureté

II.4.3 Essai de tribologie :

Pour déterminer les coefficients de frottement pour les différents échantillons on effectuer l'essai tribologie au niveau de laboratoire a l'école national des mines et métallurgie

II.4.3.1 Principe et rappel :

Les tests tribologiques sont conduits à l'aide de tribomètres qui peuvent travailler à l'air ou sous atmosphère contrôlée, à sec ou en présence d'un lubrifiant. La figure ci-dessous montre un exemple de tribomètre de laboratoire de type pion-plan à ; en mouvement linéaire alternatif Les paramètres imposées sont généralement la charge appliquée, la vitesse de glissement et les conditions environnementales (taux d'humidité, atmosphère contrôlée : nature et pression des gaz introduits, etc.). Les grandeurs mesurées sont généralement la force de frottement, la température des surfaces, la résistance de contact et l'usure.

Coefficient de frottement:

$$\mathbf{F= f\ FN}$$

Le coefficient de frottement est une propriété du système formant le contact. Sa valeur dépend :

- De facteurs mécaniques (force normale, vitesse de déplacement, viscosité du lubrifiant).
- De facteurs chimique (humidité, oxydants, additifs).
- Des propriétés des matériaux (dureté, plasticité, énergie de surface).

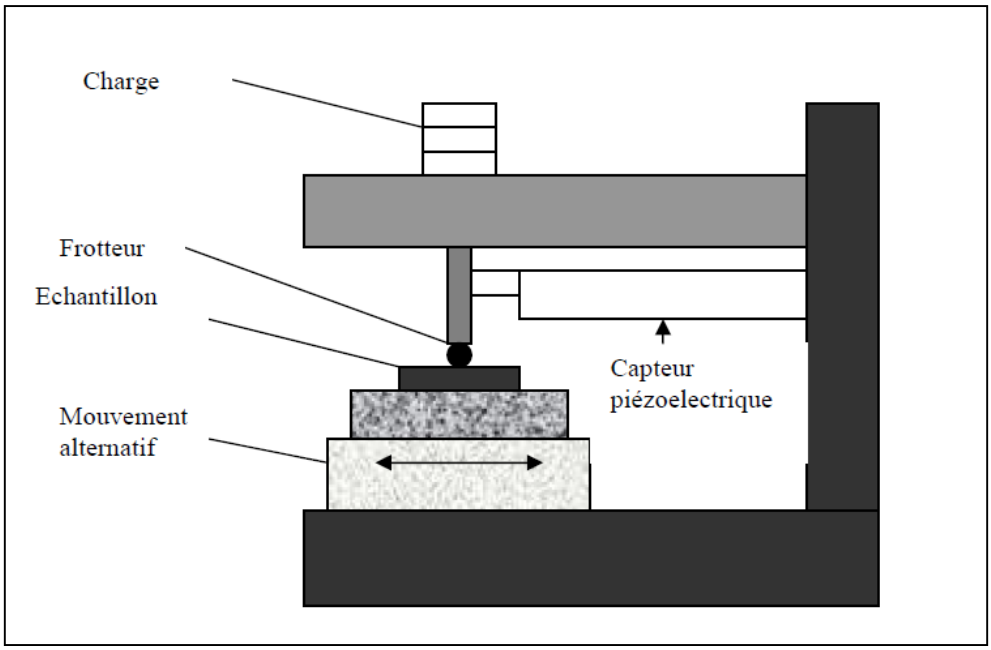


Figure 21. Tribométrie pion-plan

II.4.3.2 Montage utilisé

L'Equipment utilisé pour déterminer le coefficient de frottement est un tribomètre Bille-Disque « Modèle TRB-S-DE-0000, Marque CSM Instrument »

L'essai consiste à produire un déplacement relatif entre deux corps sous une charge contrôlée. L'échantillon en contact avec une bille montée sur un bras élastique subit un déplacement rotatif ou alternatif. La faible déflection du bras permet de déterminer les forces tangentielles et donc le coefficient de frottement induit par ce déplacement. Les taux d'usure pour l'échantillon et pour le matériau antagoniste sont calculés en déterminant la perte de volume par unité de distance parcourue.

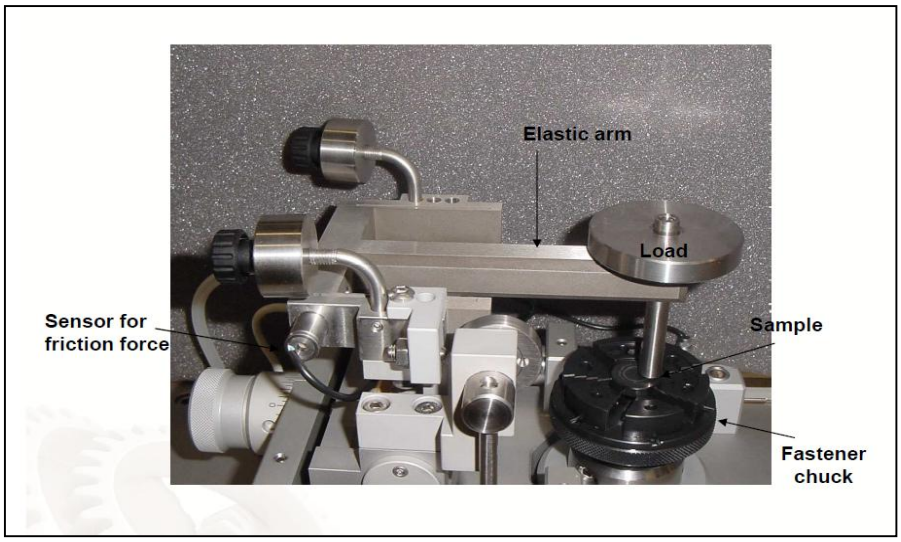


Figure 22. Tribomètre Bille-Disque et Pion-Disque

Vitesse de rotation	Distance parcourue	charge	Nature de bille
5m/s	50 m	10N	Alumine

Tableau 13.paramètres de l'essai de tribologie

II.4.4 Usure par frottement

Ce dispositif a été réalisé au niveau du laboratoire de l'université de Badji Mokhtar Annaba. L'essai effectué sur cet appareil est un essai utilisé par l'ensemble du monde industriel.

Cette essai consiste à mesurer la quantité de matière perdue après passage de 1h de l'échantillon sur un Pierre d'une meule de granulométrie 320 mm, avec une vitesse de rotation de 120 tours /minute et une charge P de 0.5 Kgf avec une distance parcoure de 40m.

Figure 23. Dispositif utilisé pour l'usure par frottement.

Nous avons choisi la géométrie de contact plan / plan. Cette configuration géométrique permet le frottement des échantillons plans sur lesquels on peut mesurer la quantité de matière enlevée par une simple pesée à l'aide d'une balance analytique de grande précision. L'échantillon plan qui est fixe frotte contre un abrasif en quartz, monté sur un disque de polisseuse est maintenu par un porte échantillon que nous avons fabriqué au sein de l'atelier de fabrication mécanique.

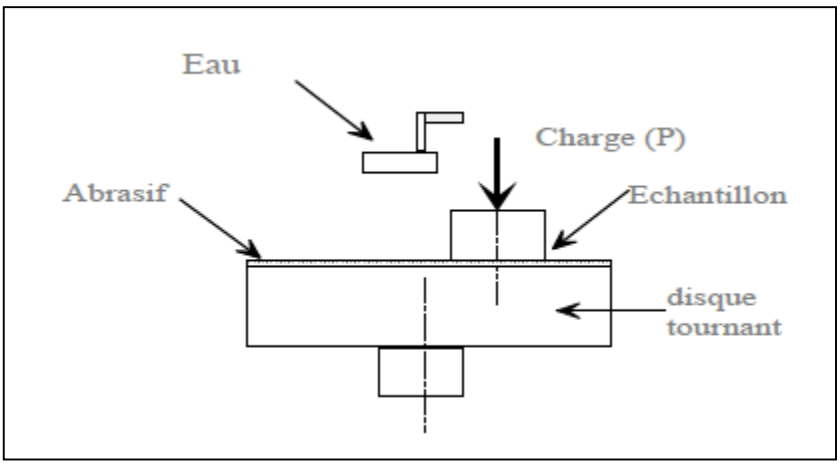


Figure 24. Dispositif de frottement des surfaces planes

On note que les expériences étaient conduites dans un milieu lubrifié à l'eau et à température ambiante où on fait varier la charge, la vitesse et la taille de l'abrasif.

Nous signalons que la perte en poids pendant 1h est mesurée après et avant l'essai.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1 Cas du rechargement MAGNA404 :

III.1.1 Observations métallographiques :

Les micrographies suivantes représentent les structures métallographiques du rechargement MAGNA404. On observe une structure biphasée avec des carbures WC en pointe et du liant Co en grande quantité, 60% de Cobalt et 30% WC.

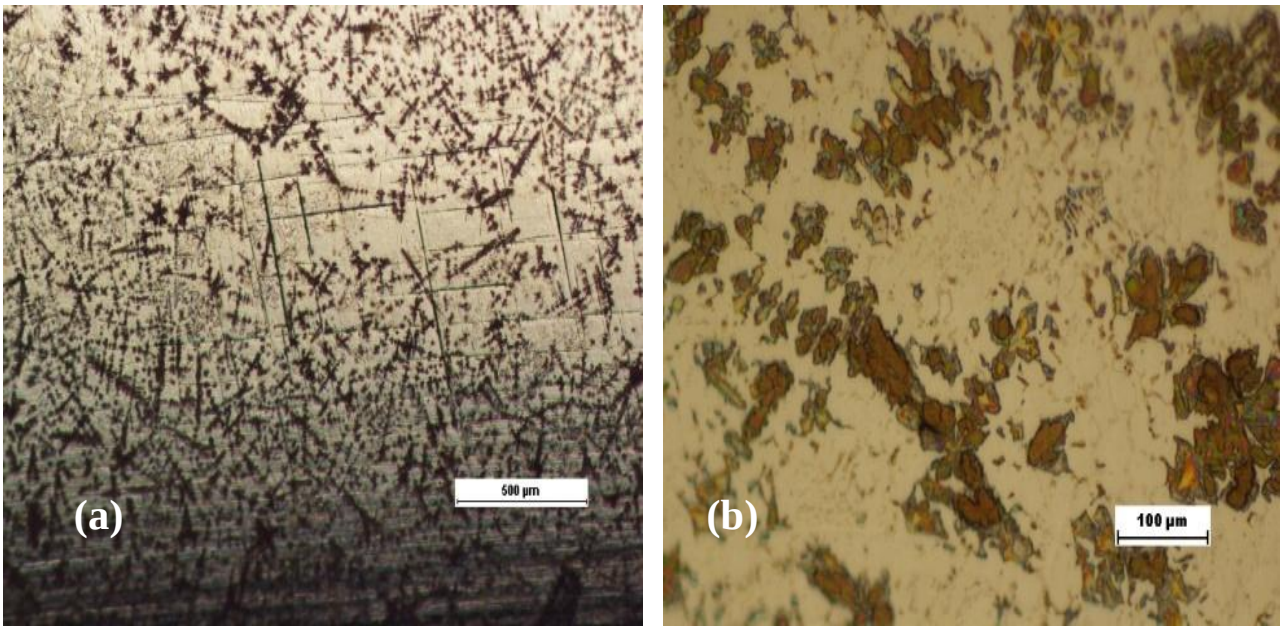


Figure 25. Micrographie du rechargement (MAGNA404), grossissement a) G=5X, b) G=100X

III.1.2 Microdureté Vickers :

Les valeurs de micro-dureté relevées sur les trois zones substrat-zone intermédiaire-rechargement sont indiquées dans le tableau suivant :

D	0	0,5	1	1,5	2	2,5	4	4,5	6	7	7,5	8	8,5	10	12
HV	1058	940	894	982	1035	511	640	507	385	367	79	71	70	73	75

Tableau 14.resultats de la micro-durete MAGNA404

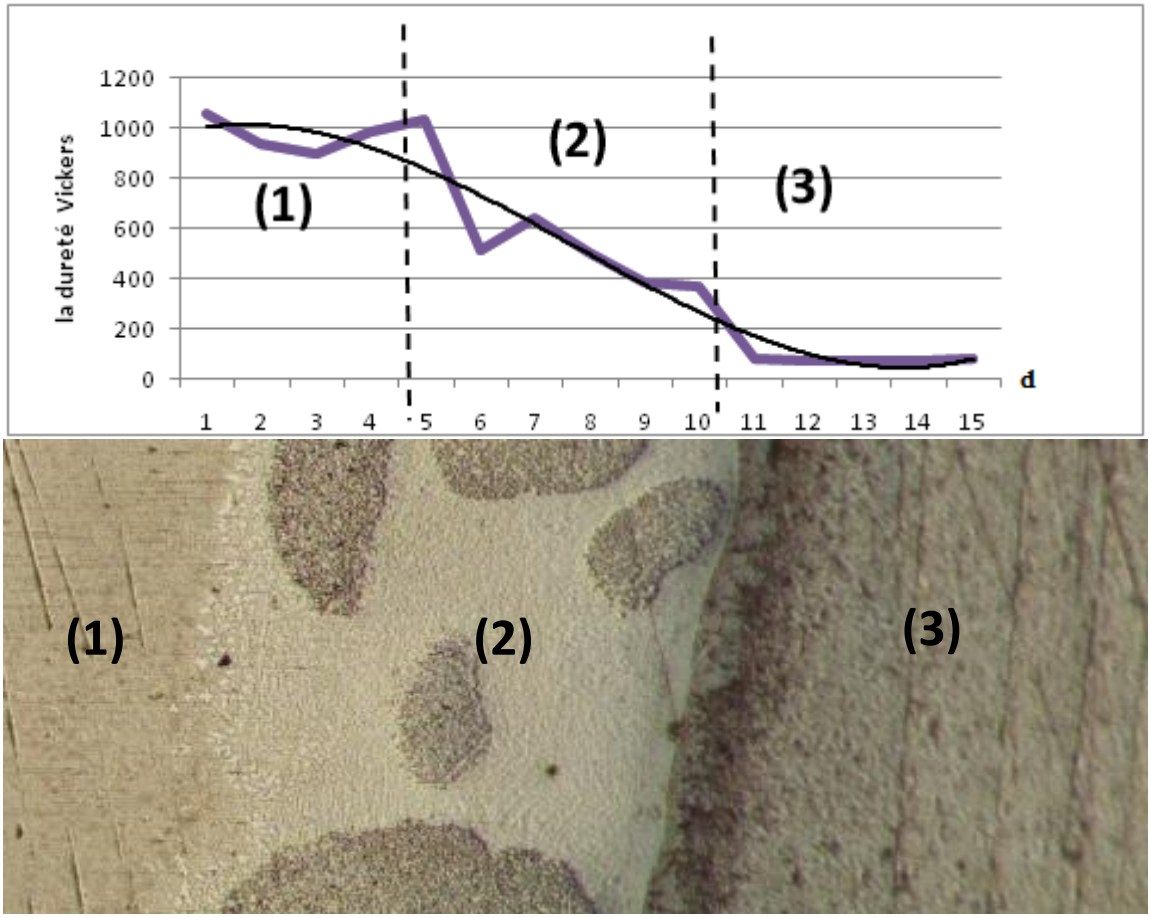


Figure 26. Profile de la micro-dureté

La courbe indiquée à la figure 26 représente le profile de micro-dureté Vickers mesurée à travers la zone de rechargement (1), la zone d'accrochage (2), et le matériau de base (3).

On remarque que la partie de rechargement est plus dure que l'outil, ceci en raison de la présence du WC dans la première phase. La faible dureté du métal de base est due à la faible teneur en éléments durcissant, Le niveau élevé de la micro-dureté du rechargement MAGNA 404 confère à l'outil une meilleure résistance à l'usure d'où l'augmentation de sa durée de vie.

III.1.3 La dureté :

Les duretés mesurées en quatre points différents sont indiquées dans le tableau suivant :

Point	1	2	3	4	**Valeur moyenne**
Dureté(HV)	714	613	635	617	645

Tableau 15.résultat de la dureté MAGNA404

Cette faible valeur de la dureté s'explique par la forte teneur en cobalt du fil de rechargement. La dureté des matériaux de rechargement en WC est inversement proportionnelle à la teneur en Co.

III.1.4 Essai tribologique :

L'évolution du coefficient de frottement en fonction de la distance de parcours est représentée par le graphe suivant :

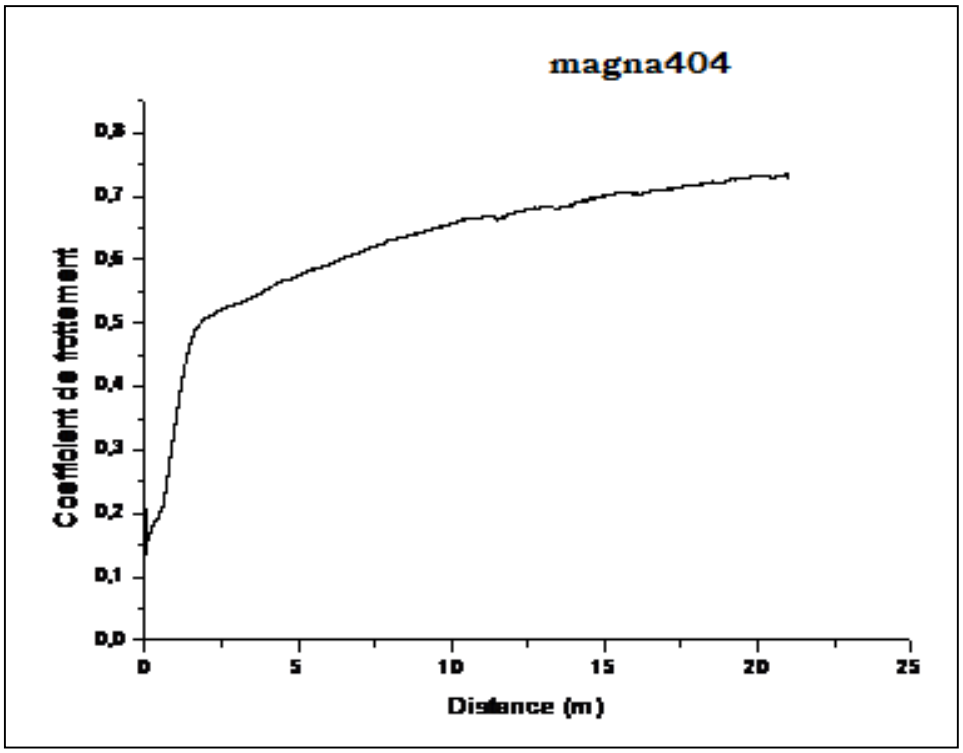


Figure 27. Evolution du coefficient de frottement du MAGNA404 en fonction de la distance

On observe au début de la courbe une période perturbée, c'est la zone d'accommodation qui correspond au cisaillement des aspérités des matériaux en contact. Le coefficient de frottement moyen stabilise à 0,720.

Les cordons MAGNA404 possèdent un coefficient de frottement élevé, en raison de sa faible dureté due à la teneur élevée en cobalt.

III.2 CAS DU SPHEROTENES

III.2.1 Observation métallographiques :

La micrographie indiquée ci-dessous représente la structure métallographique du métal d'apport sphérotène.

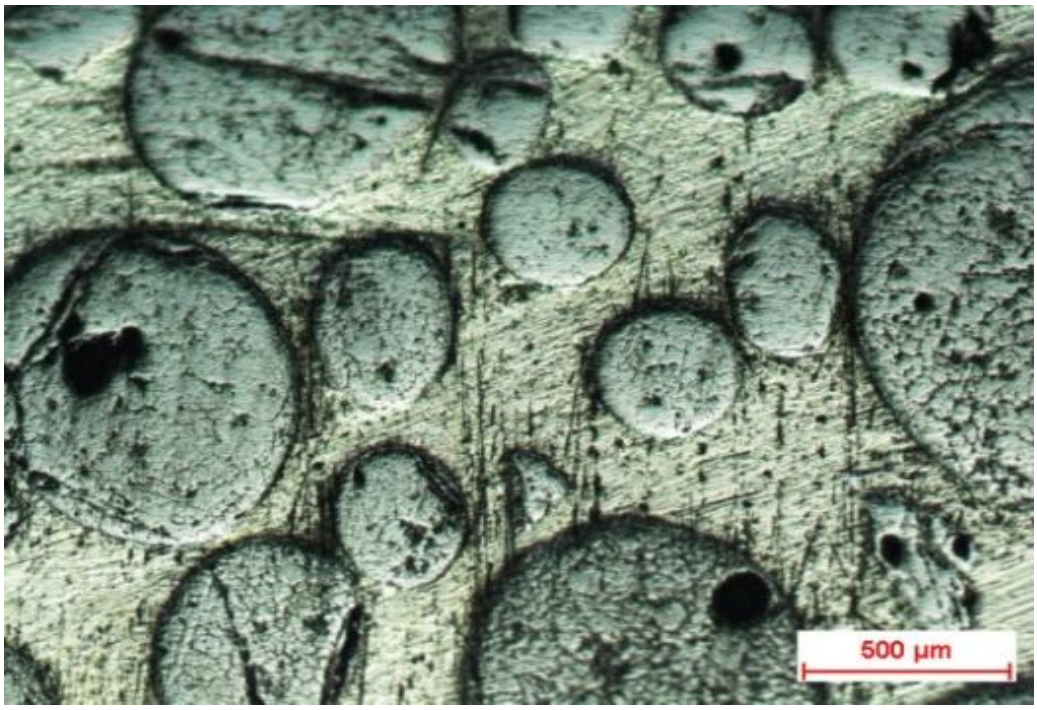
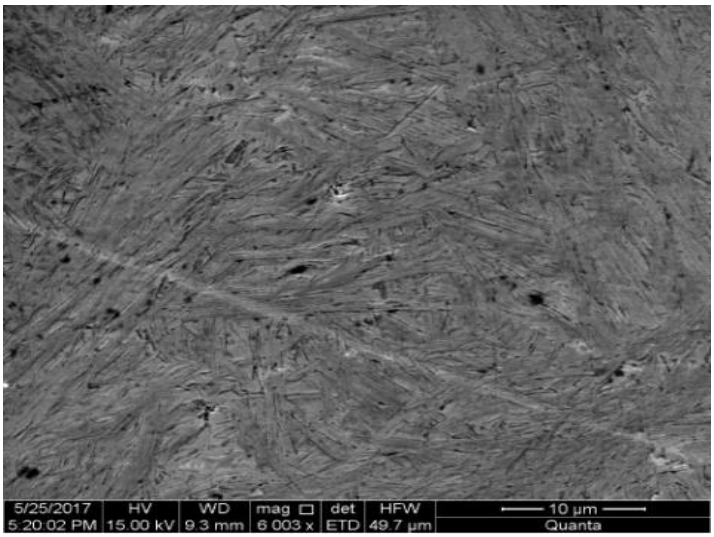


Figure 28. Microscopique du rechargement SPHEROTENES, grossissement

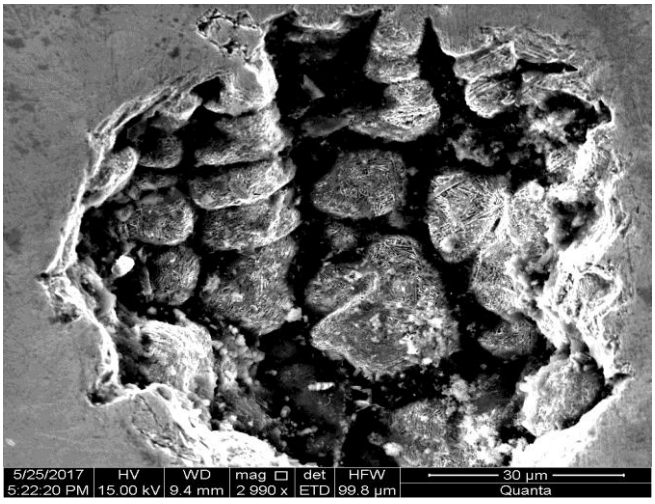
La figure 28 montre que la phase des WC a une forme sphérique, cette forme est obtenue à partir du procédé : creuset à lévitation électromagnétique [29]. Dans ce procédé lors de la solidification, les WC se trouvent suspendus en l'aire et sans contact, toutes les forces de liaison sont en équilibre et orientées vers l'intérieur ce qui conduit à la formation de cette forme sphérique.

Selon les études antérieures, cette forme améliore la résistance aux chocs et la compacité des dépôts obtenus. Les grains anguleux quant à eux de par leur forme constituent des concentrateurs de contraintes ce qui favorise l'amorce de fissures. Ce qui justifie l'utilisation des Carbures sphériques « Sphérotènes». [29]

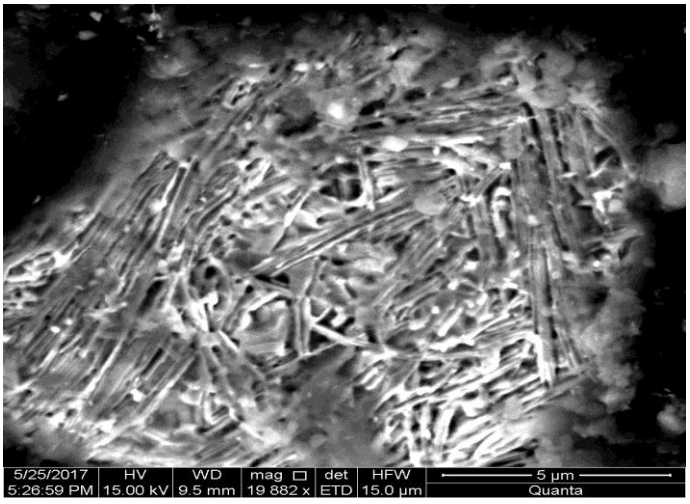
III.2.2 Observation MEB :



(a)



(b)



(c)

Figure 29.. Microstructure MEB des WC dans les grains sphériques

(a) : observation de la surface du grain, grossicement (6003x)

(b),(c) :observation à l'interieur du grain, grossicement(2990x,19882x)

L'observation montre que le Sphérotène possède une structure métallurgique particulière très fine dite d'aiguilles enchevêtrées contenus dans le volume sphérique.

III.2.3 Dureté Vickers :

Résultats micro dureté dans la phase de rechargement

Point	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	**d.moyenne**
Dureté (HV)	1964,4	1970,4	567	2034,1	570,1	542,9	1910,3	490,8	1750,8	1798,9	**1359**

Tableau 16. Résultat De La Dureté SPHEROTENES

Les résultats montrent une grande différence dans la microdureté des différentes phases, les grandes valeurs correspondent aux grains de carbure de tungstène, par contre la phase liante présente une dureté plus faible. Ce qui assure une bonne ténacité à ce matériau de rechargement.

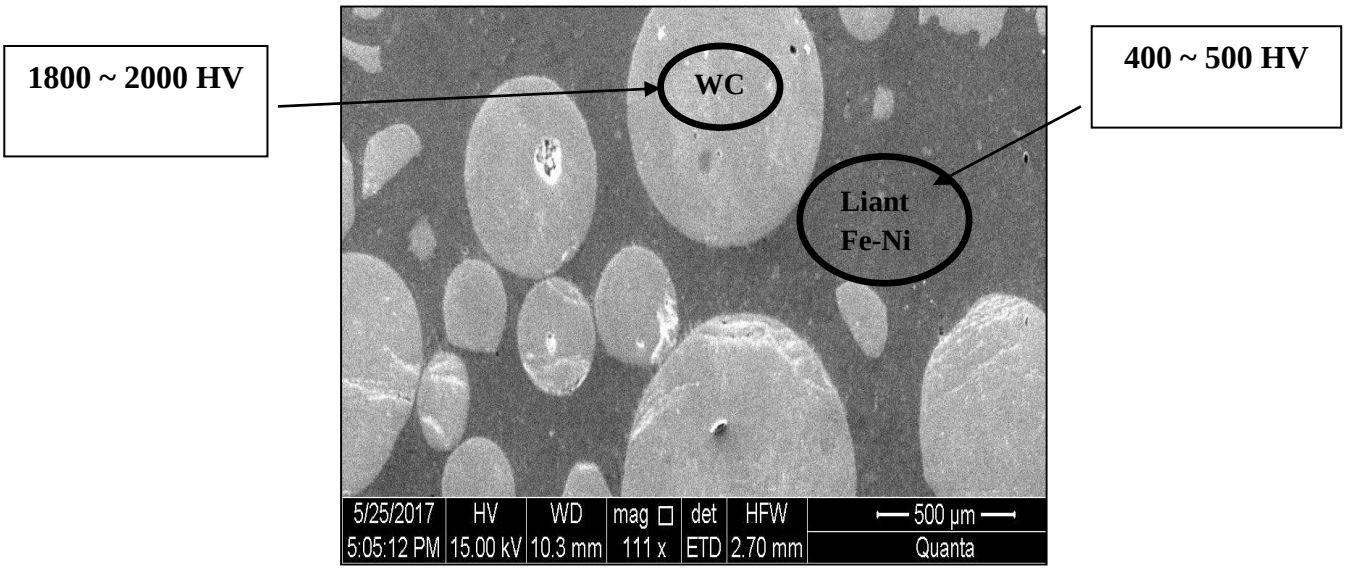


Figure 30. Observation avec le MEB de la partie de rechargement SPHEROTENES

Profile de Micro dureté :

D	0	05	1	15	2	25	4	45	6	7	75	8	85	10	12	12,5	14
Dureté (HV)	619	1940	2034	555,2	529	1700	587	1500	1059	570	487	489	79	76	80	78	77

Tableau 17.résultat de la micro-dureté de SPHEROTENES

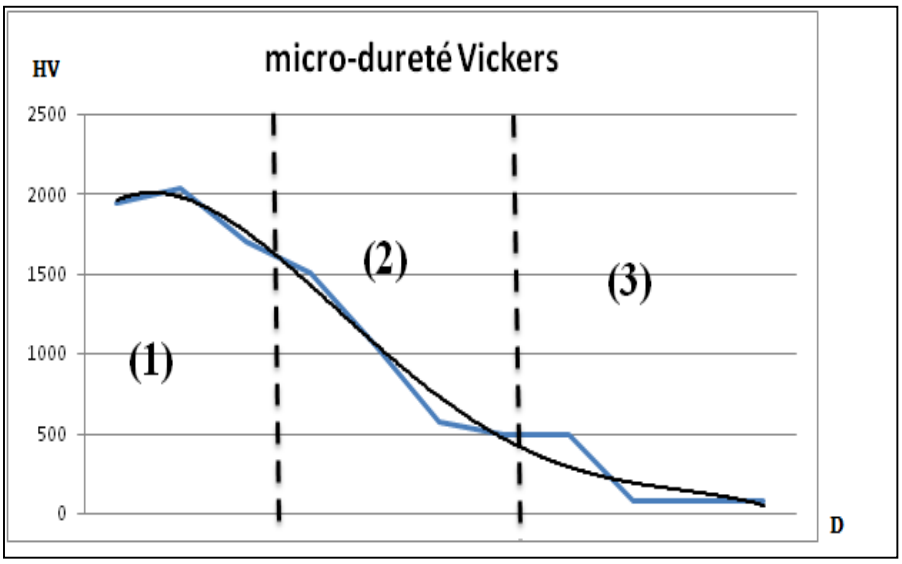


Figure 31. Courbe du micro-durete SPHETORENE

La courbe suivante représente la variation de la micro-dureté Vickers mesurée à travers la zone de rechargement (1), la zone d'accrochage (2), et le matériau de base (3). On remarque que la partie de rechargement est plus dure que le corps de l'outil, ce qui assure une bonne protection de ces derniers contre l'abrasion.

III.2.4 Dureté :

Dureté(HVà	1246	1288	1279	1214
Point	1	2	3	4

Tableau 18.résultat de la dureté SPHEROTENE

Le tableau suivant représente des valeurs prises de la dureté des cordons sphérotène la valeur moyenne de la dureté est de: 1256 HV

III.2.5 Essai de tribologique :

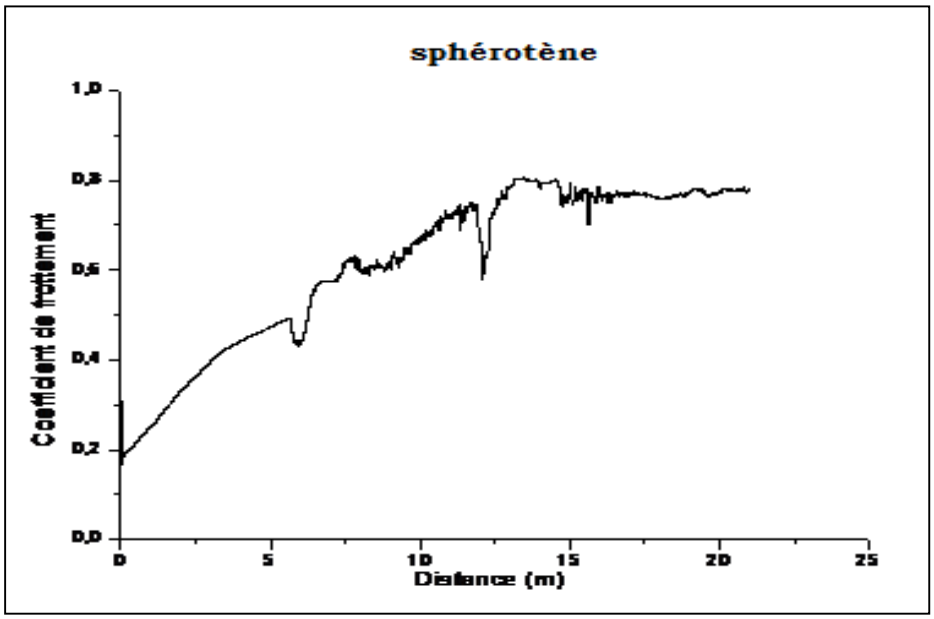


Figure 32. Courbe de coefficient de frottement du SPHETORENES en fonction de la distance

On remarque au début de la courbe une periode perturbée, c'est la zone d'accommodation ou de rodage qui correspond au cisaillement des aspérités du sphérotène et la bille d'alumine, ensuite le coefficient de frottement tend à une zone de stabilisation moyenne de 0,520. Les chutes observées correspondent à un arrachement dans la zone de liant.

III.3 RESULTATS DE LA FONTE AU CHROME

III.3.1.1 Observation métallographique

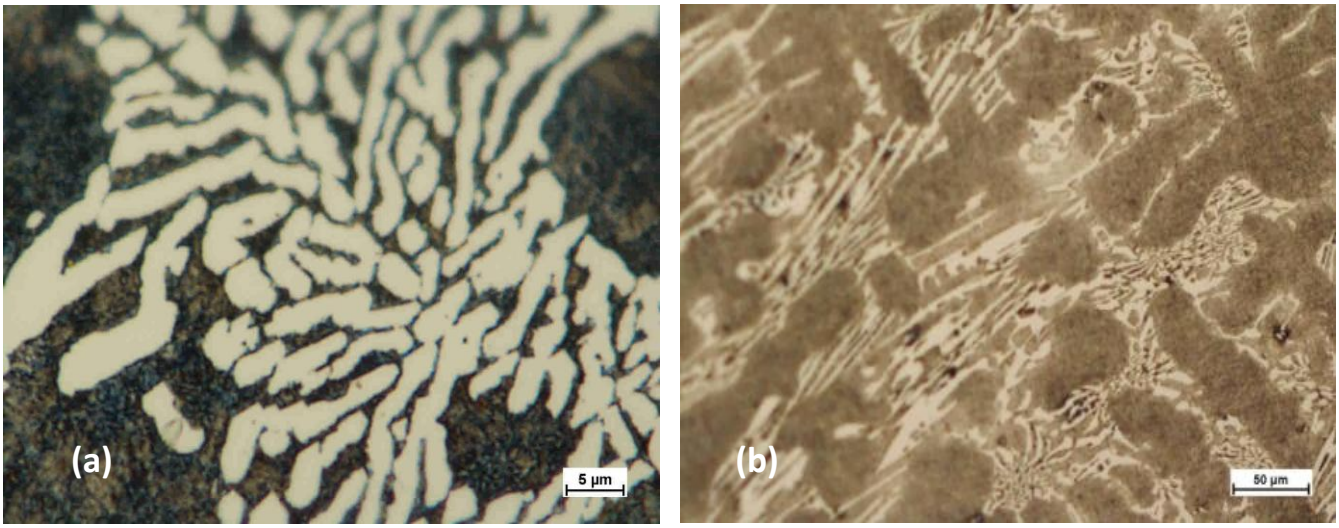


Figure 33. Microstructure de la fonte au chrome. a) avant trempe, b) après trempe

La micrographie met en évidence une structure composée d'un réseau continu de carbures eutectique de type $M_7 C_3$ (forme lamellaire en clair) dans une matrice d'austénite primaire (sombre).

La micrographie b représente la microstructure obtenue après trempe. Elle révèle la présence d'une phase martensitique associée à de l'austénite résiduelle [8].

La trempe et le revenu de la fonte, permettent aussi la précipitation de carbures dits carbures secondaires qui permettent de consolider davantage la structure. Cette précipitation a lieu au niveau de la matrice. Le traitement thermique n'affecte pas les carbures eutectiques qui demeurent inchangés.

Mesure de Dureté :

Les mesures de dureté effectuées sur échantillon **non traité** et échantillon **trempé** sont représentées respectivement dans les tableaux 19 et 20 :

Point	1	2	3	4	**Valeur moyenne**
Dureté(HV)	656	631	682	714	**670**

Tableau 19.résultat de la dureté de la fonte au chrome avant traitement

Point	1	2	3	4	**Valeur moyenne**
Dureté(HV)	1204	1197	1187	1211	**1199**

Tableau 20. La dureté de la fonte au chrome traitée

On observe une forte augmentation de la dureté de la fonte au chrome après trempe. On passe du simple au double. Ce qui permet d'assurer un meilleur comportement à l'usure.

III.3.1.2 Microdureté :

III.3.1.2.1Avant traitement :

Point	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Dureté(HV)	678	682	678	549	695	558	642	657	583	714	614	673

Tableau 21.résultat de la micro-dureté de la fonte au chrome avant traitement

La valeur moyenne de la microdureté HV est de 614Hv. Cette valeur correspond aux constitutions microstructurales de la fonte non traités, matrice austénitique (300 à 600 HV) et carbures primaires de type M_7C_3**.**

III.3.1.2.2Après traitement :

Point	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Dureté(HV)	1185	1281	1629	984	1248	1299	1145	1248	1431	1301	1501	1438

Tableau 22. Micro dureté de la fonte au chrome traitée

Après trempe on enregistre une valeur accrue de la dureté estimée à 1307HV.

Le traitement thermique réalisé sur les échantillons a pour effet d'augmenter la microdureté, et cela est dû à la formation de la matrice martensitique qui est plus dure (500 à 1000 Hv) comparativement à la matrice austénitique.

III.3.1.3 Essai de tribologique :

Avant traitement :

Au début, on remarque une période de perturbation dans la courbe qui correspond à la zone de rodage, où on a le cisaillement des aspérités des matériaux de contact. Ensuite, le coefficient de frottement tend à une zone de stabilisation ayant pour valeur 0,620.

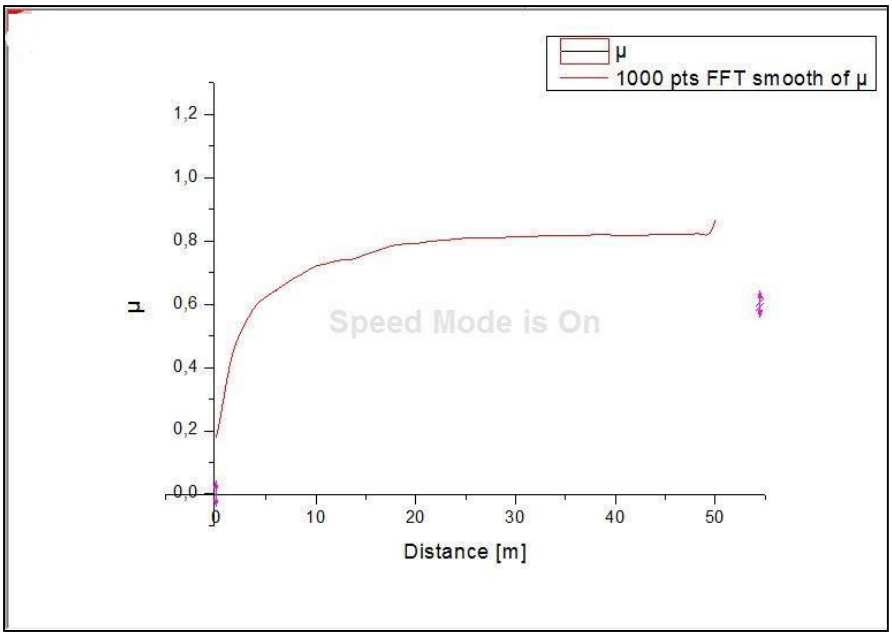


Figure 34. Coefficient de frottement de la fonte au chrome avant traitement en fonction de la distance

III.3.1.3.1Après traitement :

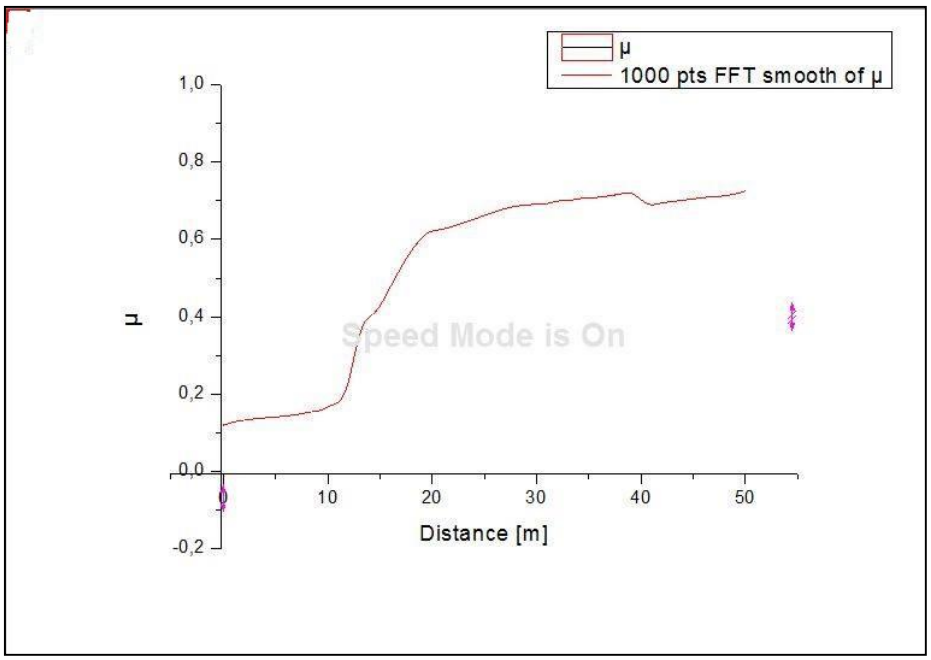


Figure 35. Courbe de coefficient de frottement de la fonte au chrome après traitement en fonction de la distance.

Après le traitement thermique, dés le début on a une diminution du coefficient de frottement à 0,018 comparativement à celle non traité, après la période de rodage, où on a le cisaillement des aspérités le coefficient de frottement se stabilise à une valeur moyenne de 0,478.

III.4 ETUDE COMPARATIVE DU COMPORTEMENT DES DIFFERENTS ECHANTILLONS

III.4.1 Coefficient de frottement :

ECHANTILLION	Coefficient de frottement
MAGNA404	0,72
SPHEROTENE	0,52
Fonte Au Chrome	0,478

Tableau 23.résultat de coefficient de frottement pour les 3 échantillons

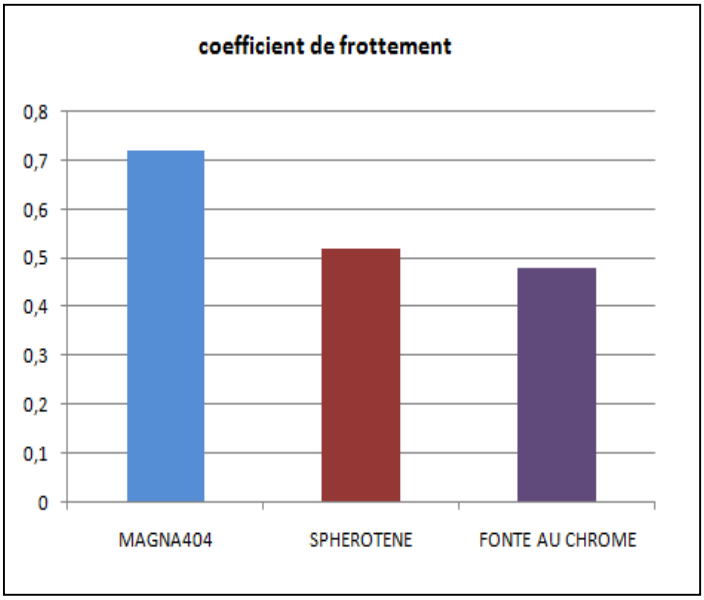


Figure 36.histogramme des coefficients de frottement

La figure 35 représente les coefficients de frottement des trois échantillons étudiés, et ainsi leurs traces d'usure (fig.42, 43), dû à leur dureté élevée par rapport au fils de rechargement MAGNA404, la fonte au chrome et le cordon sphérotène ont les coefficients de frottement les moins élevés, ce qui explique leur bon comportement à l'usure.

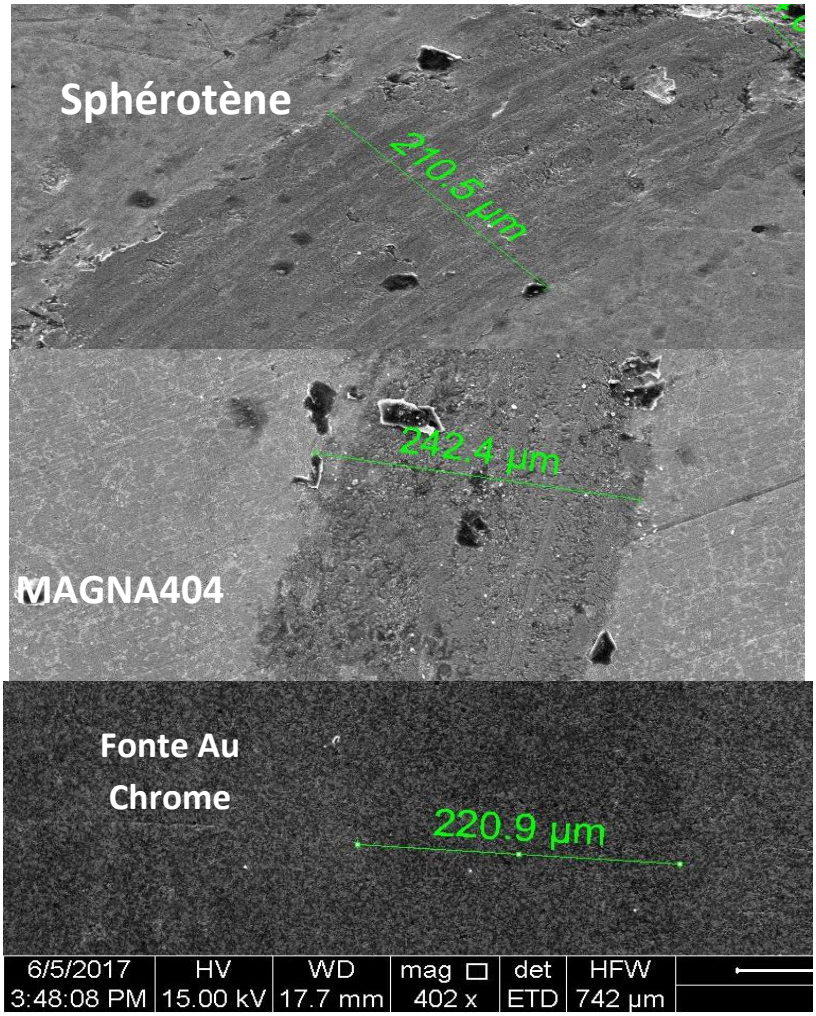


Figure 37. Traces d'usure des trois échantillons après essai tribologique.

III.4.2 La perte de masse

Echantillons	perte de masse (mg)
Fonte au chrome	2,1
Sphérotène	1,9
MAGNA404	8,2

Tableau 24.resultat du perte de masse

Les pertes de masse sont représentées sous forme d'histogramme qui donne une meilleure lecture comparative.

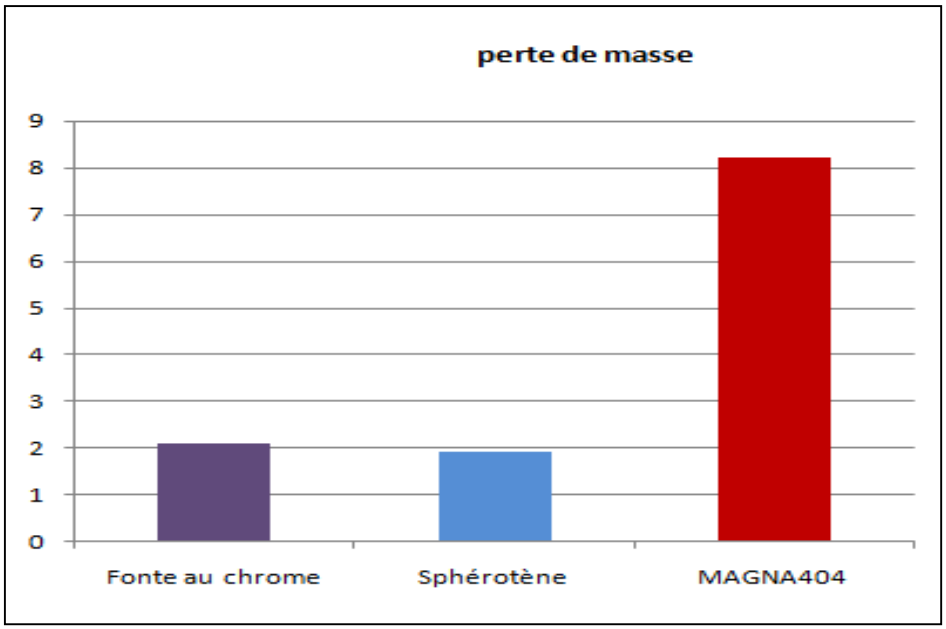


Figure 38.histogramme de la perte de masse

L'histogramme ci-dessus montre les différentes pertes de masse des trois échantillons, après l'essai du frottement réalisé, les trois échantillons sont soumis aux mêmes conditions.

Les essais d'usure montrent une perte de masse correspondant à une usure abrasive, le fil de rechargement MAGNA404 présente la plus grande perte de masse 8,1 mg, par contre le sphérotène et la fonte au chrome ont une perte de masse nettement inférieurs et presque identiques, respectivement 2,1 mg et 1,9 mg, soit quatre fois moins ce qui laisse espérer une durée de vie presque quadruplée.

Le fil de rechargement sphérotène possède le meilleur comportement au frottement, légèrement supérieur à la fonte au chrome traité. Tendis que le cordon de type MAGNA 404 a perdu la plus grande masse et cela est due à la faible teneur en carbure de tungstène et le grand pourcentage du cobalt.

III.4.3 La dureté et la micro-dureté :

La microdureté :

La figure montre la différence entre la micro-dureté en profile pour les deux cordons de soudure, le fil de rechargement sphérotène offre une meilleur protection, et une durée de vie supérieur à celle du MAGNA 404.

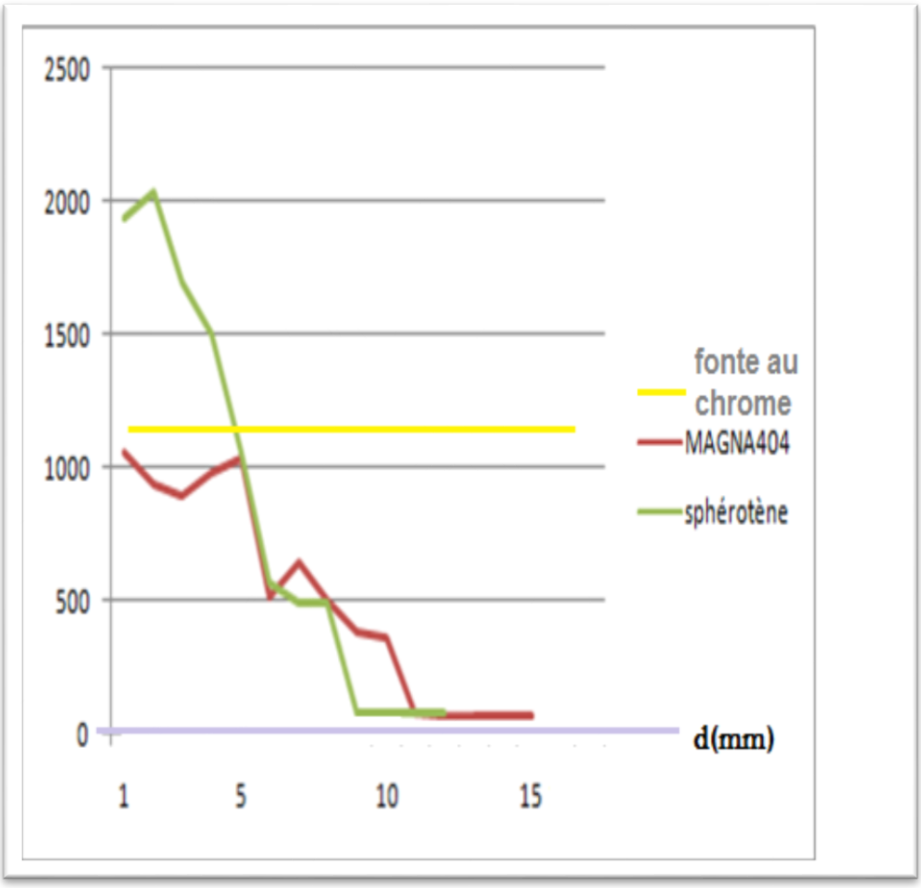


Figure 39. Les micro-duretés des 3 types.

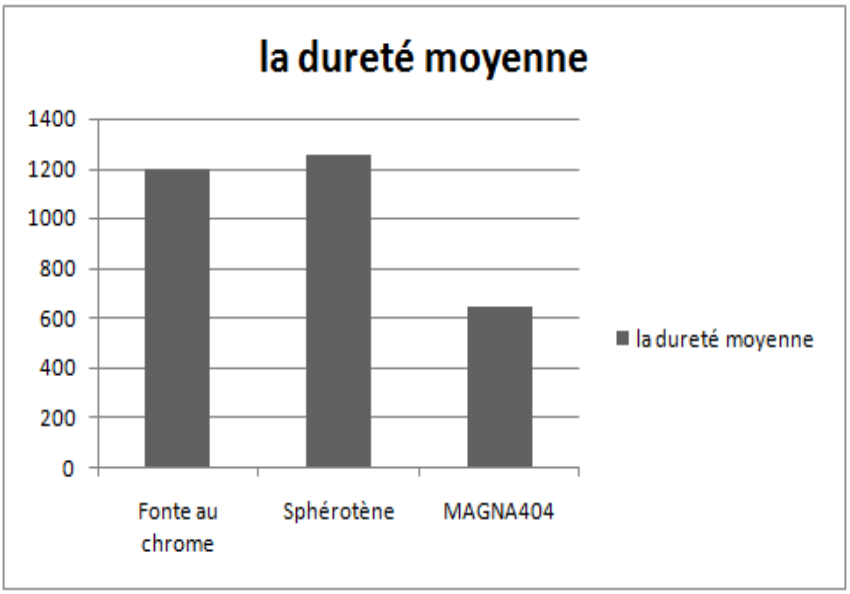


Figure 40.histogramme des 3 échantillons.

L'histogramme montre que la fonte au chrome traitée et le fil de rechargement sphérotène possèdent des valeurs de duretés relativement élevées 1256HV et 1199HV respectivement, en raison de facteurs structurelles et leurs compositions chimiques.

En fait, les cordons sphérotène contiennent une grande teneur en WC d'une structure sphérique qui favorise leur résistance aux chocs, et les propriétés de frottement. D'autre part, la fonte au chrome, après le traitement thermique, forme une matrice martensitique qui augmente la dureté de cette dernière, cette dureté est accompagnée d'une mauvaise ténacité, ce qui n'est pas le cas avec les cordons sphérotène qui, grâce la qualité du liant, possède une meilleur ténacité.

D'un point de vu coût, la différence est grande, les tableaux suivants présente une étude comparative de prix de revient des deux matériaux :

La matière	**Le prix**
Sphérotène	6000DA (1kg)
La fonte	70 DA (1Kg)

Tableau 25. Prix des matériaux par kg

Matière	**Consommation par outil**	**Prix**
Sphérotène	3 fils de rechargement (1,250Kg)	6250 DA
La fonte au chrome	4 Kg	105 DA

Tableau 26. Cout Des Solution Proposées

Sachant que le malaxeur contient 80 outils de malaxeur, sans compter l'énergie fournie et la main d'œuvre, par contre la fabrication de ces outils avec la fonte ne coute pas chère pour l'entreprise, vu que les produits de cette dernière sont fabriqué de la fonte.

Tous ces résultats font de la fonte au chrome, le choix le plus économe et le plus performant, à condition de choisir le dimensionnement convenable pour éviter les problèmes de son endommagement dus à sa faible ténacité vis-à-vis les force de flexion, et la compression qui existe à l'intérieur du malaxeur.

CONCLUSION

L'étude comparative sur le comportement au frottement et à l'usure des matériaux de rechargement sur outil de malaxeur de sable, types MAGNA404, SPHEROTENE et FONTE AU CHROME a permis en premier de déterminer les sollicitations auxquelles sont soumis ces matériaux. Il en ressort que la sollicitation la plus dominante est l'usure par frottement provoquée par les grains de silice.

Un bon comportement est traduit par une faible perte de masse au frottement en contact de grain de silice. Cette dernière est assurée par une dureté accrue du matériau d'où leurs caractérisation par les différentes méthodes en l'occurrence, la nature du matériau, sa structure métallographique, sa dureté en l'état ou après traitement et son comportement tribologique.

Globalement les résultats obtenus, dont le détail a été donné dans les chapitres précédents, montrent que le rechargement en SPHEROTENE a un meilleur comportement que le rechargement en MAGNA404 utilisé actuellement par l'entreprise. La fonte au chrome quant à elle présente un comportement presque identique au sphérotène et nettement meilleur que celui du MAGNA404.

Outre les différences des caractéristiques mécaniques, les matériaux de rechargement sont d'un coût exorbitant et leur mise en œuvre impose des frais supplémentaires en énergie, en main d'œuvre, et en temps d'immobilisation des installations ce qui constitue une charge financière relativement importante pour l'entreprise.

De prime abord la fonte au chrome s'avère la solution la mieux adaptée du fait du double avantages du point de vue comportement à l'usure et au frottement que du faible coût de la matière première. Un atout majeur quant à son utilisation réside dans la possibilité d'élaborer l'outil en une seule pièce et au niveau de l'unité.

Perspective :

Cette proposition devrait faire l'objet d'une étude plus approfondie.

Références bibliographiques :

[1] Salah MEZLINI., « étude de l'usure par abrasion d'alliages d'aluminium »- thèse Ecole Nationale de Lyon.(2003).

[2] POLYSOUDE., « rechargement TIG automatisé ». polysoude, France. (2011).

[3] KHALED CHETTAH., «Etude des propriétés physiques des couches minces et des poudres du SiO2 dopées au Cobalt »- thèse UNIVERSITÉ CONSTANTINE 1. (2014).

[4] J TAKADOUM.., « la tribologie », Matériaux et surfaces en tribologie. lavoisier (2007)

[5] A Sebhi., Etude tribologique des outils de coupe et aciers, thèse de doctorat, (2013).

[6] O. Barrau, Etude du frottement et de l'usure d'aciers à outils de travail à chaud, thèse de Doctorat, (2004).

[7] Gwidon W. Stachowiak, Wear, Material, Mechanisms and practices; J.Wiley &

Sons Ltd. ,(2006)

[8] BOUHAMLA Khédidja, Evolution structurale des fontes au chrome alliées, thèse de doctorat université d'Annaba (2009).

[9] A. Marcelin, Le frottement et l'usure dans le cadre de la physique des surfaces, J. Phys.

Phys. Appl. 12, S8 (1951).p 1-16

[10] Hutchings, I. M., Tribology : Friction and wear of Engineering Materials, department of Material Science and Metallurgy University of Cambridge, Edward Arnold, Editor (1992).

[11] Kato, K., Micro-mechanisms of wear – wear modes, Wear, 153 (1992), p. 277-295.

[12] R Lévêque . « résistance au frottement et à l'usure », Traitements et revêtements de surface des métaux, p.29-34, DUNOD (2007).

[13] R Lévêque., « projection à chaud, rechargement », Traitements et revêtements de surface des métaux, p.235-249. DUNOD (2007).

[14] H.O Pierson, Handbook of Refractory Carbides and Nitrides, (1996) 100-117.

[15] GHAILEN BEN GHORBAL., «Caractérisation mécanique et adhérence de revêtement PVD en carbure de tungstène, chapitre II. Etat de l'art sur les revêtements en carbure de tungstène »- thèse Ecole Supérieure des sciences et techniques de Tunisie.(2012).

[16] M BENTI., « Soudabilité des aciers non alliés et faiblement alliés », Structures métalliques. Centre National de Ressources Structures Métalliques.

[17] BS 499 : Partie 1 (1991) : glossaire de soudure, brasure et coupage par voie thermique.

[18] D TOUALBIA., « Rechargement », Soudage et rechargement. Université Souk Ahras (2013)

[19] Rocdacier,. « La soudabilité, technologie de soudage », www.rocdacier.com.rocdacier (2014)

[20] T.Kagnaya., C.Boher., L.Lmbert., M.Lazard., T.Cutard., « mécanisme d'endommagement tribologiques du WC-6%Co en usinage ». Modélisation du contact et de l'usure, journées internationales francophones de tribologie p 355-360, MINES ParisTech (2013).

[21] PIRSO J. VILJUS M., LETUNOVITS S., « Friction and dry sliding wear behavior of cermets », wear, vol. 260, p.851-824, (2006).

[22] SHIPWAY P.H., HOWELL L., « microscale abrasion-corrosion behavior of WC-Co hardmetals and HVOF sprayed coatings », wear, vol. 258, p.303-312, (2005).

[23] J TAKADOUM., « les matériaux en tribologie », matériaux et surfaces en tribologie, p. lavoisier (2012).

[24] Ali ACHOURI., étude du comportement en usure des outils de coupe en fonction du revêtement, thèse de doctorat université de Constantine (2006)

[25] Leveque R, Entringer M., »les propriétés intrinsèques et fonctionnelles des surfaces » le livre d'acier, Lavoisier p584-608, (1994)

[26] Moore M.A., fundamentals of friction and wear of materials, ASM, p.73, (1981)

[27] Béranger G., Henry G., le livre des aciers, Tec & Doc, Paris (1994)

[28] T.C.U - Techniques Contre l'Usure., « matériaux contre l'usure, fonte spéciales », http://tcu.fr/materiaux.php. (2014)

[29] Technogenia, Saint-Jorioz France, http://www.technogenia.com/fr

[30] H.Berns, W. Theisen, Ferrous Materials, steel and cast iron, Springer (2008).