

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Génie Mécanique
Parcours : Master
Spécialité : Construction Mécanique

Thème

Estimation de l'usure abrasive des boulets de broyage par un essai Los Angeles

Préparé par Messieurs :

- BOUSSAID Mokhtar
- OGDJ Hamid

Soutenu publiquement le 29/11/2020 devant le Jury composé de :

MM.

HADDOUCHE Kamel	Professeur	Univ. Ibn Khaldoun de Tiaret	Président
SASSI Ahmed	Maître de Conférences "A"	Univ. Ibn Khaldoun de Tiaret	Examineur
MAZARI Djamel	Maître Assistant "A"	Univ. Ibn Khaldoun de Tiaret	Examineur
AISSAT Sahraoui	Maître de Conférences "A"	Univ. Ibn Khaldoun de Tiaret	Encadreur

Année universitaire : 2019 - 2020

Dédicace

À nos familles

Et

À tous nos amis sans exception.

REMERCIEMENTS

En premier lieu, nous remercions « **ALLAH** » de nous avoir donné la force, le courage et la volonté pour achever ce travail.

Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude envers notre encadreur Monsieur AISSAT Sahraoui, Maître de conférences à l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret, pour tout, que ce soit pour sa disponibilité, sa contribution majeure à l'orientation de notre travail et ses idées originales qui ont servi à enrichir le contenu de ce mémoire.

Nous tenons aussi à remercier les autres membres du Jury, Monsieur HADDOUCHE Kamel, Professeur à l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret, qui a accepté de présider le Jury, Monsieur SASSI Ahmed, Maître de Conférences à l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret, qui a bien voulu examiner notre travail et participer au Jury, et Monsieur MAZARI Djamel, qui a bien voulu examiner notre travail.

Nos remerciements à tous les Enseignants qui ont participé à notre formation.

Aussi, nous tenons à remercier les Responsables et Laborantins d'ALFET – Tiaret.

Nos vifs remerciements vont aux Doctorants et Techniciens du laboratoire de routes du Département de Génie Civil de l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret.

Liste des figures et des tableaux

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure I.1. Vue extérieure d'un broyeur à boulets.....	3
Figure I.2. Vue intérieure du broyeur à boulets [11].....	4
Figure I.3. Types de charges mécaniques que les boulets peuvent subir dans un broyeur à boulets.....	5
Figure I.4. Zones à l'intérieur d'un broyeur à boulets (zone morte = vitesse des boulets nulle) [16].....	6
Figure I.5. Barres circulaires pour le forgeage des boulets	7
Figure I.6. Presses de forgeage.....	7
Figure I.7. Boulets forgés par estampage.....	8
Figure I.8. Durcissement par trempe : (a) chauffage, (b) trempe à l'eau et (c) boulet trempé.....	8
Figure I.9. Moulage en sable à vert.....	9
Figure I.10. Évolution du volume de carbure en fonction de la teneur en carbone.....	14
Figure I.11. Influence des éléments trempants sur la profondeur de trempe.....	15
Figure I.12. Structure de la fonte blanche au chrome-molybdène.....	16
Figure II.1. Schémas des quatre modes d'usure abrasive : (1) découpe, (2) fatigue due au labourage répété, (3) fracture et (4) arrachage de grain	18
Figure II.2. Procédé de transfert de matière par adhésion.....	19
Figure II.3. Usure par érosion [23].....	20
Figure II.4. Amorçage de fissure sous la surface frottée à partir de défauts ou d'impureté du matériau.	21
Figure II.5. Usure par corrosion [24].....	22
Figure II.6. Usure par cavitation [23].....	22
Figure II.7. Abrasion à deux corps.....	23
Figure II.8. Abrasion à trois corps fermée.....	24
Figure II.9. Abrasion à trois corps ouverte.....	24
Figure II.10. Usure abrasive des boulets de broyage.....	26
Figure II.11. Piste d'usure en acier après frottement avec un pion en acier.....	27
Figure II.12. Tribomètre Pion-disque.....	28
Figure II.13. Test d'abrasion avec sable sec et roue en caoutchouc.....	29
Figure II.14. Test d'abrasion avec broyeurs à boulets de laboratoire.....	29
Figure II.15. Abrasion relative en fonction de la teneur en carbone pour des matériaux ferreux (Test fait avec un broyeur à mâchoires).	30

Figure II.16. Usure abrasive en fonction de la teneur en vanadium pour des essais de frottement métal contre oxyde de Fe_2O_3	30
Figure II.17. Influence du taux de carbures en volume sur la résistance à l'abrasion (Les valeurs sur la courbe représentent le taux de carbures primaires).....	31
Figure II.18. Influence du rapport de dureté de l'abrasif Ha (quartz) et de la matrice Hm sur la résistance à l'usure d'une fonte à 18% Cr, 2.96% C, 1.5% Mn et 0.96% de Si [28].....	32
Figure II.19. Usure par impact (perte de masse en mg) en fonction de la dureté de trois fontes alliées (tableau II.1).	33
Figure II.20. Effet de la ténacité sur la résistance à l'abrasion des matériaux.....	34
Figure III.1. Machine d'abrasion "Los Angeles".....	35
Figure III.2. Dimensions du cylindre en acier.....	36
Figure III.3. Charge abrasive à l'intérieur de la machine Los Angeles	38
Figure III.4. Balance électronique KERN 1500 g d'une précision de 0.01g.....	38
Figure III.5. Duromètre utilisé pour mesurer la dureté Rockwell.....	39
Figure III.6. Pénétrateur conique utilisé dans un duromètre Rockwell	39
Figure III.7. Variation de la masse du boulet brut en fonction du nombre de tours.....	40
Figure III.8. Variation de la masse du boulet traité en fonction du nombre de tours.....	41
Figure III.9. Évolution de la dureté HRC des boulets non traité et traité en fonction du nombre de tours.....	41
Figure III.10. Évolution de la perte de masse en % des boulets non traité et traité en fonction du nombre de tours.....	43
Figure III.11. Relation entre la perte de masse cumulative et la dureté du boulet non traité.....	43
Figure III.12. Relation entre la perte de masse cumulative et la dureté du boulet traité..	44
Figure III.13. Usure abrasive des boulets à la fin des essais.....	45

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I.1. Caractéristiques des deux chambres du broyeur.....	5
Tableau I.2. Composition chimique des fontes au chrome selon la norme EN 12513...	10
Tableau I.3. Influence des éléments d'alliage sur les propriétés magnétiques des fontes alliées.....	13
Tableau I.4. Dureté Vickers des constituants de la microstructure des fontes blanches au chrome-molybdène.....	16
Tableau II.1. Composition chimique des fontes correspondant à la figure II.19.....	33
Tableau III.1. Éléments constituant la machine d'essai "Los Angeles".....	35
Tableau III.2. Composition chimique de l'alliage étudié.....	36
Tableau III.3. Caractéristiques mécaniques des boulets utilisés dans nos essais.....	36
Tableau III.4. Traitements thermiques réalisés sur les boulets utilisés dans nos essais..	37
Tableau III.5. Caractéristiques de la charge broyante d'un essai Los Angeles.....	37
Tableau III.6. Résultats de la perte de masse en gramme et de la dureté HRC des boulets brut de coulée et traité thermiquement.....	40
Tableau III.7. Perte de masse en % des boulets brut de coulée et traité thermiquement	42

Nomenclature

Nomenclature

K	Résistance à l'usure	[m / h]
\emptyset_0	Diamètre initial des boulets	[m]
\emptyset	Diamètre des boulets après essai	[m]
T	Durée de l'essai	[h]
m_1	Masse initiale	[kg]
m_2	Masse après chaque nombre de tours n des boulets passés dans le tambour	[Kg]
HRC ₁	Dureté initiale	[HRC]

Table des matières

TABLE DES MATIÈRES

	Page
Dédicace.....	I
Remerciements.....	II
Liste des figures.....	III
Liste des tableaux.....	V
Nomenclature.....	VI
Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : Généralités sur les boulets de broyage	
I.1. Généralités sur les broyeurs à boulets.....	3
I.2. Distribution de la charge broyante.....	4
I.3. Utilisation et rôle des boulets.....	5
I.4. Zones à l'intérieur d'un broyeur à boulets.....	6
I.5. Mode d'obtention des boulets.....	7
I.5.1. Obtention des boulets par forgeage.....	7
I.5.1.1. Forgeage par piston.....	7
I.5.1.2. Forgeage par estampage (matriçage).....	8
I.5.2. Obtention des boulets par moulage.....	9
I.6. Caractéristiques des boulets.....	9
I.6.1. Matériaux des boulets.....	9
I.6.2. Dureté.....	10
I.6.3. Résistance à l'usure.....	11
I.6.4. Résistance au choc.....	11
I.7. Facteurs exerçant une influence sur les caractéristiques mécaniques.....	11
I.7.1. Microstructure.....	11
I.7.2. Composition chimique.....	12
I.7.3. Influence de l'épaisseur.....	13
I.8. Microstructure des fontes blanches au chrome-molybdène.....	13
I.8.1. Les carbures.....	13
I.8.2. La matrice.....	14

CHAPITRE II : Usure des boulets de broyage

II.1. Introduction.....	17
II.2. Usure des matériaux.....	17
II.3. Différents types d'usures.....	17
II.3.1. Usure abrasive	17
II.3.2. Usure adhésive	18
II.3.3. Usure par érosion	20
II.3.4. Usure par fatigue	20
II.3.5. Usure par corrosion.....	22
II.3.6. Usure par cavitation.....	22
II.4. Usure abrasive des matériaux.....	22
II.4.1. Configurations de contacts.....	23
II.4.1.1. Usure abrasive à deux corps	23
II.4.1.2. Abrasion à trois corps fermée.....	23
II.4.1.3. Abrasion à trois corps ouverte.....	24
II.4.2. Paramètres de sollicitation.....	25
II.4.3. Paramètres du processus d'abrasion.....	25
II.5. Usure abrasive des boulets de broyage.....	26
II.6. Mesure de l'usure.....	27
II.7. Essais d'abrasion.....	27
II.7.1. Test pion/disque (ASTM G 99).....	28
II.7.2. Test d'abrasion avec sable sec et roue en caoutchouc (ASTM G 65).....	28
II.7.3. Test d'abrasion avec broyeurs à boulets de laboratoire.....	29
II.8. Relation de la résistance à l'usure avec les autres caractéristiques.....	29
II.8.1. Influence de la composition chimique.....	29
II.8.2. Influence de la microstructure.....	31
II.8.2.1. Effets des carbures.....	31
II.8.2.2. Effets de la matrice.....	31
II.8.3. Dureté.....	32
II.8.4. Ténacité	33

CHAPITRE III : Techniques et résultats expérimentaux	
III.1. Introduction.....	35
III.2. Principe de l'essai Los Angeles.....	35
III.3. Éléments constituant le banc d'essai "Los Angeles (N.F. P18.573)".....	35
III.4. Procédure expérimentale et matériel utilisé.....	36
III.4.1. Matériau utilisé.....	36
III.4.1.1. Composition chimique des boulets.....	36
III.4.1.2. Caractéristiques mécaniques et traitements thermiques des boulets....	36
III.4.1.3. Caractéristiques de la charge broyante (granulats, boulets).....	37
III.4.2. Matériel utilisé.....	37
III.4.2.1. Conduite de l'essai d'usure.....	37
III.4.2.2. Balance électronique.....	38
III.4.2.3. Duromètre.....	38
III.5. Résultats et discussions.....	39
III.5.1. Résultats des essais d'usure et des essais de dureté.....	39
III.5.2. Mesure de la perte de masse en %.....	42
III.5.3. Relation entre l'usure et la dureté.....	43
III.5.4. Aspect des dégâts sur les boulets.....	44
Conclusion générale.....	46
Liste des références bibliographiques.....	47

Introduction générale

La fragmentation représente le coût le plus élevé dans le secteur minier surtout l'impact significatif de la consommation de médias de broyage (boulets, barres, etc.) sur le coût du broyage ; ce dernier est estimé à 50 % de l'ensemble du coût opérationnel.

Le boulet de broyage constitue l'élément essentiel dans la fragmentation fine, et, en particulier, dans l'industrie du ciment qui consomme annuellement des milliers de tonnes de ces boulets. Il est impliqué directement dans le concassage et le broyage du clinker [1]. Il doit avoir une excellente durée de vie pour contrer les conditions d'utilisation sévères qu'il subit.

Il est fabriqué en fonte blanche alliée au chrome – molybdène ; ces fontes s'identifient facilement par leur carbure de chrome soit en raison de la vitesse de refroidissement suffisamment rapide au cours de la solidification, soit par suite de la présence du chrome dans la composition qui empêche la formation du graphite tout en garantissant la stabilité des carbures dans la microstructure. La prédominance des carbures dans leur microstructure leur donnent la dureté élevée qui est nécessaire pour concasser ou broyer les autres matériaux sans qu'elles soient dégradées elles-mêmes mais les rendent plus fragiles et inusinables par les procédés normaux d'usinage.

En général, la microstructure de la matrice des fontes blanches au chrome - molybdène est constituée d'austénite. Celle-ci est stable à la température ambiante, principalement, en raison de sa forte teneur en carbone ; elle peut être ajustée en réglant la teneur en éléments d'alliage et en appliquant ou non un traitement thermique pour obtenir le compromis le plus économique entre la résistance à l'usure, d'une part, et la résilience nécessaire pour permettre à la pièce de résister à des chocs mécaniques répétés d'autre part [2-5].

L'usure n'est pas une propriété intrinsèque du matériau mais une résultante des conditions d'applications du système tribologique. Dans la majeure partie des systèmes d'usure, ce n'est pas un mécanisme unique qui est en cause mais presque toujours une combinaison de plusieurs mécanismes [6, 7]. L'usure totale de la charge broyante dans les broyeurs à boulets est le produit de trois mécanismes d'usure reconnus notamment par l'abrasion, la corrosion et l'impact. De plus, les contributions à l'usure de chacun de ces mécanismes d'usure n'ont pas été bien établies.

L'abrasion et l'usure par impact sont des pertes de métal dues à la force mécanique exercée sur les médias de broyage. L'usure par érosion résulte du frottement entre le média de broyage et les particules. L'usure corrosive est définie comme la perte de métal due à des réactions chimiques et/ou électrochimiques du milieu de broyage avec la solution et/ou d'autres particules électrochimiques conductrices [8].

L'usure des boulets de broyage dépend à la fois du taux de remplissage, du diamètre et de la vitesse de rotation du broyeur, etc.

L'usure par abrasion est estimée dans ce travail par la perte de masse des boulets bruts et de coulée traités ayant un diamètre de 60 mm en utilisant la machine Los Angeles. Ce dispositif est utilisé pour mesurer la résistance combinée à l'usure par frottement et à la fragmentation par choc des éléments d'un échantillon de granulats selon la norme NF P 18-573 [9] ; il se trouve au niveau du Département de Génie Civil de l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret.

Pour mieux cerner les objectifs visés, le manuscrit est structuré sous forme de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons une revue bibliographique sur le rôle des boulets de broyage, leur comportement à l'intérieur du broyeur et les matériaux utilisés pour la confection de ces boulets. Les caractéristiques mécaniques des boulets, les facteurs influençant ces caractéristiques et la microstructure des fontes blanches utilisées pour la fabrication des boulets sont aussi abordés.

Nous consacrons le second chapitre à l'usure des boulets de broyage, et, en particulier, l'usure abrasive des matériaux. Nous présentons une définition de l'usure, les différents types d'usures et la relation de la résistance à l'usure avec les autres caractéristiques (mécaniques, microstructurales, et autres).

Enfin, le troisième chapitre est consacré à la présentation des techniques expérimentales utilisées, des résultats obtenus et leurs interprétations.

On clôture ce manuscrit par une conclusion générale qui donne un aperçu global de tout le travail réalisé.

Chapitre I
Généralités sur les boulets
de broyage

I.1. Généralités sur les broyeurs à boulets

La première découverte des broyeurs fût le broyeur à boulets créé par Davidsen en 1892. Les broyeurs à boulets sont très largement utilisés dans toutes les branches de l'industrie, pour le broyage fin de différents produits à savoir, les minéraux, engrais, chimie minérale (ciment, matériaux de construction ...), le domaine alimentaire, pharmacie, chimie fine (les couleurs, les vernis ...), les métaux (les émaux, ...), l'environnement et le recyclage (verre, ...) et les combustibles (charbon, ...).

Le broyage est provoqué par des boulets qui se trouvent avec le produit dans un tambour rotatif (figure I.1).



Figure I.1. Vue extérieure d'un broyeur à boulets

Le broyage est produit par le choc résultant de la chute des corps de broyage sur le produit broyé et par le frottement entre le produit et les corps de broyage.

La figure I.2 présente une vue générale de l'intérieur du broyeur et décrit ses éléments essentiels. Le tube broyeur à boulets est généralement divisé en deux compartiments, recouverts de plaques de blindage en acier. Le premier étant moins long que le deuxième, assure le concassage et le broyage grâce à de gros boulet. Le deuxième est équipé de boulets plus petits qui assurent la finition.

Ces deux compartiments (C1 et C2), sont séparés par une cloison intermédiaire qui ne laisse transiter que les grains de taille suffisamment réduite.

Le produit broyé sort du broyeur par la grille de sortie, qui empêche les boulets de sortir du deuxième compartiment [10].

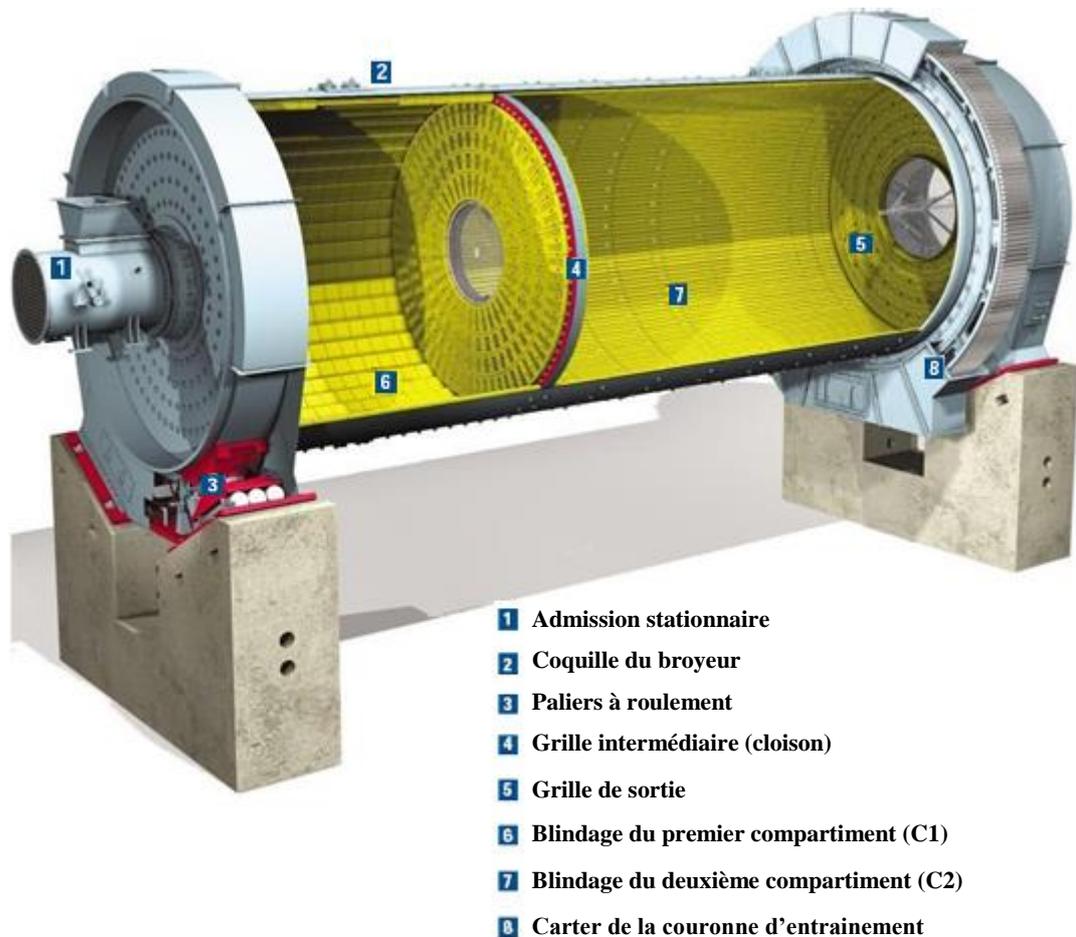


Figure I.2. Vue intérieure du broyeur à boulets [11]

I.2. Distribution de la charge broyante

La charge broyante de chaque compartiment doit être composée de corps broyants de différents diamètres et, par conséquent, posséder une composition et une distribution appropriées aux caractéristiques du matériau à broyer. En effet, le diamètre, le poids unitaire moyen et la surface spécifique des boulets qui composeront la charge broyante doivent être définis en fonction de la granulométrie et de la broyabilité du matériau, ainsi que de la finesse du produit final.

La définition de la taille maximale et minimale d'un boulet dépend de différents facteurs tels que [12] :

- ✓ Caractéristiques du matériau à broyer ;
- ✓ Dimension maximale de l'alimentation du matériau à broyer ;
- ✓ Broyabilité et structure minéralogique du matériau à broyer ;
- ✓ Type de circuit de broyage (ouvert, fermé) ;
- ✓ Dimensions du broyeur et des compartiments de broyage ;
- ✓ Classe de séparateur et finesse du produit à obtenir.

Le tableau I.1 résume les données de chaque compartiment et la répartition des boulets selon leur diamètre dans chacun des deux compartiments.

	Compartiment C1	Compartiment C2
La charge du broyeur	28 à 30%	28 à 32%
Diamètre du broyeur	3,06 m	3,10 m
Blindage	Releveur	Classant
Diamètre des Boulets	Entre 60 et 120 mm	Entre 20 et 60 mm

Tableau I.1. Caractéristiques des deux chambres du broyeur

I.3. Utilisation et rôle des boulets

À l'intérieur des broyeurs à tambour, les particules peuvent se briser à la suite d'un impact avec les parois du tambour, avec le média de broyage et avec d'autres particules. Des modes de rupture de différents types tels que : L'impact, le cisaillement, l'écrasement ou la compression, se produisent simultanément à différents endroits de l'écoulement. Par exemple, sur la figure I.3, nous voyons que les particules peuvent être cassées dans différentes conditions :

- éjectées sur la paroi du tambour,
- écrasées entre la paroi et un boulet qui s'approche,
- entre deux corps de broyage qui peuvent se comprimer, se cisailier ou s'user la particule,
- l'impact et / ou la charge pondérale d'un boulet avec un lit de particules.

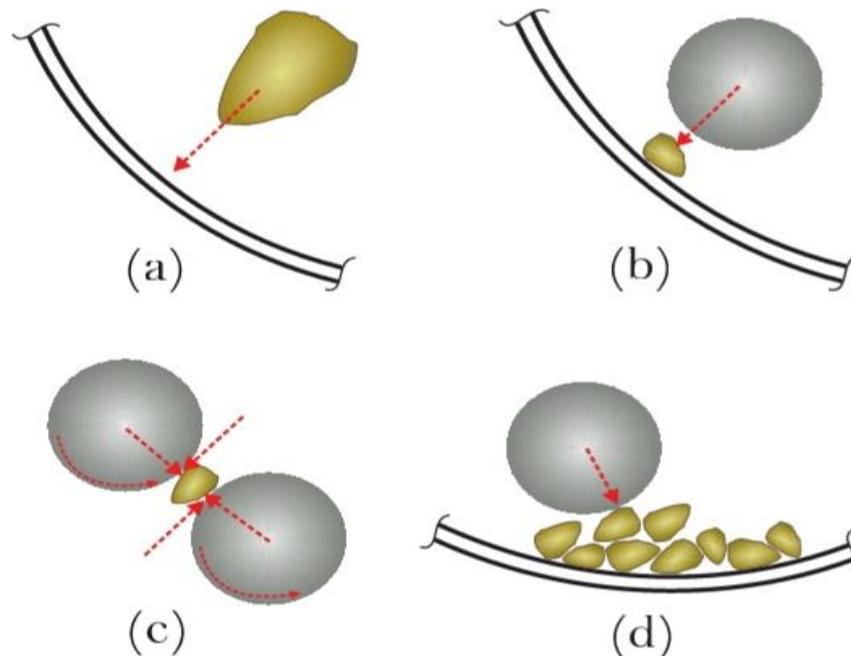


Figure I.3. Types de charges mécaniques que les boulets peuvent subir dans un broyeur à boulets

En effet, les particules peuvent se briser non seulement sous des contacts boulet-particule ou paroi-particule mais aussi des interactions particule-particule qui portent les forces transmises par ces différents modes [13].

Nous utilisons les broyeurs à boulets pour :

- Broyer la matière crue, le clinker et les combustibles solides au niveau d'une fine poudre adaptée aux besoins.
- Le broyeur doit produire aussi une finesse régulière avec une consommation d'énergie minimum et une bonne fiabilité (taux de fiabilité > 98%) [14].

I.4. Zones à l'intérieur d'un broyeur à boulets

Pendant le processus de broyage, les boulets de broyage dans le broyeur sont principalement affectés par deux forces. La première, est la force de frottement formée en raison de la différence de vitesse entre les boulets de broyage adjacent (zone d'abrasion ou marche en cascade sur la figure I.4). L'autre force, est l'impact généré par l'impact des boulets entre eux-mêmes, le blindage du tambour et la roche (zone d'impact ou marche en cataracte sur la figure I.4).

Les deux forces mécaniques donnent lieu à une désintégration mécanique des boulets de broyage. L'effet de ces deux forces est répétitif, il est en fonction du nombre de cycles ou du nombre de tours du broyeur nécessaires pour concasser la roche utilisée pour la fabrication du ciment [15-17].

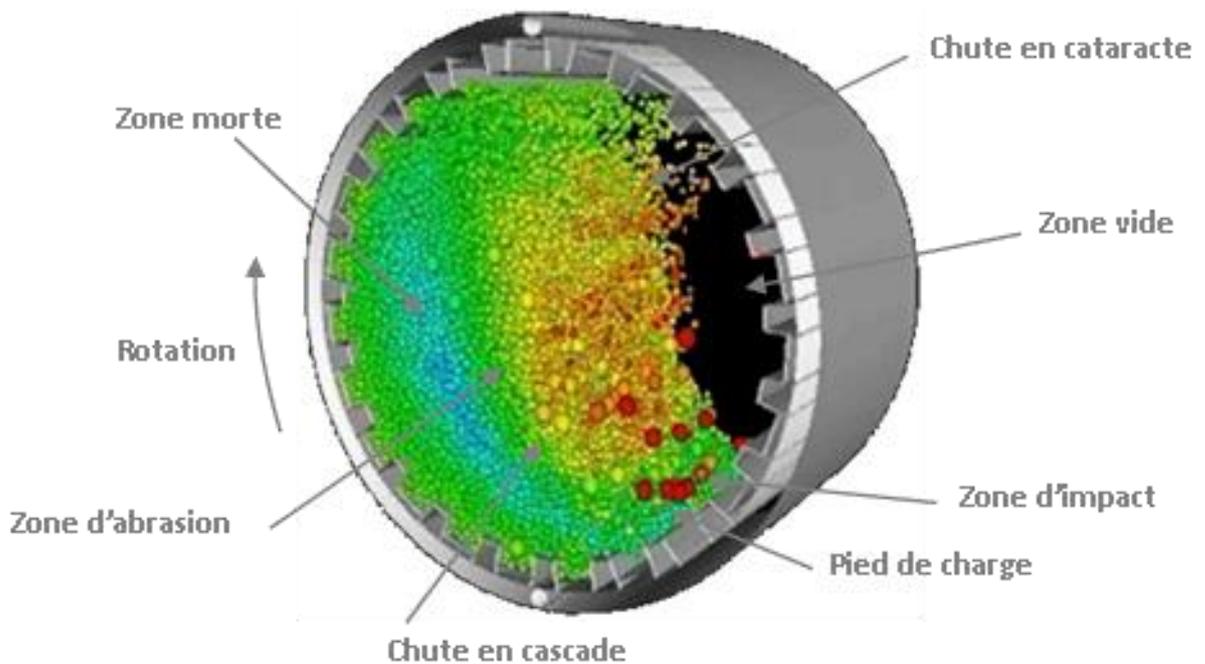


Figure I.4. Zones à l'intérieur d'un broyeur à boulets (zone morte=vitesse relative des boulets nulle) [16]

I.5. Mode d'obtention des boulets

Les boulets sont réalisés selon deux méthodes : Par forgeage des aciers ou par moulage des fontes.

I.5.1. Obtention des boulets par forgeage

I.5.1.1. Forgeage par piston

La matière première sous forme de barres circulaires (figure I.5) est soigneusement contrôlée, et chauffée dans des fours de marche moderne qui maintiennent la température constante à la sortie. Elle est l'un des facteurs les plus importants qui influent sur la dureté des boulets.



Figure I.5. Barres circulaires pour le forgeage des boulets

À une température bien déterminée, les barres sont déformées dans des presses de différentes tailles. Ces presses sont formées par deux parties (deux blocs) qui poussent l'un sur l'autre pour loger la matière chauffée dans l'empreinte qui aboutit par la suite la forme du boulet (figure I.6)

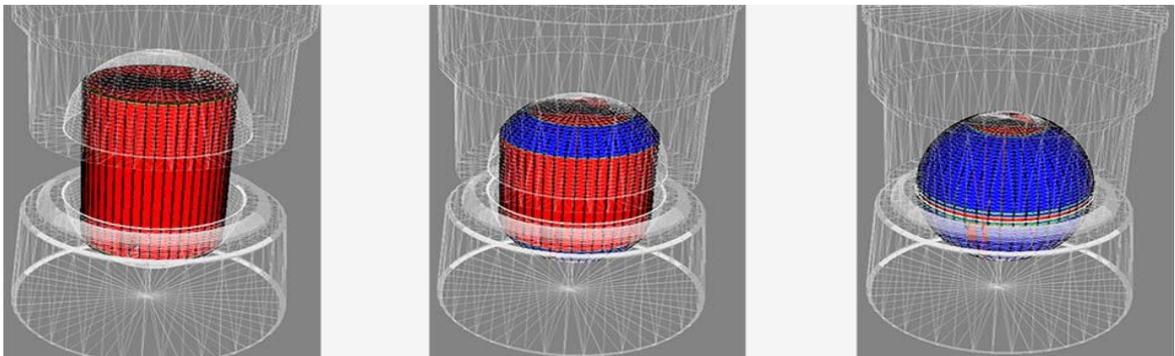


Figure I.6. Presses de forgeage

1.5.1.2. Forgeage par estampage (matriçage)

Le processus de forgeage par estampage, donne la forme au boulet et le soumet également à des efforts de compression et de traction qui améliorent les propriétés ci-dessous :

- Adaptation de l'orientation des fibres : Pour la barre nous partons du sens longitudinal, qui grâce à l'opération de forgeage devient sphérique (figure I.7). Cette nouvelle orientation équilibre radialement les propriétés mécaniques, augmentant ainsi la résistance des boulets.
- Affinage de la dimension du grain, pour améliorer les propriétés mécaniques du produit.
- Compactage du noyau des boulets pour en augmenter la résistance à la cassure par coups.

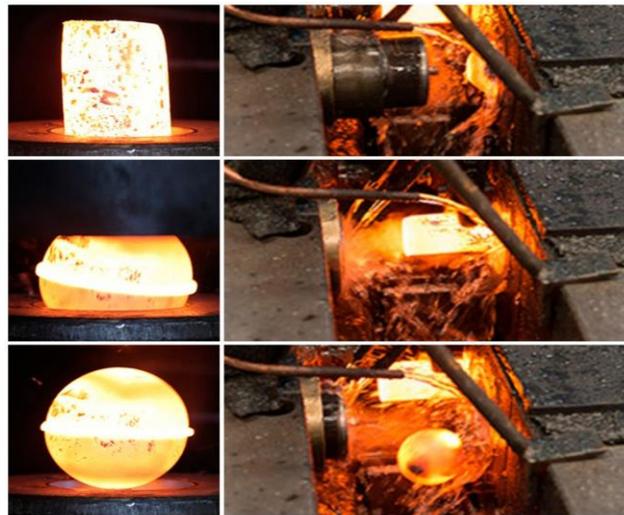


Figure I.7. Boulets forgés par estampage

Après le processus de forgeage, les boulets sont soumis à un cycle de traitement thermique de trempe et de revenu pour en améliorer les propriétés mécaniques.

- Au cours du processus de trempe, les boulets sont refroidis dans l'eau, ce qui augmente considérablement leur dureté (figure I.8).
- Pendant le processus de revenu, les tensions internes sont éliminées grâce à des fours électriques qui améliorent leur ténacité ou leur résistance aux coups. [18]

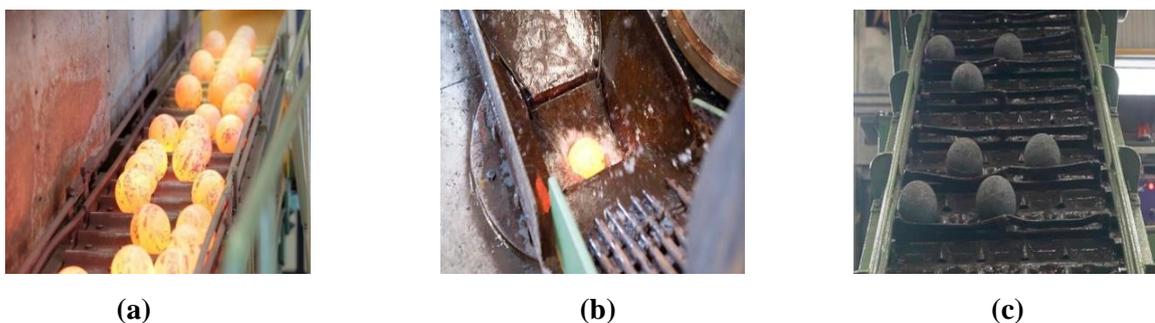


Figure I.8. Durcissement par trempe : (a) chauffage, (b) trempe à l'eau et (c) boulet trempé

I.5.2. Obtention des boulets par moulage

Le moulage en sable à vert est largement utilisé en fonderie de fonte pour la réalisation des boulets de broyage. Ce procédé consiste à utiliser un moule constitué de sable argileux humide et comprimé et dont la forme correspond aux dimensions des boulets souhaités (figure I.9).



Figure I.9. Moulage en sable à vert

Le boulet est coulé en fonte blanche avec des ajouts de chrome (élément carburigène) et de molybdène. Celle-ci est élaborée dans des fours à induction à hautes fréquences à 1600°C. La fusion consiste à fondre des jets, des retours et du boulet usé procure des cimenteries, soigneusement préparés et vers la fin de la fusion on introduit une certaine quantité de ferro-alliages (ferro-silicium, ferro-manganèse, ferro-Chrome.) [19]. Ces retours sont séparés, classés, analysés au spectromètre et nettoyés des nuisibles (ciment adhérent au boulet) avant leur utilisation. Avant la coulée, on procède à un certain nombre de contrôles qui permettent de savoir la qualité de la fonte, si elle convient ou non pour les pièces à couler. On procède à :

- L'analyse chimique de certains éléments qui permet de corriger le bain s'il y a lieu.
- La mesure de la température qui fait partie de l'opération de fusion. Il est indispensable de la connaître pour agir sur la marche du four, pour pouvoir amener cette température entre les limites voulues : au-dessus d'un minimum pour pouvoir obtenir un métal liquide apte à remplir convenablement le moule et au-dessous d'un maximum pour éviter les inconvénients de la surchauffe sur le plan métallurgique et ceux d'une température trop élevée pour la coulée des moules.

I.6. Caractéristiques des boulets

I.6.1 Matériaux des boulets

Généralement deux types de boulets sont utilisés, les boulets de fonderie et les boulets forgés. Les boulets de fonderie sont en fonte au chrome par contre les boulets forgés sont en acier. Ces derniers sont fournis sous différents diamètres et compositions chimiques.

Les boulets en fonte alliés au chrome selon la norme EN 12513 (tableau I.2) sont constitués d'une microstructure mixte composée d'un réseau de carbure contenu dans une matrice à prédominance martensitique par contre les boulets en acier, la phase carbure existe en proportion très minime. La microstructure est constituée d'un mélange de martensite et de bainite.

Designation	C	Si max	Mn	P max	S max	Cr	Ni max	Mo max	Cu max
XCr11	>1.8 à 2.4 >2.4 à 3.2 >3.2 à 3.5	1	0.5 à 1.5	0.08	0.08	11 à 14	2	3	1.2
XCr14	>1.8 à 2.4 >2.4 à 3.2 >3.2 à 3.5	1	0.5 à 1.5	0.08	0.08	14 à 18	2	3	1.2
XCr18	>1.8 à 2.4 >2.4 à 3.2 >3.2 à 3.5	1	0.5 à 1.5	0.08	0.08	18 à 23	2	3	1.2
XCr23	>1.8 à 2.4 >2.4 à 3.2 >3.2 à 3.5	1	0.5 à 1.5	0.08	0.08	23 à 28	2	3	1.2

Tableau I.2. Composition chimique des fontes au chrome selon la norme EN 12513

I.6.2. Dureté

La dureté subit l'influence du mode d'élaboration et de solidification de la fonte au chrome - molybdène, aussi bien que celle de sa composition. En effet, chacun de ces facteurs exerce une influence sur la microstructure. Les carbures durs qui se forment dans les fontes blanches au chrome-molybdène et la matrice austénitique qui peut se transformer en matrice martensitique par traitement thermique augmentent la dureté et la résistance à l'usure.

Les essais par pénétration utilisés pour apprécier la dureté des fontes sont :

- ✓ L'essai de dureté Brinell : Il est utilisé pour la majorité des fontes, parce que l'empreinte réalisée est suffisamment étendue pour que la mesure intègre les duretés des différents constituants de la microstructure, d'autant mieux que le diamètre de la bille est important.
- ✓ Les essais de dureté Rockwell, échelles B ou C : ils sont utilisés dans le cas des fontes très dures (fontes blanches alliées : fontes blanches au chrome-molybdène), donnent des résultats satisfaisants sur des surfaces usinées, à condition que la surface d'appui soit, elle aussi, usinée.

Pour l'essai Rockwell, il convient de réaliser plusieurs essais et d'en effectuer la moyenne, tout en écartant les valeurs extrêmes, par suite de l'influence importante que puisse avoir un constituant dur sur la dureté globale, compte tenu de la faible dimension de l'empreinte .

I.6.3. Résistance à l'usure

Dans la plupart des cas, la résistance à l'usure des fontes augmente avec la dureté et une fonte de grande dureté résiste beaucoup mieux à l'usure et risque moins de se gripper en présence de particules abrasives, car elle s'oppose à leur pénétration dans sa couche superficielle.

Les fontes blanches au chrome-molybdène présentent une excellente résistance à l'usure par abrasion, par suite de la présence de carbures très durs dans leur microstructure. La matrice martensitique de ces fontes a aussi une influence sur la résistance à l'usure.

I.6.4. Résistance au choc

Les fontes blanches au chrome-molybdène offrent une bonne résistance aux chocs que l'on ne peut pas trouver dans les autres fontes blanches. Ils sont de plus en plus utilisés dans l'industrie minière (boulets de broyage).

Dans le cas où les chocs mécaniques répétés ne posent pas de problèmes majeurs, les pièces en fonte blanche au chrome-molybdène peuvent être utilisées à l'état brut de coulée. Dans le cas de chocs mécaniques importants qui conduisent à des ruptures par fatigue, les meilleures performances sont obtenues avec une matrice de martensite revenue. Cette matrice est obtenue par un traitement de durcissement, suivi d'un revenu dont le but de décomposer l'austénite résiduelle, adoucir la martensite et relâcher les contraintes résiduelles, pour enfin obtenir la résistance aux chocs maximale. Ce type de traitement est préférable plutôt qu'une augmentation de la teneur en carbone qui induit une augmentation de la fragilité.

I.7. Facteurs exerçant une influence sur les caractéristiques mécaniques

I.7.1. Microstructure

De point de vue microstructure, les fontes blanches au chrome-molybdène ne contiennent pas de graphite, mais seulement du carbone à l'état combiné sous forme de carbures très durs (carbures de fer + carbures de molybdène) dispersés dans une matrice généralement austénitique. La quantité des carbures, leur grosseur et la façon dont ces derniers sont répartis dans la matrice exercent une influence directe sur les propriétés mécaniques des fontes.

La prédominance des carbures dans la microstructure des fontes blanches au chrome-molybdène leur donne une dureté élevée, une bonne résistance à la chaleur (jusqu'à 900°C), une très bonne résistance à l'oxydation, une excellente résistance à l'usure et une résistance aux chocs

mécaniques optimale, mais rendent l'usinabilité difficile par les procédés normaux.

La microstructure de ces fontes peut être obtenue à des endroits critiques, déterminés à l'avance. À partir d'une fonte grise, il est possible d'avoir cette microstructure à ces endroits, en provoquant une solidification locale et rapide de la fonte et en ajustant la composition chimique. La fonte d'une telle zone est appelée "fonte trempée".

Plus le pourcentage des carbures à l'état brut de coulée est élevé, plus la quantité de carbures dissous dans l'austénite est grande, lors de la déstabilisation de l'austénite, ce qui permet d'améliorer la trempabilité de l'austénite et d'augmenter le domaine de la transformation martensitique, qui donne à la fonte des caractéristiques mécaniques les plus élevées.

Une solidification plus lente des fontes au chrome-molybdène, donne lieu à la formation de carbures plus gros, qui donnent à la pièce une bonne usinabilité. Par contre, une solidification rapide forme des carbures très petits qui confèrent à la fonte une bonne résistance à l'usure et à la fatigue.

La matrice austénitique donne à la fonte une résistance à l'usure et une résilience élevée, mais une usinabilité réduite. Ces caractéristiques peuvent être encore améliorées par une trempe à l'air soufflé ou dans un liquide, qui transforme l'austénite en martensite.

S'il est nécessaire d'effectuer un usinage, il est possible d'adoucir cette fonte par recuit. Ce traitement permet de décomposer l'austénite en ferrite et cémentite.

I.7.2. Composition chimique

Les propriétés des fontes au chrome-molybdène dépendent, en particulier, de la composition chimique de celles-ci. Pour produire avec régularité les nuances de ces fontes, il faut choisir convenablement les matériaux qui constituent le lit de fusion, et effectuer des contrôles étroits aussi bien de leur fabrication que de leur composition.

Un accroissement de la teneur en carbone dans ces fontes entraîne un dépôt de graphite, d'où un abaissement de la dureté et de la résistance à l'usure, mais, par contre on aura une amélioration de l'usinabilité.

L'utilisation du chrome (élément carburigène) dans les fontes blanches alliées, empêche la formation du graphite, garantit la stabilité des carbures dans la microstructure et augmente leur résistance à l'usure.

Le molybdène augmente la trempabilité de la matrice austénitique, et empêche sa transformation en perlite.

Une augmentation du nickel au-delà de 1%, augmente la quantité de l'austénite résiduelle, il en résulte des contraintes internes dangereuses. Cette austénite est transformée en martensite par traitement thermique ou par écrouissage en service.

Les effets des éléments d'alliage sur les propriétés magnétiques des fontes alliées, sont indiquées dans le tableau I.3.

Élément	Induction Magnétique	Champ Coercitif	Perte par Hystérésis	Magnétisme Rémanent	Perméabilité Magnétique
Al (< 1%)	↘	↗	↗	↘	↘
Al (> 1%)	↗	↘	↘	Indéterminé	↗
Cr	↘	↗	↗	↘	↘
Cu	↘	↗	↗	↗	Indéterminé
Ni	↘	↗	↗	↘	↘

Tableau I.3. Influence des éléments d'alliage sur les propriétés magnétiques des fontes alliées

I.7.3. Influence de l'épaisseur

L'épaisseur de la section dans laquelle une fonte est coulée est un facteur qui a une influence importante sur les propriétés des fontes blanches au chrome-molybdène. Plus, la pièce est épaisse et compacte, plus le métal liquide se solidifie et se refroidit lentement dans le moule et favorise la germination du graphite.

Dans le cas des fontes blanches au chrome-molybdène, plus la solidification est lente, plus la dimension des carbures est importante.

A un refroidissement lent d'une pièce initialement portée au rouge, correspond une diminution de la dureté de la matrice métallique. Par contre une fonte coulée dans une épaisseur très mince se solidifie rapidement et elle est plus dure.

Généralement, une pièce d'épaisseur non uniforme présente des différences de grosseur de carbures et de dureté de matrice entre les sections épaisses et les sections minces, bien que la composition chimique soit identique en tous points. Ces différences de structure se traduisent par des différences de caractéristiques mécaniques dans l'ensemble de la pièce.

I.8. Microstructure des fontes blanches au chrome-molybdène

I.8.1. Les carbures

Les fontes blanches au chrome-molybdène s'identifient facilement par leur carbure primaire massif, dur et fragile du type M_7C_3 ($(Fe-Cr)_7C_3$), soit en raison de la vitesse de refroidissement suffisamment rapide au cours de la solidification, soit par suite de la présence d'éléments stabilisant les carbures dans la composition (chrome). Ce composé est le constituant dominant de

la microstructure de ce type de fontes, mais on trouve également un autre carbure de type Mo_2C (carbure de molybdène) au voisinage des carbures M_7C_3 .

Le qualificatif de "massif" signifie que les grains de carbure M_7C_3 sont relativement épais et l'adjectif "primaire" qualifie des carbures qui se sont formés lors de la solidification, directement à partir de la fonte liquide, et non au cours du refroidissement après solidification ou après traitement thermique.

Les carbures massifs réduisent l'usinabilité, mais augmentent la dureté et la résistance à l'usure nécessaire pour concasser ou broyer les autres matériaux. Leur volume est en fonction de la teneur en carbone, comme le montre le graphique ci-après (figure I.10), pour un alliage à 12% de chrome.

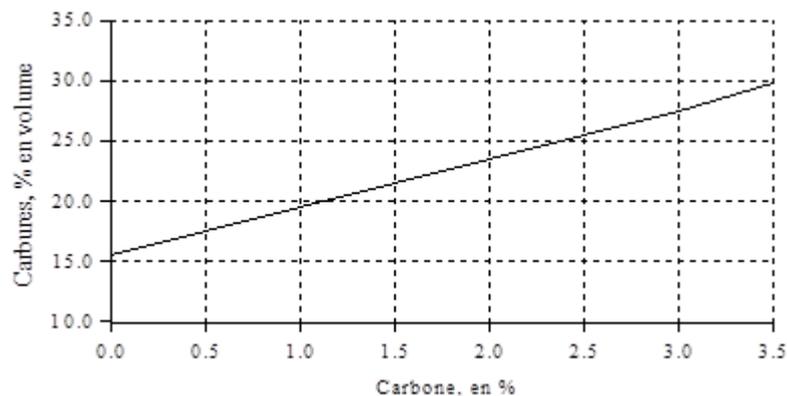


Figure I.10. Évolution du volume de carbure en fonction de la teneur en carbone

Les carbures M_7C_3 sont très stables, un maintien entre 1000°C et 1050°C n'apporte aucune modification. Il y a coalescence de ces carbures sans modification de composition et réduction des hétérogénéités après traitement à 1050°C - 1150°C ; au-delà de cette température, il y a dissolution partielle des carbures primaires et eutectiques.

La vitesse de mise en solution des carbures ne paraît pas liée à la composition chimique, mais se trouve en relation avec la finesse et le pourcentage de carbures à l'état brut de coulée. Plus la quantité de carbures à l'état brut de coulée est élevée, plus la quantité de carbures dissous est grande.

Le carbure de molybdène Mo_2C se présente différemment : en fins globules au voisinage des carbures M_7C_3 dans les alliages présentant une faible proportion de carbures de molybdène, tandis que dans les alliages industriels il se présente (Mo_2C) sous la forme d'un eutectique. Le carbure de molybdène est très stable, il n'est pas modifié au cours des traitements thermiques.

I.8.2. La matrice

En général, la microstructure de la matrice des fontes blanches au chrome - molybdène est constituée d'austénite. Celle-ci est stable à la température ambiante, principalement en raison de

sa forte teneur en carbone, elle peut être ajustée en réglant la teneur en éléments d'alliage et en appliquant ou non un traitement thermique, pour obtenir le compromis le plus économique entre la résistance à l'usure, d'une part, et la résilience nécessaire pour permettre à la pièce de résister à des chocs mécaniques répétés, d'autre part.

Le chrome (élément carburigène) empêche la formation du graphite et garantit la stabilité des carbures dans la microstructure, le molybdène est très efficace pour empêcher la transformation de la matrice austénitique en perlite lors du refroidissement à l'intérieur du moule, ou au cours du traitement thermique, même lorsque la teneur en carbone est élevée. Il augmente la trempabilité de la matrice en particulier dans le cas des teneurs en carbone élevées. La figure I.11, donne une comparaison entre les éléments trempant, augmentant la profondeur de trempé.

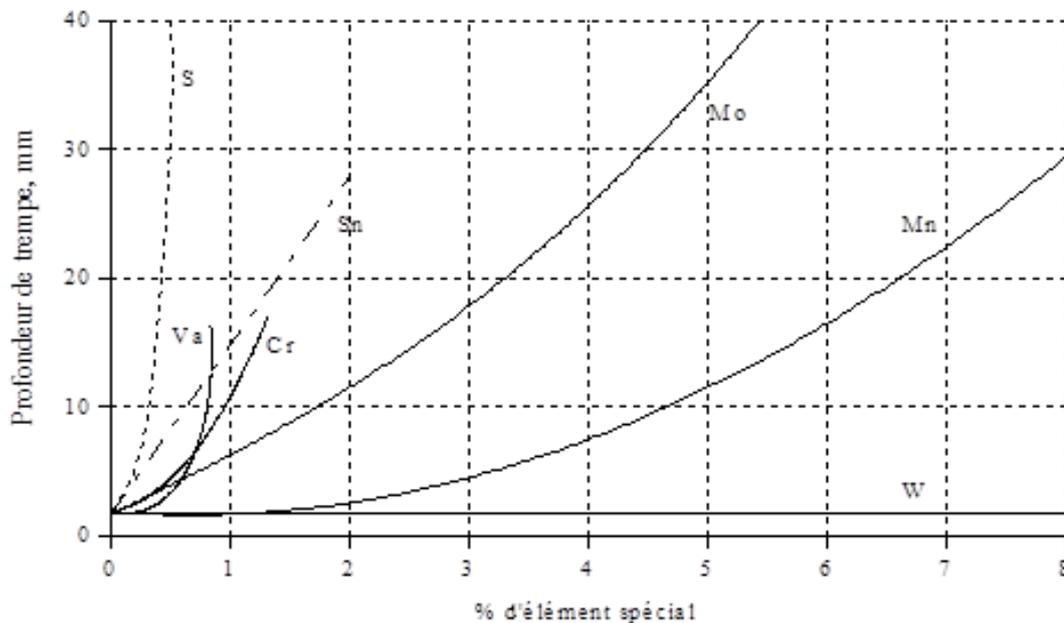


Figure I.11. Influence des éléments trempants sur la profondeur de trempé

Les pièces réalisées à l'aide de cet alliage sont susceptibles d'être utilisées à l'état brut de coulée, avec une matrice à prédominance austénitique. Toutefois, il est recommandé d'effectuer un traitement de détente, à une température comprise entre 200 et 260°C, qui permet d'améliorer la résistance aux chocs sans perte de la dureté ou de la résistance à l'usure.

La résistance aux chocs et à l'usure des fontes blanches au chrome-molybdène peuvent être encore améliorées par un traitement thermique qui transforme l'austénite en martensite (figure I.12). Ce résultat est atteint en utilisant une température élevée pour déstabiliser l'austénite sursaturée. Le traitement de déstabilisation de l'austénite favorise la précipitation des carbures M_7C_3 dans l'austénite.

Ainsi, la trempabilité de l'austénite est améliorée par suite de la réduction de sa teneur en carbone et le domaine de la transformation martensitique est augmenté.

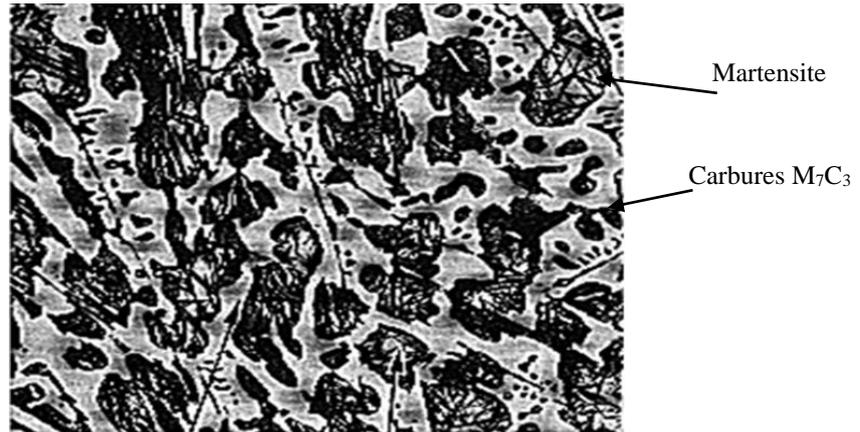


Figure I.12. Structure de la fonte blanche au chrome-molybdène

Les pièces doivent être refroidies aussi rapidement que possible (trempe dans un liquide) à partir de la température de déstabilisation, pour obtenir une résistance à l'usure maximale. Pour de nombreuses pièces de forte épaisseur, ou pour celles qui comportent des variations d'épaisseur, la vitesse de refroidissement rapide la plus sûre doit être limitée en utilisant soit l'air calme, soit l'air pulsé (soufflé), pour éviter les contraintes résiduelles indésirables et les tapures.

Ce traitement est suivi d'un traitement de détente qui est préconisé pour améliorer la résistance aux chocs.

Le tableau I.4, donne la dureté des constituants de la microstructure des fontes au chrome-molybdène [20].

	Constituants	Dureté Vickers HV ₅₀
Carbures	<ul style="list-style-type: none"> • M₇C₃ • Mo₂C 	1200-1800 1500
Matrice	<ul style="list-style-type: none"> • Perlite • Austénite • Martensite 	300-460 300-600 500-1000

Tableau I.4. Dureté Vickers des constituants de la microstructure des fontes blanches au chrome-molybdène

Usure des boulets de broyage

II.1. Introduction

Le phénomène d'usure a été étudié sous plusieurs volets [21]. D'une manière générale, les modes de dégradation 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.

Dans ce chapitre, nous allons relater les différents types d'usure et, plus particulièrement, l'usure abrasive des boulets de broyage. Puis, nous allons évoquer la mesure de l'usure et les essais d'abrasion, et nous finirons par la relation de la résistance à l'usure avec les autres caractéristiques mécaniques.

II.2. Usure des matériaux

L'usure se définit comme étant la perte de matière provoquée par la désintégration mécanique ou physique d'une surface au contact d'une autre par suite du mouvement relatif de l'un par rapport l'autre. L'usure dépend plus des conditions imposées en service que des propriétés des métaux en contact.

Ces conditions dans lesquelles l'usure se produit en service sont très diverses et, même lorsqu'on les connaît, elles ne peuvent être définies avec une très grande précision. Ainsi, la température, les vitesses relatives de mouvement, les forces de pression normales aux surfaces de frottement, l'incidence des vibrations, la nature de la lubrification et la nature des alliages en contact peuvent varier et se combiner entre elles de diverses manières et poser des problèmes très complexes. Ainsi, il est très difficile de réaliser une évaluation exacte des conditions de service à partir de laquelle le choix du matériau doit être fait de manière à réduire l'usure au minimum. En conséquence, il est d'une pratique courante de se fier, pour évaluer les matériaux aux résultats obtenus en service réel.

II.3. Différents types d'usures

L'usure se manifeste de différentes manières [22] :

II.3.1. Usure abrasive

L'usure abrasive est due au contact entre une aspérité et la surface d'un solide. Cette aspérité peut être un pic de rugosité sur une des surfaces, une particule ayant été détachée de l'une des deux surfaces, ou bien un troisième corps introduit dans le contact. Cette aspérité peut dégrader la surface du solide selon différents mécanismes présentés sur la figure II.1. La sévérité du contact dépend des propriétés et de la géométrie des matériaux en contact.

L'aspérité peut :

- Couper, si elle est suffisamment (aiguisée) (c'est-à-dire, si elle a un angle d'attaque suffisamment grand,
- Repousser la matière en surface (labourage),
- Provoquer une fracture, si le solide est fragile,
- Enlever des grains, si le matériau est insuffisamment homogène.

La nature de l'usure abrasive est précisée par le mode d'acheminement de l'aspérité dans le contact : soit l'aspérité est fixée à l'une des surfaces, et l'on parle alors d'abrasion à deux corps, soit l'aspérité est mobile par rapport aux deux surfaces, et l'on parle alors d'abrasion à trois corps.

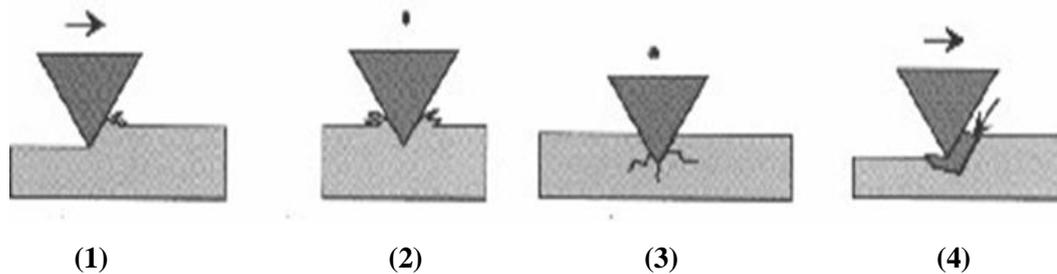


Figure II.1. Schémas des quatre modes d'usure abrasive : (1) découpe, (2) fatigue due au labourage répété, (3) fracture et (4) arrachage de grain

Le passage de l'aspérité sur la surface peut produire : soit un copeau qui enlève de la matière, c'est l'abrasion par coupe, soit un bourrelet plastique sur les bords de la rayure qui va peu à peu disparaître sous le passage répété des aspérités, c'est l'abrasion par fatigue. Dans ces deux cas, les faciès d'usure est constitué de rayures fines parallèles à la direction de glissement.

Un mécanisme de fracturation peut se produire lors du frottement, surtout si l'un des matériaux en contact est fragile. Cette fracturation est initiée par la contrainte de traction présente à l'arrière du contact, et se produit en surface ou en sous-couche.

L'arrachement de grains est un phénomène plus rare et principalement observé sur les céramiques. Ce mécanisme provoque des enlèvements de matière extrêmement grands lorsque la cohésion entre les grains est faible.

II.3.2. Usure adhésive

La composante adhésive du frottement est due à la formation et à la rupture de liens entre les deux surfaces. Ces liens résultent de forces inter atomiques inters faciales qui dépendent du degré d'interpénétration des aspérités et de la composition des surfaces. Lors de la mise en glissement, la force de frottement doit cisailer le plan le plus faible afin de permettre le mouvement.

L'usure adhésive se caractérise généralement par un fort taux d'usure et un coefficient de frottement instable. Cette forme d'usure peut entraîner une destruction rapide des surfaces

frottantes, pouvant aller jusqu'à l'arrêt du mouvement à cause de trop grandes valeurs de coefficient de frottement. Les particules d'usure créées ont une distribution de taille assez large et sont souvent transférées sur l'un des solides en contact.

Trois aspects caractérisent alors la force de frottement :

- Un aspect microscopique (adhésion) lié aux propriétés physiques et chimiques (structure atomique, liaisons pendantes, défauts, etc.) à l'échelle atomique des matériaux en contact.
- Un aspect géométrique lié à la variation de l'aire réelle de contact lors du frottement,
- Un aspect macroscopique (adhérence) qui englobe les deux points précédents ainsi que le comportement mécanique volumique des matériaux de l'interface.

Les forces d'adhésion sont directement liées au type de liaisons mis en jeu dans la structure des surfaces en contact. Dans le cas d'un contact métal/métal, le transfert d'électron entre les deux surfaces peut permettre l'existence de forces d'adhésion très fortes. Celles-ci sont modérées par la présence de couches d'oxyde ou de couches de contamination plus ou moins épaisses en surface. Elles dépendent également de la réactivité chimique des matériaux en contact.

Une forte dureté et un module d'Young élevé permettent de réduire l'adhésion. La structure cristallographique joue également un rôle : expérimentalement, les métaux à structure hexagonale compacte présentent une adhésion beaucoup plus faible que les structures cubiques ou tétraogones. Ces observations ont induit l'idée que pour que l'adhésion soit élevée, il était nécessaire d'avoir un contact suffisant entre les deux solides, donc un certain taux de déformation plastique des aspérités : les métaux à structure hexagonale ont moins de plans de glissement que les autres et sont donc moins ductiles, ce qui expliquerait leur faible adhésion.

Dans le cas du contact entre deux matériaux, si les forces d'adhésion sont supérieures à la résistance de l'un des matériaux, un arrachement de matière peut se produire lorsqu'ils sont séparés par un mouvement normal ou tangentiel. En général le matériau le plus mou se transfère sur le matériau le plus dur, comme illustré sur la figure II.2.

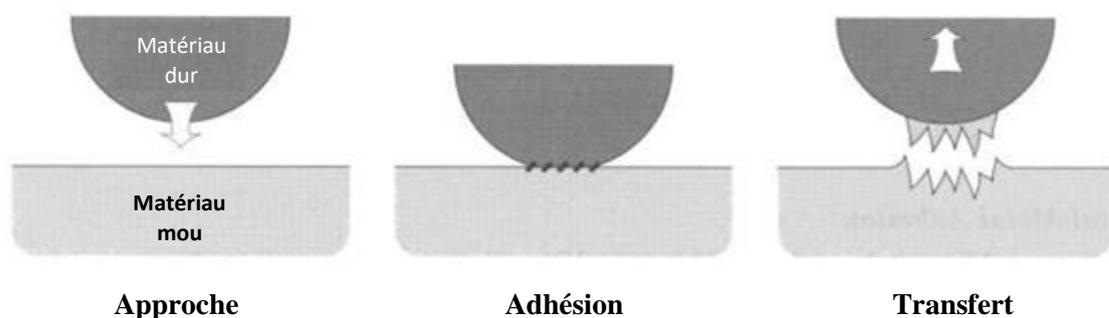


Figure II.2. Procédé de transfert de matière par adhésion

Les métaux ayant une cohésion moins importante que les céramiques techniques, des fragments de métal sont souvent transférés sur cette céramique lors d'un contact entre eux.

Les forces d'adhésion dans le cas d'un contact céramique/céramique sont dues aux interactions de Van der Waals entre les surfaces, mais l'effet de ces forces est considérablement réduit par la grande dureté des céramiques.

Une grande affinité entre les surfaces en contact et un fort échauffement du contact dû au frottement peut entraîner l'apparition de microsoudures entre les aspérités des surfaces. L'augmentation du nombre de ces microsoudures avec la distance de glissement peut finir par souder macroscopiquement les deux surfaces. Ce phénomène est l'expression la plus sévère de l'usure adhésive.

II.3.3. Usure par érosion

L'usure par érosion est causée par des impacts de particules solides ou liquides contre une surface solide. Ce mécanisme dépend des propriétés des matériaux en présence, de l'angle d'impact, de la vitesse d'impact, et de la taille de la particule (Figure II.3).

Plusieurs types d'érosion sont observés :

- Découpe,
- Fatigue,
- Repoussage ou fissuration,
- Fusion,
- Érosion à l'échelle atomique.

Ce mode d'usure a de nombreuses similitudes avec l'usure abrasive.

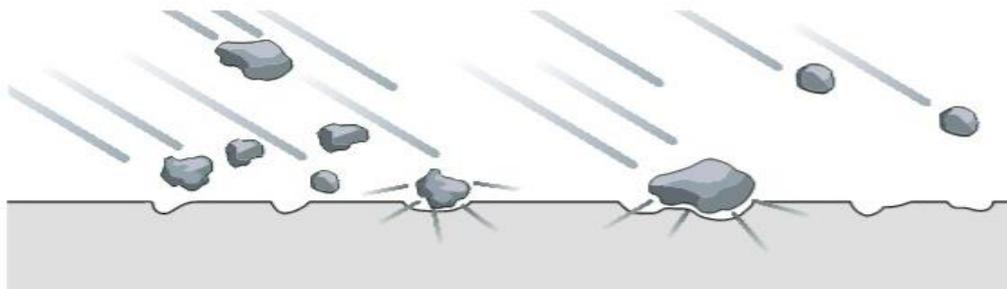


Figure II.3. Usure par érosion [23]

II.3.4. Usure par fatigue

Le contact entre les aspérités d'un solide et une surface antagoniste entraîne l'apparition de contraintes locales très fortes, qui, associées à un passage répété, peuvent provoquer l'apparition et la propagation de fissures dites de fatigue. Ces fissures se traduisent à terme par un enlèvement de matière par délamination au bout d'un certain nombre de cycles.

Les surfaces usées présentent un important taux de déformation plastique dans le cas de forts coefficients de frottement (autour de 1), se traduisant par une réorientation de la structure dans la direction du mouvement sous l'action de la force de frottement. Cette réorganisation n'est pas

observée lorsque le coefficient de frottement est plus faible. L'amorçage de fissures par fatigue à partir d'un point faible de la surface peut lui permettre ensuite de se propager le long de plans de glissement par exemple. La propagation de ces fissures et leur rencontre entre elles, ou avec une fissure préexistante sous la surface crée les particules d'usure. Si le mécanisme de réorientation de la surface a pu prendre place auparavant, les plans de glissement sont alors orientés parallèlement à cette surface et des particules d'usure de forme aplatie sont alors produites. Ce type de fissures dépend du taux d'oxygène et peut se manifester en sous couche.

▪ Influence de l'oxygène

Ce mode d'usure apparaît comme étant très dépendant du taux d'oxygène en présence pour les matériaux réactifs comme le nickel, et indépendant de celui-ci pour les métaux nobles.

Ceci peut s'expliquer par le fait que les métaux réactifs ont tendance à former un oxyde dès leur contact avec l'air, donc par exemple à l'ouverture d'une fissure. Lorsque la fissure se referme, sous l'action d'une contrainte opposée à celle ayant permis son ouverture ou lors de l'enlèvement de cette contrainte, de la matière excédentaire due à la formation de l'oxyde empêche toute cicatrisation de la structure par « recollement » partiel de la fissure, contrairement aux métaux nobles. Diminuer le taux d'oxygène permet de ralentir ce processus.

▪ Fissuration en sous couche

De la fissuration en sous couche peut également se produire pendant le glissement des deux surfaces l'une sur l'autre. Les surfaces peuvent alors paraître non usées alors que des mécanismes de fissuration sont en cours en sous couche. Si elle n'est pas possible en surface, la fissuration peut trouver son origine sur des impuretés ou des défauts présents sous la surface comme le montre la figure II. 4.

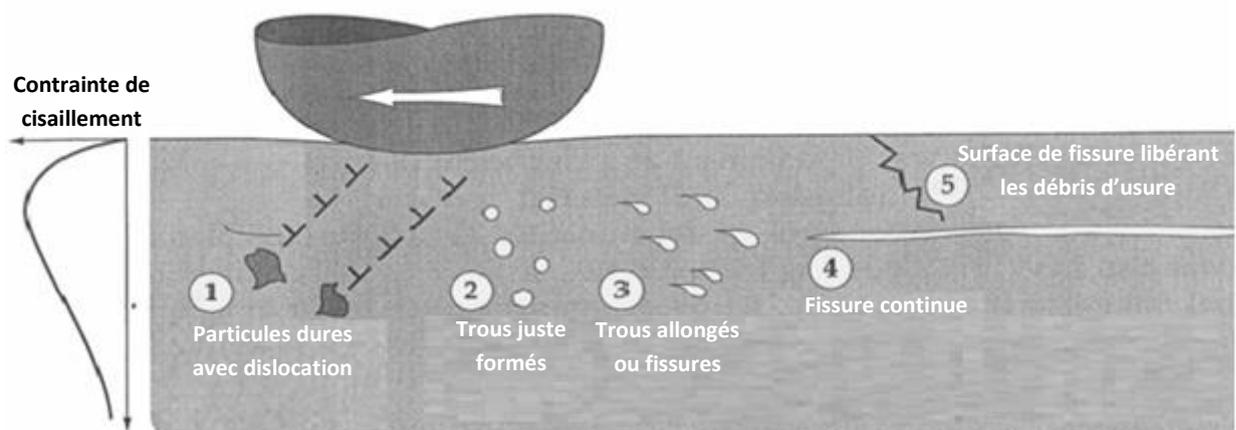


Figure II.4. Amorçage de fissure sous la surface frottée à partir de défauts ou d'impureté du matériau

II.3.5. Usure par corrosion

Si on parle de la corrosion on parle aussi de l'oxydation, qui est en général un problème de réaction chimique entre la surface d'un matériau et l'environnement lors du frottement à température élevée dans la zone de contact, donc la corrosion est la modification des surfaces due à cette réaction (Figure II.5).

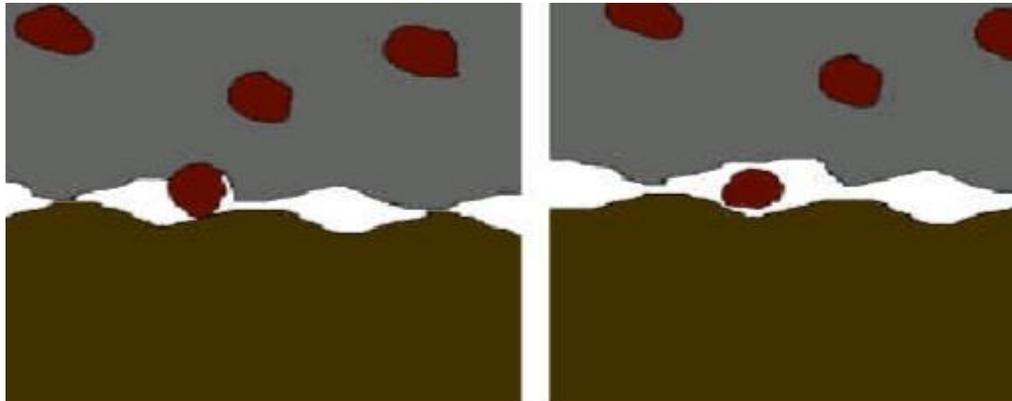


Figure II.5. Usure par corrosion [24]

II.3.6. Usure par cavitation

La cavitation est un phénomène apparaissant lorsqu'un liquide atteint au voisinage d'une surface solide sa pression de vapeur saturante. Il se crée alors une cavité instable qui implose et induit une onde de choc près de la surface du solide.

Cette implosion augmente localement le niveau de contrainte à la surface du solide, laissant le plus souvent une empreinte en forme de cratère (Figure II.6).

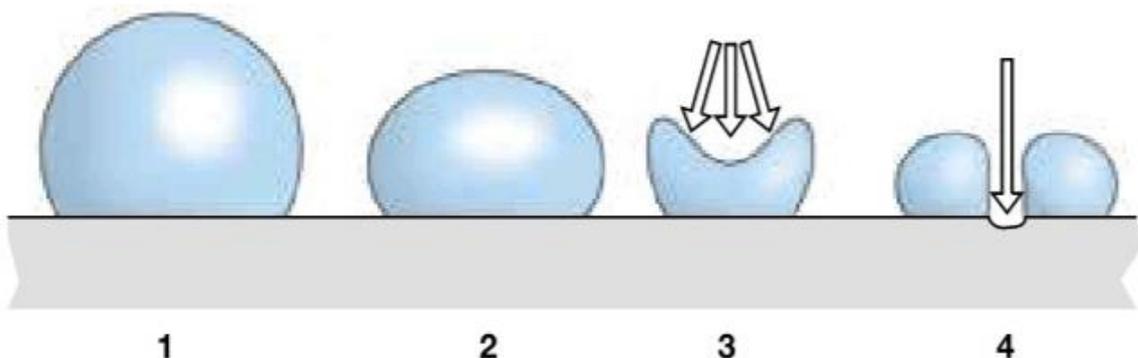


Figure II.6. Usure par cavitation [23]

II.4. Usure abrasive des matériaux

L'usure abrasive est généralement engendrée soit par des particules préexistantes (matériaux granulaires), soit par des débris écrouis (ou protubérances) emprisonnés à l'interface du contact. On distingue ainsi suivant l'application, différents types de configuration, de sollicitation et de milieu. [25]

II.4.1. 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.

II.4.1.1. Usure abrasive à deux corps

L'usure abrasive à deux corps (Fig. II.7) est un processus d'usure par déplacement et/ou enlèvement de matière de la surface frottant d'une pièce mécanique sous l'action d'aspérités dures fixes. 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. 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).

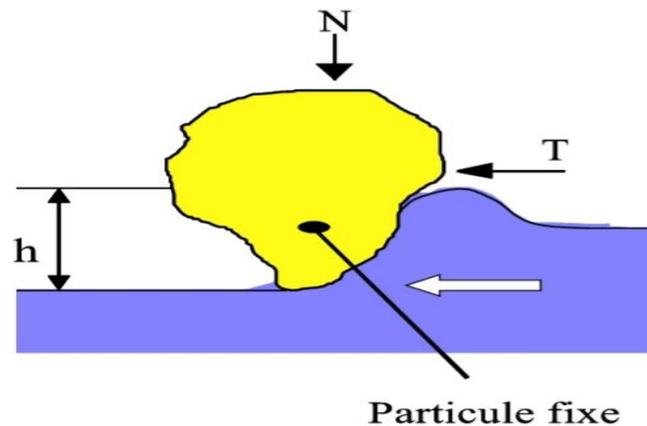


Figure II.7. Abrasion à deux corps

II.4.1.2. Abrasion à trois corps fermée

L'usure abrasive à trois corps fermée est générée lorsqu'on frotte deux surfaces avec interposition d'abrasifs libres (Fig. II. 8). Dans les configurations d'abrasion à trois corps, il faut distinguer deux cas :

- a) La distance entre les surfaces est du même ordre de grandeur que la dimension des grains abrasifs ($D \leq D_{\max \text{ grain}}$) (Fig. II.8 (a)),
- b) La distance entre les surfaces est supérieure à la dimension des grains ($D > D_{\max \text{ grain}}$) (Fig. II.8 (b)).

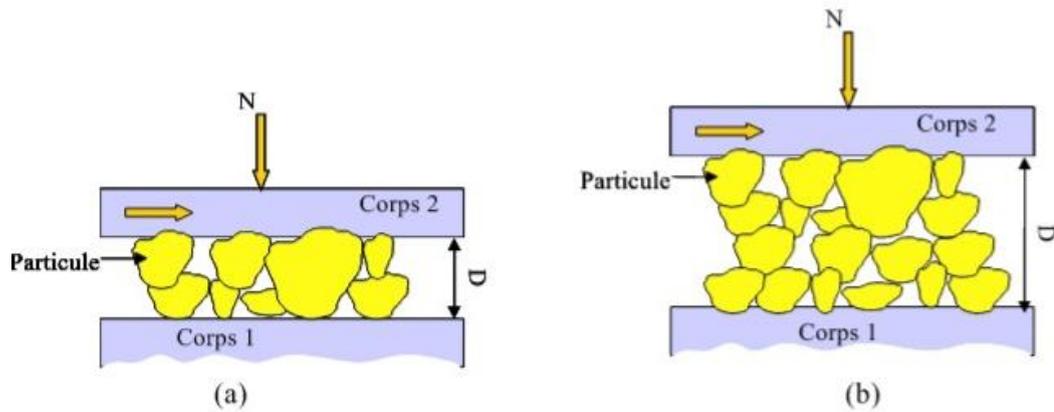


Figure II.8. Abrasion à trois corps fermée

Dans le premier cas $D \leq D_{\max \text{ grain}}$, 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 $D > D_{\max \text{ grain}}$, 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.

II.4.1.3. 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 (Fig. 9). Ce type de configuration est souvent rencontré dans le cas de matériaux granulaires en contact avec un solide.

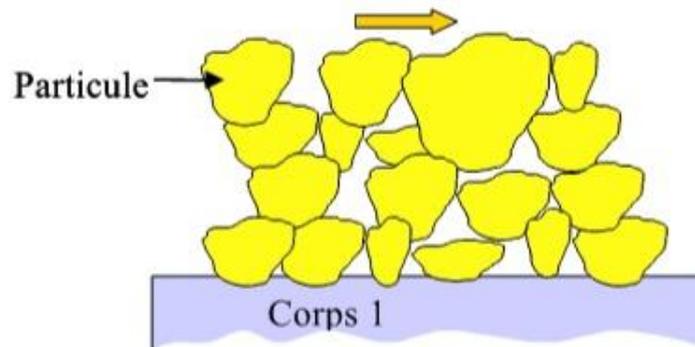


Figure II. 9. Abrasion à trois corps ouverte

Les configurations mentionnées supposent toutes la présence de corps abrasifs. Il faut noter, que

la présence de ces corps abrasifs peut être accidentelle, le plus souvent il s'agit de poussières. En revanche, certaines sollicitations de contact, initialement exemptes de particules abrasives, peuvent elles-mêmes les générer par oxydation des débris. 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 deux 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.

En plus de la configuration mécanique du contact, l'usure abrasive dépend de plusieurs paramètres de sollicitation et des caractéristiques du milieu.

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

II.4.2. 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. Cette sollicitation est aussi appelée abrasion au gougeage,
- **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 concentrations de contraintes, chocs éventuels accidentels.

II.4.3. 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,

- **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. En milieu chimiquement très agressif, la corrosion peut se superposer à l'abrasion, dont les effets de coupe sont susceptibles de détruire la couche passive éventuelle, la vitesse d'usure dépend alors de la rapidité de passivation du métal dans le milieu et de l'intensité d'abrasion.
- **La température** : la température peut influencer la résistance à l'usure abrasive et suivant ses effets une diminution ou augmentation de la résistance. Une température élevée favorisera l'oxydation ou la corrosion, dans certains cas une couche d'oxyde bien adhérente au métal de base peut le protéger de l'abrasion. Un certain nombre d'aciers réfractaires montrent une bonne résistance combinée à l'abrasion corrosion et leur domaine d'utilisation en température.

II.5. Usure abrasive des boulets de broyage

Le mécanisme d'usure par abrasion suit naturellement celui par adhérence aussitôt qu'il y a formation de débris d'usure (produits abrasifs). Il est très fréquent et très sévère. Les boulets dans les broyeurs subissent une usure abrasive, à cause de la friction des produits abrasifs présents tels que : la roche, et ces fragments qui sont situés entre les boulets et le blindage du broyeur et entre les boulets eux-mêmes entre lesquelles se produit un contact de glissement, qui provoque un arrachement du métal et une désintégration mécanique de ces surfaces (Figure II.10).

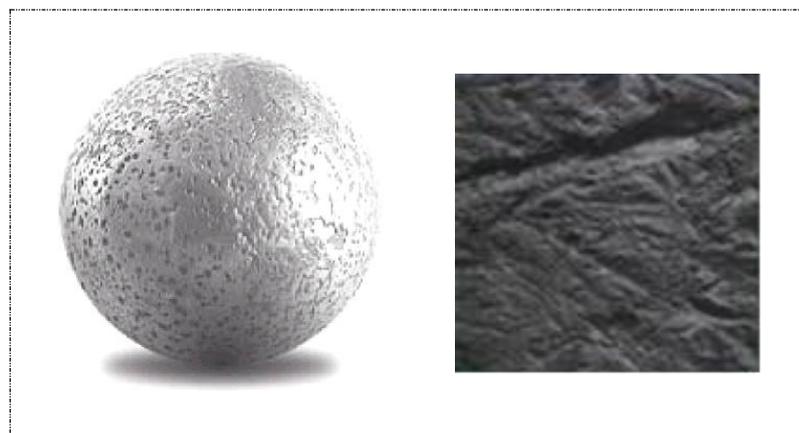


Figure II. 10. Usure abrasive des boulets de broyage

Les boulets dans les broyeurs subissent une usure qui tend à diminuer leur diamètre. Cette diminution dépend à la fois du taux de remplissage, du diamètre propre des boulets, de l'intensité des chocs mécaniques auxquels ces boulets sont soumis, du diamètre et de la vitesse de rotation du broyeur [26].

II.6. Mesure de l'usure

L'usure est généralement mesurée au cours d'un test de frottement sur un tribomètre. Des techniques simples de mesure d'usure permettent d'évaluer la quantité de matière enlevée :

- ✚ **Pesée** : pesée de l'échantillon avant et après le test de frottement au moyen d'une balance de précision ;
- ✚ **Mesure de cote** : Mesure de la variation de longueur d'un échantillon avant et après le test de frottement, dans le cas d'une usure uniformément répartie ;
- ✚ **Mesure du volume usé** : Mesure de topographie avant et après test pour évaluer le volume enlevé pour créer la piste d'usure.

Les outils de mesure de topographie de surface, comme : Le palpeur mécanique, le microscope interférométrique et le microscope à force atomique (AFM) permettent d'évaluer les hauteurs d'une surface après usure comme sur l'exemple de la figure II.11 [27].

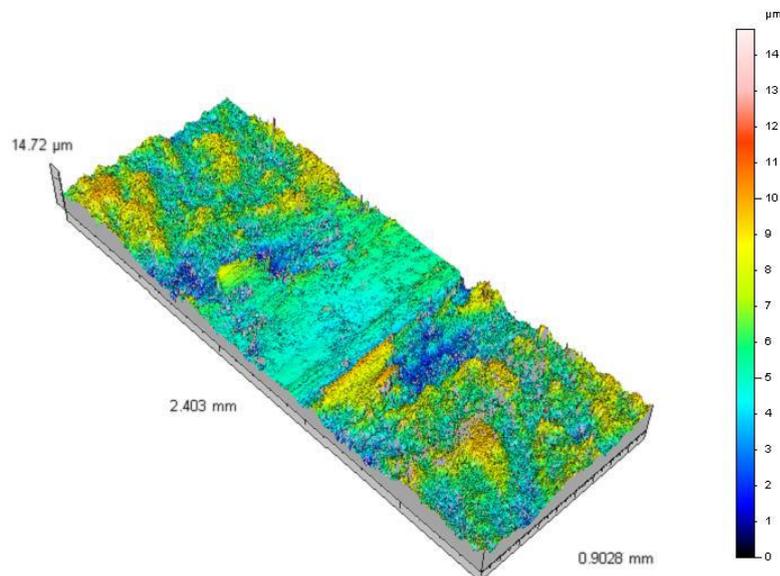


Figure II.11. Piste d'usure en acier après frottement avec un pion en acier

II.7. Essais d'abrasion

Les besoins spécifiques à vocation professionnelle, ont permis de développer divers moyens d'essais d'abrasion. Ces tests sont des procédures standards utilisées dans les secteurs de la fabrication et de l'industrie pour étudier la résistance d'un produit aux dommages et à l'usure causés par l'abrasion.

Différentes méthodes sont utilisées par les laboratoires pour tester l'abrasion, mais il en existe quelques-unes qui sont considérées comme des normes internationales. Ces tests portent la désignation ASTM, ce qui indique que les méthodes ont été développées par ASTM International, une organisation internationale de normalisation de la fabrication. Les tests d'abrasion sont utilisés sur une variété de produits manufacturés pour tester la résistance à l'abrasion de matériaux tels que la peinture, les adhésifs, les tissus et les métaux.

Ces essais permettent d'apprécier et de comparer les caractéristiques d'élaboration du matériau (composition, structure, dureté, ...), en mettant l'accent sur un ou plusieurs des paramètres d'abrasion (nature des abrasifs, vitesse, charge...).

Nous avons choisi trois exemples d'essais d'abrasion parmi les nombreux essais utilisés en tribologie.

II.7.1. Test pion/disque (ASTM G 99)

Les essais pion/disque sont largement utilisés pour évaluer les performances tribologiques des matériaux. Ils permettent de mesurer l'usure par frottement d'une bille ou d'une tige stationnaire sur un disque en rotation sous une force de compression axiale constante (Figure II. 12). Le test permet de déterminer la perte de masse (mesure par pesée) pour une distance d'usure définie.

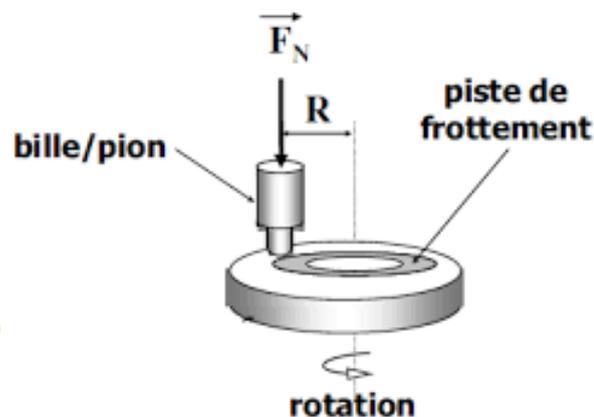


Figure II. 12. Tribomètre Pion-disque

II.7.2. Test d'abrasion avec sable sec et roue en caoutchouc (ASTM G 65)

La méthode d'essai standard pour mesurer l'abrasion à l'aide de l'appareil à sable sec / roue en caoutchouc, également connu sous le nom de test ASTM G 65, est une méthode d'essai à l'abrasion qui mesure la perte de masse (mesure par pesée) ou de volume (mesure du volume usé) causé par l'abrasion au sable sec. Le test est effectué en introduisant un écoulement de sable dans l'espace entre l'échantillon résistant à l'abrasion testé et une roue en caoutchouc en rotation (Figure II. 13).

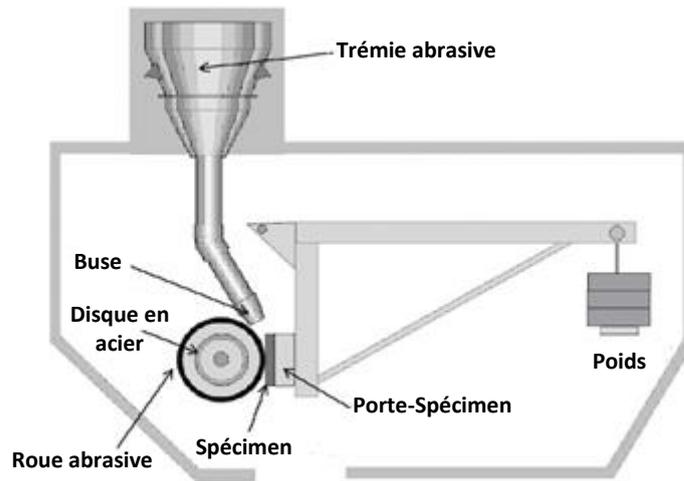


Figure II.13. Test d'abrasion avec sable sec et roue en caoutchouc

II.7.3. Test d'abrasion avec broyeurs à boulets de laboratoire

Les broyeurs à boulets de laboratoire (Figure II. 14) sont utilisés par plusieurs équipes de recherche comme une autre alternative pour simuler les conditions d'abrasion sévères rencontrées dans les broyeurs à boulets industriels. Ils donnent des prévisions précises de la durée de vie des alliages résistant à l'usure dans les applications de broyage.

Ces des essais peu coûteux et beaucoup plus rapides que les essais effectués avec des broyeurs industriels. Les premières tentatives de développement de ces essais datent des années 1940.



Figure II.14. Test d'abrasion avec broyeurs à boulets de laboratoire

II.8. Relation de la résistance à l'usure avec les autres caractéristiques

II.8.1. Influence de la composition chimique

Pour les métaux ferreux, le carbone est l'élément qui a le plus d'influence sur le comportement à l'usure, sa combinaison avec d'autres éléments d'alliage (Cr, Mn, Mo, V, W) donne lieu à des carbures de plus en plus durs (M_2C , M_7C_3 , $M_{23}C_6$).

La figure II.15 et II.16 montrent des exemples d'usure de fontes alliées au chrome en fonction, respectivement de la teneur en carbone dans le cas d'un broyeur à mâchoire et sous des essais de frottement de fontes alliées au chrome - vanadium contre un acier recouvert d'oxyde de fer Fe_2O_3 .

En dehors du carbone et des éléments carburières, d'autres éléments interviennent tels que le silicium qui doit être limité pour éviter la fragilité des pièces. Par ailleurs, comme il réduit la trempe, il est préférable de le maintenir au-dessous de 0.7%.

Le phosphore est généralement limité aux plus basses valeurs. Des essais ont montré que même à un taux de 0.5%, le phosphore n'a pas amélioré la résistance à l'usure.

Enfin, le bore peut avoir deux effets : un durcissement des carbures et la formation possible de graphite à l'interface carbure matrice, ce qui favorise la tenue au frottement abrasif.

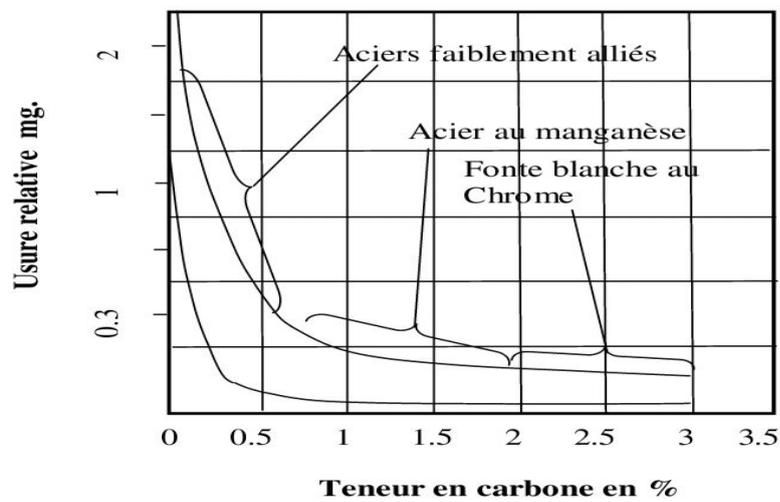


Figure II.15. Abrasion relative en fonction de la teneur en carbone pour des matériaux ferreux (Test fait avec un broyeur à mâchoires)

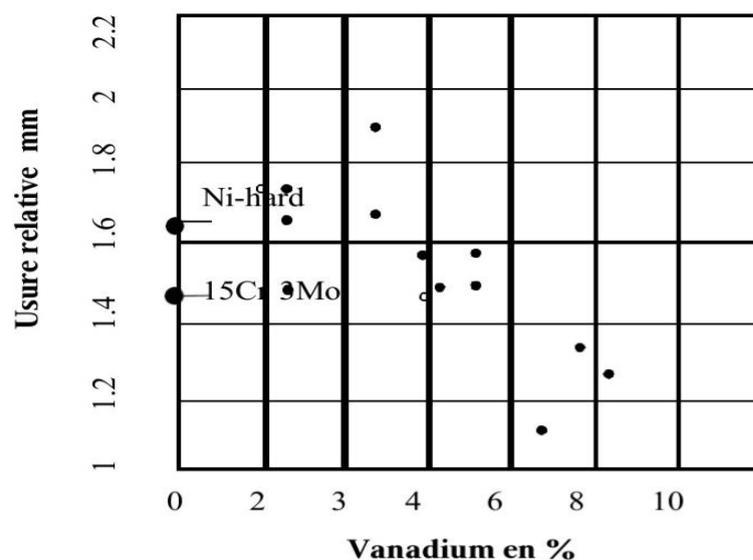


Figure II.16. Usure abrasive en fonction de la teneur en vanadium pour des essais de frottement métal contre oxyde de Fe_2O_3

II.8.2. Influence de la microstructure

II.8.2.1. Effets des carbures

En fait, la composition chimique n'intervient pas seul, il faut surtout tenir compte de la quantité, de la répartition de la forme et du type de carbure, pour pouvoir prévoir le comportement des matériaux.

La figure II.17, montre l'influence du pourcentage des carbures dans les fontes blanches à haute teneur en chrome à matrice austénitique. De cette figure on remarque que la résistance à l'abrasion diminue légèrement quand le pourcentage de carbure augmente, dès que les carbures primaires apparaissent, la résistance à l'abrasion augmente fortement mais décroît aussi rapidement quand la quantité de carbure primaire dépasse une certaine proportion. Ceci est dû au fait que les carbures M_3C et M_7C_3 sont susceptibles de se fissurer selon une série de plan de clivages parallèle au plan d'usure. Les carbures massifs hyper eutectiques sont néanmoins fragiles et ne peuvent être que défavorables pour la tenue à l'usure par impact.

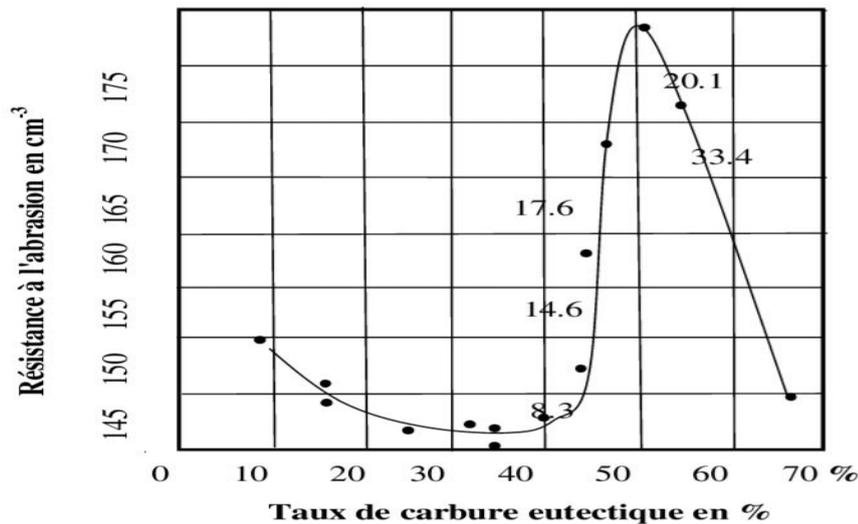


Figure II.17. Influence du taux de carbures en volume sur la résistance à l'abrasion (Les valeurs sur la courbe représentent le taux de carbures primaires)

II.8.2.2. Effets de la matrice

La matrice joue elle aussi un rôle important face à l'abrasion. En effet, différents alliages ayant la même quantité de carbures ne présentent pas la même résistance à l'usure. La figure II.18 montre ce phénomène pour les différents types de matrices obtenues par traitements thermiques, l'essai d'usure était effectué sur des boulets de diamètre de 50 mm dans un broyeur de laboratoire rempli à 70% de sable pendant une durée de 200 heures.

On remarque sur cette figure que, pour une même composition chimique de fonte alliée au chrome les structures martensitiques présentent des performances supérieures à celles des structures austénitiques et perlitiques.

La résistance à l'usure $1/k$ était déterminée en fonction du rapport de la dureté de l'abrasif sur celle de la matrice, $k = (\varnothing_0 - \varnothing) / t$ où \varnothing_0 est le diamètre initial des boulets, \varnothing est le diamètre des boulets après essai, t représente la durée de l'essai en heures.

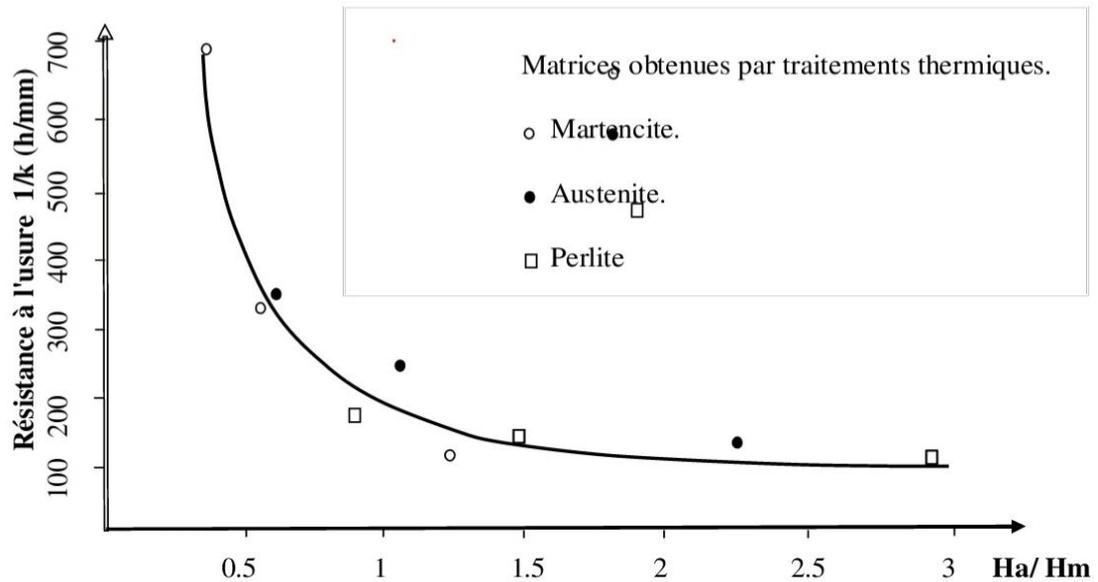


Figure II.18. Influence du rapport de dureté de l'abrasif H_a (quartz) et de la matrice H_m sur la résistance à l'usure d'une fonte à 18% Cr, 2.96% C, 1.5% Mn et 0.96% de Si [28]

II.8.3. Dureté

L'idée de relation entre l'usure et la dureté de pièces métalliques, a été admise pour les métaux purs et les aciers recuits, l'expérience a toujours montré que l'usure était directement proportionnelle à leur dureté. Cette observation a été vérifiée par la mesure de la perte de masse d'une pointe du matériau testé appliqué à un papier abrasif.

Mais pour les matériaux complexes tels que les fontes alliées et les aciers de compositions chimiques complexes, l'usure peut prendre des formes très différentes et la dispersion des points est plus grande parce que la dureté n'est qu'une moyenne des duretés des différentes phases composant la microstructure ; elle ne tient pas compte des mécanismes plus au moins complexes qui ont lieu à cette échelle.

La figure II.19 illustre de manière très nette ce point. Il s'agit d'essais comparatifs réalisés sur trois types de fontes alliées (tableau II.1). On remarque que ces fontes offrent tous les trois la même résistance à l'usure par impact, alors que leurs duretés sont respectivement de 680HV, 615HV et 465HV.

Nuance	Composition chimique					
	C	Si	Mn	Cr	V	Ni
A	3.54	0.74	3.22	0.95	7.5	1.6
B	3.41	0.73	1.08	1.05	5	4
C	2.96	0.71	0.74	14.9	8.5	–

Tableau II.1. Composition chimique des fontes correspondant à la figure II.19

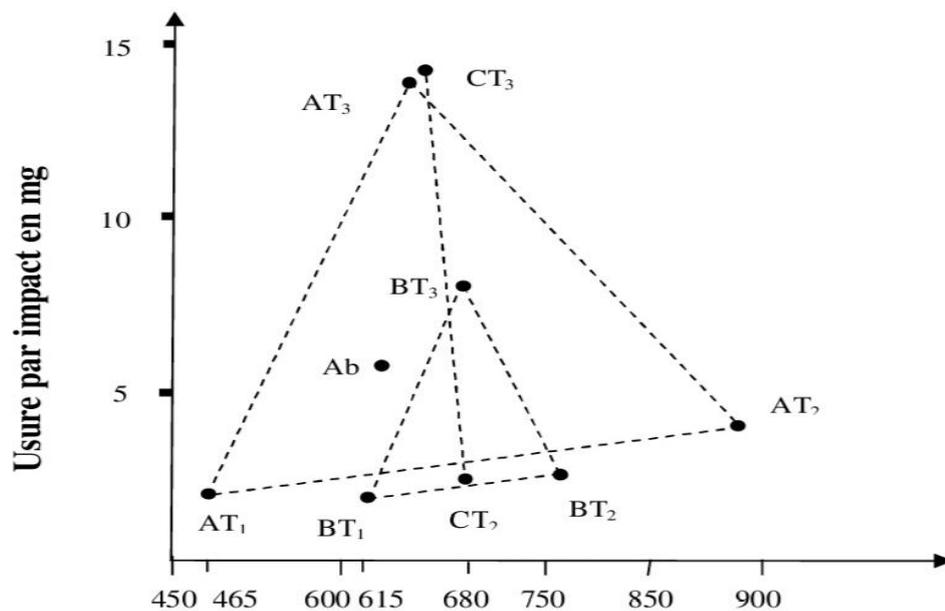


Figure II.19. Usure par impact (perte de masse en mg) en fonction de la dureté de trois fontes alliées (tableau II.1).

Ab : État brut de coulée de la nuance A.

T₁ : Traité à 1000° C pendant 6 h et refroidissement à l'air libre pour les alliages A et B.

T₂ : Traité à 850° C pendant 6 h et refroidissement à l'eau pour les alliages A, B et C.

T₃ : Traité à 850° C pendant 6 h et refroidissement à l'eau puis revenu à 550° C de deux heures de maintien pour les fontes A, B et C.

II.8.4. Ténacité

Un autre facteur qui vient s'ajouter aux critères d'évaluation et choix d'un matériau, est que certaines pièces auront à subir une abrasion combinée à des impacts plus au moins importants, situation particulièrement observée dans le cas des corps broyants des ciments et des minerais. La tendance d'un matériau à se détériorer par écaillage et rupture prématurée doit donc être réduite. Or, c'est ce qu'on appelle la ténacité qui gouverne la gravité de ces phénomènes.

La recherche d'un compromis entre la dureté et la ténacité lors de la mise au point et le choix d'un matériau est très nécessaire pour la majorité des cas industriels et ce dans le but d'offrir un meilleur rapport de résistance au type d'abrasion qu'il aura et la ténacité nécessaire à ces fonctions. La figure II.20 illustre l'effet de ces deux paramètres contraires, dont il apparaît clair que la ténacité a un impact important pour les matériaux fragiles.

1. Si la charge imposée est sous le seuil critique de propagation des fissures, le comportement du matériau est indépendant de la ténacité de sorte qu'une augmentation de la dureté entraîne une plus grande résistance à l'abrasion.
2. Si la charge appliquée sur le matériau dépasse le seuil critique il est souhaitable d'avoir une meilleure ténacité afin d'éviter le mécanisme de fragmentation, même si cela requiert une diminution de la dureté.
3. Si la sévérité de l'usure s'intensifie en raison d'une charge plus importante ou d'une augmentation de la grosseur des particules ou de l'utilisation de particules plus angulaires, une ténacité plus élevée sera nécessaire pour conserver une résistance à l'abrasion optimale [29].

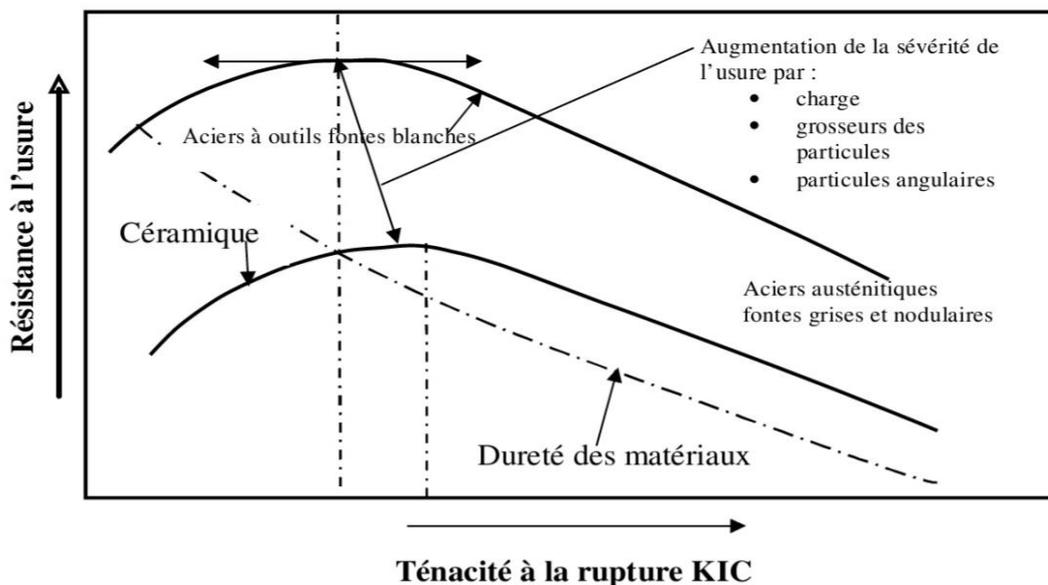


Figure II.20. Effet de la ténacité sur la résistance à l'abrasion des matériaux

**Techniques et résultats
expérimentaux**

III.1. Introduction

L'usure par abrasion est estimée dans ce travail par la perte de masse des boulets brut de coulée et traité ayant un diamètre de 60 mm tout en utilisant la machine Los Angeles. Ce dispositif est utilisé pour mesurer la résistance combinée à l'usure par frottement et à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de granulats selon la norme NF P 18-573. Il se trouve au niveau du Département de Génie Civil de l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret.

III.2. Principe de l'essai Los Angeles

L'objectif de l'essai est de mesurer la résistance combinée à l'usure par frottement et à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de granulats selon la norme NF P 18-573. L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés dans une machine Los Angeles (figure III.1). Nous avons utilisé cette machine pour réaliser nos essais d'usure [30-31].

III.3. Éléments constituant le banc d'essai "Los Angeles (N.F. P18.573)"

Les principaux éléments de la machine d'abrasion "Los Angeles" sont donnés au tableau III.1. Les dimensions du cylindre en acier sont données à la figure III.2.

Numéro	Élément
1	Cylindre en acier de Ø 711 x 508 mm
2	Support en acier
3	Compteur digital
4	Récepteur ramasseur
5	Moteur électrique
6	Porte de remplissage

Tableau III.1. Éléments constituant la machine d'essai "Los Angeles"



Figure III.1. Machine d'abrasion "Los Angeles" [32]

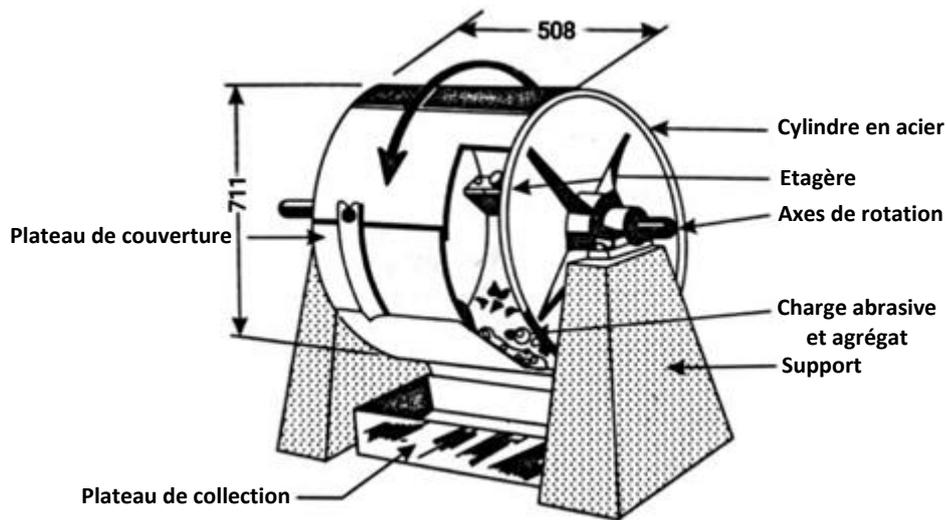


Figure III.2. Dimensions du cylindre en acier

III.4. Procédure expérimentale et matériel utilisé

III.4.1. Matériau utilisé

III.4.1.1. Composition chimique des boulets

Le tableau III.2 regroupe les résultats des analyses chimiques effectuées sur les boulets de diamètre 60 mm procurés d'ALFET bruts de coulée et traité. Les valeurs représentées sur le tableau indiquent le minimum et le maximum du pourcentage des différents éléments.

Éléments Chimiques	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
Pourcentage (masse %)	2.4 -2.8	0.41 - 0.57	0.37 - 0.4	0.056 - 0.063	0.036 - 0.08	11.5 – 13,5	0.07 - 0.09	0.23 - 0.3	0.06 - 0.17

Tableau III.2. Composition chimique de l'alliage étudié

Ces nuances se rapportent aux fontes blanches alliées au chrome, avec un pourcentage de 11.5% et 13.5% de chrome.

III.4.1.2. Caractéristiques mécaniques et traitements thermiques des boulets

Le poids unitaire, la surface du boulet et la dureté (HRC) mesurée avant de commencer les essais des boulets de diamètre 60 mm bruts de coulée et traités thermiquement sont donnés au tableau III.3.

Boulet	Diamètre du boulet en [mm]	Poids unitaire [Kg]	Surface du boulet [Cm ²]	Dureté [HRC]
Brut de coulée	60	0.820 à 0.945	113.0 ± 0,5	49,0
Traité thermiquement	60	0.820 à 0.945	113.0 ± 0,5	60,5

Tableau III.3. Caractéristiques mécaniques des boulets utilisés dans nos essais

Le tableau III.4 fait ressortir les traitements thermiques réalisés sur le boulet de diamètre 60 mm.

Traitement	Gamme de traitements thermiques		
	Température d'austénisation	Sévérité de trempe	Température de revenu
	950°C	Air soufflé	250°C

Tableau III.4. Traitements thermiques réalisés sur les boulets utilisés dans nos essais

III.4.1.3. Caractéristiques de la charge broyante (granulats, boulets)

Le tableau III.5 illustre les dimensions des granulats, leur poids, le nombre de boulets et le nombre de rotations du cylindre (figure III.2) pour chaque classe granulaire d'un essai Los Angeles.

Classes granulaires (mm)	Nombre de boulets	Nombre de rotations (tours)	Poids des fractions (g)
4 – 6,3	7	500	5000 ± 5
6,3 – 10	9	500	5000 ± 5
10 – 14	11	500	5000 ± 5
10 – 25	11	500	3000 ± 5
16 – 31,5	12	500	2000 ± 5
25 – 50	12	1000	3000 ± 5

Tableau III.5. Caractéristiques de la charge broyante d'un essai Los Angeles

Pour nos essais, nous avons utilisé la troisième classe granulaire (10 – 14 mm).

III.4.2. Matériel utilisé

III.4.2.1. Conduite de l'essai d'usure

L'essai d'usure par abrasion était effectué sur un boulet traité thermiquement et un boulet brut de coulée, en considérant les étapes suivantes :

- L'échantillon de granulat est tamisé à sec, laver et sécher à l'étuve à 105°C. La masse de cet échantillon est de 5000g ±5g ;
- Les boulets subissent une usure, qui tend à diminuer leur diamètre après leur mise en œuvre pendant un certain temps à l'intérieur du cylindre en acier de Ø 711 x 508 mm de la figure III.2, animé d'un mouvement de rotation uniforme de 33 tr/mn. Les boulets sont nettoyés et pesés (masse m_1) avant de les introduire dans la machine Los Angeles ;
- Introduire la charge broyante (nombre de boulets), puis l'échantillon pour essai. La charge broyante est constituée de 11 boulets de diamètre 60 mm. 9 boulets utilisés pour la réalisation des essais Los Angeles habituels et nos deux boulets (un brut de coulée et un traité) (figure III.3) ;
- La machine est lancée jusqu'au nombre de tours voulu. L'usure était appréciée par la perte de masse après 500, 1000, 1500, 2000, ..., et 6500 tours ;
- Une fois le nombre de tours terminé, nettoyer et peser les 2 boulets (masse m_2) ;
- La perte de masse exprimée en % est égale à $m = (m_1 - m_2) / m_1 \times 100$.



Figure III.3. Charge abrasive à l'intérieur de la machine Los Angeles

III.4.2.2. Balance électronique

La résistance à l'usure est appréciée par la perte de masse de ces boulets qui est mesurée au moyen de la balance électronique de la figure III.4 d'une précision de 0.01g.



Figure III.4. Balance électronique KERN 1500 g d'une précision de 0.01g

III.4.2.3. Duromètre

Nous avons réalisé des essais de dureté Rockwell HRC sur des boulets à l'état brut de coulée et après traitements thermiques au laboratoire des essais mécaniques d'ALFET de TIARET. Ces essais étaient effectués à l'aide d'un duromètre du type HP250 (220 V / 50 HZ / 6 A) représenté sur la figure III.5. Il est doté d'un pénétrateur conique constitué par un diamant. Ce cône ayant un angle au sommet de 120° (figure III.6) est arrondi à son sommet ($R = 0.2 \text{ mm}$).

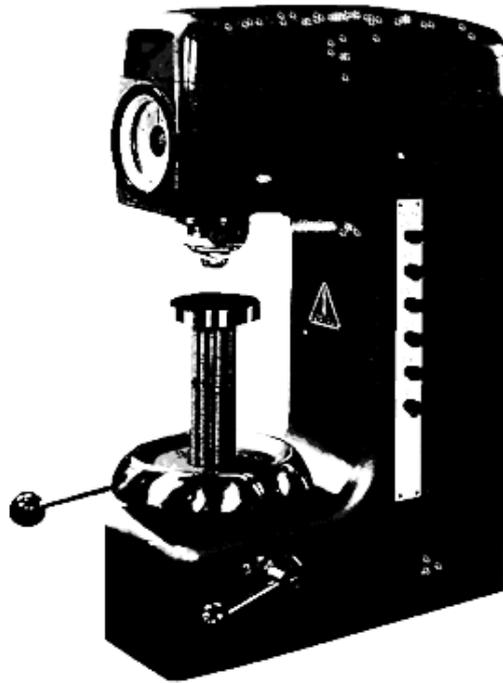


Figure III.5. Duromètre utilisé pour mesurer la dureté Rockwell



Figure III.6. Pénétrateur conique utilisé dans un duromètre Rockwell

La surface d'appui ainsi que la surface soumise à l'essai sont soigneusement préparées et rendues lisses et planes par meulage tout en prenant les précautions nécessaires pour empêcher tout échauffement excessif.

III.5. Résultats et discussions

III.5.1. Résultats des essais d'usure et des essais de dureté

Les mesures de l'usure des boulets sont exprimées par la perte de masse des boulets en gramme en fonction du nombre de tours passé par ces derniers dans le tambour en rotation de la machine Los Angeles. Les résultats de ces essais et ceux de la dureté HRC sont donnés au tableau III.6.

Nombre de tours	Boulet brut de coulée		Boulet traité	
	Masse (g)	Dureté HRC	Masse (g)	Dureté HRC
0	911,1 (m_1)	49 (HRC ₁)	866,21 (m_1)	60,5 (HRC ₁)
500	910,41	49,5	865,56	60
1000	909,99	50	865,27	60
1500	909,68	50	865,06	60,5
2000	909,45	50,1	864,93	61
2500	909,25	50,2	864,82	61,5
3000	909,08	50,3	864,76	62
3500	908,91	50,5	864,70	62
4000	908,78	51	864,60	62,4
4500	908,67	51,5	864,57	62,5
5000	908,52	52	864,50	62,5
5500	908,45	52,5	864,44	63
6000	908,35	53	864,41	63,5
6500	908,25	53,5	864,36	64

m_1 : masse initiale (g)

HRC₁ : Dureté initiale

Tableau III.6. Résultats de la perte de masse en gramme et de la dureté HRC des boulets brut de coulée et traité thermiquement

La variation de la masse du boulet brut de coulée en fonction du nombre de tours est représentée sur la figure III.7. Celle du boulet traité est donnée à la figure III.8.

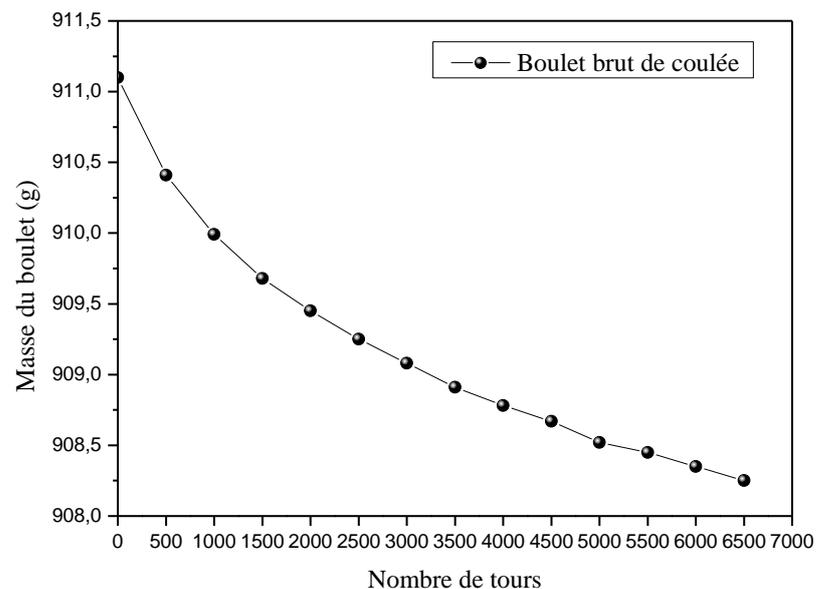


Figure III.7. Variation de la masse du boulet brut en fonction du nombre de tours

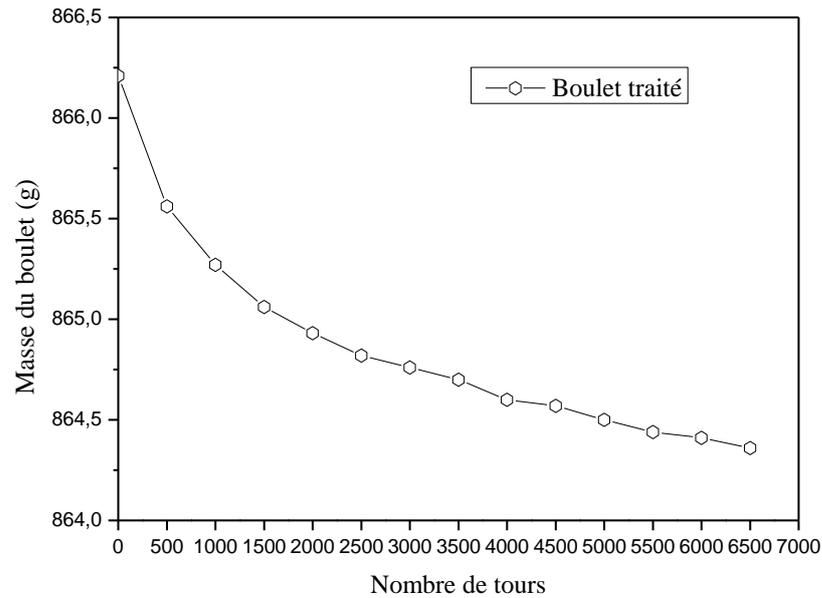


Figure III.8. Variation de la masse du boulet traité en fonction du nombre de tours

Le résultat de la friction entre les différentes surfaces ; granulats, blindage du cylindre et les boulets entre eux-mêmes provoque un arrachement du métal et une désintégration mécanique des surfaces des boulets, qui se manifeste par une diminution de leur masse en fonction du nombre de tours (figure III.7 et figure III.8).

Cette diminution est plus accentuée au début des essais surtout pour le boulet traité et commence à se stabiliser avec l'augmentation du nombre de tours. Cette dégradation intervient et elle est plus importante dès le début de l'essai d'usure à cause de la présence de couches oxydées et contaminées sur les boulets.

L'évolution de dureté HRC en fonction du nombre de tours passé dans le tambour en rotation du boulet non traité et traité est illustrée à la figure III.9.

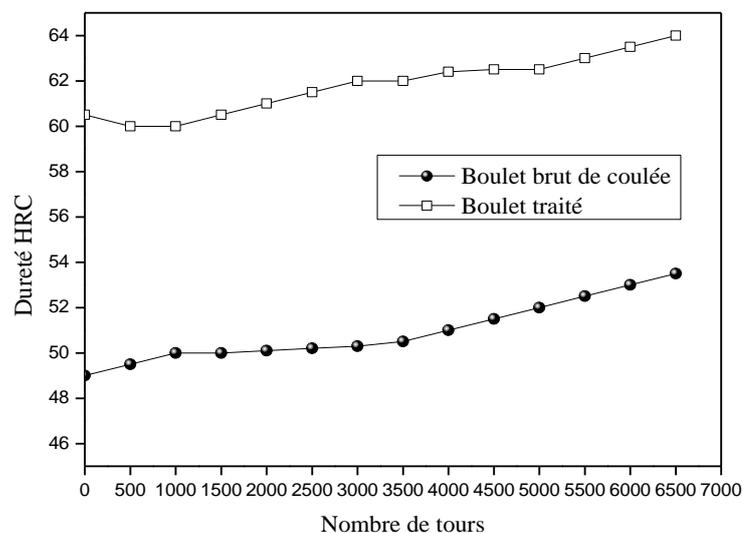


Figure III.9. Évolution de la dureté HRC des boulets non traité et traité en fonction du nombre de tours

On remarque qu'une application correcte des traitements thermiques permet d'améliorer nettement la dureté des boulets donc, l'extension de leur utilisation dans des applications plus sévères et pour lesquelles les boulets bruts de coulée ne sont pas satisfaisants. Le boulet traité a une dureté plus élevée que celle du boulet brut de coulée.

Une légère augmentation est remarquée dans les duretés superficielles des boulets en fonction du nombre de tours, à cause du durcissement par écrouissage que subissent les boulets pendant leur travail à l'intérieur du tambour.

III.5.2. Mesure de la perte de masse en %

La perte de masse exprimée en % est donnée par l'expression :

$$m = (m_1 - m_2) / m_1 \times 100$$

Avec m_1 est la masse initiale et m_2 est la masse après chaque nombre de tours n des boulets passés dans le tambour.

Les résultats de la perte de masse en % en fonction du nombre de tours sont regroupés dans le tableau III.7.

	Boulet brut de coulée	Boulet traité
Nombre de tours	Perte de masse en %	Perte de masse en %
0	0	0
500	0,075732631	0,07503954
1000	0,121830754	0,108518719
1500	0,155855559	0,132762263
2000	0,18109977	0,147770171
2500	0,203051257	0,16046917
3000	0,221710021	0,167395897
3500	0,240368785	0,174322624
4000	0,254637252	0,185867168
4500	0,26671057	0,189330532
5000	0,283174185	0,197411713
5500	0,290857206	0,20433844
6000	0,301832949	0,207801803
6500	0,312808693	0,213574076

Tableau III.7. Perte de masse en % des boulets brut de coulée et traité thermiquement

La figure III.10 présente la perte de masse en % en fonction du nombre de tours (tableau III.7) des boulets de diamètre 60 mm à l'état brut de coulée et après traitements thermiques.

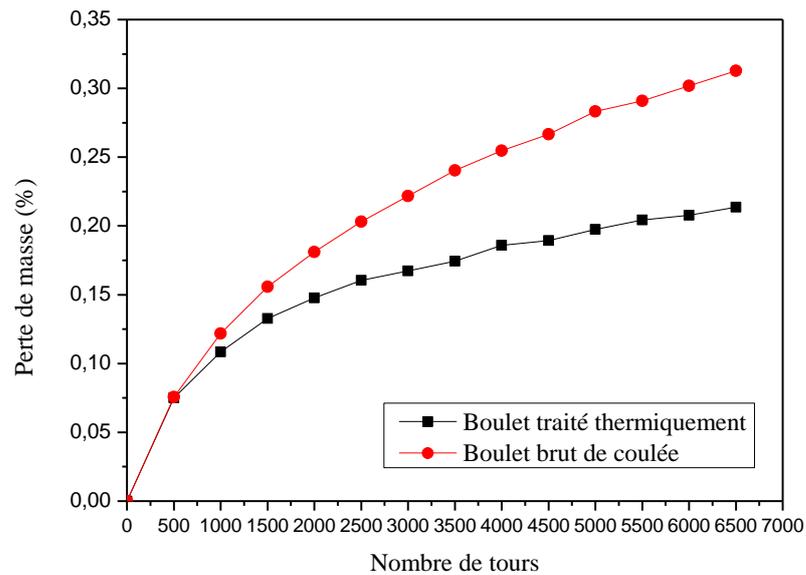


Figure III.10. Évolution de la perte de masse en % des boulets non traité et traité en fonction du nombre de tours

À l'état brut de coulée, l'usure des boulets est assez bonne, mais elle est nettement améliorée après traitements thermiques. Les carbures et la matrice martensitique obtenue après traitements thermiques donne une bien meilleure résistance à l'usure que la matrice austénitique obtenue à l'état brut de coulée.

III.5.3. Relation entre l'usure et la dureté

La relation entre la dureté HRC et la perte de masse cumulative en % des boulets de diamètre 50 mm, est illustrée à la figure III.11 pour le boulet brut coulée. Celle du boulet traité thermiquement est illustrée à la figure III.12.

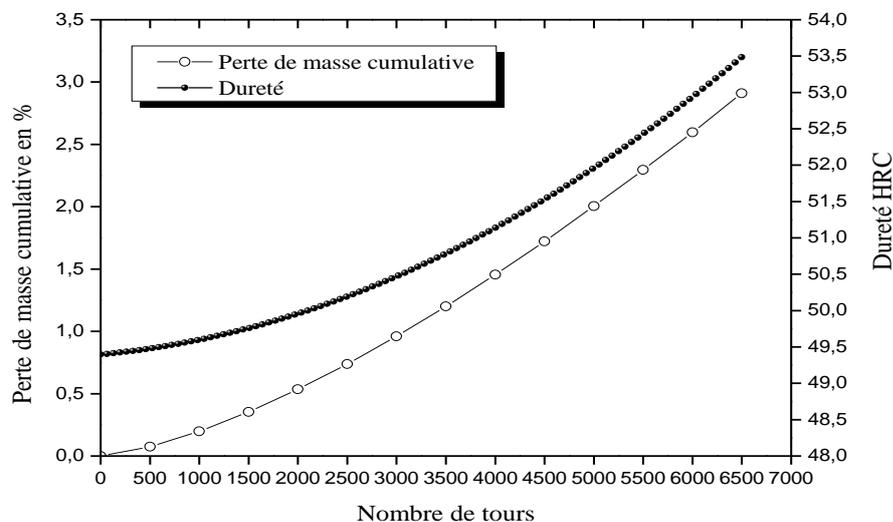


Figure III.11. Relation entre la perte de masse cumulative et la dureté du boulet non traité

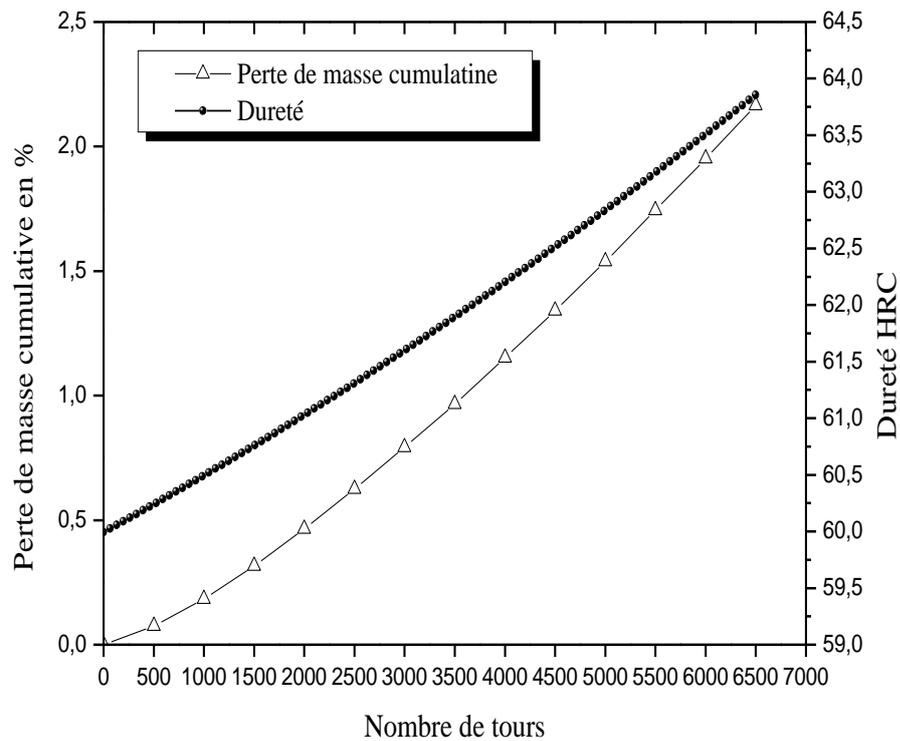


Figure III.12. Relation entre la perte de masse cumulative et la dureté du boulet traité

Il ressort de ces figures que le taux d'usure et la dureté superficielle des boulets augmente d'une manière progressive.

Il est à remarquer que la perte de masse dans les boulets est réduite à cause des duretés superficielles remarquables prélevées. C'est-à-dire, la résistance à l'usure s'améliore lorsque la dureté augmente et un matériau de grande dureté résiste mieux à l'usure avec moins de risque de se gripper en présence de particules abrasives car elle s'oppose à leur pénétration dans sa couche superficielle. La variation de la dureté superficielle du boulet traité ayant une matrice martensitique est très faible par rapport à celle du boulet non traité avec une matrice austénitique.

III.5.4. Aspect des dégâts sur les boulets

Le mécanisme d'usure par abrasion est très fréquent et très sévère dans les boulets. Ils subissent une usure abrasive, à cause des produits abrasifs présents tels que : le granulat, et ces fragments qui sont situés entre les boulets et le blindage de la machine Los Angeles et entre les boulets eux-mêmes. Cette usure se caractérise par un arrachement du matériau, comme le montre la figure III.13.



Figure III.13. Usure abrasive des boulets à la fin des essais

Une technique simple de mesure de l'usure nous a permis d'évaluer la quantité de matière enlevée des boulets. Ils sont pesés avant et après le test de frottement au moyen d'une balance de précision. Le test de frottement était réalisé en utilisant la machine Los Angeles choisi comme une autre alternative pour simuler les conditions d'abrasion sévères rencontrées dans les broyeurs à boulets industriels.

À l'issue de ces essais, nous confirmons que les traitements thermiques sont très bénéfiques pour augmenter la dureté et la résistance à l'usure des boulets. Ce résultat est obtenu suite à la présence d'une matrice martensitique et de carbures durs dans la structure du boulet traité.

Conclusion générale

Le boulet de broyage est fabriqué par l'Algérienne des Fonderies de Tiaret (ALFET – Tiaret). Il est utilisé par les cimenteries Algériennes pour transformer la roche en fines utilisées pour la fabrication du ciment.

Le boulet subit des usures très fréquentes ; cette usure survient sous différentes formes (usures par abrasion et par impact) ayant un impact sur la durée de vie du produit. L'usure des boulets de broyage dépend à la fois du taux de remplissage, du diamètre et de la vitesse de rotation du broyeur, du PH, du poids de charge des boulets et du temps de broyage, etc. Elle peut être causée par l'application incorrecte des traitements thermiques, par des défauts internes attribuables aux sables de moulage et par d'autres facteurs.

L'essai Los Angeles consiste à placer un échantillon de granulats selon la norme NF P 18-573 dans une machine rotative contenant des boulets en acier formant la charge abrasive formée de 11 boulets (9 + nos deux boulets). Cet essai est utilisé dans cette étude pour estimer la perte de masse des boulets bruts de coulée et traités de diamètre 60 mm.

La machine tourne pendant 500, 1000, ... et 6500 tours. La perte de masse est estimée par pesée après chaque 500 tours au moyen d'une balance électronique, et la dureté HRC est mesurée au moyen d'un duromètre HP250.

Les résultats obtenus dans le présent travail indiquent que l'action des traitements thermiques nous a permis d'obtenir une dureté et une résistance à l'abrasion plus élevée. Ces propriétés diminuent avec l'augmentation du nombre de tours.

Aussi, une matrice de martensite, obtenue après traitements thermiques, a montré la meilleure résistance à l'usure des boulets qu'une matrice austénitique obtenue après coulée. L'usure prélevée sur les boulets étudiés est caractérisée par un arrachement du matériau.

Aucune corrélation générale n'existe entre la dureté et la résistance à l'abrasion des boulets de broyage. Cependant, d'une manière générale, la résistance à l'usure s'améliore lorsque la dureté augmente, et une fonte de grande dureté résiste mieux à l'usure avec un moindre risque de se gripper en présence de particules abrasives car elle s'oppose à leur pénétration dans sa couche superficielle.

**LISTE DES RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES**

Liste des références bibliographiques

- [1] **P. BLAZY et E-A. JDID**, Fragmentation-Technologie, Techniques de l'Ingénieur, A5060-1, A5060-23, 1989.
- [2] Manuel des fontes moulées, traduit et adapté d'IRON CASTINGS HANDBOOK par le centre d'information des fontes moulées, 1983.
- [3] **J-C. MARGERIE**, Traitements thermiques des fontes, Techniques de l'Ingénieur, traité de Métallurgie, M 1145-20; M 1145-24, 1994.
- [4] **J-D. GATES, M-S. DARGUSCH, J-J. WALSH, S-L. FIELD, M-J-P. HERMAND, B-G. DELAUP & J-R. SAAD**, Effect of abrasive mineral on alloy performance in the ball mill abrasion test, *Wear*, 265, 865-871, 2008.
- [5] **J. ASENSIO, J-A. PERO-SANZ & J-I. VERDEJA**, Microstructure selection criteria for cast irons with more than 10 wt.% chromium for wear applications, *Materials Characterization*, 49, 83-93, 2003.
- [6] **S. AISSAT & al.**, Effect of heat treatment on the hardness and wear of grinding balls, *Metal Science and Heat Treatment*, 59, 297-301, 2017.
- [7] **E. ZDRAVECKÁ, J. TKÁČOVÁ & M. ONDÁČ**, Effect of microstructure factors on abrasion resistance of high-strength steels, *Research Agricultural Engineering*, 60, 115–120, 2014.
- [8] **A. AZIZI**, Investigating the controllable factors influencing the weight loss of grinding ball using SEM/EDX analysis and RSM model, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18, 278–285, 2015.
- [9] <https://trid.trb.org/view/1057153>
- [10] **B. EL HABCHI et A. LAMRISS**, Optimisation de la consommation électrique de l'atelier broyage BK4, Facultés des Sciences et Techniques de Fès, Département de Génie Industriel, 17 Juin 2015.
- [11] <https://www.slideshare.net/soufiane0806/les-tapes-de-la-fabrication-du-ciment-soufiane-merabti>
- [12] **M. RAHMANI**, Contribution à l'amélioration de l'efficacité énergétique de l'atelier de broyage BK1, MFE, Master Sciences et Techniques, 2015.
- [13] **L-F. OROZCO**, Modélisation numérique et rhéologie des milieux granulaires à particules fragmentables en vue d'application aux broyeurs à boulets, Thèse de Doctorat, Université de Montpellier, 18/11/2019.

- [14] **M-A. MELLOUK et M-A. AOUALI**, Le broyeur, Mémoire de Master, Université Saad Dahlab de Blida.
- [15] <http://www.thecementgrindingoffice.com/fr/millsinternals.html>,
"Équipements internes des broyeurs à boulets", The Cement Grinding Office, 2012-2014.
- [16] <https://www.youtube.com/watch?v=gEWynTtguPo>.
- [17] <http://hmsteelball.fr/profile/grinding-media-abrasion-mechanism.html/142843/0>,
"Mécanisme d'abrasion des corps broyants".
- [18] <https://www.fsantabarbara.com/fr/processus-de-production>.
- [19] **M. PAPADAKIS et M. VENUAT**, Industrie de la chaux du ciment et du plâtre, 1970.
- [21] **M. GRENIER**, Microstructure et résistance à l'usure de revêtements créés par fusion laser avec gaz réactifs sur du titane, Université Laval, Octobre 1998.
- [20] **S. AISSAT**, Amélioration des caractéristiques mécaniques du boulet de broyage, Mémoire de Magister, Centre Universitaire de Chlef, 2000.
- [22] **O. BARRAU**, Etude du frottement et de l'usure d'aciers à outils de travail à chaud, Thèse de Doctorat, 2004.
- [23] **M. LABIDI**, Etude du comportement en frottement et usure des matériaux céramiques Al_2O_3 et ZrO_2 , Université de Badji Mokhtar d'Annaba, 2008.
- [24] **WELDING ALLOYS GROUP**, Les fondamentaux du rechargement dur par fusion.
- [25] **M. DJAFRI**, Etude numérique et expérimentale du comportement tribologique des contacts glissants - Application aux freins à disques, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2014-2015.
- [26] **S. MEZLINI**, Etude de l'usure par abrasion d'alliages d'aluminium, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 25 septembre 2003.
- [27] **M. ZAID**, Caractérisation de l'usure des boulets de broyage, Mémoire d'Ingénieur, Université Ibn Khaldoun – Tiaret, 2005.
- [28] **N. BRUNETIERE**, Introduction à la tribologie, Institut Pprime Futuroscope, 2016.
- [29] **A. KEHAL**, Elaboration de fontes blanche à haute teneur en chrome et étude de leur résistance à l'usure, Mémoire de Magister, Université de Saad Dahlab de Blida, juin 2008.
- [30] **N. MAOUI**, Caractéristiques géotechniques et hydrogéologiques des grès du miocène (langhien-serravalien) du bassin de Tizi-Ouzou, Mémoire de Master, 2016.
- [31] **K. ARAB et H. BOUZIANE**, Caractérisation géotechnique des granulats de la région de Sétif en vue de leur utilisation comme matériau de ballast, Mémoire d'Ingénieur, 2009.
- [32] <http://beratest.com/catalog/francais/pdf/0018.pdf>.

ملخص — يتم تصنيع كرات الطحن في الجزائرية للمسابك بتيارت (ALFET - Tiaret). تستعمل هذه الكرات من قبل مصانع الإسمنت الجزائرية حيث تحول الصخور لاستخدامها في صناعة الإسمنت. هذه الكرة تخضع للتآكل المتكرر وفي أشكال مختلفة (تآكل بالكشط وتآكل ناتج عن الصدمات)، ولكل منها تأثير على عمر هذا المنتج. التآكل الناجم عن الكشط هو نتيجة الاحتكاك بين الأسطح المختلفة (الصخور، درع الكسارة، والكرات فيما بينها) التي يحدث بينها اتصال انزلاقي مما يؤدي إلى تمزق المعدن وتفككه ميكانيكياً. كما ينشأ تآكل الصدمات بين هاتاه الأسطح، والكرة التي تضرب من عدة زوايا تتسبب في تفككها. يُقدَّر التآكل، في هذا العمل، بفقد كتلة الكرات المصبوبة والمعالجة بالحرارة باستخدام اختبار لوس أنجلوس القياسي. تظهر النتائج التجريبية أن مقاومة التآكل حسنة للكرات المصبوبة، ولكن تم تحسينها بشكل ملحوظ بعد المعالجات الحرارية.

الكلمات المفتاحية — التآكل بالكشط، تآكل الصدمات، التفكك الميكانيكي، كرة الطحن، فقدان الكتلة، لوس أنجلوس.

Résumé — Le boulet de broyage est fabriqué par l'Algérienne des Fonderies de Tiaret (ALFET – Tiaret). Il est utilisé par les cimenteries Algériennes pour transformer la roche en fines utilisées pour la fabrication du ciment.

Le boulet subit des usures très fréquentes ; cette usure survient sous différentes formes (usures par abrasion et par impact) ayant chacune un impact sur la durée de vie de ce produit.

L'usure par abrasion est le résultat de la friction entre les différentes surfaces (roche, blindage du broyeur et boulets entre eux-mêmes) ; entre ces dernières, se produit un contact de glissement qui provoque un arrachement du métal et une désintégration mécanique. Aussi, l'usure par impact est le résultat du choc entre ces surfaces, et le boulet qui les heurte sous plusieurs angles provoque leur désintégration.

L'usure est estimée, dans ce travail, par la perte de masse des boulets bruts de coulée et traités thermiquement en utilisant l'essai normalisé Los Angeles.

Les résultats expérimentaux montrent que la résistance à l'usure est assez bonne pour les boulets bruts de coulée, mais elle est nettement améliorée après traitements thermiques.

Mots clés — Usure par abrasion, usure par impact, désintégration mécanique, boulet de broyage, perte de masse, Los Angeles.

Abstract — The grinding ball is manufactured by the Algerian Foundries of Tiaret (ALFET - Tiaret). It is used by the cement industry to transform the rock into fine used in the cement manufacturing.

The ball undergoes very frequent wear; this wear occurs in various forms (abrasion and impact wears) and each having an impact on this product life.

Abrasion wear is the result of friction between many surfaces (rock, crusher shielding and balls between them); between these, a sliding contact occurs and causes a metal wrenching and mechanical disintegration. In addition, the impact wear is the result of the shock between these surfaces, and the ball, that hits them from multiple angles, causes their disintegration.

Wear is estimated, in this work, by the mass loss of cast balls and heat-treated by using the Los Angeles standardized test.

The experimental results show that the wear resistance is quite good for the cast balls, but it is significantly improved after heat treatments.

Keywords — Abrasion wear, impact wear, mechanical disintegration, grinding ball, mass loss, Los Angeles.