



UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

## PROJET DE FIN D'ÉTUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master en Génie Mécanique

Option : Ingénierie des Matériaux et surfaces (IMS)

Thème :

**Analyse d'usure d'un marteau du concasseur  
De cru KHD 3000\*3000**

**Promoteur :**  
Mr. A. Abderrahmane

**Réalisé par :**  
Larbi Younes  
Baouni Mustapha

---

## **REMERCIEMENTS**

*Tout d'abord nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience de mener à bien notre travail de PFE de Master. Nous remercions nos familles, à qui leur revient le mérite de nous avoir éduqué, encouragé et soutenu.*

*Nous tenons à remercier notre Promoteur Mr Abderrahmane d'avoir bien voulu nous proposer le sujet et ensuite encadré notre travail en nous apportant l'orientation et l'aide nécessaire.*

*Aussi bien nous remercions Mr Mansour pour son encouragement et ses aides.*

*Egalement, nos remerciements sont adressés aux membres de jury qui en tant que rapporteurs, ont eu la patience de lire notre travail.*

*Je n'oublie pas de remercier tous les enseignants de notre département de Génie mécanique, en particulier ceux de la spécialité science des matériaux, pour m'avoir offert un agréable de formation Grand Merci.*

*Enfin, mes remerciements vont à tous ceux qui d'une manière ou d'une autre a contribué à l'élaboration de ce travail.*

*Enfin, merci à nos familles et nos amis sans oublier les étudiants de notre promotion pour leurs encouragements et leur soutien durant ces longues années.*

*Nous souhaitons également remercier tous nos collègues de la promotion IMS 2023, pour nous avoir encouragés à accomplir ce travail.*

## Résume :

La concurrence en production ciment oblige La société SCMI de Meftah à investir dans la recherche scientifique pour augmenter le taux de production avec minimisation des couts de maintenance et le temps d'arrêts, pour cela nous avons essayé d'étudier le phénomène d'usure des marteaux de concasseur KHD PHM 3000\*3000, pour le but d'augmenter leurs résistances à l'usure, et allongé leurs durées de vie.

**Mots-clés :** Usure, concassage, aciers, dureté, concasseur.

## ملخص:

المنافسة في إنتاج الأسمنت تجبر شركة SCMI في مفتاح على الاستثمار في البحث العلمي لزيادة معدل الإنتاج مع تقليل تكاليف الصيانة ووقت التوقف عن العمل، لذلك حاولنا دراسة ظاهرة تآكل مطارق الكسارة KHD PHM 3000 \* 3000، لغرض زيادة مقاومتها للاهتراء، وإطالة عمرها.

**الكلمات المفتاحية:** التآكل، التكسير، الفولاذ، الصلابة، الكسارة.

## Abstract:

Competition in cement production obliges the SCMI company of Meftah to invest in scientific research to increase the rate of production with minimization of maintenance costs and downtime, for this we have tried to study the phenomenon of wear of the KHD PHM 3000\*3000 crusher hammers, for the purpose of increasing their resistance to wear, and extending their lifespan.

**Keywords:** Wear, crushing, steels, hardness, crusher.

# Table des matières

Résume :.....	3
Introduction générale .....	1
CHAPITRE I.....	2
I.1. Introduction.....	2
I.2. Présentation générale.....	2
I.3. Localisation .....	3
I.4. Historique.....	3
I.5. Organigramme de la cimenterie de Meftah.....	4
I.6. Procédé de fabrication du ciment.....	4
I.6. Constituants.....	4
I.7. Présentation des différentes étapes de fabrication du ciment .....	5
I.8. L'extraction de la matière première .....	5
I.9. La préparation du cru.....	6
1.10. Le concassage.....	7
1.11. Le broyage du cru :.....	7
I.12. Stockage du ciment .....	7
I.13. Expédition .....	8
Chapitre II : Généralités sur les procédés et les équipements de concassage.....	9
Introduction.....	9
II.1. Définition du concassage.....	9
II.2. Procédé de concassage.....	10
II.3. Les différents types de concasseur.....	11
II.4.1.Appareils opérant par écrasement (compression) .....	13
II.4.2.Appareils opérant par choc.....	19
II.4.2.3. Concasseurs à percussion à axe vertical.....	21
II.4.2.4. Commentaires généraux sur les machines opérant par percussion .....	23
II.4.2.5 Concasseurs primaires mobiles : .....	23
II.5. Critères de choix d'un appareil ou d'une chaîne d'appareils.....	24
II.5.2. Eléments du choix du concasseur primaire.....	24
Chapitre III.....	26
Introduction.....	26
III.1. L'usure.....	26
III.1.1. Définition.....	26
III.2. Les mécanismes d'usure.....	27
III.3. Rechargement dur (Hardfacing) .....	30
III.3.1. Définition.....	30
III.3.2. Termes relatifs au rechargement dur :.....	31

III.3.3.	Les procédés de rechargement dur.....	31
III.3.3.2.	Projection thermique .....	33
III.4.	Aciers fortement allié au manganèse.....	34
III.5.	Conclusion .....	36
Chapitre IV : Étude expérimentale.....		37
IV.2.	Description du concasseur à marteau KHD de cru :.....	37
IV.2.1.	Les différents composants du concasseur.....	38
IV.2.2.	Etude technologique du concasseur à marteaux :.....	39
IV.3.	Les marteaux de Concasseur KHD type PHM 3000*3000 .....	41
IV.3.1.	Définition .....	41
IV.3.2.	Fiche technique du marteau :.....	42
IV.3.3.	Réparation des marteaux usés :.....	43
IV.4.	Evaluation de l'usure des marteaux du concasseur :.....	44
IV.5.	Réalisation des rechargements durs.....	46
IV.5.1.	Prélèvement des échantillons :.....	46
IV.5.2.	Préparation des surfaces .....	46
IV.5.3.	Dépôt dur par projection thermique à flamme .....	47
IV.5.4.	Rechargement par soudure.....	49
IV.6.	Techniques de caractérisation microstructurale et mécanique .....	50
IV.6.1.	Usinage :.....	50
IV.6.2.	Préparation métallographique :.....	50
Chapitre V Résultats et interprétations .....		53
Introduction.....		53
V.1.	Observation macrographique.....	53
V.2.	Observations microstructurales.....	54
V.2.1.	Rechargement dur par soudage .....	54
V.2.2.	Échantillon rechargé par projection thermique .....	57
V.3.	Caractérisation mécanique .....	58
V.3.1.	Essai de microdureté .....	58
V.3.2.	Essai de dureté Vickers Hv20 :.....	60
V.4.	Analyse des résultats d'usure du marteau.....	60
Conclusion générale .....		62
Références bibliographiques.....		63

## *Liste des figures*

Figure I-1 : vue de la cimenterie de Meftah SCMI.....	2
Figure I-2 localisation de la cimenterie de Meftah.....	3
Figure I-3 : quantité de production de ciment.....	3
Figure I-4 Organigramme de la cimenterie de Meftah.....	4
Figure I-5 Composants du ciment.....	5
Figure I-6 : Extractio de la matière première.....	6
Figure I-7 : : Pré-homogénéisation du mélange calcaire-argile.....	6
Figure I-8 : broyeur cru.....	7
Figure I-9 Ensachage et expédition.....	8
Figure I-10 : Schéma du processus de fabrication du ciment.....	8
Figure II-1 Concassage et transport de la matière première.....	10
Figure II-2 : Concasseur à mâchoires [4].....	13
Figure II-3 : Concasseur à mâchoire à simple effet. [5].....	14
Figure II-4 : Concasseur à mâchoire à double effet. [5].....	14
Figure II-5 : Concasseur giratoire primaire à tête guidée et portée [5].....	16
Figure II-6 : Les concasseurs giratoires secondaires [5].....	17
Figure II-7 : Concasseurs à rotors dentés [7].....	18
Figure II-8 : Concasseur MMD série 500. [8].....	19
Figure II-9 : Principe d'un concasseur à percuteurs rigides. [5].....	20
Figure II-10: Concasseur à percussion à axe vertical.....	22
Figure II-11 : Concasseur situé au niveau de la carrière [9].....	23
Figure III-1 : Endommagement de surface d'un corps frottant.....	27
Figure III-2 : Usure abrasive à trois corps.....	28
Figure III-3 : phénomène élémentaire de l'usure adhésive.....	28
Figure III-4 : usure par fatigue superficielle.....	29
Figure III-5 : Usure par érosion [16].....	29
Figure III-6 : Rechargement dur [21].....	30
Figure III-7 : Photo real d'un soudage SMAW.....	32
Figure III-8 : Diagramme d'équilibre FE-C 13% de Mn.....	35
Figure IV-1 : Photo réel du concasseur De cru KHD, PHM 3000*3000.....	37
Figure IV-2 : Rotor doté de marteaux.....	38
Figure IV-3 : Mode de fonctionnement d'un concasseur à marteau.....	40
Figure IV-4 : Chaîne cinématique du concasseur à marteaux.....	41
Figure IV-5 : Dessin technique d'un marteau.....	42
Figure IV-6 : Plan technique des marteaux.....	42
Figure IV-7 : Dessin technique définissant les zones rechargées.....	43
Figure IV-8 :Technique d'évaluation de l'usure du marteau.....	45
Figure IV-9 : Coupage oxyacétylénique des échantillons.....	46
Figure IV-10 : Machines de fraisages.....	47
Figure IV-11 : Forme d'échantillon obtenu après fraisage.....	47
Figure IV-12 : Surface de pièce après sablage.....	48
Figure IV-12 : Grenailleuse.....	48
Figure IV-13 : Pistolet a flamme-poudre " kit Eutalloy.....	48
Figure IV-14 : Photo d'échantillon après projection thermiqueet refusion.....	49
Figure IV-15 : Pièce après soudage.....	50
Figure IV-15 : Procédé de rechargement par soudage SMAW.....	50
Figure IV-16 : Polisseuse.....	51
Figure IV-17 : Attaque chimique.....	51
Figure IV-18 : Microscope optique utilisé.....	52

Figure IV-19 : Equipements de caractérisation mécanique .....	52
Figure V-1 : Macrographie de l'échantillon rechargé par soudage.....	53
Figure V-2 : Micrographie optique du métal de base .....	54
Figure V-3 : Microstructure de la ZAT .....	55
Figure V-4 : Zones de liaison .....	55
Figure V-5 : Microscopie optique du revêtement déposé par soudage avec .....	56
Figure V-6 : Microstructure du revêtement projeté thermiquement.....	57
Figure V-7 : Courbe de microdureté Vickers Rechargement par soudage.....	58
Figure V-8 : Micrographies illustrant quelques indentations .....	59
Figure V-9 : : Courbe de microdureté Vickers Revêtement projeté thermiquement .....	59
Figure V-10 :Photo real des marteaux du concasseur à l'état usé .....	61

## *Liste des Tableaux*

Tableau II-1 :Les différents types des concasseurs selon leur fonctionnement .....	12
Tableau III-1 : Différents procédés de rechargement dur.....	33
Tableau III-2 :Composition chimique de l'acier Hadfield.....	35
Tableau IV-1: Caractéristiques générale .....	39
Tableau IV-2 : Caractéristiques de référence, la machine et moteur.....	39
Tableau IV-3 : Le composants de la chaine cinématique.....	41
Tableau IV-4 : Composition et caractéristiques du matériau de base .....	43
Tableau IV-5 : Composition du métal d'apport AWS E7018.1 .....	44
Tableau IV-6 : Caractéristique mécanique du métal d'apport AWS E7018.1 .....	44
Tableau IV-7 : Composition chimique la poudre de projection.....	44
Tableau IV-8 : Specification du fabrication.....	45
Tableau IV-10 : Paramètres de projection .....	49
Tableau IV-11: Paramètre de rechargement pa soudage a l'arc SMAW .....	50
Tableau V- 1: Résultats des tests de dureté Vickers Hv20.....	56
Tableau V-2 : Résultats de mesure de A et C après 3 mois de d'utilisation.....	51

## Introduction générale

L'industrie cimentière est l'un des piliers fondamentaux du secteur de la construction, fournissant les matériaux essentiels nécessaires à la réalisation d'infrastructures durables et de bâtiments. Au cœur de ce processus de fabrication du ciment se trouve un élément crucial : le concasseur à marteau.

Le concasseur à marteau joue un rôle crucial dans l'industrie cimentière en permettant la réduction et le contrôle de la granulométrie des matières premières. En garantissant un concassage efficace et précis, il contribue à la qualité du ciment produit et à l'efficacité globale du processus de fabrication. Cependant, au fil du temps et de l'utilisation continue, les marteaux du concasseur peuvent être soumis à une usure qui peut avoir un impact significatif sur les performances de concasseur et sa durabilité.

L'usure des marteaux du concasseur peut se manifester de différentes manières. Tout d'abord, les marteaux peuvent s'user et perdre leur forme originale, ce qui diminue leur efficacité à briser les matériaux. De plus, une usure excessive peut entraîner une augmentation des temps d'arrêt pour les réparations et les remplacements, ce qui a un impact négatif sur la productivité de la cimenterie. De plus, l'usure accrue peut entraîner une augmentation des coûts de maintenance et d'exploitation, ce qui peut affecter la rentabilité globale de l'entreprise.

C'est dans ce cadre nous avons entrepris une étude approfondie sur l'usure des marteaux de concasseur utilisés dans les cimenteries. Notre objectif principal est de comprendre l'usure de ces marteaux et de mettre en place des techniques de rechargement dur pour prolonger leur durée de vie. Pour atteindre cet objectif, nous avons exploré deux techniques de rechargement : le rechargement par soudage et le rechargement par projection thermique.

Le présent mémoire est organisé en cinq chapitres :

Après une introduction générale, le chapitre I est consacré à la présentation de l'entreprise d'accueil ainsi que des généralités sur les procédures de fabrication du ciment.

Des généralités sur les procédés et les équipements de concassage sont présentés dans le chapitre II.

Le chapitre III présente une bibliographie sur les aciers fortement alliés au manganèse, usure des surfaces et les rechargements.

Le Chapitre IV est réservé à la méthodologie et aux les techniques expérimentales utilisées.

Les résultats obtenus sont présentés et interprétés au chapitre V.

Ce travail sera bien sûr clôturé par une conclusion générale.

## CHAPITRE I

### Présentation de l'entreprise d'accueil

#### I.1. Introduction

Le présent chapitre donne une vision globale sur l'entreprise SCMI de la cimenterie de Meftah. On présentera dans la première partie l'entreprise et son organisation actuelle. Dans la deuxième partie, on présentera le processus de la fabrication du ciment.

#### I.2. Présentation générale

La SCMI est une entreprise algérienne filiale du groupe GICA, spécialisée dans la fabrication de ciment. Le réseau national de la SCMI lui permet de fournir ses produits sur tout le territoire. Son procédé de fabrication spécifique procure à son ciment une excellente qualité respectant les normes internationales de fiabilité et de respect de l'environnement. La culture de SCMI repose sur les valeurs fondamentales de respect, de confiance, de responsabilité et d'autonomie. L'usine possède une seule ligne de production, procédé de fabrication est une voie sèche.



Figure.I.1. Vue globale de la cimenterie de Meftah SCMI.

- Raison Sociale : Société des Ciments de la Mitidja par Abréviation S.C.M.I.
- Activités : production et commercialisation des ciments ordinaires, spéciaux et tous autres matériaux de construction.
- Forme Juridique : Société Par Actions (S.P.A.).
- Capital Social : 1 400 000 000DA, détenu à 65% par le Groupe Industriel des Ciments d'Algérie (G.I.C.A.) et à 35% par le Groupe LAFARGE Financière.
- Effective au 30 juin 2013 : 502 employés

### I.3. Localisation

La cimenterie de Meftah SCMI est localisée au nord-est de chef-lieu de la wilaya de Blida à environ 41 Km. La superficie de l'usine est de 356 811m<sup>2</sup>, dont 72 708 M<sup>2</sup> Bâté.



Figure I.2 : localisation de la cimenterie de Meftah.

### I.4. Historique

La cimenterie est implantée dans la commune de MEFTAH, daïra de MEFTAH, Wilaya de Blida. L'usine est située à 60 m au-dessous du niveau de la mer, la carrière à 150 m. Le projet s'est inscrit dans le cadre du plan quadriennal 1970-1973, il a été individualisé par décision n° 71-20 DI du 10 mars 1971, la formule de réalisation retenue est celle du lot par lot, par l'ingénieur conseil canadien SURVEYER NENNINGER et CHENEVERT (S.N.C).

Dates importantes :

- 31 janvier 1975 : démarrage de l'atelier cru.
- 06 mai 1975 : allumage du four.
- 01 septembre 1975 : production de ciment.
- Commercialisation du ciment : 06 novembre 1975

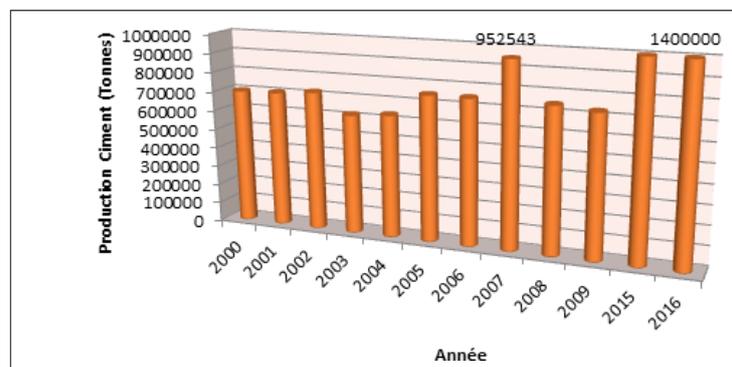


Figure. I. 3 : quantité de production de ciment

## I.5. Organigramme de la cimenterie de Meftah

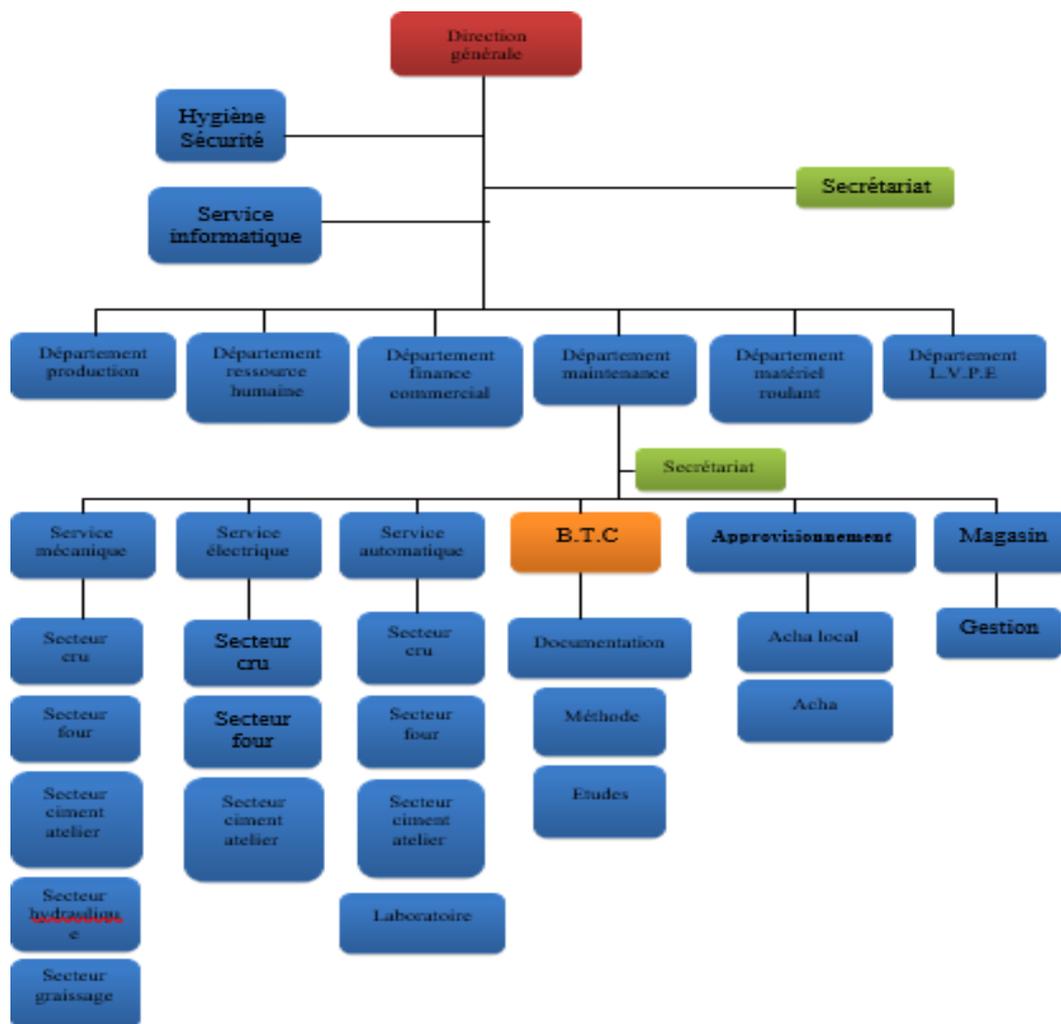


Figure I.4 : Organigramme de la cimenterie de Meftah.

## I.6. Procédé de fabrication du ciment

Le ciment est un liant hydraulique constitué d'une poudre minérale, d'aspect grisâtre, obtenue par broyage et cuisson à 1450 °C d'un mélange de calcaire et d'argile. Le produit de la cuisson, appelé clinker, forme une combinaison de chaux, de silice, d'alumine et d'oxyde ferrique. Le ciment résulte du broyage de clinker et de sulfate de calcium ajouté généralement sous forme de gypse. Il forme avec l'eau une pâte plastique faisant prise et durcissant progressivement, même à l'abri de l'air, notamment sous l'eau.

## I.6. Constituants

De la roche naturelle (calcaire + argile) à la pierre de l'homme (ciment), la transformation est très complexe et nécessite un savoir-faire, une maîtrise des outils et des techniques très performantes pour exécuter correctement la série d'opérations exigée par le processus de fabrication.

Le composé de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison selon des dosages préétablis de la chaux (65% CaO) avec la silice (20% SiO<sub>2</sub>), l'alumine (10% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et l'oxyde de fer (5% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par les argiles. Les matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile (figure 1.5) et contiennent en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier le Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> l'oxyde ferrique.



Figure I.5 : Composants du ciment.

## I.7. Présentation des différentes étapes de fabrication du ciment

- Concassage.
- Préparation du cru
- Broyage de cru homogénéisation.
- Préchauffage.
- Cuisson.
- Refroidissement.
- Stockage de clinker.
- Broyage du clinker.
- Stockage du ciment.
- Expédition

Notre travail se limite à la partie concassage.

## I.8. L'extraction de la matière première

L'extraction consiste à extraire du calcaire et de l'argile à partir de la carrière. Ces matières premières sont extraites des parois rocheuses par de l'explosif ou à la pelle mécanique. La roche est acheminée par des dumpers ou des bandes transporteuses vers un atelier de concassage. Les matières premières doivent être échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition régulière dans le temps.



Figure.I.6 : Extraction de la matière première.

## I.9. La préparation du cru

On utilise deux constituants en général pour la préparation du cru qui sont le calcaire, et l'argile. Après le concassage de ces deux constituants de base on obtient une granulométrie de 1 à 25 mm, une prise d'échantillon sera réalisée pour effectuer les analyses afin de déterminer la composition. Les constituants sont acheminés vers l'usine par des transporteurs couverts puis, ce mélange est stocké dans un hall de pré homogénéisation. Le stockeur forme deux tas l'un en constitution, l'autre en reprise. Une seconde correction est prévue juste avant le broyage cru. Cette correction se fait pour ajouter du calcaire, du minerai de fer et du sable. Après correction du cru, le mélange est acheminé à l'aide de transporteurs vers un concasseur sécheur qui réduira la granulométrie de 1 à 7 mm.

- **Hall calcaire** : Le gratteur portique (à palette) sert à gratter le calcaire et se déplace en translation de tas en tas et jettent la matière sur le tapis pour le transporter à la trémie calcaire.
- **Hall ajout** : Nous avons deux gratteurs semi-portique (à palette) qui servent à gratter les ajouts (argile, sable, fer).

Il déverse les produits sur les bandes transporteuses jusqu'aux trémies. Il existe quatre (04) trémies (calcaire, fer, argile, sable). Le dosage des différents constituants du ciment est comme suit : Calcaire 80%, Argile 17%, Sable 2% et le Fer est à 1%.



Figure.I.8 : Pré-homogénéisation du mélange calcaire-argile.

## 1.10. Le concassage

L'opération de concassage joue un rôle essentiel dans le domaine de la cimenterie en permettant la réduction de la taille des matières premières. Ce processus consiste à fragmenter les matériaux bruts tels que le calcaire, l'argile, le schiste ou les minerais avec un outil afin d'obtenir des particules de taille appropriée le broyage et pour la production de ciment de qualité.

## 1.11. Le broyage du cru :

Les matières premières pré-homogénéisées doivent être finement broyées pour être chimiquement plus réactive au cours de leur cuisson dans le four. Elles passent donc dans des doseurs alimentant un broyeur sécheur (il ne doit pas pratiquement subsister des particules de dimensions supérieures à 0.2 mm). La fonction du séchage est nécessaire car le broyage ne peut s'effectuer que dans la mesure où la matière ne s'agglomère pas sous l'effet conjugué de l'humidité et du compactage des produits par les outils de broyage.

En plus du séchage et de la fragmentation, le broyeur assure un mélange intime entre les différents minerais apportés par la matière première et les ajouts de correction en faibles proportions. A la fin du broyage, la matière est dirigée vers un séparateur qui sélectionne les particules selon leur grosseur.



Figure.I.9 : broyeur cru.

## I.12. Stockage du ciment

Le ciment est acheminé du broyeur jusqu'aux silos de stockage par le système de transport le plus courant qui combine le transport pneumatique et des transporteurs à vis sans fin ou à chaînes avec un élévateur à godet. Les différents types de ciment sont stockés dans des silos différents, mais il faut souvent plusieurs silos pour stocker un type donné de ciment. Cependant grâce aux nouvelles conceptions, il devient possible de stocker des ciments différents dans un même silo. Le ciment est stocké dans huit silos avec une capacité de 500T chacun, L'expédition du ciment se fait en sac ou en vrac.

### I.13. Expédition

**Expédition en sac :** Elle est réalisée par quatre ensacheuses avec un débit de 90 T/h. Chacune possède huit becs pour le remplissage des sacs. Les sacs de 50 kg sont chargés sur des camions à bennes.

**Expédition en vrac :** Le remplissage se fait par un flexible branché au fond d'une trémie et qui est dirigé par l'opérateur pour le mettre à l'intérieur de la bouche de cocotte des camions pour les remplir. La figure 20 résume la partie expédition.



Figure.I.10 : Ensachage et expédition.

On peut résumer toutes les étapes de la fabrication du ciment dans l'organigramme suivant

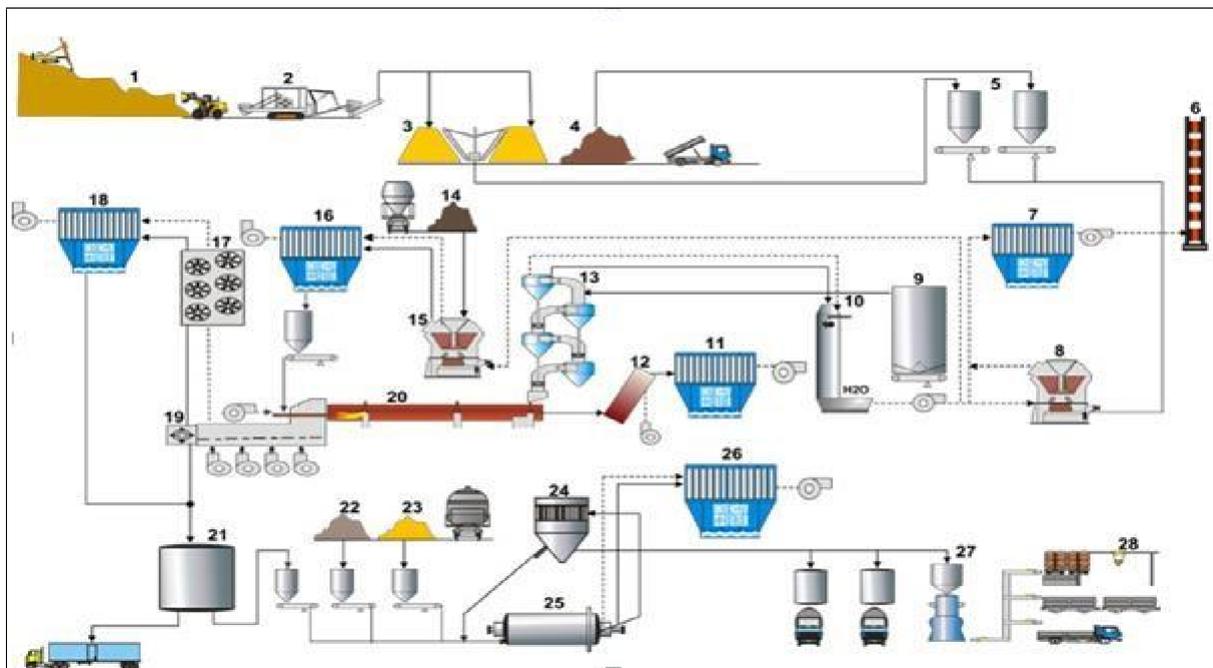


Figure.I.21 : Schéma du processus de fabrication du ciment.

## Chapitre II : Généralités sur les procédés et les équipements de concassage

### Introduction

Le concassage est une étape essentielle dans le processus de production de granulats pour la construction, les routes, les voies ferrées et autres applications similaires. Il consiste à réduire la taille des matériaux solides en morceaux plus petits en utilisant des équipements tels que des concasseurs à mâchoires, des concasseurs à cône, des concasseurs à percussion et des cribles. Cette opération permet de préparer les matériaux pour leur utilisation ultérieure dans diverses applications.

Ce chapitre se compose de deux parties. Dans la première partie, sont exposés les différents types de concasseurs et les critères de choix. La deuxième partie est consacrée à la présentation du concasseur à marteaux de cru de type KHD.

### II.1. Définition du concassage

Le concassage est une opération particulière parmi l'ensemble des opérations de fragmentation. Il débute à un stade précoce de la réduction dimensionnelle afin de faciliter la manutention, l'homogénéisation et le stockage des matériaux.

L'opération de concassage joue un rôle essentiel dans le domaine de la cimenterie en permettant la réduction de la taille des matières premières. Ce processus consiste à fragmenter les matériaux bruts tels que le calcaire, l'argile, le schiste ou les minerais avec un outil afin d'obtenir des particules de taille appropriée pour la production de ciment [1].

Le concassage se déroule généralement en plusieurs étapes, depuis l'extraction des matériaux des carrières jusqu'à leur fragmentation au moyen d'équipements spécialisés tels que des concasseurs à mâchoires, des concasseurs à percussion ou des broyeurs à cylindres (Figure II.0). L'objectif principal du concassage dans la production des ciments est d'obtenir des particules de taille homogène et bien définie, conformes aux spécifications requises pour la production de ciment de haute qualité.

De plus, le concassage prépare les matières premières pour la phase de cuisson, où elles sont chauffées à des températures élevées pour former le clinker, l'élément principal du ciment. Une fragmentation adéquate des matières premières garantit une cuisson efficace et homogène, ce qui contribue à la qualité du clinker et du ciment final.

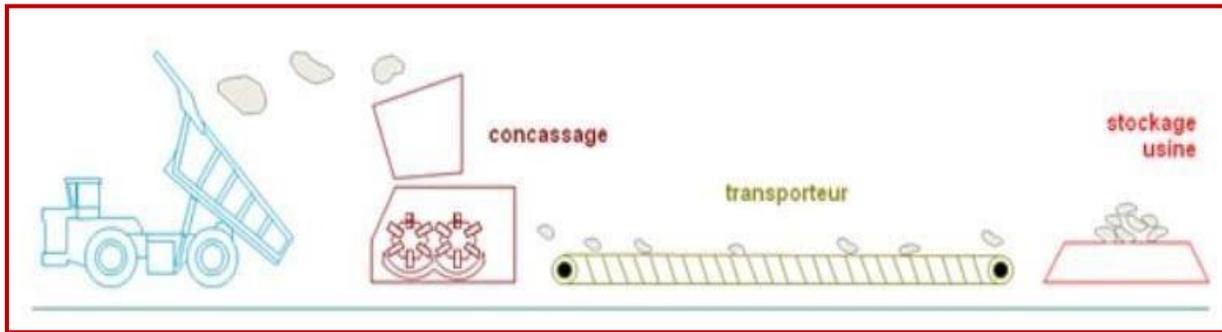


Figure II.0 : Concassage et transport de la matière première.

## II.2. Procédé de concassage

La taille des particules obtenues lors du concassage est déterminée en fonction des exigences spécifiques de production et des utilisations finales du ciment. Des particules de taille uniforme et contrôlée permettent une meilleure réactivité avec l'eau lors de l'hydratation ultérieure du ciment, favorisant ainsi une prise et un durcissement plus rapides. Dans le processus de concassage, la matière peut être concassée plusieurs fois. Le concassage pour la production de ciment comprend le concassage initial (de pierre), le concassage secondaire et le concassage tertiaire. Chaque étape vise à réduire la taille des matières premières concassées selon des critères spécifiques, afin d'obtenir un mélange de ciment de qualité avec des caractéristiques appropriées.

*Concassage primaire* : le concassage primaire vise à réduire la taille des matières premières extraites des carrières en morceaux plus petits, généralement jusqu'à 100 millimètres. Cela facilite la manutention et la préparation ultérieure des matières premières pour le processus de fabrication du ciment. Les équipements de concassage tels que les concasseurs à mâchoires et les concasseurs à percussion sont utilisés pour effectuer cette opération.

*Concassage secondaire* : le concassage secondaire consiste à réduire plus la taille des matières premières concassées jusqu'à une taille maximale de 25 millimètres. Cette étape permet d'obtenir des particules de taille uniforme et adaptée au processus de broyage ultérieur. Les matières premières concassées à cette étape sont indispensables pour la composition homogène du mélange de ciment et pour garantir une réactivité chimique idéale lors de l'hydratation du ciment.

*Concassage tertiaire* : le concassage tertiaire intervient pour affiner davantage la taille des particules, en les réduisant jusqu'à 5 millimètres. Cette étape vise à obtenir des particules très fines qui contribuent à améliorer les propriétés spécifiques du ciment, telles que la résistance et la durabilité. Les matières

premières concassées à cette étape sont utilisées pour ajuster la composition du mélange de ciment, offrant ainsi une plus grande flexibilité dans la production de différents types de ciment répondant à des exigences spécifiques.

### **II.3. Les différents types de concasseur**

#### **II.3.1. Définition du concasseur**

Un concasseur est une machine spécialement conçue pour effectuer la réduction des grosses roches en petites pierres, du gravier ou de la poussière de roche. Son utilisation est courante dans le but de réduire la taille ou de modifier la forme des déchets, facilitant ainsi leur élimination ou leur recyclage. De plus, les concasseurs permettent de réduire la taille d'un mélange solide de matières premières, tel que le minerai, afin de faciliter la séparation de ses différents composants. Le processus de concassage implique l'application d'une force, amplifiée mécaniquement en utilisant un matériau ayant des caractéristiques de dureté, de rigidité et de résistance à la déformation plastique supérieures à celles du matériau à concasser. Les appareils de concassage retiennent le matériau entre deux surfaces solides parallèles ou tangentes, et appliquent une force suffisante pour rapprocher ces surfaces, générant suffisamment d'énergie dans le matériau pour que les particules se séparent (fracturation), ou changent d'alignement les unes avec les autres (déformation).

Les premiers concasseurs étaient des pierres, frappées contre une enclume de pierre, le poids de la pierre aide la force musculaire. Les meules et les mortiers sont des appareils de concassage de ce type [2].

#### **II.3.2. Qualité de la matière et caractéristiques physique**

Pour pouvoir choisir le processus de concassage le plus approprié à une matière, il faut connaître la nature et les caractéristiques de cette matière et les exigences auxquelles le produit concassé doit répondre. Il est plus facile d'obtenir des informations fiables sur le type de matière, la composition chimique, l'homogénéité, la taille maximale, la distribution granulométrique, la teneur maximale en eau et la densité ainsi que des informations sur la distribution granulométrique de particules du produit concassé.

Par contre, il est plus difficile d'obtenir des informations fiables sur la consommation d'énergie, les caractéristiques d'usure, la résistance compressive et d'adhésivité des matières à concasser. Certains fournisseurs de concasseurs ont des possibilités d'étudier ces caractéristiques en laboratoire. Chaque un d'eux a sa propre méthode, par expérience les résultats obtenus sont liés au concassage effectué par les différents types de concasseurs.

Les caractéristiques d'adhésivités sont les plus difficiles à évaluer puisqu'elles sont liées à plusieurs caractéristiques physiques et il difficile d'empêcher les problèmes d'adhésivité lors du concassage ou d'y remédier. Ces caractéristiques sont principalement reliées à la structure de la matière et à la teneur en eau. Il est rare que les matières pierreuses absorbent suffisamment d'eau pour créer des problèmes d'adhésivité alors que les matières à grains fins et non-consolidées comme la craie, la marne et l'argile sont susceptibles d'absorber beaucoup d'eau [14].

**II.4. Types de concasseur et leur principe de fonctionnement**

Il existe différents types de concasseurs utilisés dans l'industrie du concassage, chacun ayant une méthode spécifique pour réduire la taille des matériaux (Tableau II.1). Le choix du type de concasseur dépend des caractéristiques des matériaux à concasser, de la taille de sortie requise et des spécifications du produit final. Dans les machines opérant par compression, les morceaux subissent une action d'écrasement répétée, comme en cas de concasseurs à mâchoires ou giratoires, ou continue comme dans les concasseurs à cylindres. Ils sont couramment utilisés pour le concassage de matériaux durs et abrasifs.

<b>Les concasseurs opérant par compression</b>	<b>Les concasseurs opérant par impact</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concasseurs à mâchoires</li> <li>• Concasseurs giratoires</li> <li>• Concasseurs à cylindres</li> <li>• Concasseurs à rotors dentés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concasseurs à percussion à axe horizontal</li> <li>• Concasseurs à percussion à axe vertical</li> <li>• Concasseurs à cylindre de frappe</li> <li>• Les concasseurs opérant essentiellement par attrition :</li> <li>• Broyeurs autogènes et semi-autogènes.</li> <li>• Trommels concasseurs en particulier.</li> </ul>

Tableau II.1 : Les différents types des concasseurs selon leur fonctionnement [18]

Dans les machines opérant par impact, les morceaux sont frappés violemment par un organe tournant à grande vitesse et projetés contre des enclumes, de façon à induire des fractures suivant les plans de clivage naturels de la roche. Ils sont efficaces pour le concassage de matériaux durs et résistants tels que les roches.

Dans les machines opérant par attrition, c'est principalement le phénomène d'abrasion qui est mis en jeu. Ces machines sont couramment utilisées dans la production de sable. Par convention, les machines de concassage sont classées en fonction de l'action prédominante qu'elles utilisent pour la fragmentation [3].

## II.4.1.Appareils opérant par écrasement (compression)

### II.4.1.1. Concasseurs à mâchoires

#### a. Principe de fonctionnement et description

Dans ces appareils, le matériau est écrasé entre deux mâchoires verticales, l'une mobile et l'autre fixe. Le passage du matériau à travers l'appareil se fait par gravité (Figure II. 1).

Mais pour résoudre certains problèmes particuliers, il existe également un autre système appelé concasseur horizontal.

Les types les plus répandus de concasseurs à mâchoires verticales sont le concasseur à simple effet (ou plutôt simple volet) et le concasseur à double effet (ou plutôt à double volet).

Cependant, actuellement dans l'industrie minière les concasseurs à simple effet qui sont moins lourds (et donc moins chers) que les concasseurs à double effet seuls sont plus utilisés [1] [3].



Figure II. 1. Concasseur à mâchoires [4].

#### b. Concasseur à simple volet (Figure II. 2)

Dans un concasseur à simple effet, la mâchoire mobile est liée à sa partie supérieure à un arbre excentrique alors que sa partie inférieure repose sur un volet articulé qui lui confère un mouvement alternatif d'amplitude limitée, mais qui provoque une friction de la mâchoire contre les matériaux. Ainsi, la mâchoire mobile glisse de bas en haut, pendant la phase d'ouverture, puis de haut en bas pendant la phase de fermeture [3].

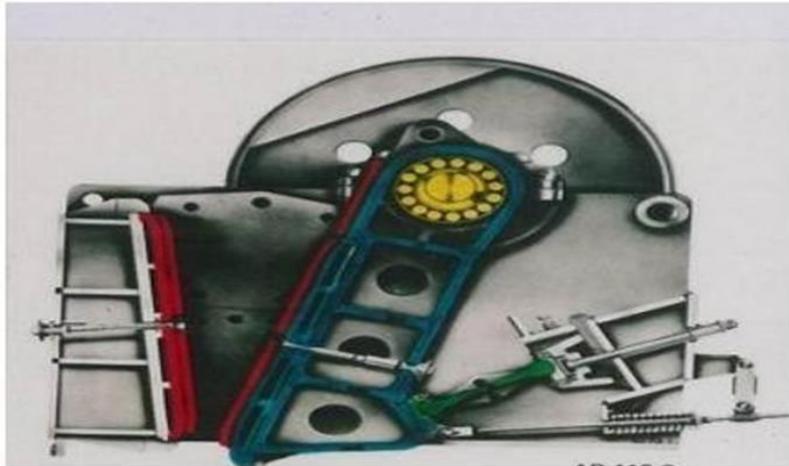


Figure II. 2. Concasseur à mâchoire à simple effet. [5].

**c. Le concasseur à double volet (Figure II. 3.)**

La mâchoire mobile est portée par un balancier qui pivote autour d'un axe fixe situé à sa partie supérieure. Derrière ce balancier, une bielle est animée à sa partie supérieure d'un mouvement circulaire uniforme par un arbre excentrique à quatre paliers. Un système à deux volets entre les parties inférieures du balancier et de la bielle, d'une part, et bielle et bâti d'autre part, permet de transformer le mouvement de la bielle en un mouvement alternatif périodique du bas du balancier. [3]. Ce type de concasseurs sont généralement utilisés pour la fragmentation des matériaux très abrasifs comme les Ferro – alliages [5].

Les concasseurs à simple volée sont souvent préférés pour leur simplicité de conception, leur coût relativement inférieur et leur capacité à manipuler des matériaux de taille plus importante. Les concasseurs à double volée, quant à eux, offrent une plus grande capacité de concassage et une meilleure efficacité dans la réduction de la taille des matériaux.

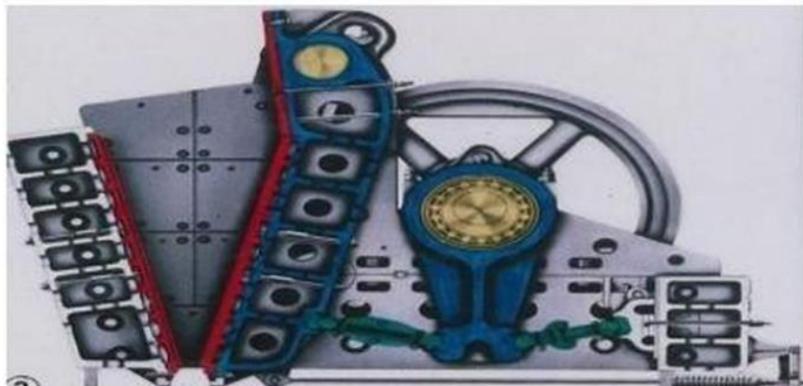


Figure II. 3. Concasseur à mâchoire à double effet. [5].

#### **d. Utilisations et caractéristiques des concasseurs à mâchoires**

Les appareils à mâchoires sont essentiellement utilisés en concasseurs primaires dans les carrières de roches massives et dures ou dans les mines, soit en installations fixes, soit en installations mobiles et semi mobiles. Dans tous les cas, ils doivent être alimentés au moyen d'une trémie, d'un distributeur et éventuellement d'un crible pour court-circuiter les produits dont la dimension est inférieure au réglage. [3].

#### **II.4.1.2 Concasseurs giratoires**

Il existe deux familles distinctes de concasseurs giratoires, les appareils à tête montée sur arbre guidé et porté et les appareils dits à tête en porte à faux [3].

##### **a. Principe de fonctionnement et description :**

Les concasseurs giratoires représentent les appareils les plus répandus dans diverses étapes de préparation des minerais des matériaux. [18].

##### **e. Les appareils à tête montée sur arbre guidé :**

Ces appareils sont utilisés dans toutes les applications primaires mais existent aussi en applications secondaires. Souvent préféré des appareils dits à tête en porte à faux [3].

Les appareils dits à tête en porte à faux sont utilisés à partir du stage de concassage secondaire et dans les applications tertiaires. On étudiera chacune de ces machines en fonction de leurs applications :

Ils sont tous à arbre guidé et porté. L'arbre est guidé en tête, dans un étrier, au niveau de l'intersection des axes de l'arbre et du bâti de la machine, et porté en pied par un vérin permettant le réglage et la compensation de l'usure. L'entraînement se fait en pied par l'excentrique monté le plus souvent sur bague bronze, et parfois sur roulement. Le mouvement  $y$  est transmis directement par l'intermédiaire d'un couple d'engrenages coniques formant à la fois réduction et renvoi d'angle (ou anciennement par poulie à axe vertical). La chambre de broyage, largement ouverte, a pour bissectrice une génératrice quasi-verticale.

L'évacuation des matériaux concassés s'effectue en sortie inférieure par décharge annulaire (ou par deux couloirs si entraînement direct par poulie à axe vertical). Pour les anciens appareils à tête suspendue, le réglage était réalisé par écran en partie supérieur de l'arbre qui est supporté par un vérin qui permet un réglage quasi instantané. Les facteurs déterminant pour la production et le rendement des concasseurs sont, bien évidemment, le choix de la dimension, suivi de :

- La vitesse de rotation
- L'angle de prise des matériaux entre les pièces bruyantes qui ne doit pas dépasser 280 sous peine de voir les blocs sauter dans cuve broyage.

On caractérise habituellement les concasseurs giratoires primaires par la dimension radiale des ouvertures d'admission, exprimée en pouces. Suivie du diamètre de la mâchoire mobile à sa partie inférieure, exprimée également en pouces.

En effet, ce sont les deux chiffres caractérisant le mieux les possibilités de l'appareil, puisque le premier conditionne la dimension des blocs à l'alimentation et le second conditionne le débit dont l'appareil est capable pour un réglage donné [6].

- Le débit des concasseurs est, bien évidemment fonction de la dimension, et ensuite de la vitesse de rotation et de l'excentricité de l'arbre concasseurs giratoires primaires.
- Concasseurs giratoires secondaires
- Concasseurs giratoires tertiaires
- Concasseurs giratoires pour production de sable

**f. Concasseurs giratoires primaires :**

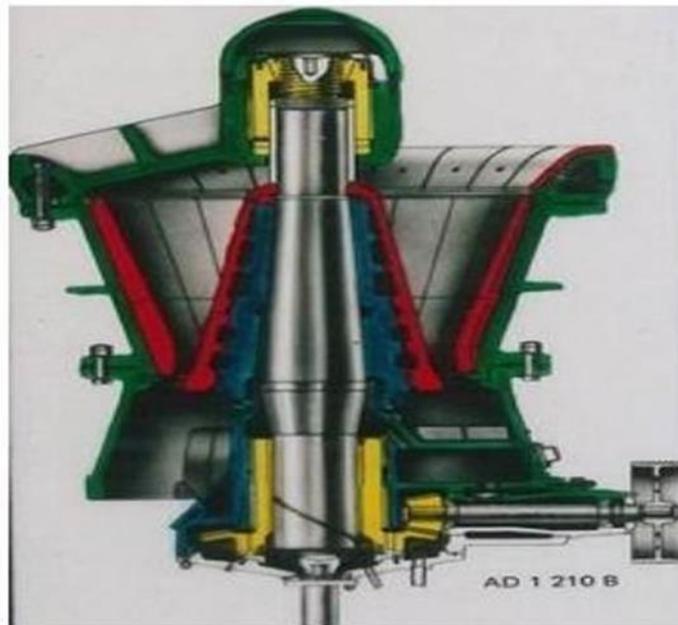


Figure II.4. Concasseur giratoire primaire à tête guidée et portée [5].

### g. Les concasseurs giratoires secondaires

Ce sont des appareils destinés à reprendre les matériaux pré-concassés à l'étage primaire afin de les ramener à une dimension admissible pour les matériaux fins, sauf les ballasts. Le concassage secondaire assure un grand rapport de réduction 4 à 5 les contraintes suivantes même critères comme le concasseur primaire tel que :

- Admission et dégagement des produits à concasseur très libre
- Angle de pincement dans la chambre de broyage déterminé à la limite de la préhension des matériaux à traiter.

Les concasseurs giratoires secondaires, ce sont des appareils (à tête sur arbre en porte à faux) ce dernier système, présente plusieurs avantages :

- Maintien d'un circuit fermé
- Retour rapide au réglage établi de la mâchoire
- Raideur des ressorts oléopneumatiques plus faible que les traditionnels ressorts mécaniques. [3].

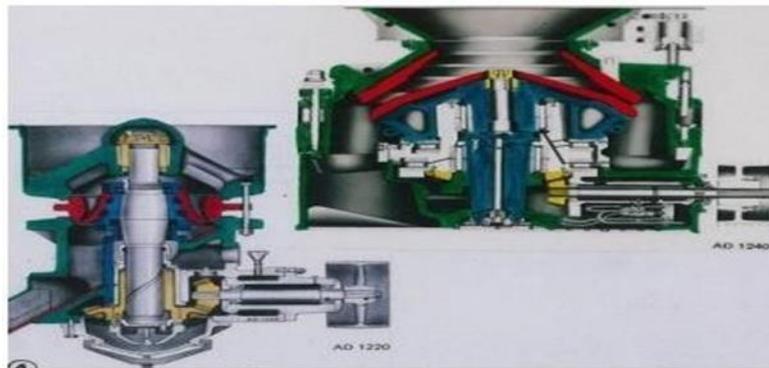


Figure II. 5. Les concasseurs giratoires secondaires [5].

### h. Les concasseurs giratoires tertiaires

Ils ne diffèrent des concasseurs secondaires que par la géométrie de la chambre de concassage.

Il s'agit donc de machine déterminante dans la chaîne de production de granulats routiers ou de béton, qui nécessite par ailleurs une qualité intrinsèque de grande dureté et une grande résistance à l'abrasion.

Les efforts des différents constructeurs, au cours des dernières décennies, ont porté sur la mise en évidence et la bonne application des conditions idéales d'exploitation, afin d'améliorer :

- Le coefficient de réduction.
- Le coefficient d'aplatissement.

- Le cout des pièces d'usure ramené à la tonne des produits finis.
- Le rapport puissance absorbée /tonnage produit.

Toutes ces conditions sont déterminées par :

- La forme de la chambre de concassage
- La vitesse d'excitation de la tête
- L'inclinaison de la tête par rapport au bol

Dans les concasseurs giratoires tertiaires on recherchera des chambres très faiblement décroissantes en volume, pour assurer une bonne capacité des produits en cours de concassage. Une qualité régulière des produits est assurée par un réglage automatique continu de l'ouverture de la chambre de concassage. Ainsi tous les appareils tertiaires bénéficient du même développement d'assistance hydraulique décret pour les concasseurs secondaires [15].

Après étalonnage, il devient facile, à l'aide d'un mini -calculateur, d'assurer une maîtrise de la courbe granulométrique, au fur et à mesure de l'usure des pièces. [3].

#### II.4.1.3. Concasseurs à rotors dentés

##### a. Introduction

Les Concasseurs à rotors dentés sont des appareils à double (ou triple) rotor munis de divers organes coupants, sont utilisés pour des matériaux tendres ou collants.



Figure II. 6. Concasseurs à rotors dentés [7].

Depuis une vingtaine d'années ce concept du double rotor a été repensé et développé par la société britannique MMD (Mining Machinery Développement). Il en résulté le développement d'un type un peu particulier de concasseur (pour le concassage grossier et moyen principalement) compacts, de profil bas, facilement intégrables dans les installations mobiles, capables de très gros débits et convenant, en particulier, à des matériaux humides et collants [2][3].



Figure II. 7. Concasseur MMD série 500. [8].

## II.4.2.Appareils opérant par choc

### II.4.2.1. Concasseurs à percussion :

#### a. Généralité

Le principe général de la plupart des appareils opérant par chocs est simple : un rotor tournant à grande vitesse et portant un certain nombre de pièces de choc (percuteurs) fixes ou articulées lance le matériau sur des plaques dites de choc ou enclumes ou sur une couche du même matériau.

Dans les concasseurs à percussion, il faut que la vitesse d'impact soit au moins égale à 20 m/s pour provoquer la rupture du matériau. Pratiquement, la vitesse tangentielle des percuteurs est souvent nettement plus élevée. Ces machines fonctionnent donc sur le principe de la rupture des matériaux au choc, de manière quasi instantanée, par opposition à la rupture par écrasement. [3].

#### b. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement de ces concasseurs se caractérise ainsi par rapport aux concasseurs opérant par écrasement :

- La courbe granulométrique des produits obtenus est beaucoup plus riche en éléments fins.
- Les produits sont sensiblement plus cubiques ; le coefficient de réduction est élevé, surtout si l'on traite des matériaux fragiles.
- La consommation d'énergie est faible eu égard au rapport de réduction et au débit obtenu.

- Les chocs sont tels que le procédé n'est pas utilisable industriellement pour des matériaux trop durs. Les effets du frottement sont si intenses que les matériaux un peu abrasifs provoquent des coûts d'usure absolument prohibitifs, cette usure pourra être contenue dans la mesure où l'architecture du concasseur privilégiera les chocs normaux, mais à partir d'un certain degré d'usure inévitable, on générera des chocs tangentiels qui la précipiteront ; on y a remédié dans une certaine mesure (appareils verticaux) en remplaçant les enclumes métalliques par une couche de matériaux, mais au détriment d'autres caractéristiques de ces appareils.

Ces machines sont divisées en deux types :

- Rotor à axe horizontal,
- Rotor à axe vertical.
- Seules celles du premier type effectuent du concassage primaire, car généralement la dimension maximum admissible à l'entrée ne peut dépasser 50mm dans le cas des appareils à axe vertical. [3].

#### II.4.2.2. Concasseurs à percussion à axe horizontal

Cette famille est elle-même divisée en deux groupes, les appareils à percuteurs rigides et ceux qui ont des percuteurs articulés.

##### i. Concasseurs à percuteurs rigides

Ils sont constitués d'un rotor cylindrique à vitesse variable muni de percuteurs et d'un bâti avec des plaques de choc. Constituant un, deux ou trois écrans réglables en position, en fonction du nombre d'étages de concassage recherché et du coefficient de réduction. Tous les paramètres de ces appareils sont réglables à distance, permettant ainsi leur intégration dans un ensemble automatisé. Ils ne possèdent pas de grille de sortie. [3].

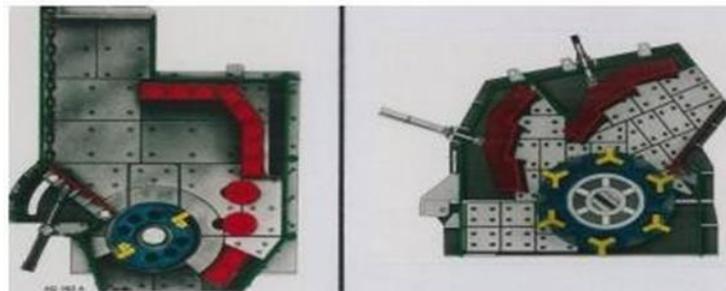


Figure II. 8. Principe d'un concasseur à percuteurs rigides. [5].

#### **j. Concasseurs à percuteurs articulés**

Le principe est le même que le concasseur à percussion à percuteurs rigides, sauf que la chambre de broyage est ouverte à la partie inférieure. L'avantage est l'absence de bourrage.

L'inconvénient étant le manque de contrôle granulométrique des matériaux sortant. Lorsqu'il est nécessaire d'effectuer un contrôle granulométrique des matériaux.

Par exemple dans le cas de la production de produits fins, le fabricant met une grille galbée à la partie inférieure. Le risque de bourrage apparaît et est atténué par le remplacement des percuteurs rigides par des percuteurs articulés. [3][5].

#### **k. Avantages et inconvénients des concasseurs à percussion à axe horizontal**

Par leur conception, les appareils à chocs primaires sont des appareils permettant de très gros quotients de réduction. Surtout dans la mesure où l'on traite des matériaux fragiles.

Ces appareils permettent en particulier de produire un pourcentage important d'éléments fins.

En revanche, leur emploi est absolument à proscrire lorsque :

- On a affaire à des matériaux tant soit peu abrasifs (plus de 5 à 8% du quartz ou de tout autre minéral dur).
- Le matériau à traiter est trop peu fragile aux chocs (calcaire tendre, craie, etc.).
- On ne veut pas produire d'éléments fins au poste primaire afin de pouvoir, par un criblage ultérieur, éliminer les matériaux sales avant l'étage secondaire.

D'autre part ces appareils réclament des puissances installées très importantes pour faire face au passage des gros blocs.

### **II.4.2.3. Concasseurs à percussion à axe vertical**

Il existe trois types de concasseurs à percussion à axe vertical.

#### **a. Concasseur à impact unique**

Les grains à projeter sont placés près du centre d'un plateau comportant des canaux allant du centre à la périphérie. Sous l'effet de la force centrifuge, les grains se déplacent vers la périphérie du plateau et le quittent pour amorcer une trajectoire aérienne et venir heurter soit des plaques de blindage, soit un talus de produit.

Au début de la trajectoire aérienne, la vitesse des grains est la composante de la vitesse relative des grains par rapport au plateau et de la vitesse périphérique du plateau au point où le grain quitte ce dernier.

Deux types de machines se présentent sur le marché :

- Dans l'un, on s'attaque essentiellement aux problèmes d'usure en limitant les contacts du matériau avec les organes de protection de la machine.
- Dans l'autre, on cherche au contraire à tirer le meilleur parti possible de ses qualités. [3].



Figure II. 9. Concasseur à percussion à axe vertical. [7].

### b. Machines à double impact indirect

Ces machines sont équipées de deux rotors situés l'un au-dessus de l'autre. Et montés sur le même arbre. Après un premier impact, le matériau est guidé vers le deuxième rotor pour être à nouveau accéléré en vue d'un deuxième impact, créant un concasseur à double impact indirect.

Le premier rotor est normalement équipé d'un anneau blindé, tandis que le seconde peut être équipé soit d'un autre anneau blindé, soit d'un autogène. [3].

### c. La machine synchro concasseur

Il se distingue à impact classique en ce que le trajet des particules est totalement déterministe, évitent à la fois les perturbations à l'impact et les interférences entre les particules. Les particules sont d'abord guidées le long des pales d'un distributeur rotatif et projetées par les forces centrifuge. Avec une vitesse de décollage la plus faible possible.

Sur une enclume tournant dans le même sens et positionnée transversalement sur leur parcours pour augmenter leur énergie cinétique grâce à l'accélération qui leur a communiquée. Après cet impact en Co-rotation, les particules rebondissent avec une vitesse plus élevée que leur vitesse d'impact. Cette vitesse de rebond permet un impact secondaire soit contre un anneau blindé (synchro Pactor), soit contre un anneau autogène (synchro CombiPactor), la collision s'effectue d'une façon totalement déterministe ; c.-à-d. Que les particules entrent en collision sans perturbation, essentiellement au même endroit, à la même vitesse d'impact et sous le même angle d'impact. [3].

#### II.4.2.4. Commentaires généraux sur les machines opérant par percussion

Le concassage à percussion constitue un progrès par rapport au concassage par écrasement : il permet le plus souvent des coefficients de réduction presque deux fois supérieurs, et l'obtention de matériaux riches en éléments fins, qui sont souvent utilisables.

De plus, la forme des produits est nettement supérieure.

Ces caractéristiques font que le concassage par percussion suscite à l'heure actuelle un intérêt considérable auprès des carrières.

Ces qualités sont malheureusement stérilisées par leur incompatibilité avec les produits un peu durs, comme les matériaux dits nobles pour la construction des routes ou la fabrication de ballast : les appareils où "caisses à pierres" remplacent les pièces d'usure perdent en effet une partie des avantages, que le principe des appareils à percussion leur confère. [3].

#### II.4.2.5 Concasseurs primaires mobiles :

Dans les exploitations à ciel ouvert, il est souvent intéressant de rendre les concasseurs primaires mobiles pour les rapprocher des fronts d'extraction et diminuer les distances de transport par tombereau. Ceci s'applique surtout au minerai qui doit être concassé de toute façon, mais peut également être utilisé pour le stérile et l'on peut ainsi réduire sensiblement les dépenses de découverte en remplaçant un transport par tombereau par un transport par bandes.

Pratiquement, tous les types de concasseurs primaires peuvent être rendus mobiles. Les concasseurs mobiles peuvent être soit montés sur patins fixes et tirés d'un point à un autre par un engin, soit montés sur châssis équipés de chenilles ou de pneus.



Figure II.11. Concasseur situé au niveau de la carrière [9].

## II.5. Critères de choix d'un appareil ou d'une chaîne d'appareils

### II.5.1. Données de base

Elles sont de deux sortes :

**a. Les objectifs à atteindre :**

- Quantité à fragmenter.
- Dimensions ou degré de fragmentation à atteindre des divers produits que l'on veut obtenir.
- Sélection des divers constituants.

**b. La nature et les propriétés de la roches (des matériaux) traités :**

- Nature pétrographique.
- Abrasivité et pourcentage des constituants les plus durs.
- Résistance mécanique et fragilité.
- Humidité et propreté.
- Dimension maximale des morceaux.

### II.5.2. Eléments du choix du concasseur primaire

L'ouverture du concasseur primaire doit permettre l'admission des blocs provenant de la carrière ou de la mine dont la taille dépend du programme prévu pour l'abattage. En fonction de l'abrasivité de la roche, on peut opter pour un appareil à percussion, ou un appareil opérant par écrasement. [3].

#### II.5.2.1. Matériaux non abrasifs (calcaires, charbons, phosphates, bauxites)

Le concassage par percussion peut être judicieux eu égard à l'énergie spécifique qu'il demande et aux grands coefficients de réduction qu'il permet, pouvant aller jusqu'à 10. Il est cependant générateur d'une plus grande quantité de fines. Il est surtout utilisé pour des applications où on ne désire pas obtenir de granulométries intermédiaires (cimenterie par exemple).

Il est à noter que pour des matériaux friables on pourra opter pour un concasseur à cylindres, opérant en compression. [3].

#### II.5.2.2. Matériaux abrasifs (La grande majorité des roches et des minerais)

Le concassage par compression s'impose et la capacité de production prévue fixe en général le choix entre appareil à mâchoires et appareil giratoire.

Dans le tableau suivant on trouve les caractéristiques des différents types de concasseurs :

Tableau II. 1. Caractéristiques des appareils de fragmentation grossière (concasseurs) [10].

Appareil	Dimension maximale admise (mm)	Rapports de réduction normaux	Capacités maximale (t/h)	Energie consommée par tonne traitée
Concasseurs à mâchoires	2500	1/4 à 1/6	4000	0,4 à 2
Concasseurs giratoires primaires	1600	1/4 à 1/5	7000	0,25 à 0,75
Concasseurs giratoires secondaires	750	1/5 à 1/8	3000	0,5 à 1
Concasseurs à cônes tête standard	450	1/5 à 1/8	3000	0,75 à 1,5
Concasseurs à cônes tête courtes	175	1/4 à 1/7	1500	1,5 à 2
Concasseurs à cylindres cannelés	0,05 à 0,6 (diamètre)	1/3 à 1/4	2000	0,3 à 0,75
Concasseurs à percussion (percuteurs rigides)	2000	1/8 à 1/15	1200	0,2 à 0,6
Concasseurs à marteaux articulés	0,1 à 0,8 (diamètre)	1/10 à 1/30	1200	0,2 à 0,6
Emoteurs à fléaux et à chaînes	250	1/10 à 1/15	50	0,3 à 0,8
Trommels concasseurs	0,1 à 0,5 (diamètre)	25	400	0,1 à 0,3
Coupeuses et trancheuses	300	1/10 à 1/15	60	0,5 à 20
Déchiqueteuse	1200	1/2 à 1/10	200	0,1 à 50

### II.5.3. Cas particulier des produits humides et collants

Les appareils alimentés par simple gravité ne sont pas utilisables. On a alors le choix entre les concasseurs à cylindres qui peuvent être alors munis de peignes de dé colmatage, et les concasseurs opérant par chocs munis soit d'un système de séchage à air chaud, soit d'une enclume mobile, ou encore les appareils autogènes ou semi autogènes à sec avec une circulation d'air chaud. [3].

## **Chapitre III**

### **Aciers fortement alliés au manganèse, usure des surfaces et rechargements durs**

#### **Introduction**

Dans le domaine du concassage, les marteaux jouent un rôle essentiel en appliquant des forces d'impact pour réduire la taille des matériaux. Toutefois, en raison de ces forces et des caractéristiques abrasives des matériaux traités, les marteaux de concasseur subissent une usure progressive qui peut altérer leur efficacité opérationnelle et réduire leur durée de vie. Afin de remédier à ce problème, différentes techniques de rechargement et de réparation sont employées, notamment le rechargement dur (hardfacing).

Dans ce chapitre, nous abordons les différents types d'usure, leurs mécanismes et leurs effets, dans le but de les contrôler et de les gérer de manière adéquate. La prévention de l'usure excessive peut être réalisée grâce à l'utilisation de matériaux résistants à l'usure, ainsi qu'à l'application de techniques telles que le rechargement dur et les traitements de surface. Ces derniers seront l'objet de la partie qui suit. Enfin, nous faisons une présentation générale des aciers fortement alliés au manganèse et de leurs propriétés.

#### **III.1. L'usure**

##### **III.1.1. Définition**

L'usure peut être définie comme l'ensemble des phénomènes qui entraînent des pertes de masse ou des évolutions géométriques significatives des surfaces de contact en mouvement relatif (l'une par rapport à l'autre). Ces phénomènes peuvent être accompagnés d'effets secondaires tels que l'apparition de jeu dans le mécanisme en mouvement, la perte de côtes, l'émission de débris ou l'endommagement des surfaces [11].

##### **III.1.2. Phénomènes élémentaires d'endommagement des surfaces**

Sous l'effet des sollicitations tribologiques, une surface subit des modifications et un endommagement dont les principales formes sont schématisées (figure III.1).

Les phénomènes élémentaires d'endommagement des surfaces peuvent varier en fonction du contexte spécifique, mais voici quelques-uns des phénomènes :

- **Déformation plastique** : lorsque les contraintes créées par le contact glissant dépassent la limite d'élasticité ; ces déformations plastiques induisent des modifications de géométrie des surfaces en frottement.
- **Fissuration** : elle se produit sous l'effet de contraintes dépassant la limite à la rupture, ou de phénomènes de fatigue.
- **Transformation physicochimique de surface** : transformations structurales des surfaces en contact sans intervention de l'environnement ou réaction tribologique entre les corps frottant et l'environnement.
- **Adhésion entre les corps frottant** : l'adhésion conduit à formation d'une couche de transfert d'un des matériaux sur l'antagoniste.

Ces différents phénomènes élémentaires peuvent se produire simultanément ou successivement dans un contact tribologique donné, la description de la chronologie des événements correspond au processus d'usure.

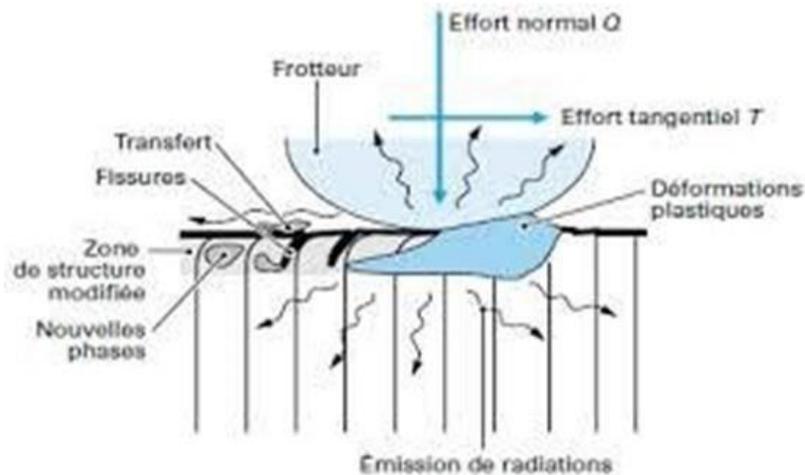


Figure III.1 : Endommagement de surface d'un corps frottant.

### III.2. Les mécanismes d'usure

L'usure est un ensemble complexe des phénomènes difficiles à interpréter, amenant une émission des débris avec perte de masse, de côtes, de forme, et s'accompagnant des transformations physiques et chimiques des surfaces. Il existe plusieurs mécanismes d'usure qui peuvent se produire dans les surfaces en contact et en mouvement relative. Voici quelques-unes des formes d'usure les plus courantes :

### a. Usure abrasive :

L'usure abrasive est un phénomène mécanique qui représente l'endommagement des surfaces par des aspérités (abrasion à deux corps) ou des particules « dures » (abrasion à trois corps). On différenciera le labourage (déplacement de matière et formation de bourrelets), prédominant pour les matériaux ductiles, de la coupe (enlèvement de matière), particulièrement repérée pour des matériaux fragiles. On lira également [12].

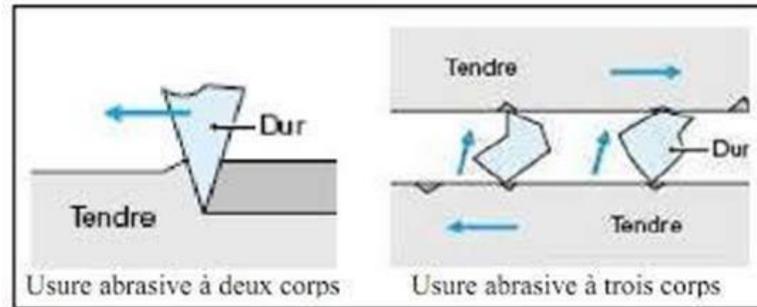


Figure III.2 : Usure abrasive à trois corps.

### b. Usure adhésive :

L'usure adhésive fait appel à des notions de physico-chimie. Il y a formation de liaisons (intermoléculaires, interatomiques) à l'interface. On parle d'usure douce lorsqu'il y a cisaillement de ces liaisons (Figure III.3). L'usure sévère appelée aussi grippage apparaît lorsqu'il y a arrachement de matière de l'une des surfaces. D'où la formation d'un film de transfert collée à la surface antagoniste [13].

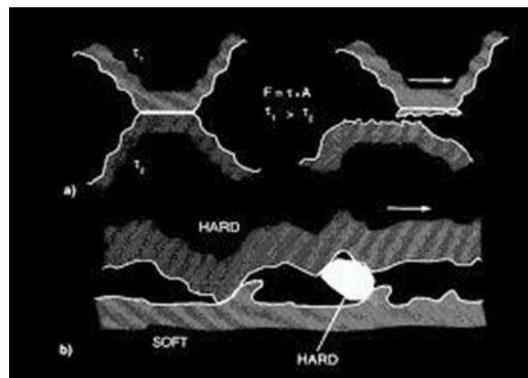


Figure III.3 : phénomène élémentaire de l'usure adhésive.

### c. Usure par fatigue :

Dans l'usure par fatigue il y a formation de fissures dans les matériaux en présence, sous l'effet des contraintes cycliques. Les fissures se propagent vers la surface et il y a détachement de grosses particules dont la taille peut atteindre le millimètre. On parlera particulièrement d'égrènement lorsqu'il y a formation de trous correspondant à la microstructure initiale des matériaux. Il y a déchaussement au niveau des joints de grains d'un métal par exemple. On parle de délamination lorsque les déformations plastiques répétées des premiers corps conduisent à des fissures en sous-surface, parallèles à la surface. Il y a propagation des fissures le long du plan de cisaillement maximum (figure III.4) [14] [15].

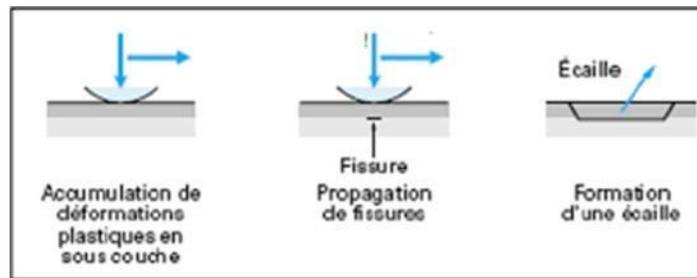


Figure III.4 : usure par fatigue superficielle.

### d. Usure par érosion :

L'usure par érosion apparaît lorsque des particules solides ou liquides rentrent en contact avec la surface du substrat. Le taux d'usure est alors directement lié à l'angle d'attaque de l'élément extérieur et à la vitesse à laquelle il est projeté. Ainsi, suivant les propriétés physiques du substrat, l'érosion sera plus ou moins importante (Figure III.5).

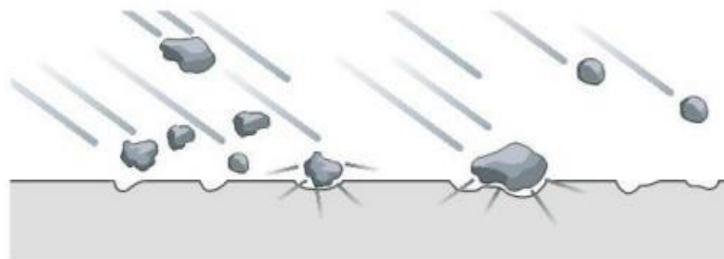


Figure III.5 : Usure par érosion [16]

**e. Usure corrosive (ou tribochimique) :**

Dans ce cas l'endommagement est dominé par des réactions tribochimiques, et les produits de corrosion sont enlevés par action mécanique. Il y a formation de films compactés à l'interface.

**f. Usure par impact**

L'usure par impact est définie comme l'usure d'une surface solide due à la percussion, qui est une exposition répétitive à un contact dynamique par un autre corps solide. L'usure par impact implique une déformation élastique et plastique lorsque la charge d'impact ou l'énergie d'impact est élevée et/ou une fatigue accompagnée de la libération de débris d'usure due à la formation de fissures. En général, l'usure par impact des métaux est dépendante de la formation de couches déformées, en particulier lorsque l'usure par fatigue ou formation de fissures est prédominante. L'usure par impact est de la plus haute importance dans l'exploitation minière et le traitement des minéraux. L'exploitation minière et le traitement des minéraux exigent des machines et des composants résistants à l'usure, car les énergies et les masses des corps en interaction sont importantes.

**III.3. Rechargement dur (Hardfacing)****III.3.1. Définition**

Le rechargement dur (hardfacing en anglais) est un procédé de revêtement utilisé pour renforcer la surface d'une pièce métallique, généralement dans le but d'améliorer sa résistance à l'usure ou usure corrosion ou à d'autres formes de détérioration. Le rechargement dur consiste à appliquer une couche de matériau dur et résistant sur la surface d'une pièce, créant ainsi une protection supplémentaire. Cela permet de prolonger la durée de vie des pièces et de les rendre plus adaptées aux conditions d'utilisation difficiles. [21]

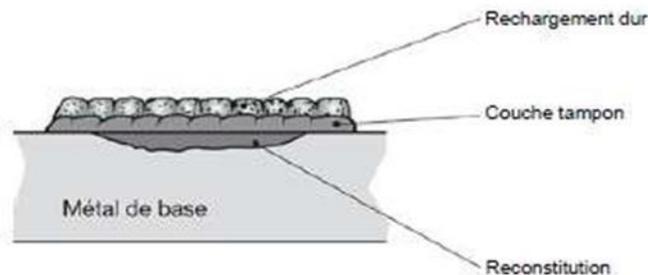


Figure III.6 : Rechargement dur [21]

### III.3.2. Termes relatifs au rechargement dur :

#### a. Reconstitution :

La “reconstitution” est l’action de remettre à la cote initiale une pièce dont la géométrie aurait été modifiée par l’effet de l’usure. On utilisera dans ce cas prioritairement un métal d’apport homogène : analyse chimique et caractéristiques mécaniques identiques à celles du métal de base. Dans certains cas, il est toutefois possible d’utiliser un alliage hétérogène, à condition que ses caractéristiques soient compatibles avec celles du substrat. Les trois facteurs importants pour définir le métal d’apport de reconstitution approprié sont :

- Le risque de fissuration à froid : il faut définir la température de préchauffage ainsi que la température entre-passe.
- La température de service et donc, la dilatation différentielle entre métal d’apport et métal de base.
- La réalisation d’un rechargement après reconstitution et donc, la compatibilité entre les métaux d’apport utilisés

#### b. Couche tampon / Sous-couche :

Aussi appelée “sous-couche” ou encore “transition métallurgique”, la couche tampon n’est pas toujours nécessaire. Elle sert à assurer l’accrochage entre le métal de base et le rechargement dur et éviter la propagation des fissures de retrait du rechargement vers le métal de base.

**c. Rechargement dur**, c’est une couche de haute dureté déposée essentiellement pour apporter les propriétés de résistance à l’usure.

### III.3.3. Les procédés de rechargement dur

Il existe plusieurs procédés couramment utilisés pour réaliser le rechargement dur (hardfacing). Chaque procédé présente des caractéristiques spécifiques en termes de technique de soudage, de matériau d’apport et d’applications recommandées. Voici quelques-uns des procédés de hardfacing les plus utilisés :

#### III.3.3.1. Rechargements durs par soudage

Le rechargement dur par soudage est une technique de protection utilisée pour récupérer des pièces usées afin de prolonger leur durée de vie. III peut être, néanmoins, adapté à des produits neufs exposés à différents types d’usure en service. Sous l’effet des contraintes mécaniques élevées, souvent dans des milieux agressifs, ces produits doivent posséder à Laois une bonne ténacité et une dureté élevée. Les différents procédés de soudage sont résumés au tableau 1.

- A. Soudage TIG (Tungstène Inerte Gas) :** Le soudage TIG utilise une électrode en tungstène non consommable et un gaz inerte pour protéger le bain de fusion. Ce procédé est souvent utilisé pour des applications nécessitant une précision élevée, comme le rechargement de petites surfaces ou de pièces complexes.
- B. Soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée (SMAW) :** Ce procédé, également connu sous le nom de soudage à l'électrode, utilise une électrode enrobée qui fournit à la fois le matériau d'apport et le flux nécessaire pour protéger le bain de fusion. Le SMAW est un procédé polyvalent et largement utilisé pour le rechargement dur, en particulier dans des applications telles que le soudage des zones d'usure sur les pièces d'usure, les lames de bulldozer, les dents de godet, etc.



Figure II.7 : Photo real d'un soudage SMAW

- C. Soudage au plasma (PAW) :** Le soudage au plasma utilise un arc électrique et un gaz de protection ionisé pour fondre le matériau d'apport. Ce procédé offre un contrôle précis de l'apport de chaleur et est souvent utilisé pour des applications nécessitant une faible déformation ou des exigences strictes en termes de qualité de soudure, telles que les outils de coupe, les moules, les matrices, etc.
- D. Soudage MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas) :** Le soudage MIG/MAG est un procédé semi-automatique qui utilise un fil d'apport continu et un gaz de protection inerte ou actif pour protéger le bain de fusion. Ce procédé est rapide, polyvalent et convient à une large gamme d'applications de rechargement dur.
- E. L'arc submergé (SAW) :** Le métal fondu est généré par un arc électrique entre un fil et la pièce, sous un "manteau" de flux solide (poudre). L'arc électrique n'est pas visible. La configuration

de ce procédé et l'utilisation du flux en poudre limitent son application aux positions de soudage à plat. Le soudage à l'arc submergé est un procédé qui permet des taux de dépôt très élevés. Ce procédé est couramment utilisé pour le rechargement dur de grandes surfaces, telles que les surfaces de cuves, les plaques d'usure dans les industries minières, les rouleaux d'acier...etc. [22] [23].

Tableau III.1 : Différents procédés de rechargement dur.

Nom complet	Abréviation	Type	Précautions	Protection du bain	Dilution	Taux de Dépôt kg/h
Soudage sous gaz avec électrode de tungstène	TIGGTAW	Manuel / Automatique	Arc électrique	Gaz	5 - 15 %	0,5 - 1,5
Soudage à l'arc avec électrode enrobée	MMA SMAW	Manuel	Arc électrique Étuvage	Laitier	15 - 30 %	1,0 - 3,0
Soudage à l'arc avec électrode tubulaire	TE	Manuel	Arc électrique	-	8 - 30 %	2,0 - 4,0
Soudage à l'arc avec fil fourré sous protection gazeuse	MAG FCAW	Semi-automatique / Automatique	Arc électrique	Gaz	15 - 35 %	3,0 - 10,0
Soudage à l'arc avec fil fourré auto-protecteur (sans protection gazeuse)	FCAW	Semi-automatique / Automatique	Arc électrique	Avec ou sans laitier	15 - 35 %	3,0 - 12,0
Soudage à l'arc submergé	SAW	Automatique	Étuvage flux	Laitier	30 - 50 %	5,0 - 20,0

### III.3.3.2. Projection thermique

La projection thermique est une méthode qui utilise la chaleur pour projeter des particules de matériau fondu ou semi fondu sur la surface à revêtir. Les principales techniques de projection thermique comprennent la projection à la flamme, la projection à l'arc électrique et la projection plasma. Ces procédés sont souvent utilisés pour appliquer des revêtements de haute qualité sur de grandes surfaces ou des pièces de forme complexe.

- **Projection flamme avec refusion** : Les alliages utilisés pour ces dépôts sont des alliages à base Ni ou de Co contenant des éléments d'addition tels que le bore (> 1 %), le silicium (2 à 5 %), le chrome (10 à 20%), et pouvant être chargés en carbures (jusqu'à 70 %). Les dispositifs utilisés sont les torches à gaz avec lesquelles les opérations de projection et de refusions sont réalisées

simultanément. La refusions est alors réalisée soit à l'aide d'une torche oxyacétylénique ou oxypropane, soit à l'aide d'un dispositif à induction [21]. Les poudres utilisées sont les carbures de chrome ou de tungstène liés par du nickel ou du cobalt, l'alumine ou l'oxyde de chrome. Les dépôts obtenus ont l'avantage d'être très compacts (porosité inférieure à 1%), d'avoir une bonne adhérence. L'épaisseur du dépôt reste en général inférieure à 0,2 mm. Les domaines de l'aéronautique, la sidérurgie, la chimie ou le textile utilisent ce procédé assez contraignant par ses dimensions et ses nuisances sonores. [24].

- **Projection à l'arc électrique** : Le principe de la projection par arc électrique consiste à faire jaillir un arc électrique entre deux fils dégageant une énergie thermique importante d'environ 6000°C, variant selon le matériau utilisé et l'intensité choisie, ce qui fait fondre le métal des fils, un jet d'air comprimé situé dans l'axe du point de création de l'arc, pulvérise le métal fondu sur le substrat.

Les dépôts ont une épaisseur de 0,2 à 3 mm avec une porosité de 5 à 10%. Les matériaux projetés doivent être conducteurs. L'avantage du processus de projection à l'arc fil reste indéniablement son taux de déposition élevé le rendant parfait pour les grandes régions ou pour les applications de production de grand volume.

- **Projection au plasma atmosphérique (APS)** : Un plasma gazeux est initié par un arc électrique confiné (12 000 à 20 000 °K). Il est étranglé dans une tuyère d'où il s'échappe avec une vitesse élevée. On injecte alors la poudre dans ce jet de plasma grâce à un gaz porteur en général de l'argon. Les particules fondent et sont projetées sur le substrat par ce jet de gaz. Un intérêt de cette technique réside dans la diversité de substances projetables. Ainsi les métaux, les alliages, les céramiques, les carbures et les cermets peuvent être utilisés. [24].

### III.4. Aciers fortement allié au manganèse

Les aciers fortement alliés au manganèse sont des matériaux utilisés principalement dans la fabrication des marteaux de concasseurs. Ces aciers sont spécialement conçus pour résister aux conditions abrasives et aux chocs intenses rencontrés lors de l'écrasement des matériaux. Les aciers au manganèse Hadfield, également connu sous le nom d'aciers austénitiques au manganèse, est une variante spécifique de l'acier au manganèse. Il tire son nom de son inventeur, Sir Robert Hadfield, qui a développé cet acier au début du 20<sup>ème</sup> siècle. Voici quelques caractéristiques clés de l'acier au manganèse Hadfield :

- a. **Composition chimique et microstructure** : Les aciers fortement alliés au manganèse sont principalement composés de fer et de manganèse, avec des quantités variables d'autres éléments tels que le carbone, le chrome et le nickel. Le manganèse est l'élément clé dans ces alliages,

apportant des propriétés essentielles à leur performance. Une composition typique est donnée dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.2 : Composition chimique de l'acier Hadfield [18].

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu
0.95-1.3	0.65	11.5-14	0.05	0.03	0.5	0.75	1.75	0.045	0.3

Les aciers fortement alliés au manganèse présentent généralement une microstructure complexe. Ils peuvent contenir de l'austénite, de la ferrite. Des carbures de chrome et de manganèse peuvent également se former, contribuant à la dureté et à la résistance de ces aciers. Des inclusions de différents éléments, tels que le manganèse, le silicium, le nickel et le molybdène, peuvent être présentes dans l'acier, influençant ses propriétés mécaniques. La microstructure précise dépend des conditions de traitement thermique et de la distribution des éléments d'alliage. Des analyses supplémentaires peuvent être nécessaires pour caractériser en détail la microstructure de ces aciers, telle que la microscopie électronique à balayage et la diffraction des rayons X.

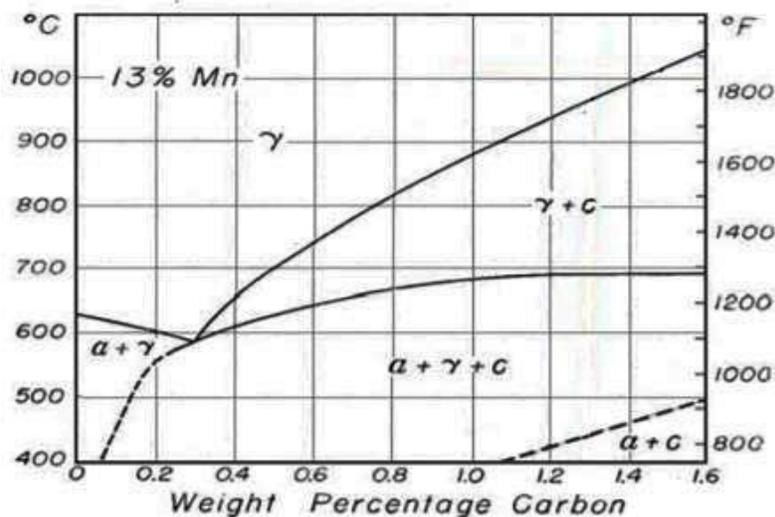


Figure II.8. Diagramme d'équilibre Fe-C à 13% de Mn

### b. Résistance à l'usure et à l'impact :

L'acier au manganèse Hadfield est principalement utilisé pour ses propriétés exceptionnelles de résistance à l'usure et à l'impact. Il est extrêmement dur et résistant à l'abrasion, ce qui en fait un choix populaire pour les applications nécessitant une résistance à l'usure élevée, telles que les blindages, les plaques de concassage, les chemises de broyeur, les mâchoires et les cônes, et les marteaux du concasseur.

**c. Ductilité et ténacité :**

Bien que l'acier au manganèse Hadfield soit très dur, il conserve également une bonne ductilité et une bonne ténacité, ce qui lui permet de résister aux charges d'impact élevées. Cela en fait un matériau adapté aux applications où une résistance à l'usure combinée à l'impact est nécessaire.

**d. Formation d'une couche durcie en surface :**

Lorsque l'acier au manganèse Hadfield est soumis à un impact ou à une pression, sa surface se durcit davantage en raison de la déformation plastique. Cela crée une couche dure et résistante à l'usure à la surface de l'acier, tandis que le noyau reste relativement plus doux et tenace. Cette combinaison de surface dure et de noyau tenace améliore les performances de l'acier au manganèse Hadfield.

**e. Soudabilité :**

L'acier au manganèse Hadfield peut être soudé, mais en raison de sa teneur élevée en manganèse et de sa sensibilité à la fissuration à chaud, il nécessite des procédures de soudage spécifiques. Des précautions doivent être prises pour prévenir la fissuration par l'hydrogène et des électrodes de soudage appropriées doivent être utilisées.

**f. Domaine d'utilisation :**

Les aciers au manganèse sont largement utilisés dans diverses applications industrielles en raison de leurs propriétés uniques. Ils sont principalement utilisés dans le domaine du concassage et du broyage, où ils assurent la fabrication de pièces d'usure résistantes, garantissant ainsi une longue durée de vie des équipements et une efficacité élevée dans le traitement des matériaux. De plus, ils sont employés dans la construction de structures résistantes, dans l'industrie minière pour la fabrication d'outils de forage et de pièces d'excavation, grâce à leur résistance aux conditions extrêmes et à l'abrasion. Les aciers au manganèse offrent une combinaison de résistance, de ténacité et de résistance à l'usure, jouant ainsi un rôle vital dans de nombreuses applications industrielles pour améliorer l'efficacité et la durabilité des équipements et des infrastructures.

**III.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, Nous avons exploré les différents mécanismes d'usure auxquels les matériaux peuvent être soumis, ainsi que les facteurs qui influencent ce processus. Nous avons également discuté des techniques de rechargement pour protection contre l'usure, telles le rechargement dur par soudage et par projection thermique. Enfin nous avons exposés les aciers fortement allié utilisé dans la fabrication des marteaux du concasseur.

## Chapitre IV : Étude expérimentale

### IV.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la partie expérimentale de notre travail. Une partie de ce travail expérimental a été réalisée à la cimenterie de Meftah, tandis que l'autre partie a été réalisée dans notre département (génie mécanique, Blida). Tout d'abord, nous présentons le concasseur à marteau utilisé dans la production du ciment à la cimenterie de Meftah, à Blida. Ensuite, nous exposons la méthode utilisée pour mesurer l'usure des marteaux du concasseur. En troisième lieu, nous décrivons les moyens et les techniques utilisés pour réaliser les rechargements durs (Cimenterie Meftah et laboratoire LTSM Blida1). Enfin, nous exposons les différents instruments utilisés dans la préparation métallographique, la caractérisation métallurgique et la caractérisation mécanique, en suivant un protocole expérimental.

### IV.2. Description du concasseur à marteau KHD de cru :

Il s'agit d'un concasseur à marteau de type KHD utilisé pour le concassage des matières premières. C'est un équipement essentiel utilisé dans la cimenterie de Meftah pour le broyage des matières premières (Figure IV.1). Il joue un rôle clé dans le processus de production du ciment. Sa fonction est de fragmenter le matériau, dont la granulométrie à l'entrée peut atteindre jusqu'à 100 mm, pour obtenir une granulométrie de sortie de 0-10 mm grâce à l'impact. Il est principalement utilisé pour le concassage de matières sèches.



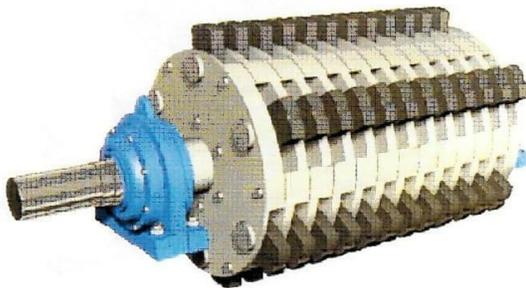
Figure IV.1. Photo réel du concasseur De cru KHD, PHM 3000\*3000

### IV.2.1. Les différents composants du concasseur

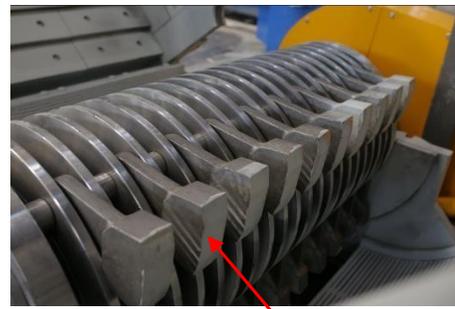
Le concasseur est composé de plusieurs éléments :

- Caisson robuste doté de plaques de blindage et d'un déflecteur. Ces éléments offrent une protection et une sécurité accrues aux composants internes du concasseur.
- Rotor : pièce centrale du concasseur, il est doté de porte marteau et de marteaux qui sont responsables du processus de broyage des matières premières par impact (Figure.VI.2).
- Goulotte : l'endroit où les matières premières sont alimentées dans le concasseur. Elle permet un chargement régulier et contrôlé des matières premières, assurant un flux continu pour le broyage efficace.
- Conduite d'admission de GAZ chaud : Ce gaz chaud peut être utilisé pour le séchage des matières premières ou pour d'autres procédés liés à la production de ciment. De plus, une conduite d'évacuation est présente pour permettre l'évacuation des gaz et des matériaux concassés.
- Conduite d'évacuation GAZ/matière : elle permet l'évacuation des gaz et des matériaux concassés.

L'entraînement du rotor est réalisé par un moteur puissant d'une puissance de 900 kW. La transmission de la puissance du moteur au rotor se fait par l'intermédiaire de courroies, dont le nombre total est de 29.



a. Rotor



b. Marteau

Figure.IV.2. Rotor doté de marteaux

## IV.2.2. Etude technologique du concasseur à marteaux :

### IV.2.2.1. Caractéristiques :

Les concasseurs sont disponibles dans différents types et tailles pour s'adapter à diverses applications. Ils offrent une grande efficacité énergétique grâce à des systèmes de contrôle avancés et sont équipés de dispositifs de sécurité pour assurer un fonctionnement sûr. Les caractéristiques du concasseur étudié sont bien expliquées dans les tableaux IV.1 et Tab IV.2.

#### a. Caractéristiques générale

Tableau IV.1. Caractéristiques générale

Fournisseur	KHD
Marque	9 8446-5-1408 Bayar
Type	PHM 3000*3000
Poids	30 T

#### b. Caractéristique de référence, la machine et moteur :

Tableau IV.2. Caractéristique de référence

Produit à l'entrée	Calcaire /argile/sable/fer
Débit	350 (200) t/h
Taille du produit entré	0-30mm
Calibre finale	0-10mm
T° Gaz	413 °c
Humidité	10%
<b>Rotor</b>	
Diamètre	3000
Moment d'inertie	$J = 23780 \text{ Kg.m}^2$
Nombre de tour	259 tr/mn
Vitesse périphérique du rotor	40m/s
Arbre Ø	300mm
Nombre d'axe porte marteau	6
Nombre de marteaux	54
Poids	100 Kg
Eau, refroidissement	max 2400 l/h
<b>Moteur</b>	
Marque	Siemens
Type	1657.710.6 64c 90.Z
Puissance	900KW
Poids	6990 Kg
Vitesse nominale	1000 l/min

### IV.2.2.2 Mode de fonctionnement :

L'introduction de la matière se fait par la partie supérieure à travers une goulotte munie de chicanes disposées en escaliers pour éviter la chute directe de la matière sur les marteaux (Figure. IV.3). Avant que la matière entre dans le concasseur, elle entre en contact avec les gaz chauds provenant aussi par la partie supérieure. Ce contact permet de réduire en partie l'humidité de la matière. La matière près séchée et les gaz entrent ensemble dans le concasseur dont le rotor fonctionne à une vitesse périphérique de l'ordre de 40 m/s. Le concassage de la matière arrivant avec une granulométrie allant jusqu'à 100 mm se fait entre le mécanisme de percussion et le blindage par impact avec les marteaux du rotor. Les particules, ayant pour granulométrie de 0-10 mm sont aspirées à travers le séparateur à l'aide d'un ventilateur de 1600 KW. La matière n'ayant pas atteint le degré de finesse suffisant est encore concassé au niveau du déflecteur latéral et repasse à nouveau dans le concasseur.

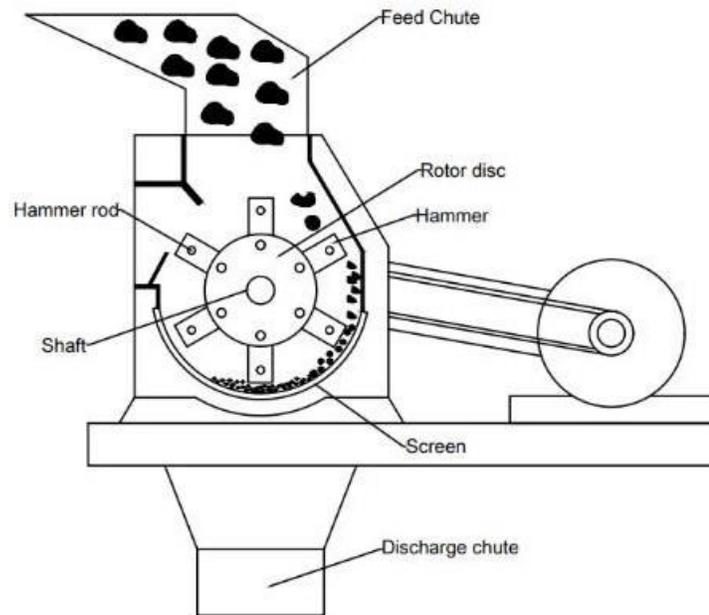


Figure. IV.3. Mode de fonctionnement d'un concasseur à marteau

### IV.2.2.3. La chaîne cinématique

La chaîne cinématique du concasseur à marteau comprend plusieurs éléments, on retrouve le moteur d'entraînement, la transmission, le rotor et les marteaux (Figure IV.4). Ces éléments travaillent ensemble pour permettre au rotor de tourner à grande vitesse et aux marteaux de frapper le matériau, réalisant ainsi le processus de concassage. La figure et le tableau suivants représentent les composants de la chaîne cinématique d'un concasseur à marteau.

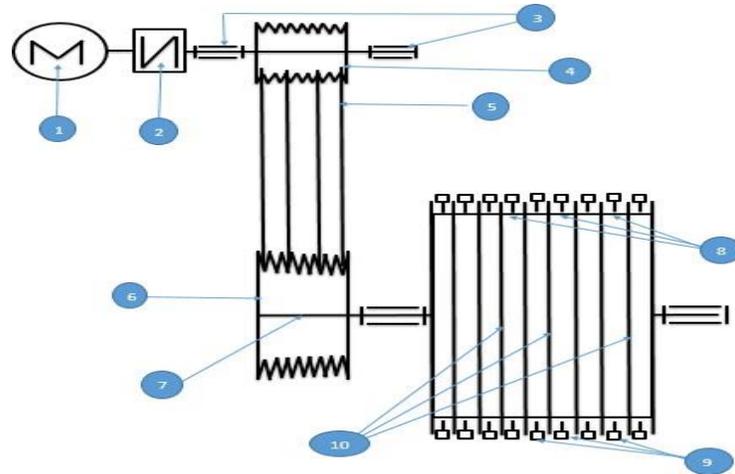


Figure IV.4. Chaîne cinématique du concasseur à marteaux

Tableau IV.3. Les composants de la chaîne cinématique

Repère	Désignation	Nombre
1	Moteur	1
2	Accouplement	2
3	Palier	4
4	Poulie motrice	1
5	Courroies	29
6	Poulie réceptrice	1
7	Arbre principale	1
8	Arbre porte marteaux	6
9	Marteaux	54
10	Disques	10

### IV.3. Les marteaux de Concasseur KHD type PHM 3000\*3000

#### IV.3.1. Définition

Les marteaux du concasseur de la cimenterie de Meftah sont des pièces métalliques moulés, ils pèsent près de 100 kg. Ils sont fixés sur un rotor et alignés sur six axes chacun porte neuf marteaux dont le rôle est de concasser la matière arrivante par impact, assurant ainsi le processus de concassage de manière efficace. La forme et les dimensions sont représentés dans les figures IV.5-6.

- Hauteur total  $h = 430$  mm.
- Largeur  $l = 170$  mm.
- Longueur  $L = 280$  mm.

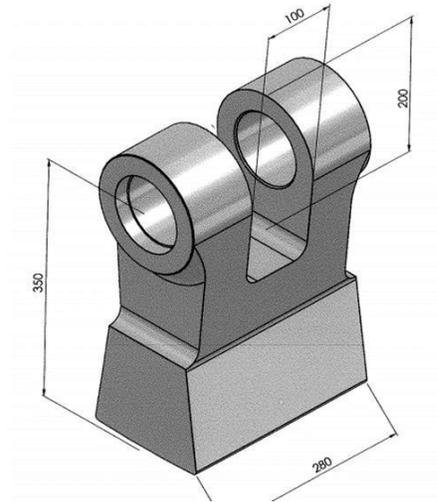


Figure IV.5. Dessin technique d'un marteau

La figure suivante montre un plan technique descriptif du marteau dont les dimensions sont très claires en coupe A-A.

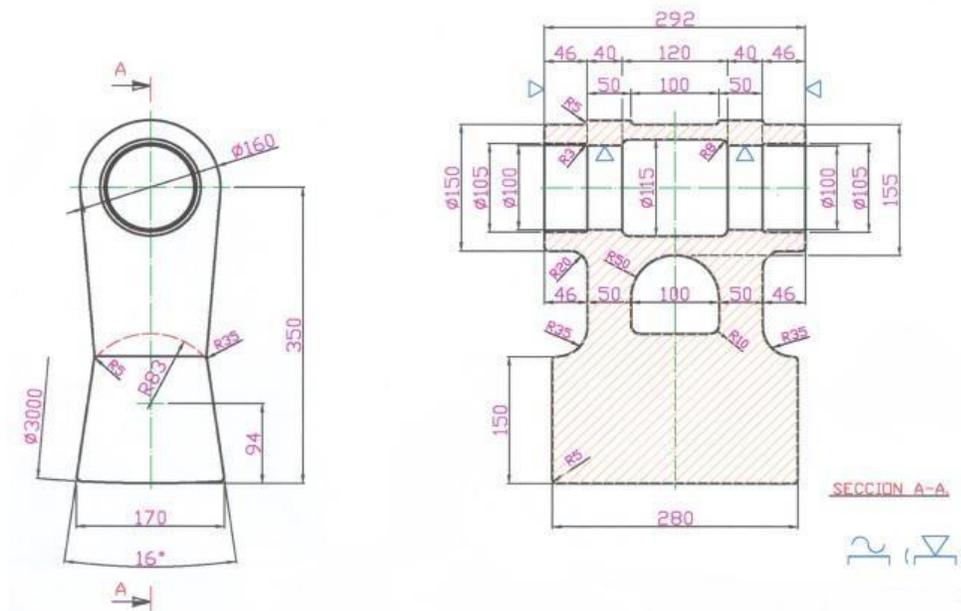


Figure IV.6. Plan technique des marteaux

### IV.3.2. Fiche technique du marteau :

Le marteau est fabriqué à partir d'un d'acier fortement allié au manganèse très résistant. Les marteaux en acier au manganèse sont capables de résister aux forces d'impact intenses générées lors du concassage des matériaux durs, ainsi ils constituent un choix privilégié pour le concassage grâce à leur résistance à l'usure, à la fatigue et à leur ténacité accrue. Ci-dessous la composition et la dureté du matériau de base du marteau.

Tableau IV.4. Composition et caractéristiques du matériau de base

Nuance	Manganèse	Chrome	Dureté initial	Pendant le travail
FGN1C	11 - 13%	1 – 1,5%	210 HB	600 HB

Un rechargement dur et résistant d'épaisseur de 10 mm est réalisé initialement par le fournisseur pour renforcer les parties travaillantes sur la base et les côtés du marteau (Figure IV.7). Cela améliore leur résistance à l'usure et aux chocs, prolongeant ainsi leur durée de vie et assurant une performance continue du concasseur. Aucune indication ne nous a été fournie sur le type et la composition de ce rechargement.

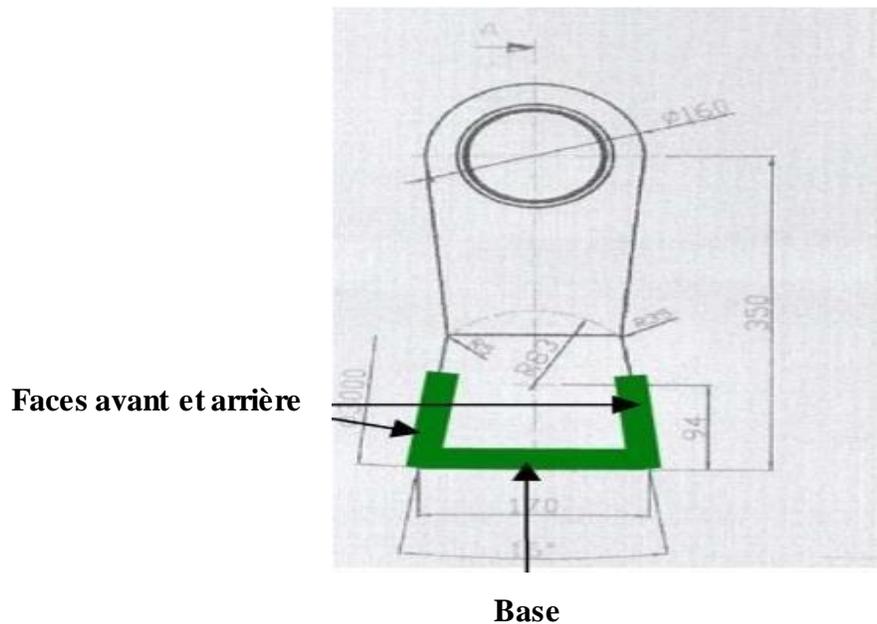


Figure IV.7. Dessin technique définissant les zones rechargées

### IV.3.3. Réparation des marteaux usés :

Afin de prolonger la durée de vie des marteaux du concasseur une réparation est faite pour une réutilisation. Dans cette démarche, nous avons employé deux techniques distinctes pour réaliser le rechargement dur. Par la suite, nous avons procédé à une comparaison des propriétés résultantes. La première technique est celle utilisée au niveau de la cimenterie de Meftah, il s'agit d'un rechargement par soudage à l'arc. Le métal d'apport pour le rechargement des marteaux après usure est une électrode basique en acier faiblement allié de spécification AWS E7018.1. La composition et les propriétés mécaniques dont données ci-dessous :

Tableau. IV.5. Composition du métal d'apport AWS E7018.1.

Elements	Ni	Cr	Mo	Si	Mn	C	P	S
(wt.%)	traces			0.4	1.35	0.07	0.02<	0.02 <

Tableau. IV.6. Caractéristiques mécaniques du métal d'apport AWS E7018.1 :

Résistance à la traction (MPa)	Allongement (%)	Résilience en Joule (à -45°)
500	22	47

La deuxième technique utilisée pour réaliser le rechargement dur est la projection thermique à la flamme avec refusion. La poudre utilisée dans cette technique est une poudre d'un alliage NiCrBSi nommé sous Borotec 10009 selon la désignation du producteur Castollin Eutectic.

Les compositions chimiques de cette poudre sont résumées au Tableau IV.7.

Tableau IV.7. Composition chimique la poudre de projection

Elements	Ni	Cr	B	Si	Fe	C
(wt.%)	Bal.	15.2	3.2	4	4	<0.6

La préparation des échantillons et la méthodologie de réalisation de ces deux rechargements sont détaillés dans section IV.5.

#### **IV.4. Evaluation de l'usure des marteaux du concasseur :**

Mesurer l'usure du marteau de concasseur est essentiel pour garantir la performance optimale du concasseur, réduire les coûts d'exploitation, prolonger la durée de vie du marteau et assurer la sécurité des opérateurs. La mesure de l'usure des marteaux d'un concasseur peut être effectuée de différentes manières, selon le type de concasseur et les spécifications du fabricant. La méthode couramment utilisée au niveau la cimenterie de MEFTAHA pour mesurer l'usure des marteaux du concasseur par le superviseur est décrite ci-dessous :

##### **a. Préparation de surface :**

D'abord, il est essentiel de s'assurer que le concasseur est hors tension et de prendre toutes les précautions de sécurité nécessaires. Ensuite, procédez au nettoyage des marteaux à l'aide d'une brosse métallique ou d'un outil approprié pour éliminer les dépôts de matériaux concassés et les débris présents sur les marteaux.

**b. Mesurer de l'usure :**

Les marteaux sont numérisés afin de suivre l'usure de chaque marteau. L'usure est relevée périodiquement presque chaque mois, les mesures obtenues sont notées sur un tableau. L'évaluation de l'usure des marteaux est faite en se basant sur la longueur de la tête et du marteau (Figure IV.8), ainsi que sur le jeu entre le marteau et le blindage. Une diminution de la longueur de la tête et du marteau (C), ainsi qu'une augmentation du jeu entre le marteau et le blindage (A), peuvent indiquer une usure significative. Les spécifications fournies par le fabricant du concasseur définissant les limites d'usure acceptables pour la longueur de la tête du marteau, ainsi que pour le jeu entre le marteau et le blindage sont donné au tableau.IV.4.

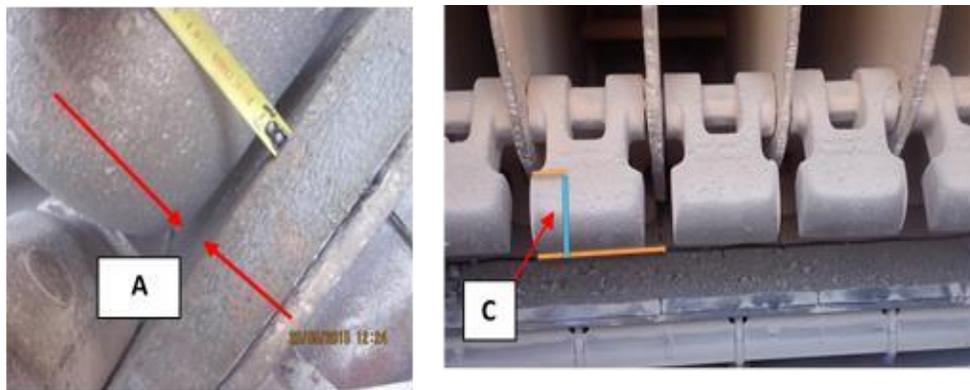


Figure IV.8. Technique d'évaluation de l'usure du marteau

Tableau IV.8. Spécifications du fabricant

Point	Valeur initiale (mm)	Valeur Alarme (mm)	Valeur Action(mm)	Outils
C long tete de marteau	<b>150</b>	90	80	metre+reglé
A jeu entre marteau et le blindage	<b>10</b>	30	50	metre+reglé

Les outils utilisés pour mesurer les dimensions A et C sont une règle et un mètre ruban. La longueur de la tête et du marteau (C) et le jeu entre le marteau et le blindage (A) des marteaux neufs sont mesurés initialement avant d'utiliser les marteaux. Ces mesures sont prises comme références. Après un mois d'utilisation ces deux paramètres (A et C) sont remesurés de la même manière que précédemment. Ainsi l'usure peut être mise en évidence.

Une inspection des marteaux est aussi faite pour repérer d'autres signes d'usure tels que des fissures, des déformations ou des encoches.

**d. Comparaison avec les spécifications du fabricant :**

En comparant les valeurs mesurées après usure (**A et C**) avec les spécifications du fabricant (Tableau IV.8) une décision peut être prise si les marteaux peuvent continuer à travailler ou sont usés au-delà des valeurs seuils, donc ils doivent être réparés ou remplacés. Si l'usure dépasse les limites recommandées, les marteaux doivent être retirés immédiatement pour éviter soit le remplacement ou la réparation. Le retrait immédiat des marteaux usés du concasseur est obligatoire pour prévenir la baisse d'efficacité, les risques de blocage, les dommages supplémentaires et les problèmes de sécurité des travailleurs.

**IV.5. Réalisation des rechargements durs****IV.5.1. Prélèvement des échantillons :**

La réalisation des rechargements durs est effectuée sur un métal de base identique à celui utilisé dans la fabrication du marteau. Pour cette raison, nous avons procédé au prélèvement des échantillons à partir d'un marteau usé. Afin de garantir l'intégrité du matériau et vérifier qu'il n'a pas subi de modifications, le coupage a été effectué thermiquement au niveau de la région supérieure du marteau. Cette opération a été réalisée à la cimenterie de Meftah en utilisant un chalumeau à flamme oxyacétylénique (voir Figure IV.9).



Figure IV.9. Coupage oxyacétylénique des échantillons

**IV.5.2. Préparation des surfaces**

Les blocs de marteau usé, découpés à la flamme oxyacétylénique, ont ensuite été soumis à des opérations de fraisage afin d'enlever la zone de coupage oxyacétylénique et la zone affectée par la

chaleur lors du coupage ainsi pour avoir des surfaces planes. Le bloc a été solidement fixé sur une table de fraisage et une fraise rotative a été utilisée pour enlever progressivement la matière, donnant ainsi aux échantillons leur forme parallélépipédique (Figure IV.10-11). Les échantillons obtenus à partir du bloc de marteau sont ultérieurement utilisés pour effectuer des rechargements durs.



Figure IV.10. Machines de fraisages



Figure IV.11. Forme d'échantillon obtenu après fraisage

### **IV.5.3. Dépôt dur par projection thermique à flamme**

Avant la déposition, nous avons procédé à la préparation de la surface par sablage. Le sablage a été utilisé pour nettoyer la surface en éliminant les oxydes et les graisses, tout en augmentant la rugosité afin d'améliorer l'adhérence. Cette augmentation de la rugosité est obtenue en projetant à grande vitesse des grains de sable d'alumine ( $Al_2O_3$ ) de taille micrométrique sur l'échantillon à l'aide d'air comprimé sous une pression élevée. Le sablage a été réalisé au laboratoire LTSM, et une vue de

la grenailleuse est présentée et l'aspect des éprouvettes après l'opération de grenailage est également illustré à la Figure IV.12.



Surface de pièce après sablage

Figure IV.12. Grenailleuse

L'élaboration du revêtement dur a été faite par projection thermique à la flamme oxyacétylénique. Une torche à flamme de type fusion-refusions de Castollin Eutectic désigné par Eutalloy Super Jet a été utilisée pour cet objectif (Figure IV.13) avec les paramètres de projection donnés au tableau.IV.10.



Figure IV.13. Pistolet a flamme-poudre " kit Eutalloy "

Le processus de déposition s'est déroulé en deux étapes. Tout d'abord, un léger préchauffage a été réalisé pour améliorer l'adhésion, puis la poudre NiCrBSiFe (Tableau IV.7) a été projetée en six

passes à l'aide de la flamme. Cette première étape de projection thermique a permis de déposer une couche de matériau dur sur les surfaces de nos échantillons.

Tableau.IV.10. Paramètres de projection.

Paramètre	Valeur
T° de pré-chauffage du substrat, °C	200 – 250
Distance de projection, mm	20-30
Angle de projection	90°
Pression d'oxygène, bar	2
Pression d'acétylène, bar	0.5
Distance de la refusion, mm	10 – 15
Angle de refusion	90°

Ensuite, la deuxième étape a consisté à la refusion à la flamme juste après déposition. Cette étape a été réalisée pour fondre et densifier la couche de matériau précédemment déposée (Figure IV.14). La flamme a été soigneusement ajustée afin de fournir la chaleur nécessaire pour atteindre la fusion du matériau et permettre une meilleure adhésion avec le substrat.

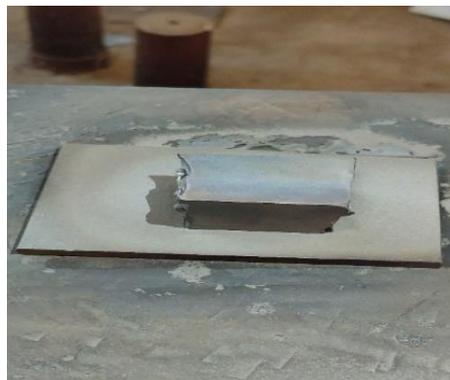


Figure IV.14. Photo d'échantillon après projection thermique et refusion

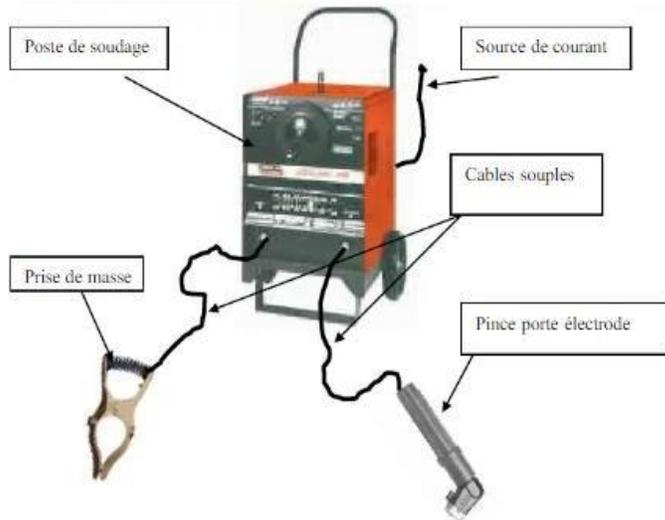
#### IV.5.4. Rechargement par soudure

La deuxième technique utilisée pour réaliser le rechargement dur est le soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée (SMAW). Tout d'abord, la préparation de la pièce est essentielle. Cela implique un nettoyage minutieux de la surface, en éliminant les contaminants tels que la rouille, les graisses. Ensuite, la pièce est fixée de manière sécurisée pour garantir une stabilité pendant le

processus de soudage. Le métal d'apport utilisé est une électrode basique E-7018 dont la composition et les propriétés sont citées dans les tableaux. IV.5-6. Le soudage a été réalisé en deux passes avec les paramètres cités ci-dessous :

Tableau.IV.11. Paramètres de rechargement par soudage à l'arc SMAW.

Electrode AWS	Diamètre électrode (mm)	Intensité de courant (A°)	Voltage V
E-7018	3.2	90-120	25-30



Pièce après soudage

Figure IV.15. Procédé de rechargement par soudage SMAW

## **IV.6. Techniques de caractérisation microstructurale et mécanique**

### **IV.6.1. Usinage :**

Avant d'effectuer la préparation métallographique des échantillons rechargés par soudage, une opération préalable de fraisage a été faite sur le côté. Cette étape de fraisage a été réalisée pour éliminer les résidus de soudage et obtenir une surface plane prête à la préparation métallographique ainsi que pour faciliter la manipulation des échantillons pendant l'opération de polissage.

### **IV.6.2. Préparation métallographique :**

La caractérisation microstructurale et mécanique requièrent un polissage fin de la surface des échantillons à caractériser. Pour cette raison avons effectué un polissage mécanique manuel visant à retirer par abrasion les défauts, les rayures et les aspérités afin d'obtenir une surface plane avec un état miroir. Cela a été réalisé en utilisant des papiers abrasifs au carbure de silicium (SiC) de

différentes granulométries (80, 280, 400, 600, 800, 1000, 1200 et 2000). À chaque étape, la taille des grains d'abrasif diminue, permettant d'affiner progressivement l'état de polissage et de réduire la rugosité.

Ensuite, un polissage de finition très fin a été effectué en utilisant une suspension d'alumine  $Al_2O_3$  avec une granulométrie de  $0,3 \mu m$ , appliquée sur un tissu en soie. Après ce polissage de finition, les échantillons ont été rincés à l'eau et séchés. La Figure IV.16 montre la polisseuse utilisée au niveau de laboratoire SDM du département mécanique.



Figure IV.16 : Polisseuse.

### IV.6.3. Attaque chimique

Afin de révéler les différents constituants de la microstructure nous avons utilisé le Nital comme réactif. La surface des pièces est mouillée de la solution pendant quelques secondes (5s) et nettoyée rapidement avec de l'eau du robinet, l'opération est suivie toute suite d'un séchage avec le séchoir.



Figure IV.17. Attaque chimique.

### IV.6.3. Observation microscopique

Dans notre travail, nous avons procédé à des observations microscopiques à l'aide d'un microscope optique disponible au laboratoire LTSM du département mécanique. Ce microscope est équipé d'une caméra numérique permettant le transfert des images vers un ordinateur. La Figure IV.18 montre une photo du microscope utilisé.



Figure IV.18. Microscope optique utilisé.

#### IV.6.4. Essai de Microdureté Hv 0.05 :

Pour étudier l'évolution de la microdureté en profondeur, nous avons effectué des profils de microdureté Vickers en coupe transversale à partir de la surface de l'échantillon passant par les couches déposés jusqu'au substrat en utilisant une charge de 50g (Hv 0.05). Ces profils de microdureté nous ont permis d'analyser les variations de dureté dans différentes zones spécifiques, à savoir le substrat, l'interface et le dépôt. Les mesures ont été réalisées avec précision à l'aide d'un microduromètre hautement fiable et de pointe, le modèle INNOVATEST FLACON 400.

#### IV.6.4. Essai de dureté Hv20 :

Les mesures des duretés des échantillons ont été réalisées sur la surface extérieure (horizontale) des échantillons en utilisant un Duromètre universel de type INNOVATEST du laboratoire SDM. Les tests ont été faits conformément à la méthode la méthode de Vickers sous une charge de 20Kg.



A) Duromètre.



B) Microduromètre

Figure IV.19. Equipements de caractérisation mécanique

## Chapitre V

### Résultats et interprétations

#### Introduction

Ce chapitre présente les résultats et la discussion de notre étude expérimentale. Les résultats portent sur l'étude microstructurale, la caractérisation mécanique du métal de base et des deux rechargements durs, ainsi que l'analyse de l'usure du marteau. Ces résultats sont essentiels pour comprendre la microstructure, les propriétés mécaniques et la performance du marteau du concasseur. Nous prévoyons qu'ils fournissent également des informations pour guider le choix du rechargement dur le plus approprié.

#### V.1. Observation macrographique

D'après la figure V.1, la macrographie de l'échantillon rechargé par soudage révèle clairement quatre zones distinctes sur une coupe transversale. La première zone correspond au métal de base (MB). La deuxième zone, repérée par ZAT, représente la zone affectée thermiquement due aux températures élevées atteintes lors du procédé de rechargement par soudage. La troisième zone, notée DP, correspond au dépôt proprement dit réalisé par la fusion du métal d'apport et une partie du métal de base par soudage. Enfin, la quatrième zone située sur les côtés et notée ZATC, est formée suite aux températures très élevées atteintes lors du processus de découpage avec le chalumeau à flamme oxyacétylénique.

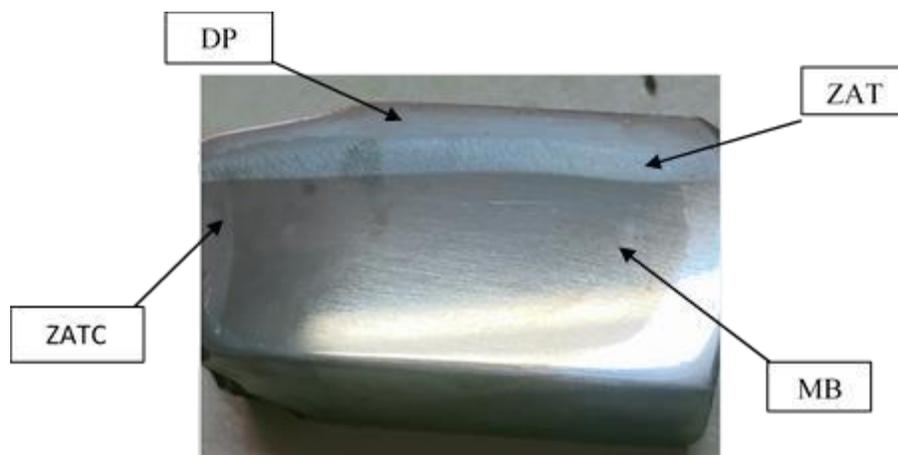


Figure V.1. Macrographie de l'échantillon rechargé par soudage

## V.2. Observations microstructurales

### V.2.1. Rechargement dur par soudage

#### V.2.1.1 Metal de base MB :

La figure V.2 présente la microstructure du métal de base obtenue par microscopie optique. D'après cette micrographie, le métal de base (acier au manganèse) présente une structure constituée de deux types de phase et des points gris foncé. En se basant sur le diagramme d'équilibre à 13% Mn fournie à la figure II.8, la phase claire représente la phase austénitique  $\gamma$  et la phase sombre peut être identifiée comme la ferrite  $\alpha$ . Les points gris foncé peuvent être des inclusions de manganèse-silicium.

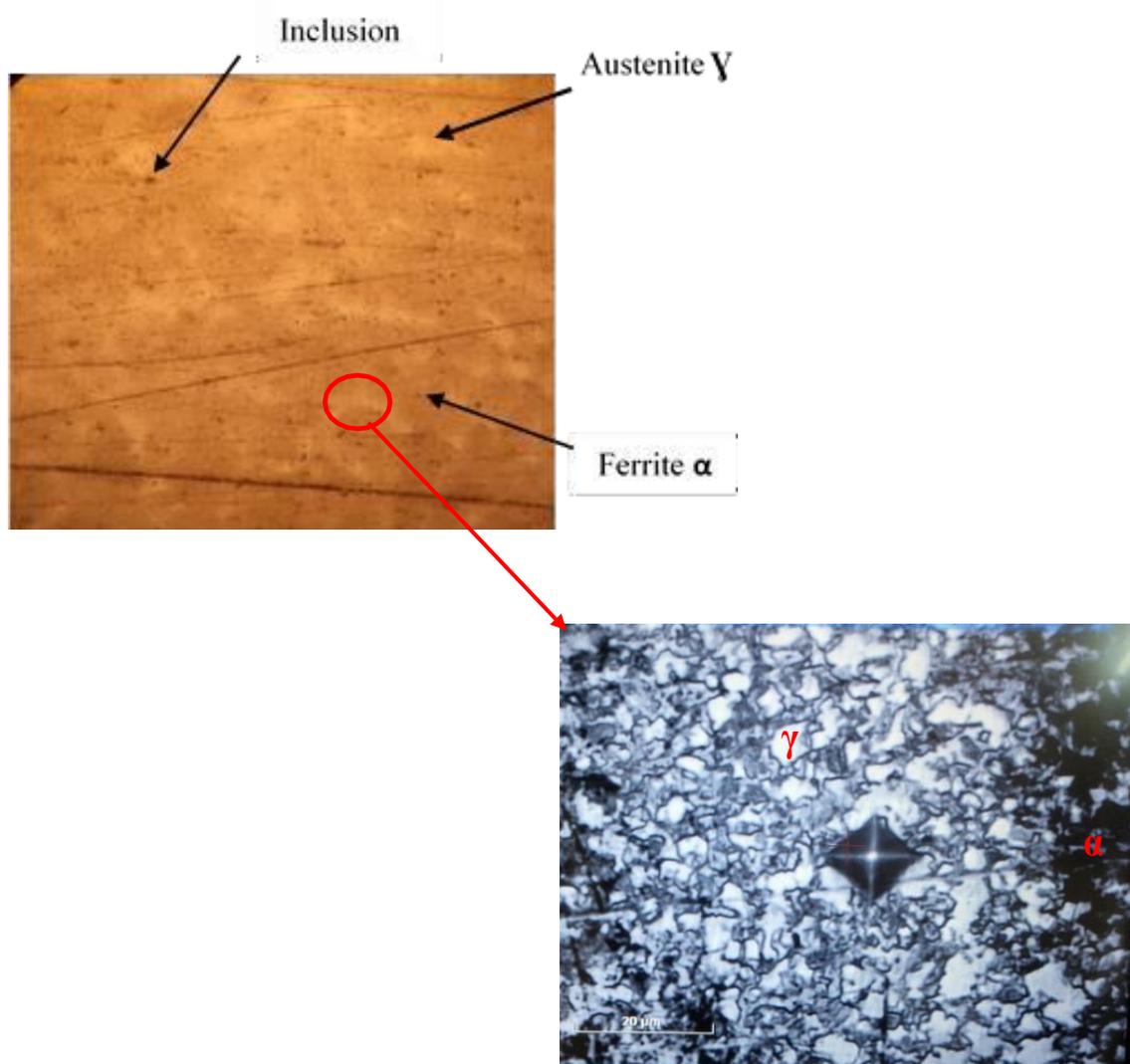


Figure V.2. Micrographie optique du métal de base

### V.2.1.2. Zone affectée thermiquement ZAT :

L'examen microscopique par microscopie optique de la zone affectée thermiquement révèle pratiquement les mêmes phases que le métal de base, une phase austénite ( $\gamma$ ) en claire et une phase ferritique sombre (Figure V.3). Cependant, on constate un grossissement des grains par rapport au métal de base avec une forme plus au moins globulaire.

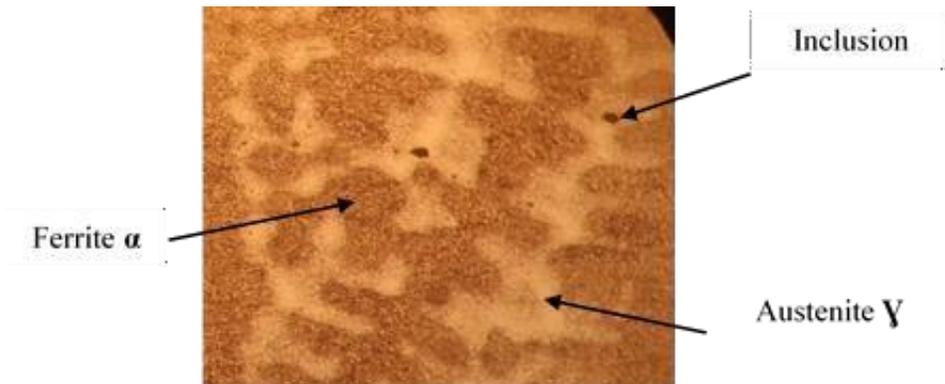


Figure V.3. Microstructure de la ZAT

La ZATC présente pratiquement la même microstructure que la ZAT.

### V.2.1.3. Zones de liaison ZL :

L'observation microscopique a révélé l'existence de deux zones de liaison, une zone de liaison entre le MB et la ZAT (ZL1) et une deuxième zone de liaison entre la ZAT et le DP (figure V.4). La photo illustre clairement une différence de morphologie et de taille de grain au niveau de ces deux zones.

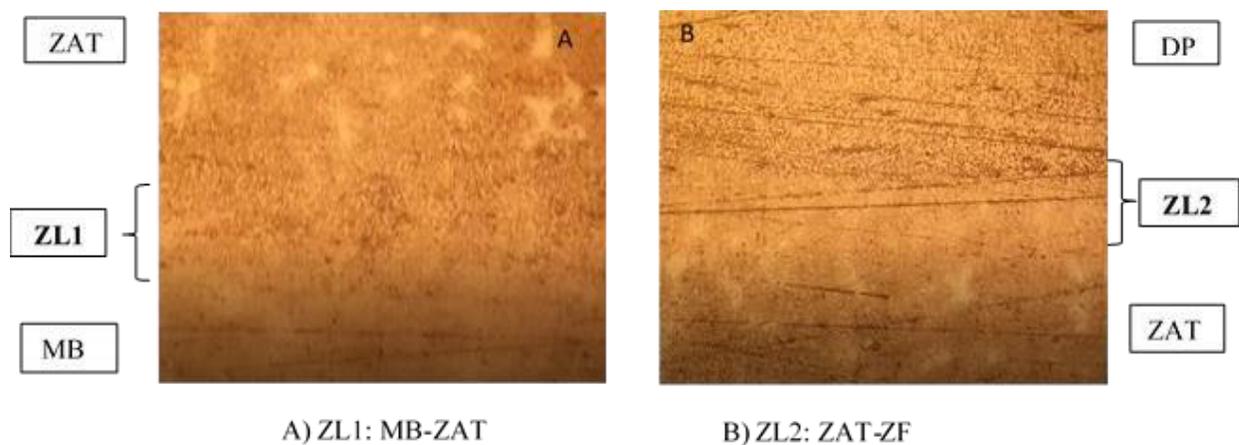


Figure V.4. Zones de liaison

#### V.2.1.4. Dépôt :

La Figure V.5 présente la microstructure du dépôt DP réalisé par soudage. La microstructure à différentes échelles, montre une morphologie totalement différente à celle du métal de base. Cette microstructure est caractérisée par une morphologie fine et plus ou moins lamellaire constituée principalement de ferrite plus perlite. La ferrite apparaît en blanc et la perlite en noir. La perlite est de plus faible proportion concentrée au niveau des joints des grains.

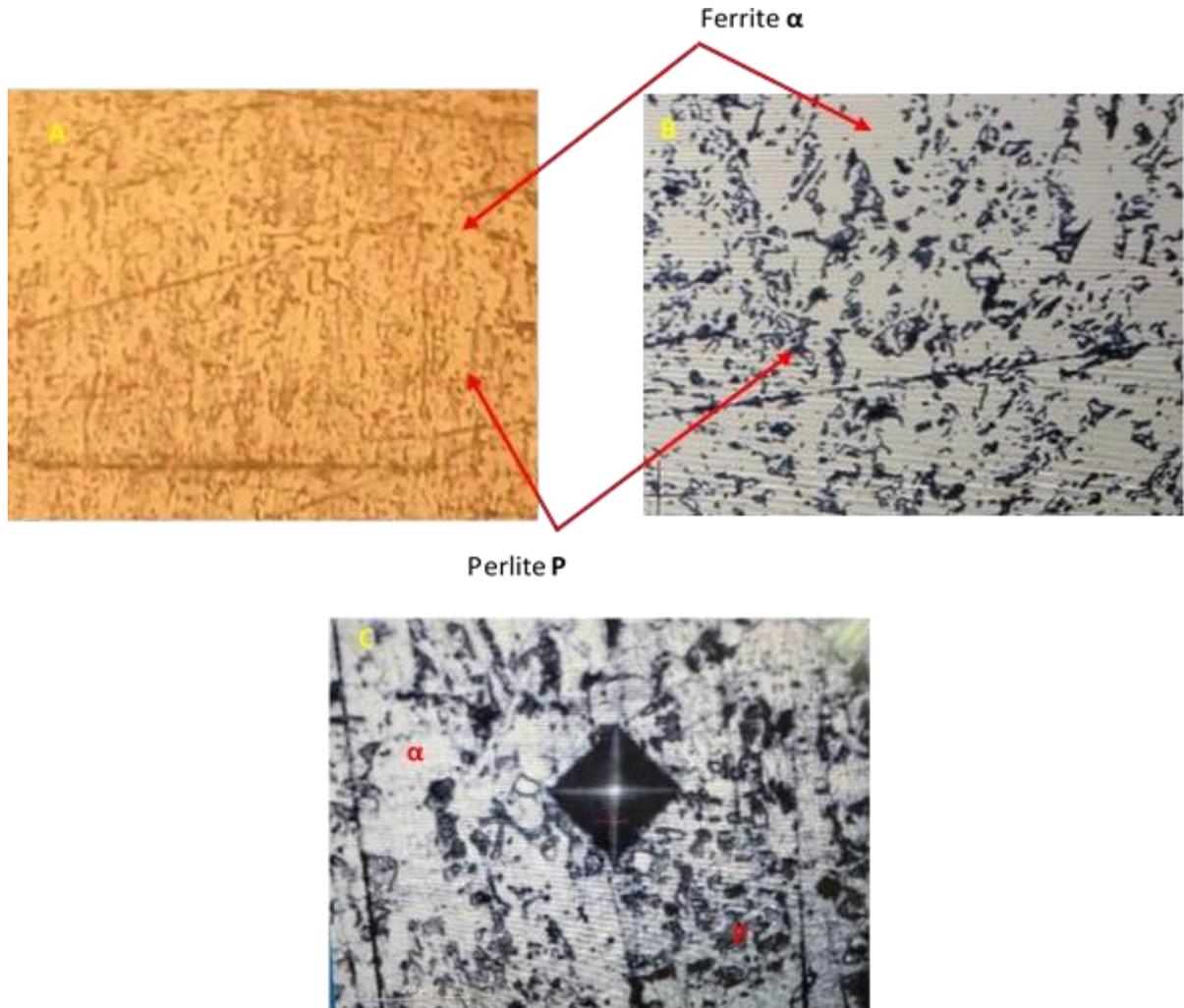


Figure V.5. Microscopie optique du revêtement déposé par soudage avec différents grossissements a) faible b) intermédiaire c) fort

### V.2.2. Échantillon rechargé par projection thermique

Après une bonne préparation métallographique, nous sommes passés à l'observation au microscope optique. La micrographie obtenue est représentée dans la figure V.6, d'après cette micrographie, on peut constater ce qui suit :

- L'absence de la zone affectée thermiquement.
- La présence de certains défauts ainsi que des porosités dans le revêtement.
- Le revêtement présente une bonne adhésion avec le substrat.
- La microstructure est formée de l'austénite de Nickel en claire et une deuxième phase sombre.
- Moins de défauts et de porosités, pas de délaminages à la zone de liaison, ce qui est un indice de bonne adhésion suite à une liaison métallurgique.

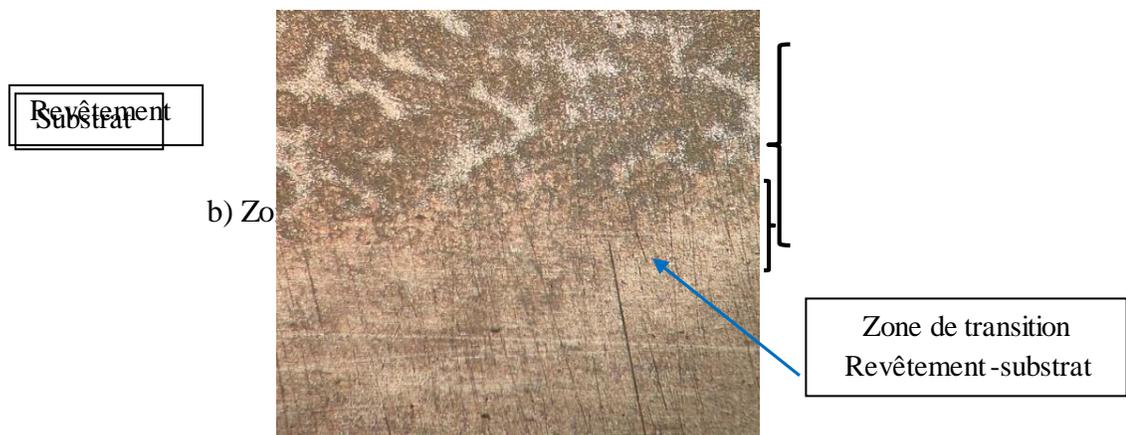
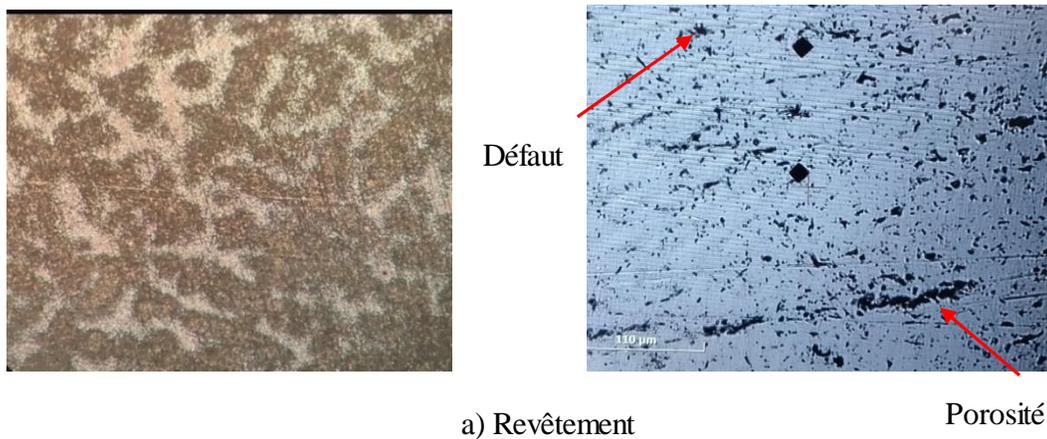


Figure V.6. Microstructure du revêtement projeté thermiquement

### V.3. Caractérisation mécanique

#### V.3.1. Essai de microdureté

##### V.3.1.1 Rechargement par soudage :

Pour obtenir un profil représentatif de la distribution de la dureté dans l'échantillon. Les mesures de microdureté Vickers Hv ont été effectuées sur une coupe transversale de l'échantillon en utilisant une charge de 50g. 32 points de mesure ont été pris avec un espacement de 80  $\mu\text{m}$  à 130  $\mu\text{m}$ , en partant du dépôt et en se déplaçant vers le substrat.

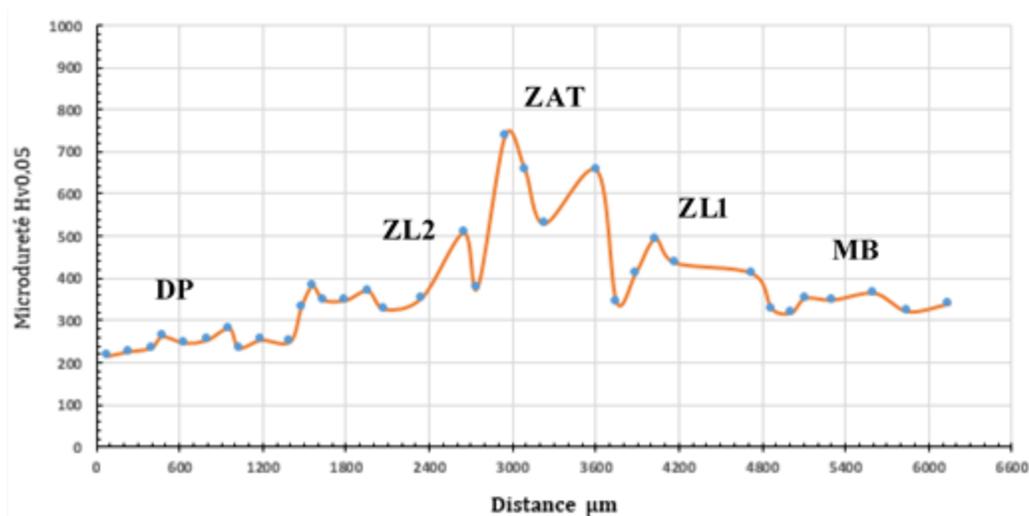


Figure V.7 : Courbe de microdureté Vickers  
Rechargement par soudage

Les résultats de microdureté pour le rechargement par soudage présentés dans la figure V.7 révèlent des variations significatives de dureté dans les différentes zones de l'échantillon. Le profil de microdureté a permis de mettre en évidence les différentes zones du rechargement, ainsi que leur étendue. Les valeurs les plus faibles de microdureté ont été enregistrées au niveau du dépôt avec une moyenne autour de 250 Hv, ce qui peut être attribué au faible pourcentage de carbone 0.07% et les faibles pourcentages des éléments d'additions. Les valeurs les plus élevées de microdureté ont été observées au niveau de la zone affectée thermiquement (moyenne autour de 600 Hv), où des températures élevées ont été atteintes. Ces températures ont pu induire des transformations microstructurales et augmenter la dureté du matériau. Ensuite, elle diminue progressivement pour atteindre des valeurs intermédiaires dans le métal de base (moyenne autour de 350 Hv).

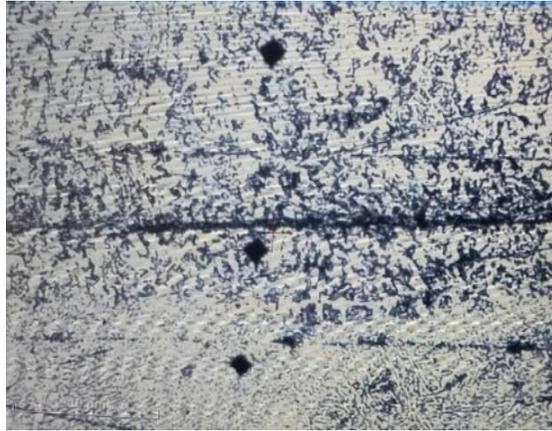


Figure V.8 : Micrographies illustrant quelques indentations

### V.3.1.2 Échantillon rechargé par projection thermique

Les résultats de test de microdureté pour le rechargement par soudage sont présentés dans la figure V.9. D'après cette figure, la microdureté enregistrée en niveau du substrat est entre 300-400 Hv0.05, valeur représentative de l'acier au manganèse. La microdureté du revêtement présente des hauts et des bas situés entre 300 et 450 Hv0.05. Il est clair que la dureté du revêtement est supérieure à celle du substrat. Contrairement au dépôt par soudage où il présente une dureté plus faible que le substrat.

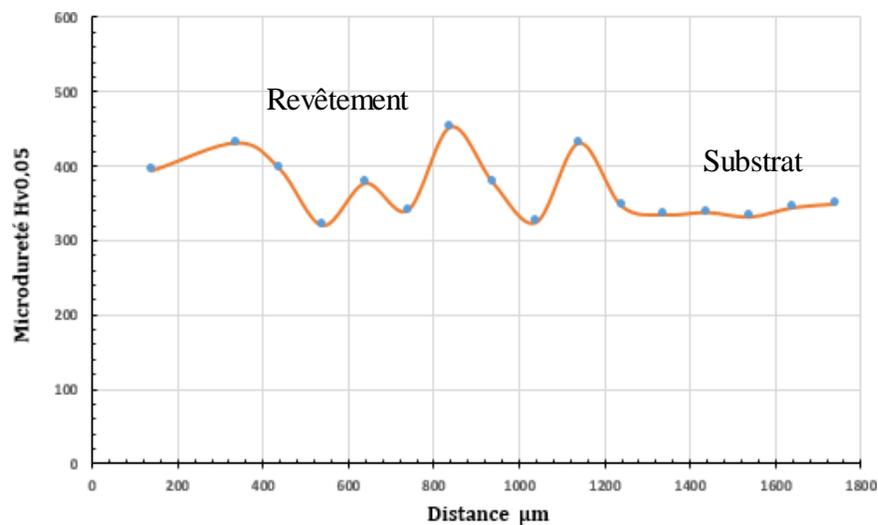


Figure V.9 : Courbe de microdureté Vickers  
Revêtement projeté thermiquement

Donc, la dureté du revêtement de l'alliage de Nickel projeté thermiquement est plus élevée à celle du dépôt par soudage ainsi que du substrat. Cela peut être dû à la matrice austénitique ainsi que pour la formation de composés de haute dureté dans la microstructure du revêtement suite à la présence des éléments d'alliages comme le chrome, le bore et le carbone.

### V.3.2. Essai de dureté Vickers Hv20 :

Les mesures de la dureté Vickers ont été effectuées sur la surface des deux rechargements sous une charge de 20 Kgf. Pour avoir une valeur représentative de la dureté des revêtements, cinq mesures ont été considérées sur des endroits choisis aléatoirement sur chaque échantillon, la moyenne est ensuite déterminée

Pour l'échantillon soudé nous avons réalisé un méplat afin de effectuer des tests de dureté sur les deux passes de rechargement.

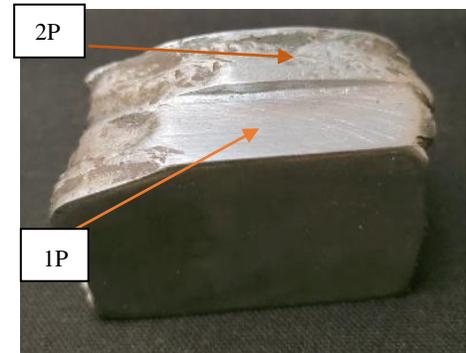


Tableau. V.1. Résultats des tests de dureté **Vickers** Hv20

Technique rechargement		01	02	03	04	05	Moyenne
Soudage	1 <sup>ère</sup> passe 1P	186.4	182.4	184.2	194.4	195.4	188.56
	2 <sup>ème</sup> passe 2P	203	205.8	211.5	219.4	215.73	211.08
Projection thermique		378.3	357.4	428.1	415.3	431.8	402.18
Métal de base		366.9	361.8	353	364.9	369.5	363.22

### V.4. Analyse des résultats d'usure du marteau

Les marteaux du concasseur à l'état usé (après utilisation) sont représentés dans la figure ci-dessous (figure V.10).

D'après la photo real des marteaux de concasseur à l'état usé (figureV.10) et le tableau V.2 il est clair que l'usure des marteaux n'est pas uniforme, le marteau B est très usé en comparant avec A qui apparait presque neuf. Lorsque les matériaux à concassé sont introduits dans la chambre de concassage, ils tombent sur les marteaux. Les marteaux sont alors soumis à des impacts et d'abrasion répétés à mesure que les matériaux tombent puis concassés.



Figure V.10. Photo real des marteaux du concasseur à l'état usé  
**Après 3 mois d'utilisation**

Tableau V.2. Résultats de mesure de longueur de la tête et du marteau après 3 mois de d'utilisation

Longueur de la tête et du marteau	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Etat initial	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Après 3 mois d'utilisation	55	80	100	100	95	90	85	70	55

En raison de la nature non homogène des matériaux à concasser, les matériaux durs ou abrasifs peuvent provoquer une usure plus rapide des marteaux sur lesquels ils tombent fréquemment. Par conséquent, ces marteaux en particulier peuvent montrer une usure plus élevée par rapport aux autres marteaux moins sollicités.

Donc on recommande de :

- Faire un mixage des produits à concassés avant leurs introduction dans la chambre de concassage. Le fait de réaliser un mixage préalable des matériaux à concasser peut contribuer à obtenir une répartition plus uniforme des matériaux dans la chambre de concassage. Cela pourrait réduire l'impact inégal sur les marteaux et ainsi atténuer l'usure inégale.
- Contrôler l'usure des marteaux et d'ajuster le remplacement des marteaux en fonction de leur usure spécifique. Cela peut se faire en suivant les recommandations du fabricant du concasseur et en surveillant régulièrement l'usure des marteaux grâce à des mesures de la perte en épaisseur et de l'inspection visuelle.

## Conclusion générale

L'objectif principal de notre travail était d'étudier l'usure des marteaux de concasseur et de mettre en place des techniques de rechargement dur afin de prolonger leur durée de vie. Pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé deux techniques de rechargement : le rechargement par soudage et le rechargement par projection thermique.

À partir des essais de dureté et de microdureté, le revêtement projeté thermiquement est relativement plus dur que le rechargement par soudage et ne présente pas une zone affectée thermiquement. Ainsi, la projection thermique semble être une option plus favorable dans ce cas. La meilleure dureté du revêtement projeté thermiquement peut offrir une meilleure résistance à l'usure, ce qui est souhaitable pour les marteaux d'un concasseur. La présence d'une large zone affectée thermiquement dans le rechargement soudé constitue une hétérogénéité des propriétés, ce que peut créer un problème de comportement. Alors que, l'absence de zone affectée thermiquement dans le revêtement projeté thermiquement peut contribuer à un meilleur comportement en service.

Par ailleurs, la microstructure des matériaux de rechargement est un facteur important pour déterminer leur capacité à résister à l'usure des marteaux. La microstructure du revêtement projeté du thermiquement constituée principalement d'une matrice austénitique à structure cubique à face centrée est plus favorisée que la matrice ferritique constaté dans rechargement par soudage. Elle peut offrir plusieurs avantages en termes de ténacité et de résistance à l'usure. L'austénite est généralement plus dure que la ferrite, ce qui peut contribuer à une meilleure résistance à l'usure abrasive. Par ailleurs, la matrice austénitique est généralement plus tenace, ce qui signifie qu'elle peut mieux résister aux contraintes et aux impacts répétés sans se fissurer ou s'écailler. Donc une meilleure résistance à l'usure.

Cependant, plus il est également recommandé de mener des essais d'usure et prendre en compte le coté économique pour un choix définitif du type de rechargement.

Ce projet de fin d'étude a représenté une étape significative dans notre parcours académique et professionnel, nous offrant l'opportunité d'approfondir nos connaissances scientifiques et d'explorer le domaine industriel. Il nous a permis de mettre en pratique les connaissances acquises tout au long de notre formation et de relever des défis concrets liés au monde industriel.

## Références bibliographiques

- [1] DJEZAIRI Omar, L'influence du mode de concassage sur les caractéristiques de fabrication des granulats. Département de Génie Minier, école nationale polytechnique. Promotion juin 2008.
- [2] Bagnères-de-Luchon, Le livre de sable, librairie ancienne et moderne depuis 1985, France.
- [3] Société de l'industrie minérale N° 4, 4<sup>ème</sup> trimestre 1999.
- [4] Wikipédia. Entreprise Lafarge, [http://fr.wikipedia.org/wiki/Lafarge\\_\(entreprise\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Lafarge_(entreprise)), 2016.
- [5] Lafarge, Centre de viviers, service formation EdSE, connaissances cimenteries, Concassage 2016.
- [6] HADDOUCHE Kawther, La caractérisation d'un acier inoxydable duplex, mémoire de Master.2019. Université 8 mai 1945 Guelma.
- [7] [www.le type de concasseur.com](http://www.le_type_de_concasreur.com), 2016.
- [8] Photo d'usine de hammam d'Alaïa, m'sila 2016.
- [9] Dr. F. Ghomari, Science des matériaux de construction ; Université Aboubaker Belkaid, 2009.
- [10] Mr Akim. A, Cour de préparation mécanique des roches, 3<sup>ème</sup> année mine et géologie, 2016.
- [11] FLSMIDTH, Concasseur à marteaux EV avec cylindre d'admission. Montage, utilisation VIGERSLEV ALLÉ et entretien, instruction manuel 70000193-477 - 2500 VALBY – DANEMARK. 2002.
- [12] GEORGES J.-M. Frottement, usure et lubrification. Sciences et techniques de l'ingénieur Paris : Eyrolles et CNRS, pp.424 Editions 2000.
- [13] BOWDEN F.P., TABOR D. Friction and Lubrication of Solids, Part II. Oxford: Clarendon press, 1964, 544 p.
- [14] DUBOURG M.-C., BERTHIER Y and VINCENT L. Cracking under fretting fatigue: damage prediction under multiaxial fatigue. Journal of Strain Analysis, , vol 37 (special issue), n°6, pp. 519-533, 2002.
- [15] LEMAITRE J., CHABOCHE J.-L. Mécanique des matériaux solides. 2<sup>nd</sup> ed. Paris : Dunod Bordas, , 544 p, 1988.
- [16] M. LABIDI, Etude du comportement en frottement et usure des matériaux céramiques Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et ZrO<sub>2</sub>, Université de Badji Mokhtar d'Annaba, 2008.
- [17] AOUIFI Belgacem, Comportement à la fatigue d'un acier au carbone après traitement thermique, mémoire de l'Université Mohamed BOUDHIAF M'SILA, Master. 2017.
- [18] ZIOUAL Sara, Influence des traitements thermiques sur les propriétés mécanique d'un acier au manganèse, mémoire de l'Université Abderrahmane MIRA BEJAIA, Master. 2019.

- [19] FNIDES Mohamed. Magistère, contribution à l'étude expérimentale et à la simulation numérique de la loi de frottement entre deux matériaux par des essais de torsion. 2012. université 8 mai1945 Guelma.
- [20] SILEM Hamza. Etude de l'effet de la charge normale appliquée sur le comportement tribologique du couple métallique, mémoire de Master. Université Mohamed BOUDHIAF M'SILA, 2016.
- [21] C. CHAUSSIN, G. HILLY, Métallurgie, alliages métalliques tome I, pp. 126-127. DUNOD, Paris 1976
- [22] CHRISTIAN VARGEL Le comportement de l'aluminium et ses alliages Dunod technique, paris 1979.
- [23] Sylvain JACOB Données numériques sur les alliages d'aluminium de moulage. Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques, M449 (Société AREGA), 2005.
- [24] H. GRANJON, Bases métallurgiques de soudage. 2ème édition. Publication du Soudage et de ses applications. Paris. 1995.