

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : Science & technologie
DEPARTEMENT : Génie mécanique
N° :



DOMAINE : Science et technologie
FILIERE : GENIE MECANIQUE
OPTION : CONSTRUCTION

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: Allal Said.

Intitulé

**Cinétique de broyage des matières premières
par les broyeurs à boulets (a revêtement en
caoutchouc)**

Soutenu devant le jury composé de:

Dr. SLAMANI.M	Université Med Boudiaf-M'sila	Président
Dr. FARSI.Ch	Université Med Boudiaf-M'sila	Rapporteur
Dr. SAIB.Ch	Université Med Boudiaf-M'sila	Examineur
Dr. MENASRI.N	Université Med Boudiaf-M'sila	Examineur

Année universitaire : 2017/2018.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement et gratitude

Au terme de ce modeste travail nous remercions en premier lieu **ALLAH** le tout puissant de nous avoir prêté vie.

Au début je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements tous l'équipe de **LCM** (Lafarge ciment M'sila) est spécifiquement l'équipe de bureau méthode pour tout le temps qu'ils m'ont consacré, leurs directives précieuses, et pour la qualité de leur suivi durant toute la période de mon stage.

Je tiens aussi à remercier vivement le chef de bureau méthode, **Mr : BEN MUBARK MOUNIR** qui a accepté de m'accueillir en stage au sein de son organisme.

Mes profonds remerciements vont à mon encadrant à **LCM**. **Mr : OULD DJABALLAH AHMED** qui a accepté d'encadrer mes travaux durant ces 12 jours de stage.

Mes plus vifs remerciements s'adressent aussi à tout le cadre professoral et administratif de université de M'sila. Spécifiquement a mon encadrant **Mr : FARSI CHOUKI** qui ma l'aide pour ca travail.

Je tiens à exprimer ma plus vifs remerciements aux membres de jury de vous avoir honorés par leur présence et d'avoir accepté d'examiner ma modeste travail, je leur dois les remerciements les plus sincères.

A la fin je remercie tout ceux qui ma ont aides de proche ou de loin durant ces années de recherche et d'étude, je ne peux pas conclure sans un mot de remerciement a tout ma collègues et spécialement promotion 2018.

Dédicace

Je dédie ce modeste ouvrage

À ma très chère mère

À mon très cher père

À mon frère et mes sœurs

À tout ma grande famille

À tous mes amis proches

À tout les étudiants de la promotion
2018

En fin à toute qui ma connais

Allal.s

Résumé, abstract, الملخص

الملخص

في المطلق، تعود الحاجة إلى تجزئة المادة إلى ما لا يقل عن العصور القديمة

مع استخدام مدقه والمواد لطحن المنتجات الغذائية. الحاجة إلى استخدام المواد المنقسمة التي تنمو جنباً إلى جنب مع التقدم التكنولوجي، فقد أصبح تكسير المواد وطحنها في كل مكان في العالم من الصناعات المعدنية والكيماوية والأدوية والأغذية الزراعية وغيرها من الصناعات.

خلال هذه الدراسة، سنتحدث عن موضوع: حركية سحق المواد الخام التي تحتوي على ثلاثة أجزاء أساسية.

الجزء الأول: عموميات حول طحن المواد والأجهزة المرتبطة بها. الجزء الثاني هو وصف لمطحنة الكرات، والجزء الثالث هو دراسة العوامل التي تؤثر على حركية الطحن. وفي الأخير اقتراح الميزة التكنولوجية الجديدة، هي طلاء المطاط في طاحونة الكرات.

Abstract

In the absolute, the need to fragment the material goes back at least

to antiquity with the use of the pestle and the material to grind the food products. The need to use split material growing in tandem with technological progress. Crushing has become ubiquitous in the world of the metallurgical, chemical, pharmaceutical, agri-food and other industries.

During this study, we will talk about the topic: crushing kinetics of raw materials that contains three basic parts. The first part: generalities on grinding materials and associated devices. The second part is a description for the ball mill, the third part is a study for the factors that influenced the grinding kinetics. Finally the proposal of the new technological advantage, are the rubber coating in the ball mill.

Résumé

Dans l'absolu, la nécessité de fragmenter la matière remonte au

moins à l'antiquité avec l'emploi du pilon et de la matière pour broyer les produits alimentaires. Le besoin d'utiliser de la matière divisée s'accroissant de concert avec le progrès technologique .le broyage est devenu omniprésent dans le monde des industries métallurgique, chimique, pharmaceutique, agroalimentaire, etc.

Pendant cette étude, nous parlerons sur le sujet : cinétique de broyage des matières qui contient trois parties de base. La première partie: généralités sur le broyage et les appareils associés. Le deuxième partie est une description pour le broyeur à boulets, le troisième partir est une étude pour les facteurs qui influé sur la cinétique de broyage. Finalement la proposition de la nouvelle avantage technologique, sont le revêtement en caoutchouc dans les broyeur à boulets.

Sommaire

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I

Généralités sur le broyage et les appareils associés.

Généralités sur le procédé de broyage	1
I.1 Terminologie	2
I.1.1 Définitions	2
I.1.1.1 Fragmentation mécanique	2
I.1.1.2 Appareils de fragmentation mécanique	2
I.1.1.3 Le broyage	3
I.1.2 Type de broyage	3
I.1.2.1 Broyage simple	3
I.1.2.2 Broyage poussé	3
I.1.2.3 Broyage ménage	3
I.1.2.4 Broyage différentiel (broyage sélectif)	3
I.1.2.5 Broyage formel	4
I.1.2.6 Broyage autogène	4
I.1.2.7 Cryobroyage	4
I.1.2.8 Broyage combinés	4
I.2 Propriétés des matériaux à broyer	5
I.3 Buts de la fragmentation	6
I.4 Procèdes de fragmentation	7
I.5 Mécanismes de fragmentation	8
I.6 Quelques types des concasseurs et broyeurs	8
I.6.1 La concassage	10

I.6.1.1 Concasseurs à mâchoires	10
I.6.1.2 Concasseurs à cône	10
I.6.1.3 Concasseurs à cylindres lisses et ceux à cylindres dentés	10
I.6.1.4 Concasseurs à rotor	10
I.6.1.5 Désintégrateurs	10
I.6.2 Les concasseurs	11
I.6.2.1 Concasseur à pics	11
I.6.2.2 Concasseur horizontaux	12
I.6.2.3 Concasseur à marteaux articulés mono rotor	12
I.6.2.4 Concasseur à marteaux birotor	13
I.6.2.5 Concasseurs à couteaux ou à pics	13
I.6.3 Les broyeurs	14
I.6.3.1 Broyeurs à rouleaux opérant par gravité (meules)	14
I.6.3.2 Moulins à rouleaux à pression mécanique	14
I.6.3.3 Broyeur à trois cylindres	15
I.6.3.4 Broyeurs à alimentation forcée	16
I.6.3.5 Broyeur à croisillons (batteurs rigides)	16
I.7 Intérêts du broyage	17
Conclusion	18

Chapitre II

Description de broyeur à boulets.

Histoire du broyeur à boulets	19
II.1 Broyeur conventionnelle à boulets	19
II.2 Définition du broyeur à boulets	19
II.3 Objectifs de broyeur à boulets	20
II.4 Broyeur à boulets	20

II.5 Les différents broyeurs à boulets	21
II.6 Caractéristiques technique du broyeur à boulets LCM (Lafarge Ciment M'sila)	24
II.7 Les Eléments du broyeur à boulets	25
II.7.1 La virole	25
II.7.2 Les portes de visite du broyeur	25
II.7.3 La goulotte d'entrée	26
II.7.4 Les blindages d'entrée	26
II.7.5 Blindages virole	27
II.7.6 Engins broyant	29
II.7.7 Chargement du broyeur	29
II.7.8 Les cloisons	30
II.7.9 Grilles de cloison	32
II.7.10 Grilles de décharge	33
II.7.11 Paliers de broyeur	34
II.7.12 Commande	35
II.7.13 Pompes de lubrification	35
II.7.14 Niveau de matière	36
II.7.15 Ventilation du broyeur	37
II.7.16 Injection d'eau	38
II.8 Spécifications des broyeurs à boulets	39
II.9 Le travail de la charge	40
II.10 Caractéristique de broyeur à boulets	40
II.11 Principe de fonctionnement de broyeur à boulets	41
II.12 Les régimes de fonctionnements	42
II.13 Temps de passage	43
II.14 Les paramètres influençant le fonctionnement du broyeur	43

II.15 Energie de broyage	43
Conclusion	44

Chapitre III

Etude la cinétique de broyage.

Problématique	45
III.1 Comment Résolution de la cinétique de broyage ?	45
III.2 Influence du blindage sur la cinétique de broyage	45
III.2.1 Blindage Releveur (1 ^{er} compartiment)	45
III.2.2 Les formes de blindage releveur existant	46
III.2.3 Blindage classant (2 ^{ème} compartiment)	47
III.2.4 Les formes de blindage classant existant	48
III.3 Influence des boulets	49
III.3.1 Les boulets du 1 ^{er} compartiment	50
III.3.2 Les boulets à 2 ^{ème} compartiment	50
III.3.3 Charge des boulets	50
III.4 Le niveau de matière	50
III.4.1 Niveau de matière dans le broyeur dans le 1 ^{er} compartiment	51
III.4.2 Niveau de matière dans le broyeur dans le 2 ^{ème} compartiment	52
III.5 Le taux de remplissage	53
III.6 La vitesse de rotation et de fonctionnement	54
Conclusion	59

Chapitre IV

Le revêtement en caoutchouc à broyeur à boulets.

Introduction	60
IV.1 Le caoutchouc	61
IV.2 Caoutchouc naturel	61

IV.3 Les caoutchoucs synthétiques	62
IV.4 Propriétés du caoutchouc	63
IV.5 Domaines d'utilisation de caoutchouc	64
IV.6 Les types de broyeurs utilisés pour les applications de caoutchouc	65
IV.7 Broyeur à boulets avec revêtement en caoutchouc	65
IV.8 Comparaison du revêtement en caoutchouc et celui en métal	67
IV.9 Avantage des revêtements des broyeurs en caoutchouc	68
Conclusion	70
Conclusion général	71

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre I

Généralités sur le broyage est les appareilles associé.

Tableau I.1 Montrent les différentes étapes de la fragmentation (tableau 1) est les machines qui y sont associées (tableau 2) **5**

Tableau I.2 Développement chronologique des machineries de fragmentation (les broyeurs) durant le 19eme et le 20eme siècle **9**

Chapitre II

Description de broyeur à boulets.

Tableau II.1 Présentation les caractéristiques techniques du broyeur à boulets. **24**

Tableau II.2 Spécification des broyeurs à boulets. **39**

Chapitre III

Etude La cinétique de broyage.

Tableau III.1 : Conception Standard “SLEGTEN”. **49**

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I

Généralités sur le broyage est les appareils associé.

Figure I.1	Différente modes d'action des forces externes en fragmentation.	7
Figure I.2	Schémas cinématiques des concasseurs: a) - á mâchoires ; b) - á cônes (giratoire) ; c) - á cylindres ; d) - á marteaux ; e) - á rotor ; f) - centrifuge á rotor ; g) - désintégrateur.	11
Figure I.3	Concasseur á pics.	11
Figure I.4	Concasseur horizontaux.	12
Figure I.5	Concasseur á marteaux articulés mono rotor.	12
Figure I.6	Concasseur á marteaux birotor.	13
Figure I.7	Concasseurs á couteaux ou á pics.	13
Figure I.8	Broyeur á meules.	14
Figure I.9	Broyeur á rouleaux avec piste tournante.	15
Figure I.10	Broyeur á 3 cylindres.	15
Figure I.11	Broyeurs á alimentation forcée.	16
Figure I.12	Broyeur á croisillons.	16

Chapitre II

Description de broyeur á boulets.

Figure II.1.1	Explique l'effet d'impact et l'effet d'attrition.	20
Figure II.1.2	Le broyeur á boulets.	21
Figure II.2	Broyeur Air-Sweept.	22
Figure II.3	Broyeur á décharge centrale.	23
Figure II.4	Broyeur á deux compartiments de broyage.	23

Figure II.5	La virole.	25
Figure II.6	Les portes de visite du broyeur.	25
Figure II.7	La goulotte d'entrée.	26
Figure II.8	Blindages d'entrée.	26
Figure II.9	Blindage releveur et classant.	27
Figure II.10	Les différents types de blindages à broyeurs à boulets.	28
Figure II.11	Les deux profils : Releveurs (photo 1) et Classant (photo 2).	28
Figure II.12	Les engins broyant.	29
Figure II.13	Compartiment vide.	29
Figure II.14	Compartiment trop plein.	29
Figure II.15	Cloison de l'entre.	30
Figure II.16	Cloison intermédiaire.	31
Figure II.17	Cloison de sortie.	31
Figure II.18	Les composent de cloison.	32
Figure II.19	Le grilles de cloison.	32
Figure II.20	Schéma explique comment passent les particules de lumières.	33
Figure II.21	Les grilles de décharge.	33
Figure II.22	Les paliers à patins.	34
Figure II.23	Palier à tourillons.	34
Figure II.24	La partie commande de broyeur à boulets.	35
Figure II.25	Pompes de lubrification (haut pression et basse pression).	36
Figure II.26	Photo montre le bon niveau de matière.	37
Figure II.27	Ventilation du broyeur.	37
Figure II.28	Injection d'eau.	38
Figure II.29	L'effet cataracte et cascade.	40
Figure II.30	Le régime responsable sur l'effet cataracte et cascade.	42

Chapitre III

Etude la cinétique de broyage.

Figure III.1	Schéma de conception de blindage releveur (OSC formation de base).	45
Figure III.2	Comparaison entre blindage conventionnel (1) et progressif (2).	46
Figure III.3	Blindage avec rebord.	46
Figure III.4	Blindage ondulé de type “Duolift”.	47
Figure III.5	Blindage à pas de type “Xlift” (1) et blindage à pas avec profil ondulé (2).	47
Figure III.6	Blindage de type ondulé “Traîné”.	48
Figure III.7	Blindage classant avec profil releveur.	48
Figure III.8	Blindage classant conventionnel avec profil ondulé.	49
Figure III.9	Comparaison entre le poids des boulets et le diamètre.	50
Figure III.10	Explique le bon niveau de matière dans le 1 ^{er} compartiment.	51
Figure III.11	Explique le bon niveau de matière pour le 2 ^{ème} compartiment.	52
Figure III.12	Les données nécessaires pour calculer le taux de remplissage.	53
Figure III.13	Le taux de remplissage en fonction de la hauteur libre h au dessus de la charge de boulets.	53
Figure III.14	La meilleure zone pour une efficacité de broyage selon la charge de boulet et la rotation du broyeur au % de vitesse critique.	54
Figure.15	Forces agissant sur les corps de broyage dans le broyeur à boulets pendant la rotation.	55

Chapitre IV

Le revêtement en caoutchouc à broyeur à boulets.

Figure IV.1	La composition chimique et le motif de caoutchouc naturel.	61
Figure IV.2	Récolte de caoutchouc naturel (Latex).	62
Figure IV.3	La composition chimique et le motif de caoutchouc synthétique.	62

Figure IV.4	Les composants de broyeur à boulets avec revêtement en caoutchouc.	65
Figure IV.5	Broyeur à boulets avec revêtement en caoutchouc.	66
Figure IV.6	Montage et assemblage de revêtement en caoutchouc.	66
Figure IV.7	Visite interne de broyeur à boulets avec revêtement en caoutchouc.	67

Introduction générale

Introduction générale

Parmi toutes les opérations unitaires d'obtention de poudres, le broyage est sans doute celle qui est la plus utilisée.

Le broyage est une opération de mise en forme des solides, elle vise à diminuer et à maîtriser la granularité des solides, dans le but de faciliter les étapes ultérieures du traitement des produits. Il se présente dans différents domaines industriels tels que, la métallurgie, la chimie, la pharmacie, l'agroalimentaire, etc. Qui se compose de plusieurs opérations par exemple : concassage, criblage, broyage classification, etc.

Le broyage se divise aussi en broyage fin, moyen et gros, à deux états secs (broyage sec) ou bien humide (broyage humide).

Parmi ces applications, on retrouve à l'industrie du ciment, qui a connu un important essor car ce produit a une large utilisation dans la construction. Cela s'est traduit par la réalisation de nombreuses cimenteries. À titre d'exemple LCM (Lafarge ciment M'sila) qui constitue l'investissement le plus important dans le pays.

Dans le but de maintenir un volume de production convenable plus que 5 millions de tonnes par an en LCM, il faut avoir une bonne cinétique de broyage.

Dans ce cadre, nous avons opté pour l'étude cinétique de broyage des matières premières par les broyeurs à boulet (revêtement en caoutchouc), donc notre mémoire s'articule autour de quatre chapitres repartis comme suit:

-Le premier chapitre présente une généralité sur le broyage et les appareils de fragmentation associés

- Le deuxième chapitre est consacré à la description du broyeur à boulet qui utilise dans la fabrication de ciment, le composant, caractéristique technique, Etc.
- Le troisième chapitre est consacré à étude la cinétique de broyage dans le broyeur à boulet.
- Le quatrième et le dernier chapitre est consacré sur le revêtement en caoutchouc dan le broyeur à boulet.

Chapitre I

***Généralités sur le broyage et les
appareilles associé.***

Généralités sur le procédé de broyage

Le broyage est une opération de mise en forme des solides, elle vise à diminuer et à maîtriser la granularité des solides, dans le but de faciliter les étapes ultérieures du traitement des produits, manutention, conditionnement, ou de mise en suspension.

Cette technique présente une large utilisation dans le domaine industriel, elle peut être effectuée suivant deux voies, la première sèche (broyage sec) ou bien humide (broyage humide).

Avec le développement technologique, le broyage est devenu omniprésent dans le monde des Industries Métallurgiques, Chimique, Pharmaceutique, Agroalimentaire, etc.

Cette variété de discipline résulte en fait des multiples aspects que revêtent ces procédés et des nombreuses utilisations qui en résultent

A titre d'exemple dans l'industrie minérale, on enregistre l'utilisation de deux termes pour qualifier la fragmentation du produit brut pour faciliter sa manutention et le préparer pour la fragmentation ultérieure (le broyage).

D'autre part, la production de la poussière et le bruit se présentent comme les inconvénients de ce procédé industriel.

De même, sa forte consommation énergétique (< 3%) de l'énergie totale demeure un problème économique.

I.1 Terminologie

I.1.1 définitions

I.1.1.1 Fragmentation mécanique

Elle peut se définir comme l'ensemble des opérations ayant pour but de réaliser, grâce à l'application des contraintes mécaniques externes :

- soit la division d'une masse solide en fragments de dimension maximale déterminée.
- soit la réduction d'une dispersion solide existante jusqu'à des éléments de plus petit volume unitaire [1].

I.1.1.2 Appareils de fragmentation mécanique

Ils peuvent se classer, assez arbitrairement d'ailleurs, et sans qu'il y ait de limites bien précises, en :

- **Concasseurs** : opération une fragmentation grossière, par exemple jusqu'à des calibres compris entre 25 et 150 [mm] ;
- **Granulation** : opérant la réduction en fragments de calibre pouvant aller de 6.3 jusqu'à 25 [mm] ;
- **Broyeurs**: donnant des produits de calibres allant de 0.2 jusqu'à 6.3 [mm].
- **Pulvérisateurs** ou **moulins** : opérant la réduction en poudre de calibre : 0 à 200 [μm].
- **Atomiseurs** : pouvant donner des calibres descendant jusqu'à l'ordre du [μm].

La fragmentation de certains produits peut également nécessiter l'intervention de :

→ **Défibreurs** (traitement de matières fibreuses).

→ **Déchiqueteuses** (matières à la fois flexibles et tenaces telle par exemple : le bois, les emballages métalliques, etc.).

→ **Coupeuses** : opération par sciage, cisaillement ou tranchage, en vue d'obtenir des fragments de formes régulières (matières thermoplastique) [1].

I.1.1.3 Le broyage

Le terme broyage, bien que ne s'appliquant en réalité qu'à une tranche des opérations de fragmentation, est très couramment utilisé pour désigner l'ensemble de ces opérations, et se retrouve par conséquent, dans de nombreuses expressions qui s'y rapportent.

Les différents types des broyages peuvent être classés en :

- Broyage à sec (moins de 2 % d'eau dans le produit).
- Broyage semi-humide (2 à 25% d'eau dans le produit).
- Broyage en phase liquide ou broyage à voie humide (25 à 300% d'eau dans le produit) [1].

I.1.2 Type de broyage**I.1.2.1 Broyage simple :**

Il n'y a pas d'autre impératif que celui de ramener la totalité de l'échantillon jusqu'en dessous d'un calibre déterminé (sans aucune considération de la granulométrie interne de deuxième produit), cela suffit lorsque par exemple, la réduction opérée a simplement pour but de rendre le produit plus aisément manutentionnable [1].

I.1.2.2 Broyage poussé :

Le produit broyé doit contenir le maximum possible d'éléments nettement plus fins que la limite supérieure imposée. En d'autres termes, l'échantillon broyé doit présenter une surface spécifique aussi élevée que possible (liants hydrauliques, perte de valeur) [1].

I.1.2.3 Broyage ménage :

En sens inverse du broyage applicable seulement, on peut avoir intérêt à chercher le moins de sur broyage possible. Soit parce qu'il est inutile (dans ce cas l'économie de force motrice) soit même parce qu'il est nuisible (difficulté de récupération, perte de valeur) [1].

I.1.2.4 Broyage différentiel (broyage sélectif) :

Ce mode de broyage applicable seulement à des produits structurellement hétérogènes, permet au prix de certaines précautions de pousser la réduction des constituants friables un peu plus loin que celle de constituants plus durs [1].

I.1.2.5 Broyage formel :

Ce terme est proposé pour désigner les opérations de fragmentation au cours desquelles la forme des fragments obtenus a une influence sur la valeur du produit.

La forme recherchée peut être :

-soit celle de petits grains cubiques (cas des matières thermoplastique).

-soit celle de fragments se rapprochant le plus possible la forme cuboïde (matériaux souliers, agrégats pour la fabrication de béton...etc.) pour lesquels le coefficient de forme est un des éléments du cahier des charges.

-soit au contraire, celle d'éléments plats paillettes ou écailles, telles que dans le cas des poudres de talc, graphite, pigment pour peinture, etc. [1].

I.1.2.6 Broyage autogène :

Il s'agit ici d'opérations de réduction volumique dans lesquelles les éléments du produit à broyer se fragmentent par percussion et frottement réciproques (self ou auto broyage) [1].

I.1.2.7 Cryobroyage :

Fragmentation de solides préalablement refroidis à de très basses températures (en générale par l'Azote liquide) [1].

I.1.2.8 Broyage combinés :

Il arrive assez souvent que les opérations les de fragmentations puissent être combinées dans un même appareil avec d'autres opérations plus ou moins complémentaires, on peut avoir ainsi :

- Des broyeurs cribleurs ou broyeurs tamiseurs.
- Des broyeurs séparateurs ou sélecteurs à courant d'air.
- Des broyeurs sécheurs.
- Des broyeurs mélangeurs.
- Des broyeur dans lesquels débutent ou se poursuivent des réactions chimiques ou physiques (fabrication de l'alumine par le procédé broyer, Amal gâtion de minerais d'or, etc.) [1].

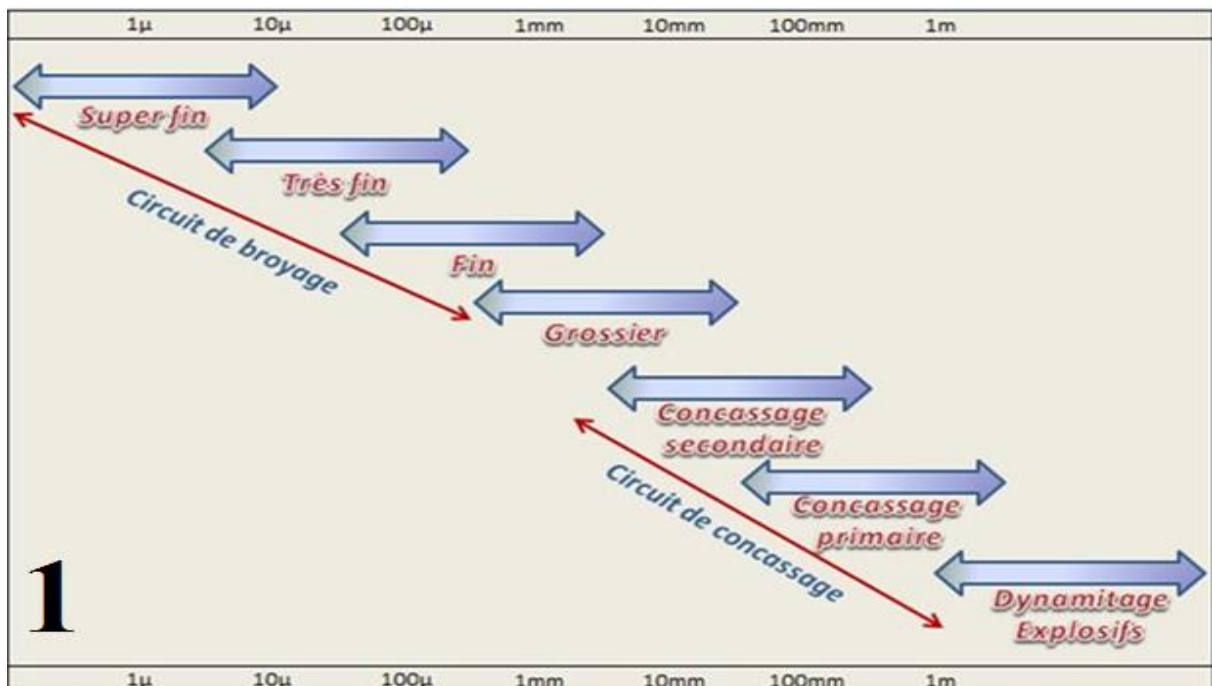
I.2 Propriétés des matériaux à broyer

Les propriétés physiques des matériaux à fragmenter influencent sur le choix des appareils de fragmentation, ces propriétés sont caractérisées par des indices tels que l'indice de friabilité de HARDGROVE, l'indice énergétique de BOND, l'indice d'aptitude à l'agglomération de PAPADKIS, l'indice d'abrasion [1],[2].

Leurs déterminations se font à partir des essais sur des échantillons moyens des matériaux à fragmenter. On cite parmi ces propriétés :

- **L'abrasivité** : c'est l'aptitude d'un matériau donné à éliminer ou user la surface d'un autre matériau.
- **La dureté** : c'est la propriété la plus répandue et la plus utilisée dans le domaine du broyage, elle est définie comme étant la résistance d'une particule à la pénétration par un corps étranger.
- **La granulométrie de départ** : c'est un facteur de grande importance dans le choix du type broyage, à titre d'exemple, si la distribution de départ est très large, le broyage doit s'effectuer en plusieurs étapes tout en évitant le phénomène de sur broyage.

Selon BERTHIEUX [1994] on peut caractériser sept zones conventionnelles, chacune d'entre elles présente un intervalle de taille donné comme le montre le Tableau (I.1) suivant :



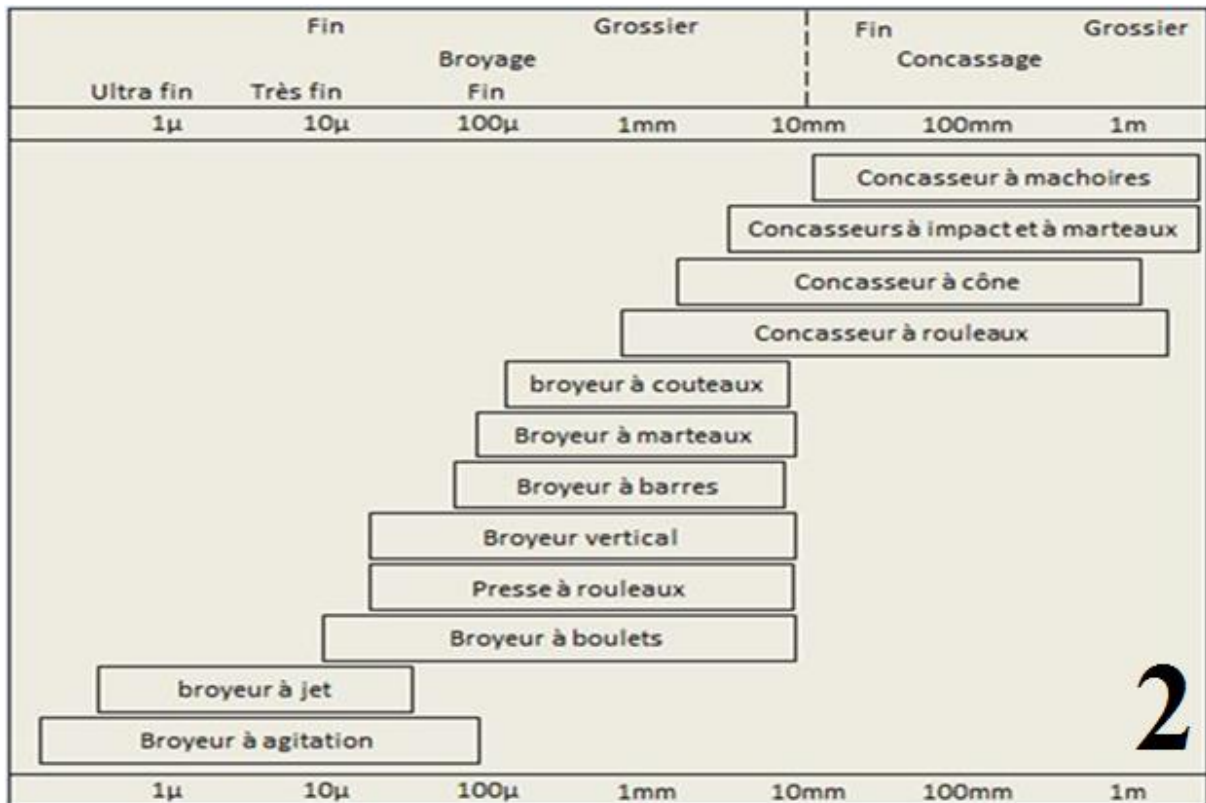


Tableau I.1 : Les différentes étapes de la fragmentation (tableau 1) est les machines qui y sont associées (tableau 2) [2] [15].

I.3 Buts de la fragmentation

Les opérations de fragmentation ont pour but :

- Soit d’obtenir une réduction de la dimension des corps solides en vue faciliter leur conditionnement
- Soit par cette réduction, de faciliter des opérations purement physique, telle que triages, mélanges, dosage, dissolution
- Soit de permettre ou de faciliter des réactions physicochimiques ou chimiques, dont la rapidité est normalement fonction de l’importance des surfaces exposées, c’est-à-dire du degré de division des matières solides.

Une connaissance complète et exacte des buts à atteindre est naturellement la condition première pour la détermination des procédés et des appareils [1].

I.4 Procèdes de fragmentation

La fragmentation s'obtient par rupture de la cohésion des solides sous l'action de forces externes qui peuvent être appliquées sous l'une ou l'autre des formes suivantes :

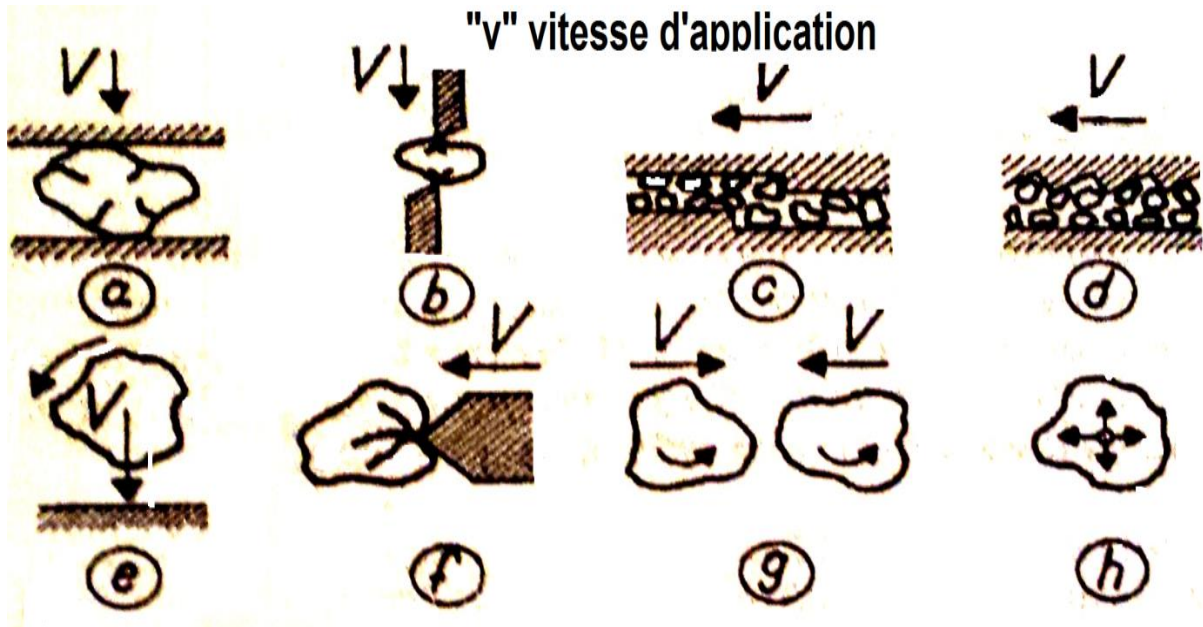


Figure I.1 : Différents modes d'action des forces externes en fragmentation [1].

- a)- **Compression lente** (écrasement sous vitesse de compression $V = 0.1$ à 0.8 [m/s]) ;
- b)- **Cisaillement** ($V = 4$ à 8 [m/s]) ;
- c)- **Attrition et cisaillement combinés** ($V = 4$ à 8 [m/s]) ;
- d)- **Attrition** (usure) ($V = 2$ à 30 [m/s]) ;
- e)- **Percussion par projection sur paroi fixe** ($V = 15$ à 200 [m/s]) ;
- f)- **Percussion au moyen d'organes mobiles** : marteau ou fléaux boulets...etc. ($V = 8$ à 200 [m/s]) ;
- g)- **Percussion entre particules** ou auto-broyage ($V = 10$ à 300 [m/s]) ;
- h)- **Explosion** sous l'action de force interne d'origine thermique, thermoplastique, ultrasonique.etc.

La plupart des appareils de fragmentation industriels mettent d'ailleurs simultanément en jeu deux ou plusieurs des actions décrites de (a) à (g), bien qu'on ait

généralement tendance à les classer en fonction de l'action mécanique considérée comme principale [1].

I.5 Mécanismes de fragmentation

Suivant le matériau traité et le mode de fragmentation mis en œuvre, différents mécanismes de fragmentation restent possibles [3].

On considère en général trois grands types de mécanisme de fragmentation qui compte tenu de l'inhomogénéité de la répartition des défauts structuraux des particules, interviendront souvent simultanément :

- **l'abrasion**, consiste en une érosion de la surface des particules ; elle génère deux grandes populations : la première de taille voisine de la particule abrasée, la seconde constituée par les fragments arrachés étant une population de particules beaucoup plus fines que la population de départ.

L'abrasion, a donné lieu à de nombreuses études notamment de la part des spécialistes de la fluidisation et des réacteurs catalytiques, domaine dans lesquels ce mode de fragmentation est généré par un phénomène indésirable : l'attrition.

L'attrition est définie comme une usure de deux particules dures par frottement.

- **la désintégration**, résulte d'un apport énergétique suffisamment intense pour engendrer une contrainte qui dépasse largement le point de fracture.

Les particules ainsi générées sont de petite taille devant celle de la particule mère et la distribution de taille de ces fragments est très étalée.

- **Le clivage**, phénomène intermédiaire entre l'abrasion et la désintégration, engendre la production de particules du même ordre de grandeur que la particule mère, il résulte d'un apport énergétique juste suffisant à la propagation de fractures préexistantes dans le matériau traité.

I.6 Quelques types des concasseurs et broyeurs

Deux mots sont utilisés dans l'industrie minière pour qualifier la fragmentation en vue d'une réduction granulométrique, le concassage et le broyage. En effet, le concassage est la première étape de fragmentation du produit brut, qui vise principalement à faciliter la manutention du minerai et à le préparer pour la fragmentation ultérieure (broyage).

-Voila un Tableau représente le développement chronologique des machines de fragmentation (les broyeurs) durant le 19eme et le 20eme siècle.

Equipements	Source	Année
Stampa Mill	Joachimsthal, Allemagne	1519
concasseur à rouleaux	Derbyshire, Angleterre	1804
concasseur à mâchoires	(Blake) états unis	1861
broyeur à boulets	(Brueckner), Allemagne	1876
broyeur à boulets (charbon)	Pottstown, Pa, us	1882
concasseur giratoire	(Gâtes) états unis	1888
tube broyeur (minerai d'or)	Kalgoorlie, Australie	1899
tube broyeur (minerai d'or)	Rand, Afrique du sud (Test)	1904
broyeur à boulet (minerai de fer)	Pottstown, Pa, us	1905
tube broyeur (minerai d'or)	Rand, Afrique du sud	1907
concasseur à cône	Nordberg, us	1927
broyeur autogène (sec)	(Hadsel, Hardinge, Cominco, Weston) us ,Canada	1932-1964
broyeur SAG autogène (humide)	Canada , us	1951 à ce jour
tour broyeur	Japan	1970
broyeur à rouleaux à haute pression	(Schoenert), Allemagne	1984
cône à jet d'eau	Nordberg , us	1988

Tableau I.2 : Développement chronologique des machineries de fragmentation (les broyeurs) durant le 19eme et le 20eme siècle [2].

I.6.1 Concassage

Classification des concasseurs industriels :

Les appareils de concassage utilisés actuellement se divisent en **5** types principaux:

I.6.1.1 Concasseurs à mâchoires :

- le concassage s'effectue par écrasement périodique des morceaux de minerai entre une mâchoire fixe et une mâchoire mobile (fig. I.2.a) [4].

I.6.1.2 Concasseurs à cône :

- le concassage s'effectue par écrasement ininterrompu, partiellement avec flexion et trituration des morceaux du minerai entre un cône fixe et un cône concassant dont la rotation est excentrée. Le plus souvent on appelle ce type concasseurs giratoires (fig. I.2.b) [4].

I.6.1.3 Concasseurs à cylindres lisses et ceux à cylindres dentés :

- le concassage s'effectue par écrasement ininterrompu avec la trituration partielle par les cylindres lisses rotatifs ou par spallation avec cassure partielle des morceaux de minerai par les cylindres dentés rotatifs tournant dans les sens inverses (fig. I.2.c) [4].

I.6.1.4 Concasseurs à rotor :

- le concassage s'effectue par action dynamique du rotor: par coups des marteaux ou des battes fixés sur le rotor ou bien par lancement des morceaux par la force centrifuge-les rejetant contre un blindage fixe (fig. I.2.f) [4].

I.6.1.5 Désintégrateurs (concasseurs à barres fixés sur les anneaux tournant dans les sens inverses) :

- la désintégration des morceaux est atteinte par coups de deux ou quelques rangs de barres qui sont fixés rigidement sur les anneaux et disques étant en mouvement en sens inverses (fig. I.2.g) [4].

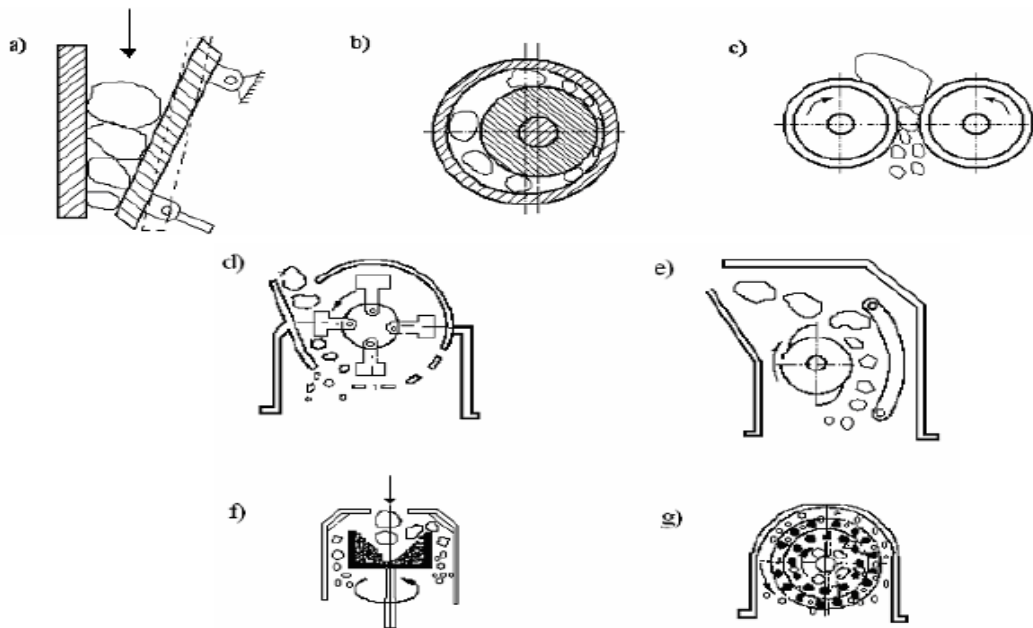


Figure I.2 : Schémas cinématiques des concasseurs: **a)**- á mâchoires ; **b)**- á cônes (giratoire) ; **c)**- á cylindres ; **d)**- á marteaux ; **e)**- á rotor ; **f)**- centrifuge á rotor ; **g)**- désintégrateur [4].

I.6.2 Les concasseurs

I.6.2.1 Concasseur à pics (fig. I.3) :

Ils sont destinés à diviser par voie d'éclatement des matières relativement friables, telles que la houille ou le coke, en vue d'obtenir le maximum de fragments d'un calibre déterminé et un minimum de fines. Ces appareils ont perdu beaucoup de leur intérêt depuis que l'évolution des procédés industriels a considérablement valorisé les fines, et on les remplace de plus en plus par des types de machines moins fragiles [1].

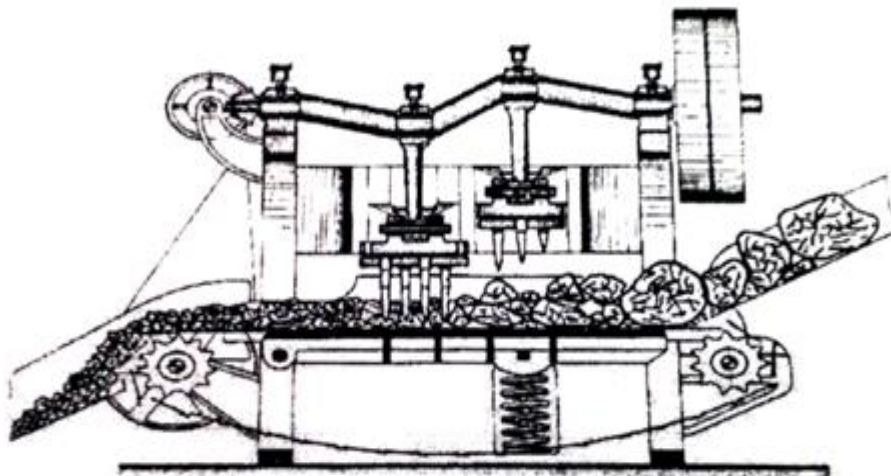


Figure I.3 : Concasseur à pics.

I.6.2.2 Concasseur horizontal (fig. I.4) :

Ces appareils, destinés à fonctionner à proximité immédiate de fronts d'abattage dans les mines, opèrent la réduction des plus gros blocs des houilles ou de minerais tout-venant, en cours de translation horizontale sur un transporteur à chaînes [1].

Ils peuvent utiliser soit un dispositif à mâchoires avec chambre horizontale, soit deux cylindres dentés à axe verticale, soit un cylindre à picots disposé horizontalement (fig.3).

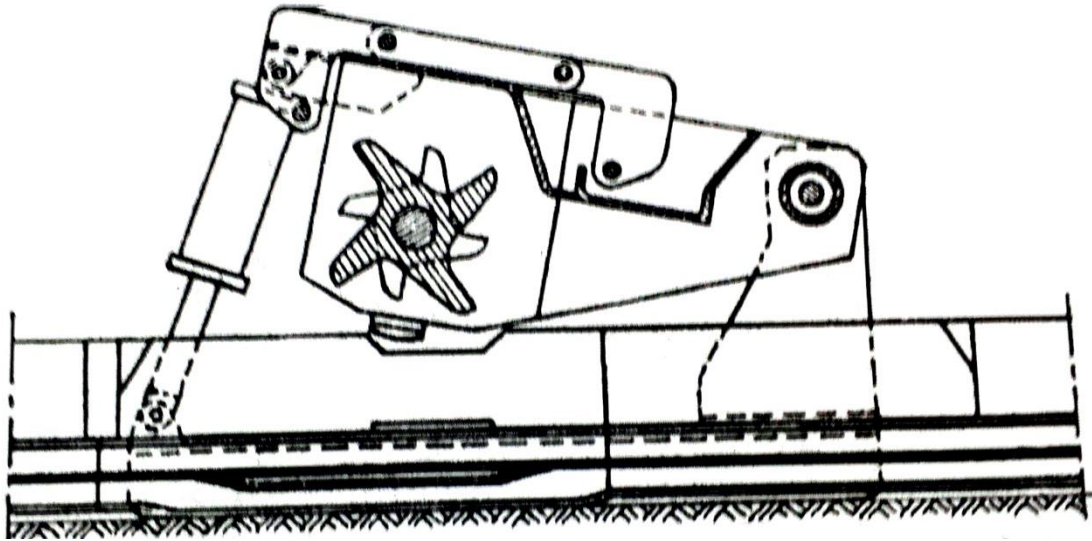


Figure I.4 : Concasseur horizontal.

I.6.2.3 Concasseur à marteaux articulés mono rotor (fig. I.5) :

Ces appareils opèrent également par percussion mais ici les organes de percussion sont des marteaux articulés autour d'un rotor. La souplesse de ce montage permet d'équiper l'orifice de sortie avec des grilles de contrôle, et d'obtenir ainsi des rapports de réduction plus élevés [1].

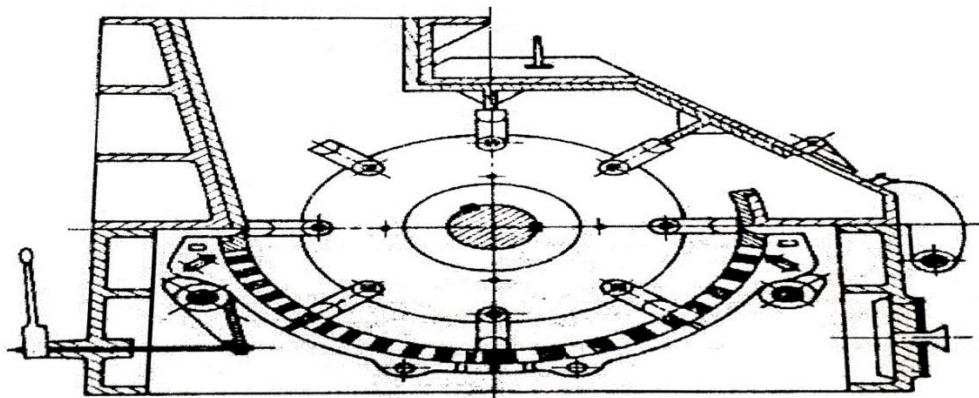


Figure I.5 : Concasseur à marteaux articulés mono rotor.

I.6.2.4 Concasseur à marteaux birotor (fig. I.6) :

Ils ont même conception que les précédents (fig. I.5) mais sont construits avec 2 rotors parallèles qui permettent d'obtenir, à capacité d'admission égale, et à rapport de réduction équivalent, des débits plus élevés [1].

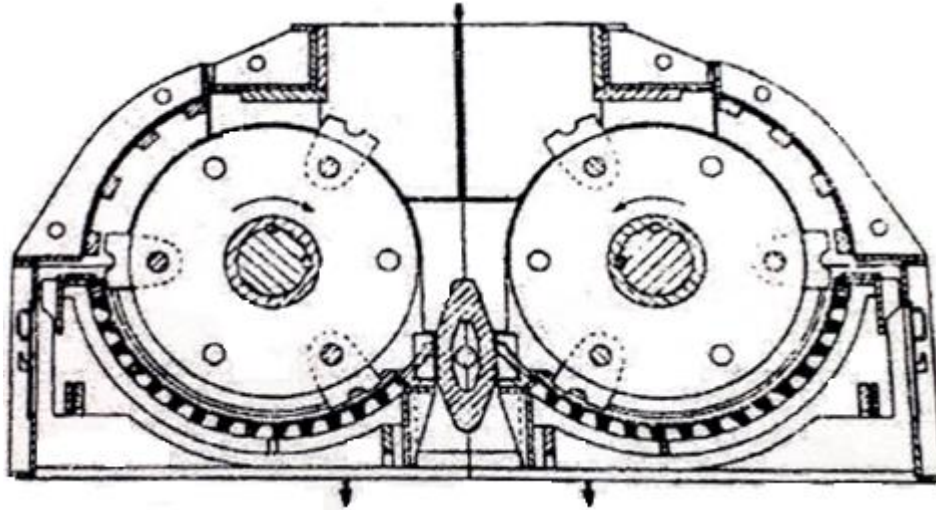


Figure I.6 : Concasseur à marteaux birotor.

I.6.2.5 Concasseurs à couteaux ou à pics (fig. I.7) :

Ces appareils comportent soit un, soit deux arbres garnis de bras formant couteaux rotatifs dont la trajectoire d'intercale entre les herse de couteaux fixes [1]. Il est ainsi possible de fractionner par cisaillement des matériaux plastiques ou semi-plastiques tels qu'argiles et marnes, tourteaux d'huilerie, etc.

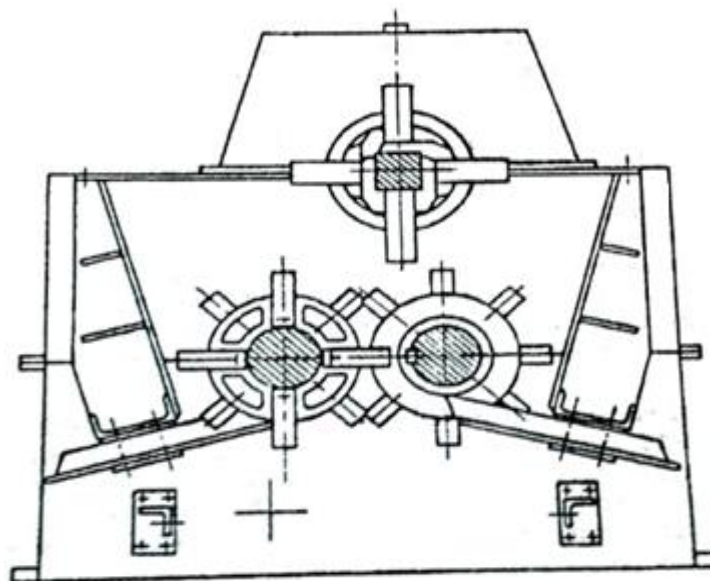


Figure I.7 : Concasseurs à couteaux ou à pics.

I.6.3 Les broyeurs

I.6.3.1 Broyeurs à rouleaux opérant par gravité (meules) (fig. I.8) :

C'est un des plus anciens types de moulins. Ils sont constitués par deux lourdes meules cylindriques roulant sur une piste circulaire, pleine ou constituée par des grilles [1]. Meules et piste peuvent être soit en métal, soit en granit et lamasse unitaire des meules peut aller de 150 jusqu'à 6000 [kg] ces appareils sont, en dépit de leur rusticité ou à cause d'elle, encore employée par préférence dans certaines industries (fonderie, fabriques de réfractaires, tuilerie, briqueterie).

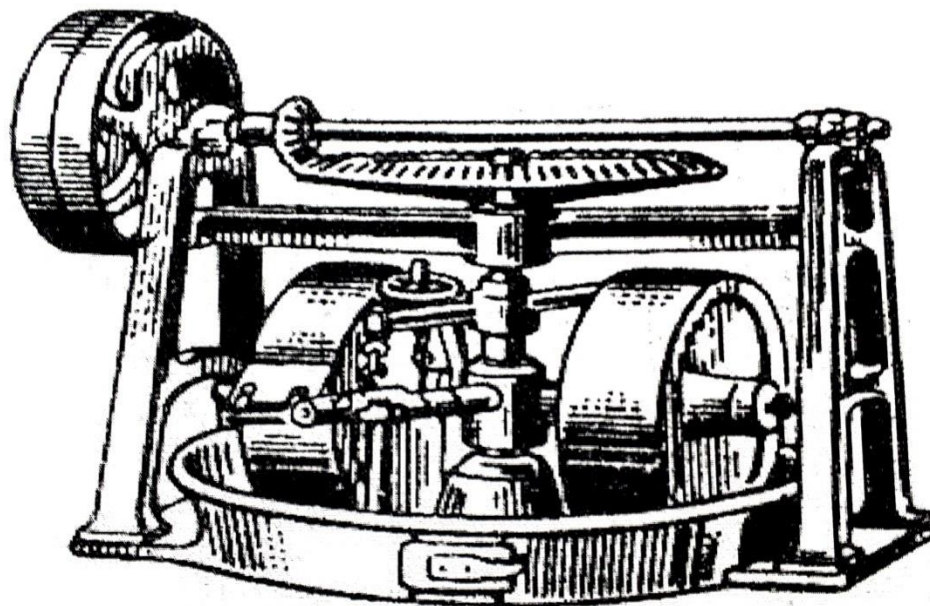


Figure I.8 : Broyeur à meules.

I.6.3.2 Moulins à rouleaux à pression mécanique (fig. I.9) :

Ces broyeurs de forme analogue à celle précédents remplacent l'effet centrifuge imprimé aux meules par une pression mécanique résultant soit de ressorts, soit de vérins hydropneumatiques. Ceci a permis de régler les pressions indépendamment de la vitesse de rotation, d'adopter des pistes circulaires de profil mieux approprié et de concevoir des machines nettement plus puissantes [1].

On en est ainsi actuellement à réaliser d'énormes moulins à rouleaux susceptibles d'assurer une production unitaire de l'ordre de 200 [t/h] en matière crues de cimenterie.

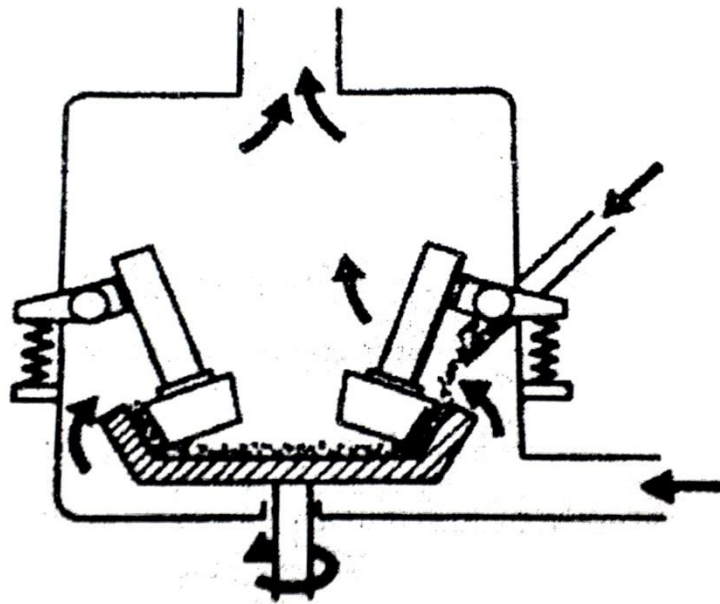


Figure I.9 : Broyeur à rouleaux avec piste tournante.

I.6.3.3 Broyeur à trois cylindres (fig. I.10) :

Afin d'obtenir des rapports de réduction plus importants, de l'ordre de 10/1 par exemple, on combine sur un même bâti trois cylindres horizontaux en zigzag permettant deux passages successifs de la matière entre cylindres (1) et (2) puis entre cylindres (2) et (3), [1].

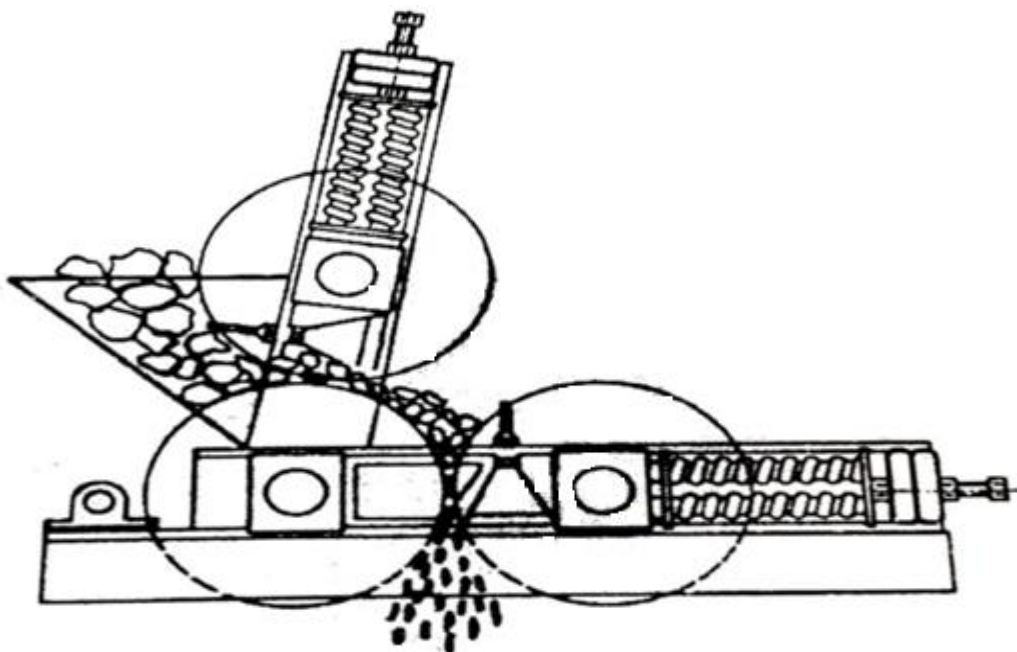


Figure I.10 : Broyeur à 3 cylindres.

I.6.3.4 Broyeurs à alimentation forcée (fig. I.11) :

Ce sont des broyeurs à marteaux avec chambre de broyage close, l'alimentation s'opérant au moyen d'un distributeur à vis d'Archimède qui assure l'étanchéité [1].

Cette alimentation forcée, jointe à une vitesse de rotation élevée (vitesse périphérique 60 à 120 [m/s]) et à l'emploi de grilles fines, permet d'obtenir en passage direct des finesses de l'ordre de 100 à 150 [μm].

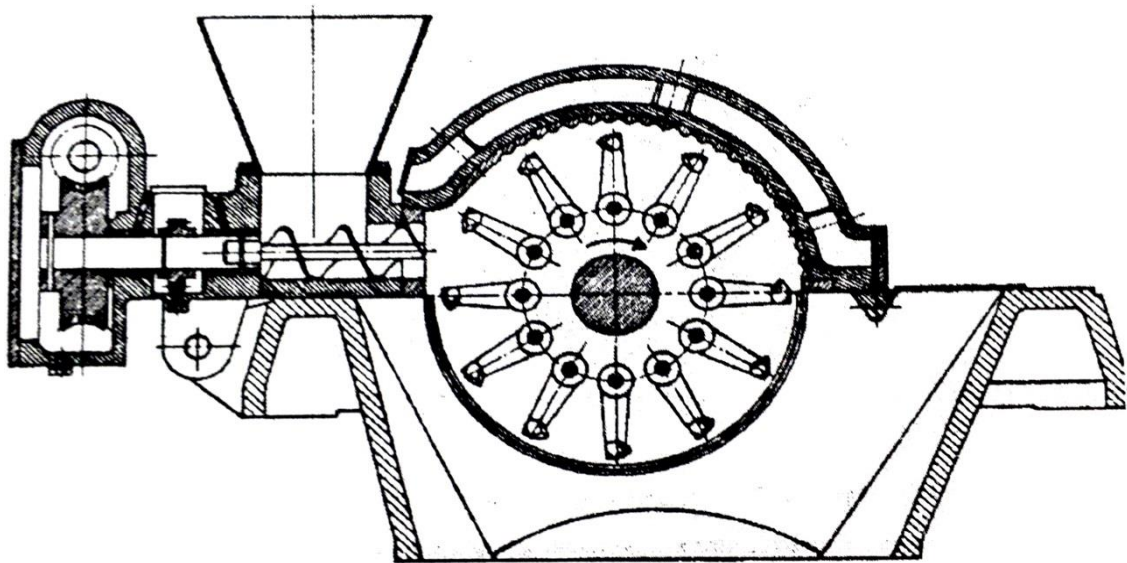


Figure I.11 : Broyeurs à alimentation forcée.

I.6.3.5 Broyeur à croisillons (batteurs rigides) (fig. I.12) :

Ce sont des broyeurs à percussion de forme simplifiée comportant une chambre blindée à l'intérieur de laquelle tourne un rotor armé de 4 batteurs rigides, et dont la partie inférieure est constituée par une grille fine contrôlant la sortie du produit broyé [1].

Il convient pour des broyeurs relativement grossiers (de l'ordre du [mm] ou plus) de toutes matières minérales ou organiques, friables ou demi-dures, en productions unitaires n'excédant pas quelques centaines de Kilogrammes par heure.

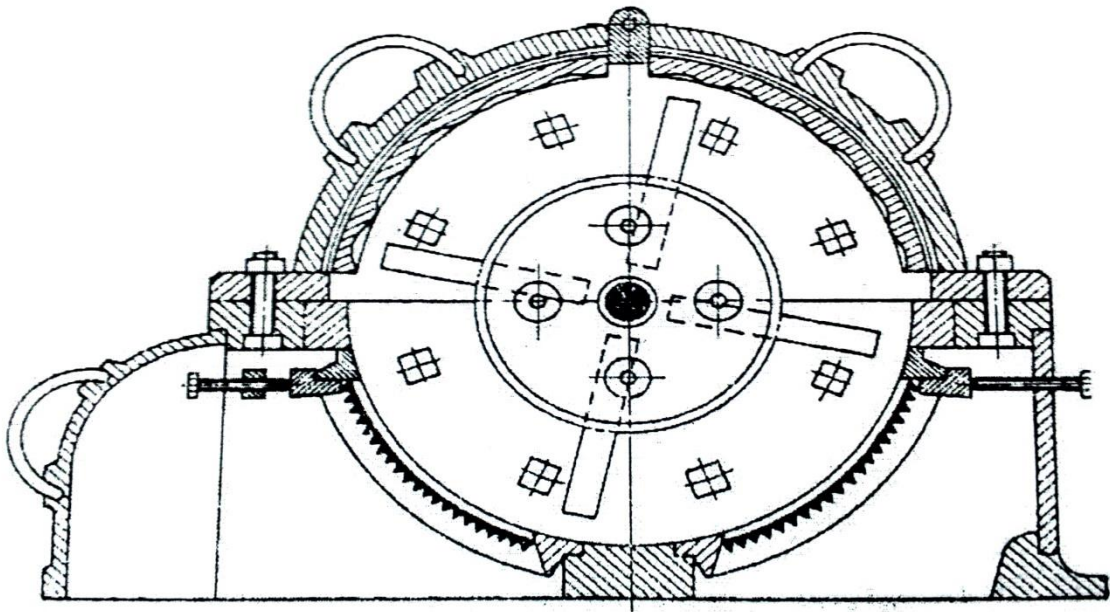


Figure I.12 : Broyeur à croisillons.

I.7 Intérêts du broyage

- La préparation de formes galéniques (poudres, comprimés, gélules...).
- Avoir une granulométrie maîtrisée.
- Meilleure homogénéité et stabilité des mélanges de poudres.
- Améliorer la stabilité des suspensions.
- Accélérer le séchage.
- Extraction liquide des principes actifs (plante) est plus facile.
- Augmenter la vitesse de dissolution ce qui améliore la biodisponibilité.

Conclusion

L'étude faite tout le long de ce chapitre nous permis de conclure :

Le broyage est une opération de mise en forme des solides, elle vise à diminuer et à maîtriser la granularité des solides.

-C'est une opération d'une grande importance et largement utilisation dans le domaine industriel et particulièrement dans les domaines des métallurgiques, chimique, pharmaceutique, agroalimentaire, etc.

-Son but de faciliter les étapes ultérieures du traitement des produits.

-Ce procédé présente des applications vastes et variées.

-Il s'effectue dans des appareils de fraction classée suivant les propriétés des matériaux utilisés.

-Le choix du type de broyeur dépend des propriétés des matériaux à broyer tel que (L'abrasivité, la dureté, la granulométrie du départ, la cohésivité), etc.

Chapitre II

Description de broyeur à boulets.

Histoire du broyeur à boulets

Le broyeur à boulets est au début du 19^e siècle, 1870 dans le moulin, basée sur le développement d'une usine de fil machine de marqueur de taille uniforme en 1908, il créé un self-Mill sans broyant. 30à50 dernières années du 19^e siècle les États-Unis et l'Allemagne ont mis au point un moulin de bol de rouleau, rouleau de moulin et autres pulvérisateurs de disque de type vertical.

Cette année est équipement de traitement des minerais mine comme une partie essentielle de la boule est un développement plus rapide.

Le broyeur à boulets est un processus dans la chaîne de production du ciment.

Il est constitué d'un cylindre en tôle forte, blindée à l'intérieur par des plaques en acier au manganèse, reposant le plus souvent sur des tourillons. Le broyeur utilisé à ERCC-SEG est broyeur à un seul compartiment avec une partie de séchage et à attaque centrale avec un réducteur assurant la liaison entre le broyeur lui-même et le moteur d'entraînement [5].

II.1 Broyeur conventionnelle à boulets

Les cimenteries utilisent essentiellement des broyeurs à boulets. Ces broyeurs ont un faible rendement, car une grande partie de l'énergie fournie est transformé en chaleur. Le reste sert à la fragmentation des matériaux, mais aussi à leur ré agglomération. Les grains sont traits collectivement à l'intérieur du broyeur par des boulets qui opèrent par chocs [5].

II.2 Définition du broyeur à boulets

Un broyeur à boulets est un cylindre en rotation contenant des boulets d'acier qui agissent comme des medias de meulage, le matériau à broyer est mis dans le baril cylindrique, qui tourne à une vitesse compris entre 4 et 20 tour par minute, en fonction du diamètre de l'usine, plus le diamètre de l'appareil cylindrique est large ,plus la vitesse de rotation est lent.

La rotation produit des forces centrifuges qui soulèvent les boulets à une hauteur donne, et les font tomber dans le cylindre et sur le matériau pour être broyé.

Le produit est mélangé et broyé en poudre par le media de meulage (boulets d'acier) à la suite de la rotation. Si la vitesse du moulin est trop grande, le cylindre agira comme

une centrifuge, ce qui permet aux boulets de rester sur le périmètre du moulin au lieu de retomber [5].

Le moment où un broyeur à boulets agit comme une centrifugeuse est appelée la «vitesse critique». La vitesse de fonctionnement du broyeur boulet est généralement comprise entre 50% et 90% de vitesse critique.

II.3 Objectifs de broyeur à boulet

-Broyer la matière crue, le clinker et les combustibles solides au niveau d'une fine poudre adaptée aux besoins.

-Le broyeur doit produire aussi une finesse régulière avec une consommation d'énergie minimum et une bonne fiabilité (taux de fiabilité > 98%) [6].

II.4 Broyeur à boulets

Le système le plus commun est le broyeur à boulets (70% des broyeurs Lafarge) c'est la technologie la plus ancienne et donc la mieux connue.

Elle est utilisée pour broyer le cru, le clinker et les combustibles solides.

Elle est aussi utilisée dans les voies humides pour la pâte.

La matière est introduite dans tube rotatif contenant des boulets en acier.

La réduction de la taille est due au choc entre les boulets et la matière. Deux phénomènes se produisent :

- 1) L'effet de **cataracte**, concassage de matière.
- 2) L'effet de **cascade**, attrition.

Les fines sont évacuées du broyeur par la poussée de la matière entrant dans le broyeur et aussi par le flux gazeux emportant les plus fines particules [6].

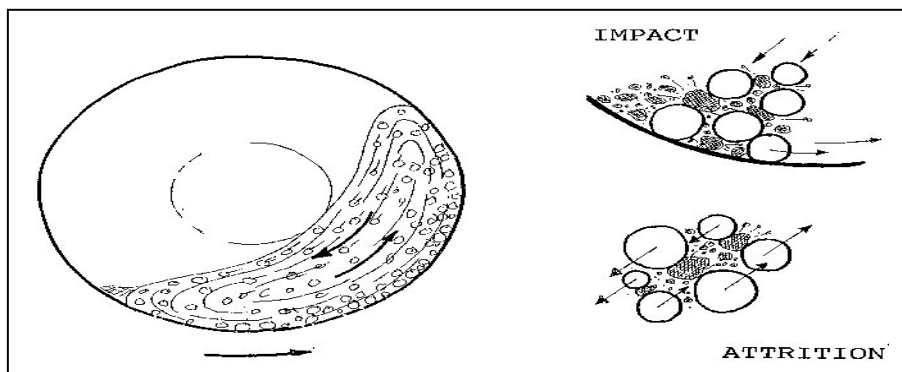


Figure II.1.1: Explique l'effet d'impact et l'effet d'attrition [7].

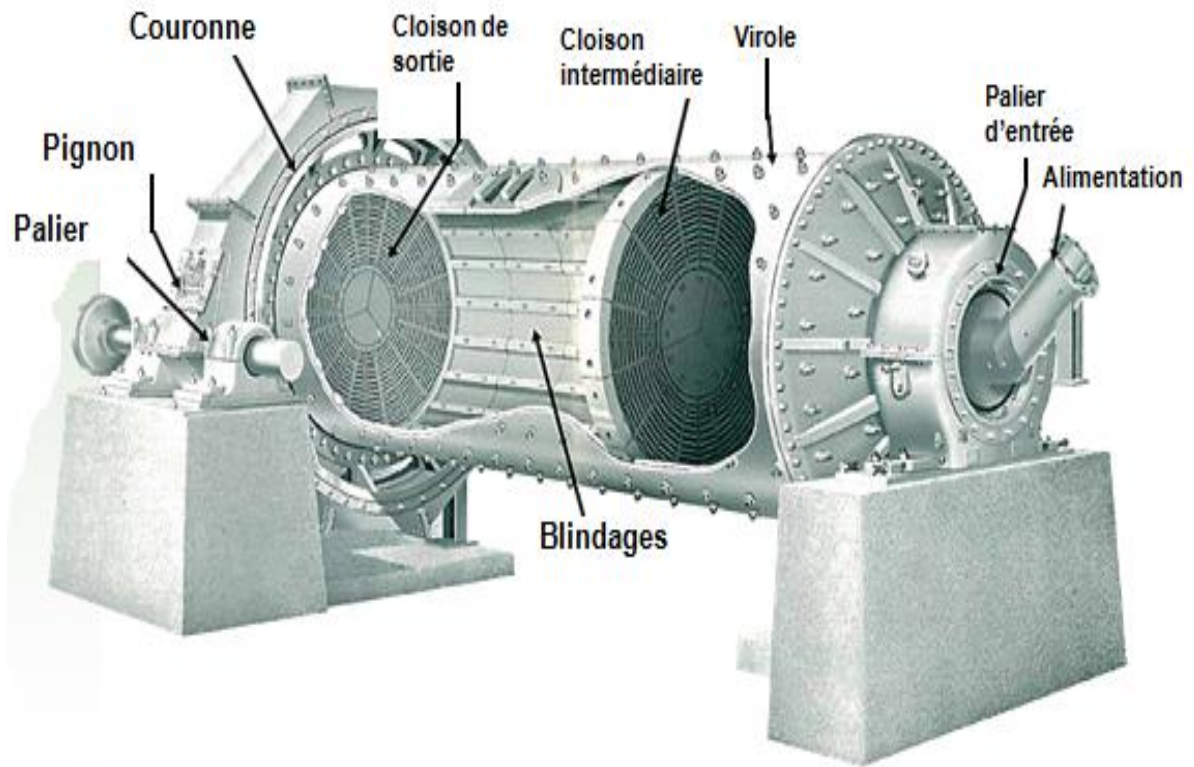


Figure II.1.2 : Le broyeur à boulets [7].

II.5 Les différents broyeurs à boulets

Les broyeurs peuvent avoir 1,2 ou 3 compartiments.

Dans les broyeurs à cru nous n'avons pas besoin de broyer si fin.

Ainsi il n'est pas rare de trouver des broyeurs mono-chambre courts utilisant de la matière grossière comme charge [6].

Est existé 3 types :

1) Broyeur Air-Sweept

-Il ne comprend qu'un compartiment de broyage sans ou avec cloison de sortie.

-La matière est transportée pneumatiquement à la sortie du broyeur.

-Cette conception est surtout utilisée pour les matériaux à fort taux d'humidité et comprend généralement un compartiment de séchage [6].

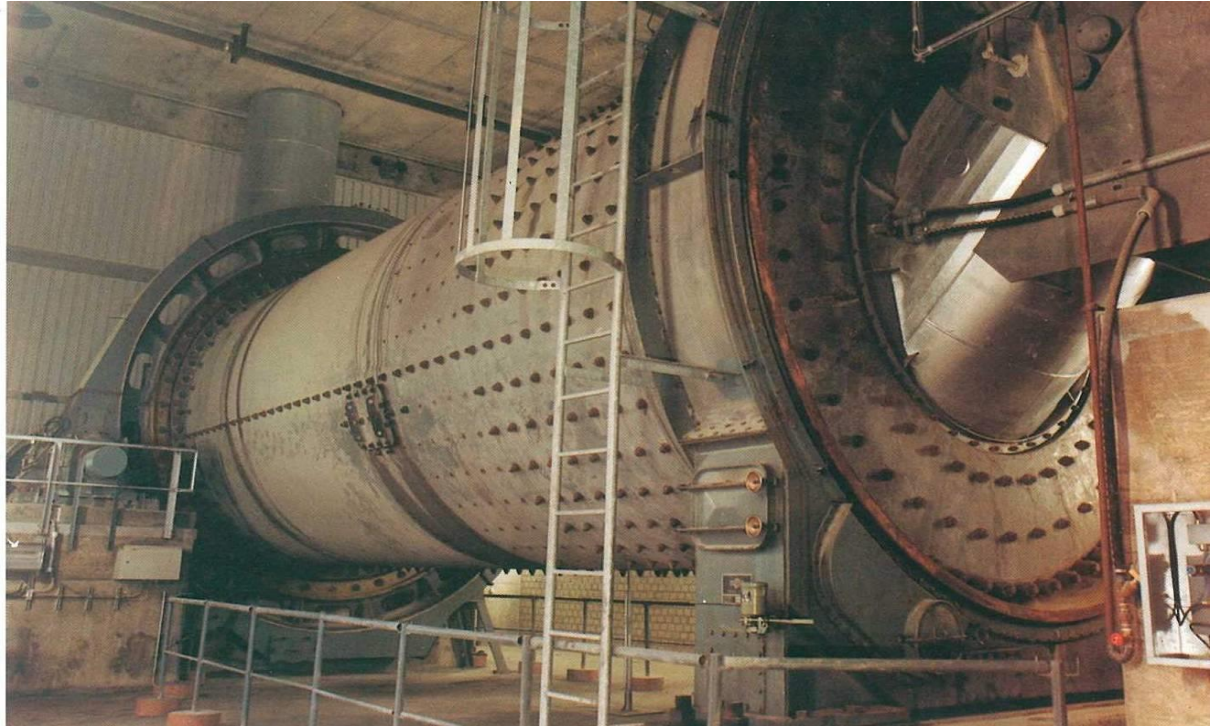


Figure II.2 : Broyeur Air-Swept [7].

2) Bi-rotateur (Décharge centrale)

Ce système accepte aussi les flux d'air importants [6]; il est utilisé pour sécher la matière crue :

- Le broyeur à boulets comporte deux compartiments de broyage séparés par une décharge centrale.
- La matière peut être séchée dans un compartiment de séchage situé en amont, puis pré broyée dans le 1^{er} compartiment.
- Ensuite, la matière sort du 1^{er} compartiment en passant par la décharge centrale pour être transportée jusqu'au séparateur.
- Le séparateur trie la matière. Les particules grossières retournent au broyeur (principalement dans le 2^{ème} compartiment de broyage). Les fines sont envoyées directement au silo farine.
- La matière broyée dans le 2^{ème} compartiment sort également par la décharge centrale, pour être à nouveau triée dans le séparateur.

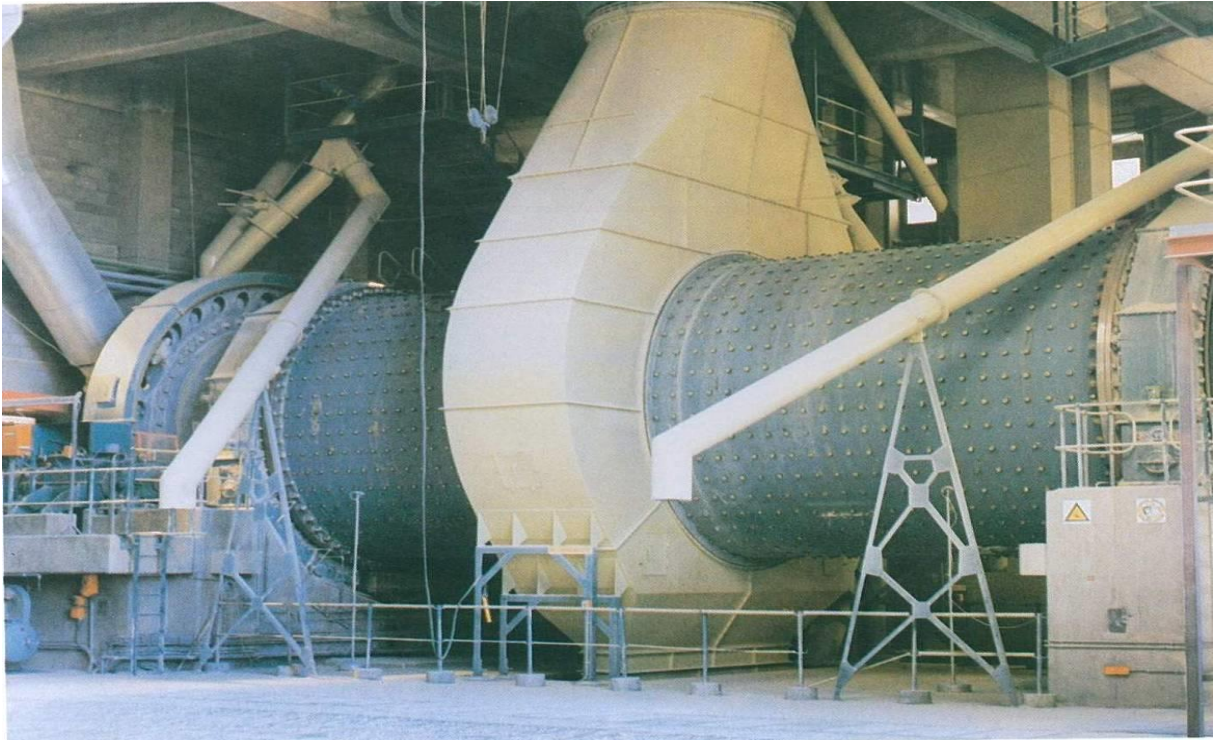


Figure II.3 : Broyeur à décharge centrale [7].

3) Compound (deux compartiments de broyage)

Est le système le plus fréquemment utilisé chez Lafarge (66%).

Il a 2 compartiments pour optimiser le processus : le premier est utilisé pour concasser, le second pour broyer finement. Les deux sont séparés par une cloison [6].

Cette séparation permet la constitution de deux charges différentes et régule aussi le flux de matière.

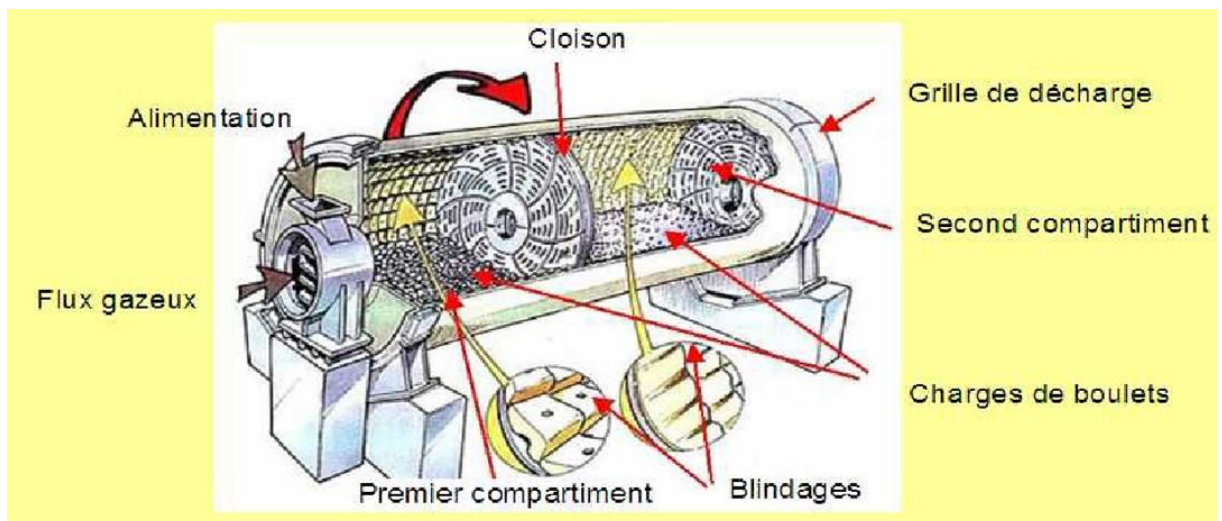


Figure II.4 : Broyeur à deux compartiments de broyage [6].

II.6 Caractéristiques technique du broyeur à boulets LCM (Lafarge Ciment M'sila) :

repère	valeur		notation
Longueur totale	15.5		[m]
Diamètre total	4.6		[m]
La vitesse de rotation	15.33		[N/min]
La vitesse de fonctionnement	76.1-77% de V_{cr}		[tr/min]
Nombre de compartiment	2		
	Compartiment 1	Compartiment 2	
Longueur effective	4.89	9.8	[m]
Diamètre effectif	4.41	4.52	[m]
Charge nominale	86	202	[ton]
Taux de charge nominal	26.9	28.4	[%]
La hauteur nominale	821	781	[mm]
La puissance nominale	1381	2943	[kW]
Charge totale nominal	288		[ton]
La puissance totale nominale	4324		[kW]
Charge maximale	94	223	[ton]
Taux de charge maximale	29.4	31.3	[%]
La hauteur maximale	673	727	[m]
La puissance maximale	3098	1454	[kW]
Charge totale maximale	317		[tonne]
La puissance totale maximale	4551		[kW]

Tableau (II.1) : Présentation les caractéristiques techniques du broyeur à boulets [8].

II.7 Les Eléments du broyeur à boulets

Voyons maintenant les éléments principaux d'un broyeur à boulets [6].

II.7.1 La virole

La virole est la structure supportant les éléments internes comme les blindages et la cloison et la couronne externe, les trous percés dans la virole servent à fixer les blindages et la cloison. Les trois trous percés dans la virole servent à fixer les blindages et la cloison.



Figure II.5 : La virole.

II.7.2 Les portes de visite du broyeur

Elles donnent accès au broyeur pour les visites, la maintenance et les réparations de la charge. Le parti de la virole entourant les portes est plus épais que le reste de la virole. Elle est conçue pour accepter l'augmentation des contraintes mécaniques.



Figure II.6 : Les portes de visite du broyeur.

II.7.3 La goulotte d'entrée

Elle dirige la matière (et les rejets du séparateur) dans le 1^{er} compartiment du broyeur.

Elle est équipée pour résister à l'usure.

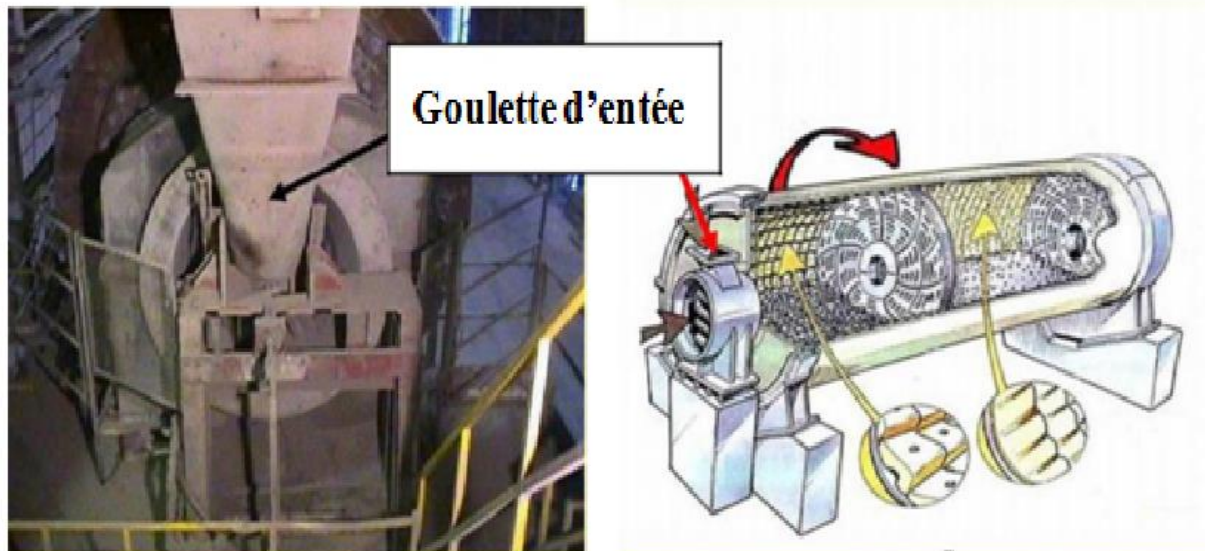


Figure II .7 : La goulotte d'entrée.

I.7.4 Les blindages d'entrée

Ce sont des blindages d'usure amovibles placés sur fond d'entrée du 1^{er} compartiment. Ils protègent le fond d'entrée et la virole des chocs, des contraintes et de l'usure. Ce sont des blindages d'usure remplaçables placés sur la virole.



Figure II .8 : Blindages d'entrée.

II.7.5 Blindages de virole

Ce sont des blindages d'usure remplaçable sur la virole. Ils protègent la virole des chocs, des contraintes et de l'usure. Selon leur emplacement et leur conception ils ont une forme spéciale destinée à optimiser la remontée ou le classement de la charge afin d'augmenter l'efficacité du broyage.

Dans le premier compartiment nous devons briser de grosses particules, nous allons utiliser de gros boulets remontés aussi haut que possible pour obtenir l'effet de cataracte le plus efficace.

Dans le second compartiment ou il ya juste a broyer finement la matière.

L'effet de cascade est fourni par des boulets plus petits.

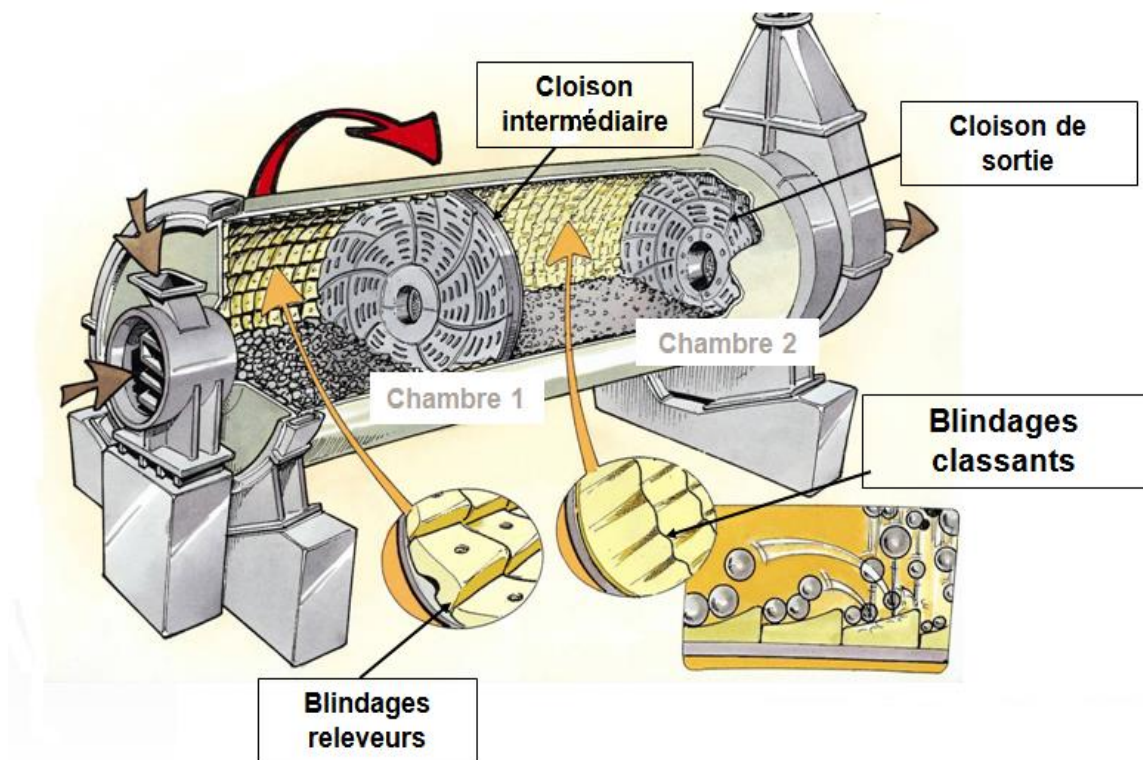


Figure II.9 : Blindage Releveur et Classant.

Les éléments de blindage :

1. Blindage fond d'entrée.
2. Blindage Releveur.
3. Blindage Classant.
4. Blindage de Cloison (entrée –intermédiaire- sortie).

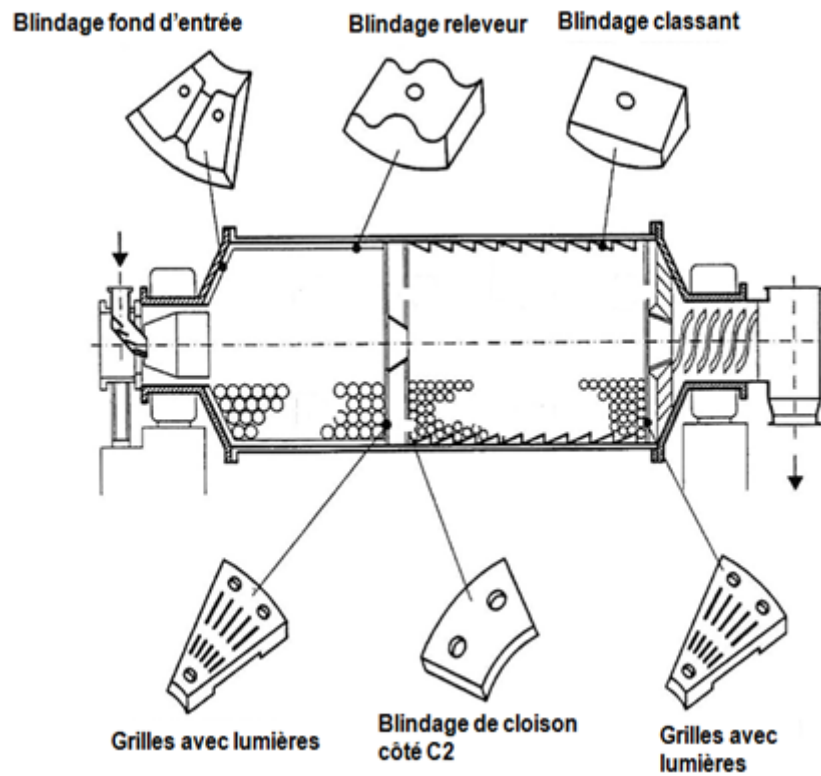


Figure II.10 : Les différents types de blindages à broyeurs à boulets [7].

-Le profil du blindage est très important pour assurer un bon effet releveur et classant des corps broyant.

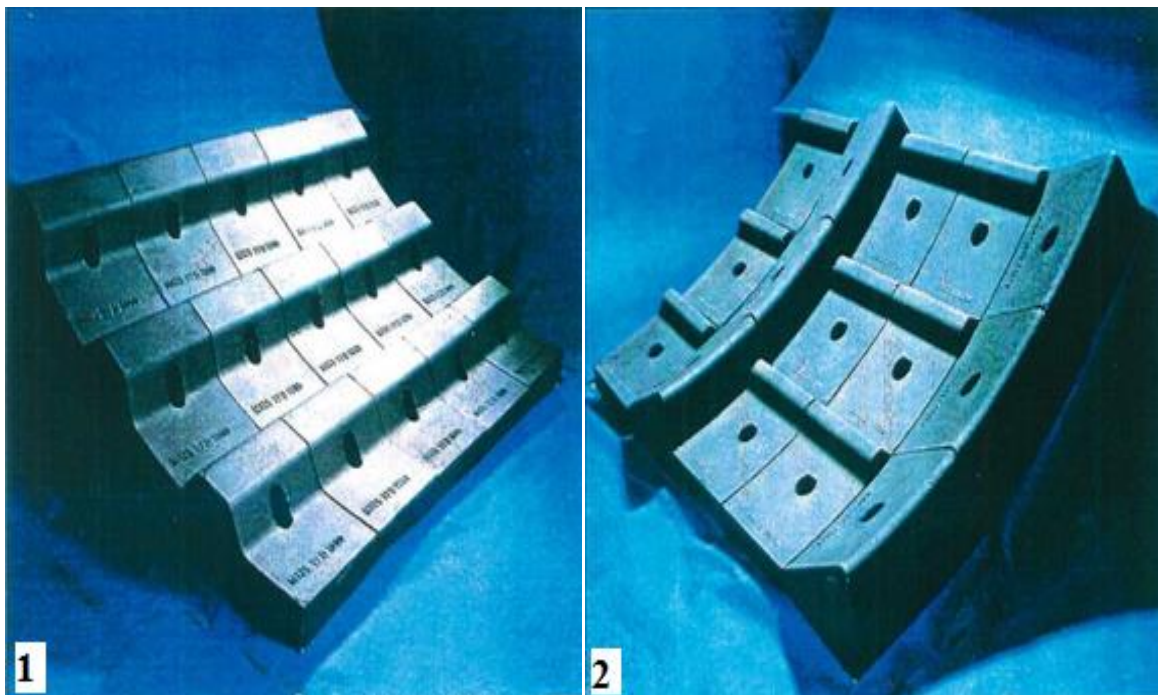


Figure II.11 : Les deux profils : Releveurs (photo 1) et Classant (photo 2) [7].

II.7.6 Engins broyant (les boulets)

La taille des boulets est habituellement comprise entre : 25 mm et 100 mm (5/8" à 4"). Elle peut être aussi de différentes longueurs et diamètres.

- Diamètre des boulets dans C1 de 90-100 mm à 60-70 mm.
- Diamètre des boulets dans C2 de 50-60 mm à 17-20 mm.

Ils sont faits d'acier forge ou moulés à haute teneur en chrome.



Figure II.12 : Les engins broyant.

II.7.7 Chargement du broyeur



Figure II.13 : Compartiment vide.



Figure II.14 : Compartiment trop plein [9].

II.7.8 Les cloisons

Elles séparent le broyeur en différents compartiments :

- Autorisent des charges différentes dans chaque compartiment.
- Permettent de contrôler le flux de matière d'un compartiment dans l'autre.

Il existe plusieurs types de cloisons :

- Double cloison pleine.
- Double cloison avec anneau central ajustable.
- Double cloison avec écopés ajustables.

Est existe aussi différents types de cloisons :

- Intermédiaires.
- De sortie.
- Centrales (avec sortie).
- De transfert (entre chambre de séchage et C1).

1. Cloison de l'entre

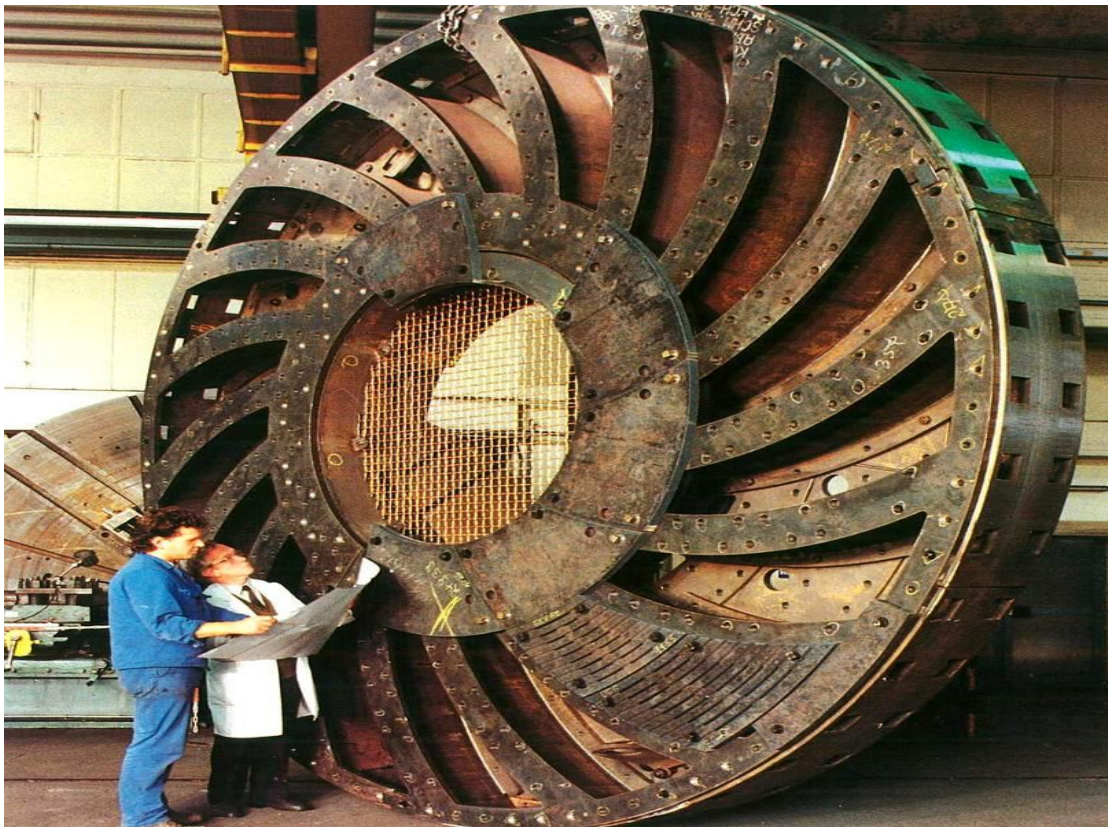


Figure II.15 : Cloison de l'entre [7].

2. Cloison intermédiaire

- La cloison intermédiaire sépare les compartiments de broyage.
- Ceci permet d'adapter le diamètre des boulets aux caractéristiques de la matière.
- La matière est transférée du 1^{er} vers le 2^{ème} compartiment par un système d'écofes internes à la cloison et un cône de transfert vers le compartiment suivant.



Figure II.16 : Cloison intermédiaire [7].

3. Cloison de sortie

-La cloison de sortie permet de retenir la charge broyant dans le dernier compartiment du broyeur et de laisser sortir la matière.

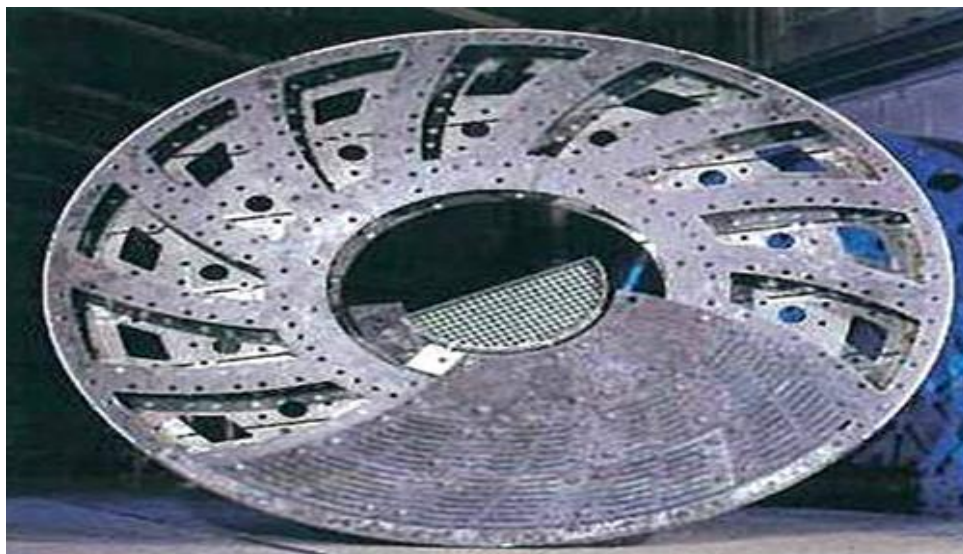


Figure II.17 : Cloison de sortie [7].

II.7.9 Grilles de cloison

Elles possèdent des blindages amovibles résistants l'usure avec des lumières retenant la matière dans le compartiment jusqu'à ce qu'elle soit assez fine pour passer au travers.

Les lumières se caractérisent par leur double forme évasée (les particules et les fragments de matière ne resteront pas coincés).

Elles protègent la structure de la cloison de l'usure et de la casse.

Les gros broyeurs ont trois rangées de grilles (externe, médiane et interne).



Figure II.18 : Les composants de cloison.



Figure II.19 : Les grilles de cloison.

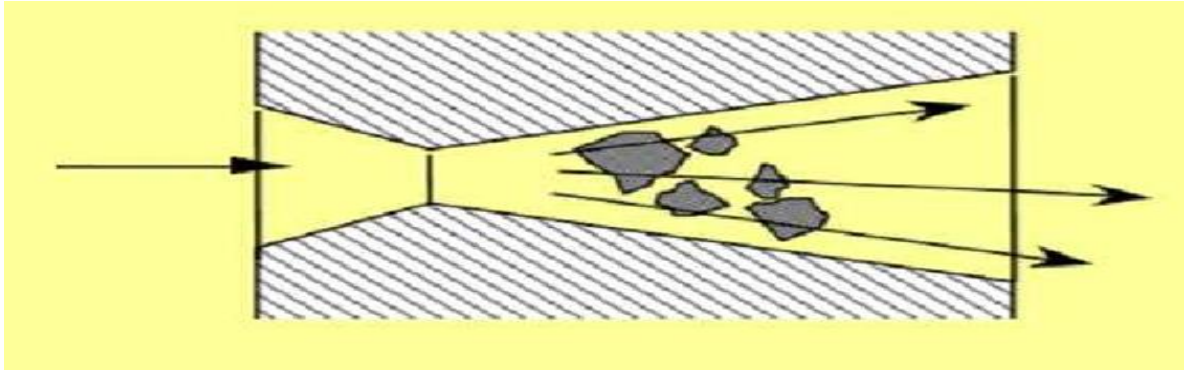


Figure II.20 : Schéma explique comment passent les particules de lumières.

II.7.10 Grilles de décharge

Identique aux grilles de cloison avec les différences suivantes :

-Fixées au fond de sortie.

-Lumières légèrement plus large que les lumières de la cloison intermédiaire (+2mm).

-Permet de s'assurer que les matériaux grossiers qui traversé la cloison intermédiaire puissent sortir du broyeur.

-Lorsqu'une grosse particule est sortie du broyeur elle peut retourner dans le 1^{er} compartiment par le séparateur pour être broyée à nouveau.

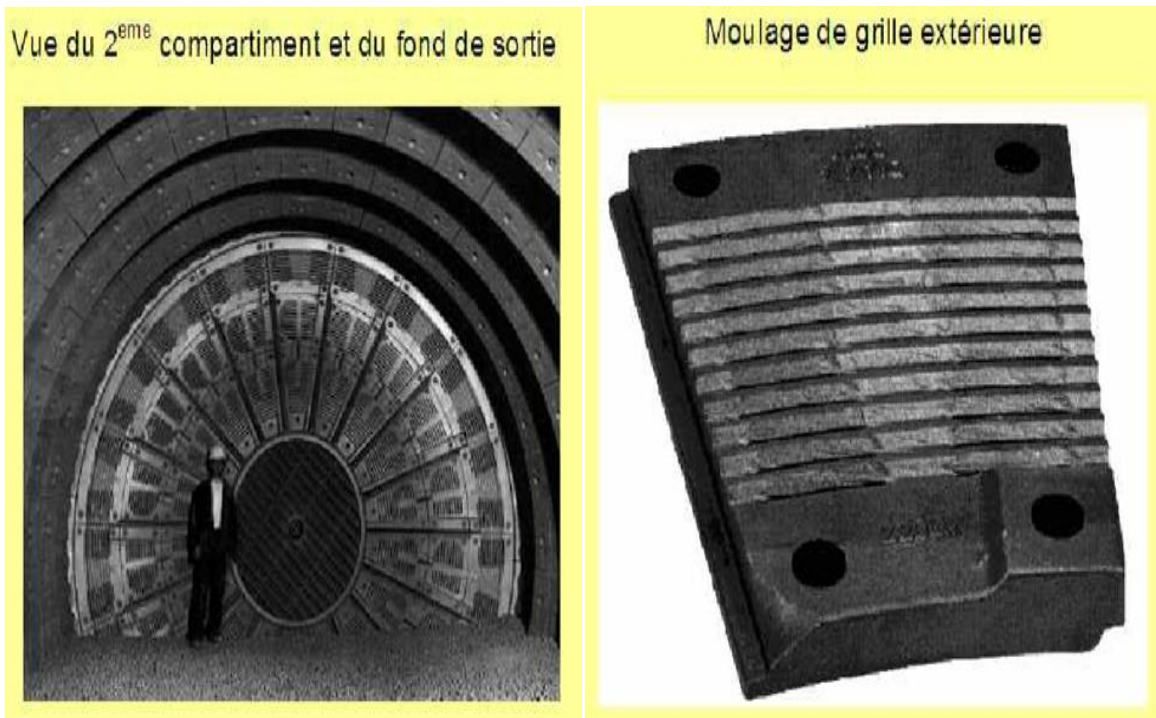


Figure II.21 : Les grilles de décharge.

II.7.11 Paliers de broyeur

Il y a deux types de paliers :

1-A patins

Paliers à patins pour petits broyeurs
(conception avec deux coussinets)



Patins pour gros broyeurs
(conception avec quatre coussinets)



Figure II.22 : Les paliers à patins.

2- A tourillons



Figure II.23 : Palier à tourillons.

II.7.12 Commande

Ensemble des éléments électriques et mécaniques nécessaires pour fournir la force motrice au broyeur. Dans le groupe Lafarge, la gamme des puissances de broyeurs va de 200 KWH (150 hph) pour les petits broyeurs, à 8000 KWH (5900 hph) pour les plus gros broyeurs (par exemple : 16 m de long et 5.5 m de diamètre).

La vitesse du broyeur est fixe et calculée en fonction de la charge pour atteindre le plus haut point de libération, afin d'obtenir le maximum d'énergie.

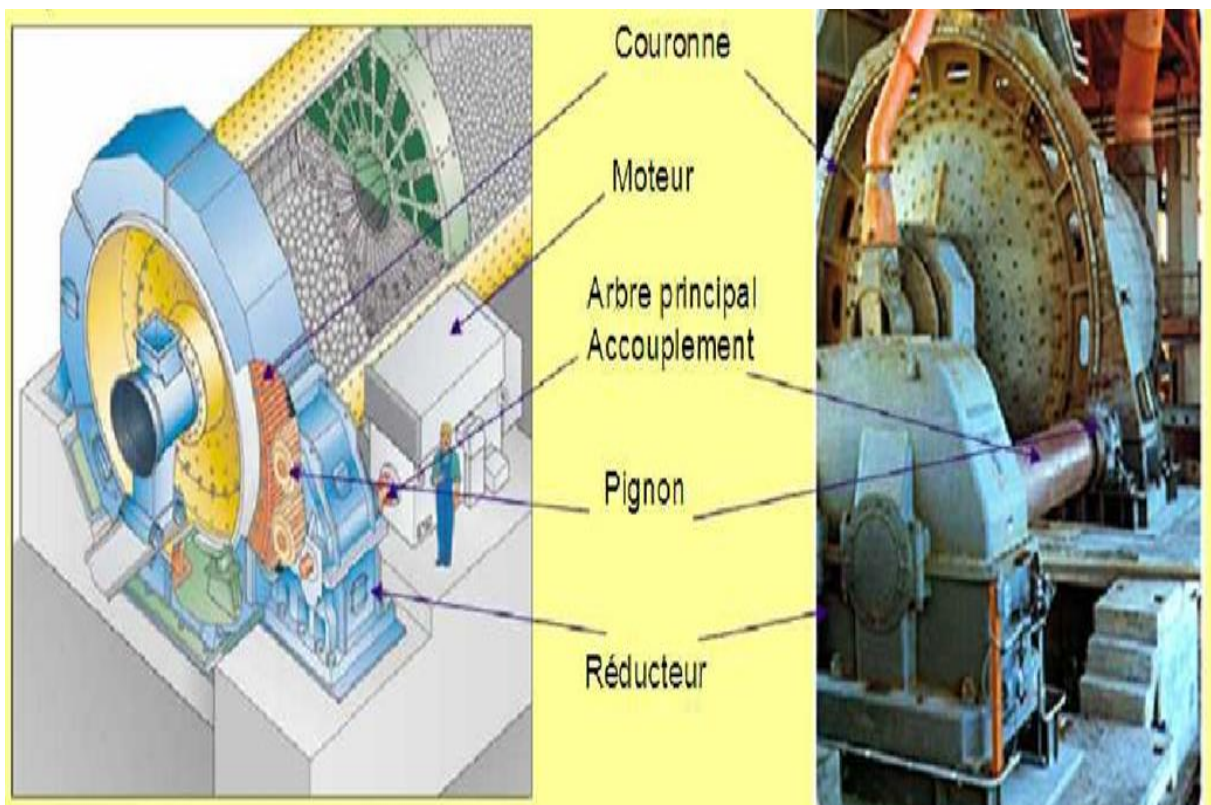


Figure II.24 : La partie commande de broyeur à boulets.

II.7.13 Pompes de lubrification

Pompes paliers-utilisées pour soulever le tourillon ou la fusée du broyeur sur la piste de roulement.

Pompes haute et basse pression :

-Haute pression-utilisée pour soulever le broyeur au dessus des coussinets durant le démarrage.

-Basse pression-utilisée pour alimenter la fusée avec un débit constant pour former un film d'huile.

L'injection d'huile maintient la fusée sur un fin film d'huile au dessus des coussinets pendant le fonctionnement.

Dans la plupart des installations, les pompes à haute et basse pression ont un moteur et un arbre communs et tournent en continu.

Dans d'autres application, la pompe haute pression est autonome et s'arrête après le démarrage.

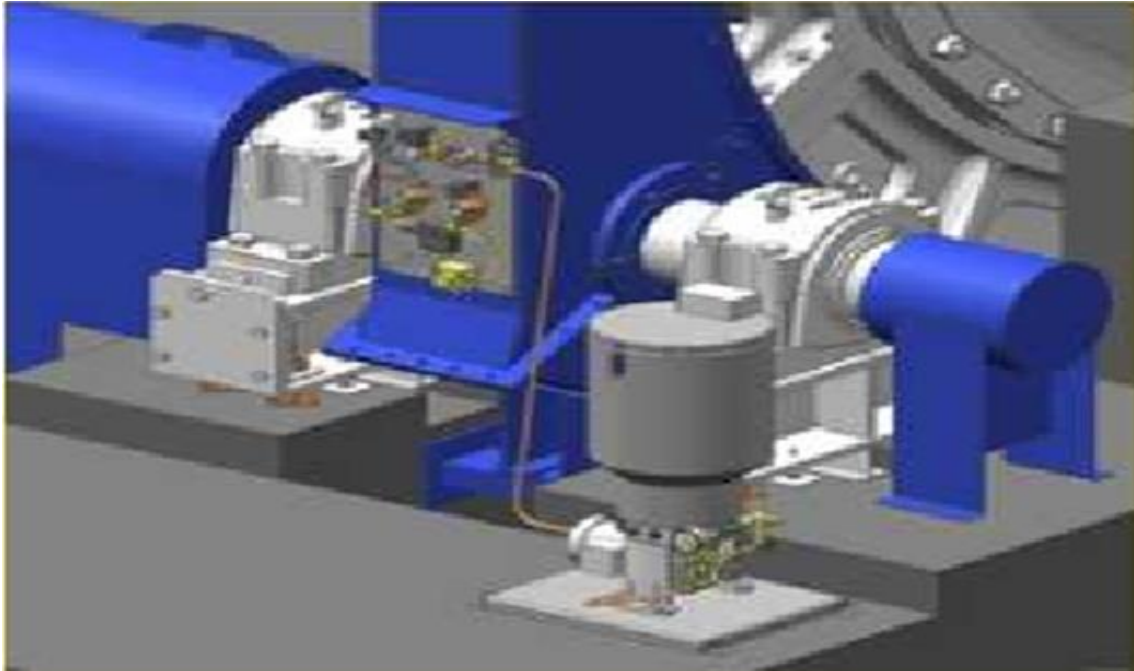


Figure II.25 : Pompes de lubrification (haut pression et basse pression).

II.7.14 Niveau de matière

Visuellement, il devrait être au niveau du sommet de la charge et ce sur toute la longueur du compartiment.

Pour contrôler, un arrêt crash est nécessaire.

Pour surveiller le niveau de matière pendant le fonctionnement de l'installation, les meilleurs outils sont des oreilles électriques ou des micros.

Plus le bruit est fort plus le niveau de matière est bas.

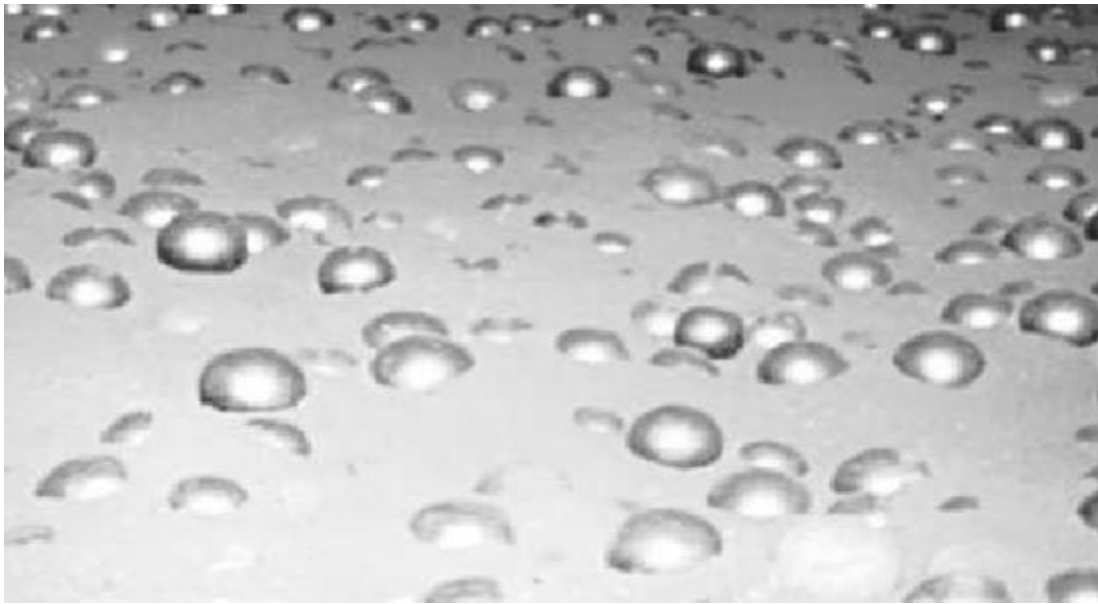


Figure II.26 : Photo montre le bon niveau de matière.

II.7.15 Ventilation du broyeur

La ventilation a les buts suivants :

- Extraire les fines dès qu'elles sont produites et ainsi éviter le sur-broyage (20% de la matière).
- Favoriser le refroidissement du broyeur et de la matière.
- Réduire l'humidité de la matière (pour une humidité importante des gaz chauds sont nécessaires).
- Aider l'avancée de la matière dans le broyeur.

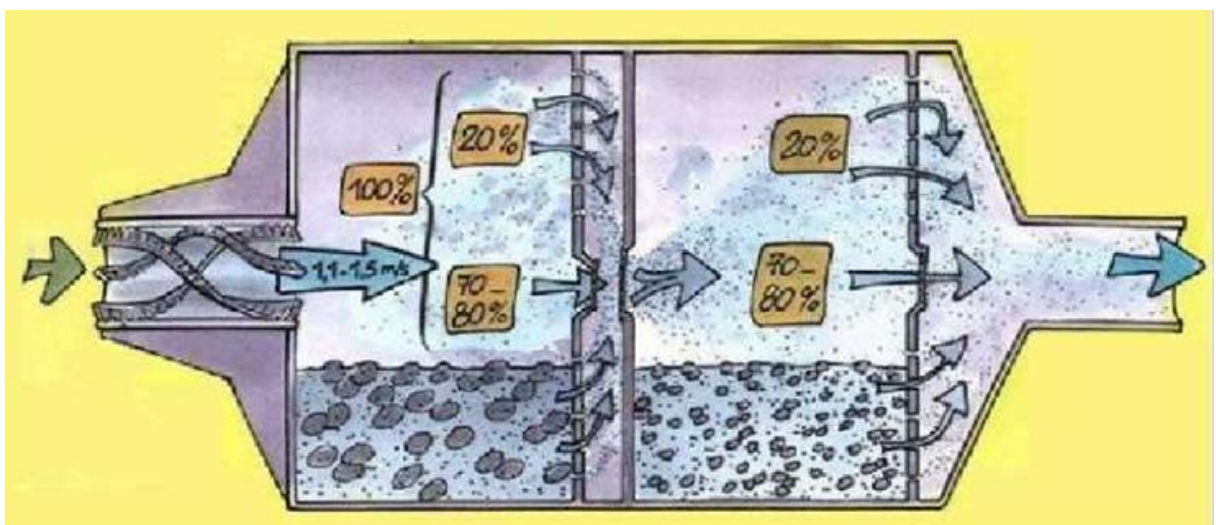


Figure II.27 : Ventilation du broyeur.

La ventilation est exprimée en débit. Voici les valeurs recommandées :

- 0.3-0.5 Nm³ /kg de clinker.

- 0.6-0.8 Nm³ /kg de cru dosé.

La vitesse des gaz est aussi utilisée.les valeurs préconisées pour les broyeurs cuits sont :

-1.4 à 2.2 m/s au dessus de la charge dans un circuit fermé.

-0.9 à 1.5 m/s pour un circuit ouvert.

II.7.16 Injection d'eau

Quand le refroidissement de l'air n'est pas suffisant, une injection d'eau est utilisée pour faire baisser la température du ciment.

A cause de la température le gypse se déshydrate partiellement pour forme des semi-hydrates.

Ces semi-hydrates sont importants pour avoir de bonnes résistances à un jour mais ne doivent excéder 40 % du gypse (1 % du ciment).

Si la température est trop haute.la déshydratation complète du gypse (formation d'anhydrite) est responsable du phénomène de fausse prise sulfate.

C'est pourquoi la température du ciment ne doit atteindre 110 °c.



Figure II.28 : Injection d'eau.

II.8 Spécifications des broyeurs à boulets

modèle	Vitesse de rotation (r/min)	Chargement du boulet (t)	Taille d'alimentation en (mm)	Taille de la sorte (mm)	Capacité (t/h)	Puissance (kW)	Poids(t)
Ø 900*1800	36-38	1.5	≤20	0.075-0.9	0.65-2	18.5	4.6
Ø 900*3000	36	2.7	≤20	0.075-0.9	1.1-3.5	22	5.6
Ø 1200*2400	36	3	≤25	0.075-0.6	1.5-4.8	30	12
Ø 1200*3000	36	3.5	≤25	0.074-0.4	1.6-5	37	12.8
Ø 1200*4500	32.4	5	≤25	0.074-0.4	1.6-5.8	55	13.8
Ø 1500*3000	29.7	7.5	≤25	0.074-0.4	2-5	75	15.6
Ø 1500*4500	27	11	≤25	0.074-0.4	3-6	90	21
Ø 1500*5700	28	12	≤25	0.074-0.4	3.5-6	130	24.7
Ø 1830*3000	25.4	11	≤25	0.074-0.4	4-10	130	28
Ø 1830*4500	25.4	15	≤25	0.074-0.4	4.5-12	155	32
Ø 1830*6400	24.1	21	≤25	0.074-0.4	6.5-15	210	34
Ø 1830*7000	24.1	23	≤25	0.074-0.4	7.5-17	245	36
Ø 2100*3000	23.7	15	≤25	0.074-0.4	6.5-36	210	34
Ø 2100*4500	23.7	24	≤25	0.074-0.4	8-43	245	42
Ø 2100*7000	23.7	26	≤25	0.074-0.4	8-48	280	50
Ø 2200*4500	21.5	27	≤25	0.074-0.4	9-45	280	48.5
Ø 2200*6500	21.7	35	≤25	0.074-0.4	14-26	370	52.8
Ø 2200*7000	21.7	35	≤25	0.074-0.4	15-28	380	54
Ø 2200*7500	21.7	35	≤25	0.074-0.4	15.28	380	56

Tableau II.2 : Spécification des broyeurs à boulets [5].

II.9 Le travail de la charge

Les boulets et la matière sont remontés par la rotation du broyeur.

L'importance de la remontée dépend la forme des blindages et de la vitesse du broyeur.

Elle est conçue pour remonter la charge au point de chute le plus haut de façon à avoir l'énergie maximum.

Mais les boulets doivent tomber sur l'extrémité de la charge et non sur les blindages.

Cela produit des impacts importants qui brisent grossièrement la matière fraîche.

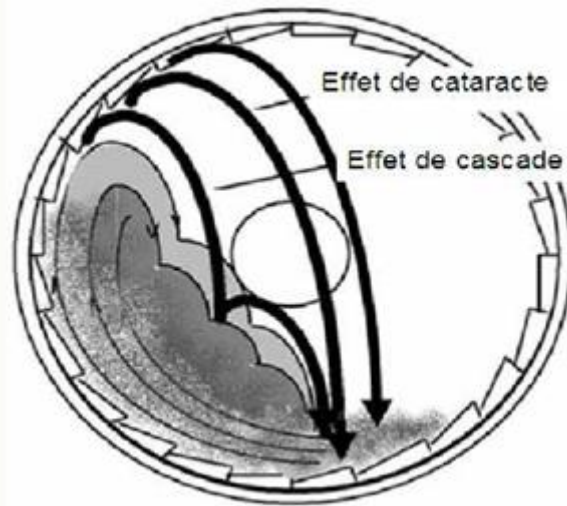


Figure II.29 : L'effet cataracte et cascade [9].

Les boulets sont remontés un point de chute moins haut que l'effet de cataracte.

Quand elle retombe, la charge glisse sur elle-même en roulant en culbutant à la surface.

Ce phénomène crée l'attrition nécessaire pour générer des fines.

II.10 Caractéristique de broyeur à boulet

- 1- Le broyeur à boulets est un outil de broyage efficace qui est capable de broyer différents types de matériaux en poudre fine.
- 2- Le broyeur à boulets écrase et broie plusieurs sortes de minerais et de roches pendant l'extraction.

3- Le broyeur à boulets est largement utilisé dans l'industrie minière, de construction et dans l'industrie chimique.

4- Deux techniques de broyage qui peuvent être utilisées sont le broyage de type-sec et le broyage de type humide.

5- Le broyeur à boulets peut être soit de type tabulaire ou de type coulant, en fonction de la forme dans laquelle le matériau est déchargé.

6- Le broyeur à boulets va tourner à une vitesse spécifique provoquant l'écrasement de la matière pour les transformer en poudre, par les différentes pièces du media de meulage cela peut prendre plusieurs heures. Cependant, plus le broyeur à boulets est court, plus le matériel deviendra poudre.

7- La taille de la particule ultime dépend en grande partie de la dureté de la matière à broyer, et le temps utilisé dans le procédé de broyage [5].

II.11 Principe de fonctionnement de broyeur à boulet

Broyeur à boulets de ce principe, un type horizontal et tubulaire périphérique en cours d'exécution, a deux entrepôts.

Le matériau entre en spirale et uniformément le premier entrepôt de la machine de fraisage dans l'axe creux matériaux d'entrée périphérique matériel. Dans cet entrepôt, il y a une échelle ou ondulation scoreboard, du fait que le corps de baril tourne et puis produit force centrifuge, à cette époque, la bille d'acier est effectuée à une certaine hauteur et tombe vers le bas pour rendre le matériel lourd barre et broyées. Après avoir été broyées grossièrement dans le premier entrepôt, le matériel, puis entre dans le deuxième entrepôt pour réaffutage avec la bille d'acier et scoreboard. En fin de compte, la poudre est déchargée par le matériel de bord sortie et les produits finaux sont prêts.

Dans un autre cas :

- Contrôle de la finesse qui est fonction de la durée de séjour de la matière dans l'appareil.

- La qualité des corps broyant peut être adaptée à la matière ainsi que le revêtement.

- Souplesse d'utilisation : on peut passer rapidement d'une matière à une autre.

- Possibilités de ventilation, chauffage, refroidissement. la température de la matière peut être ainsi maintenue dans limites strictes.

- Investissement réduit : convient parfaitement pour les domaines d'utilisation ou la quantité sont relativement peu importantes [5].

II.12 Les régimes de fonctionnements

La vitesse à laquelle le broyeur tourne est un élément déterminant du processus de Broyage. C'est ce paramètre qui va déterminer le régime de fonctionnement du broyeur. La vitesse permet de déterminer à quel moment la masse bruyante va se détacher de la Surface du cylindre pour retomber sur les granulats solides.

- À vitesse réduite, le régime est dit « en cascade ». Dans ce cas, la charge bruyante a tendance à rouler jusqu'au point bas du cylindre. Il y a un phénomène d'abrasion des granulats à cause de cette charge bruyante qui « roule » tout simplement sur eux. Ce régime induit la production de particules fines. Afin d'éviter l'usure du broyeur à cause de cette même abrasion, il faut augmenter l'épaisseur du blindage, ce qui peut s'avérer coûteux. Ce régime n'est dès lors pas choisi préférentiellement.

- À plus haute vitesse, le régime est dit « en cataracte ». La charge bruyante est dans ce cas projetée sur les granulats à broyer en une série de paraboles et s'écrase sur ces derniers. La fragmentation produit dès lors de plus gros grains. Cette méthode permet de réduire l'épaisseur du blindage. Ce régime est choisi préférentiellement. Lorsque la vitesse augmente encore, la charge bruyante ainsi que les granulats sont plaqués contre les parois et il n'y a plus aucune réduction de taille. Ce point correspond à la vitesse critique du système. En pratique, on choisit une vitesse entre 50 et 90 % de la vitesse critique. Ce choix est influencé par des considérations économiques [10].

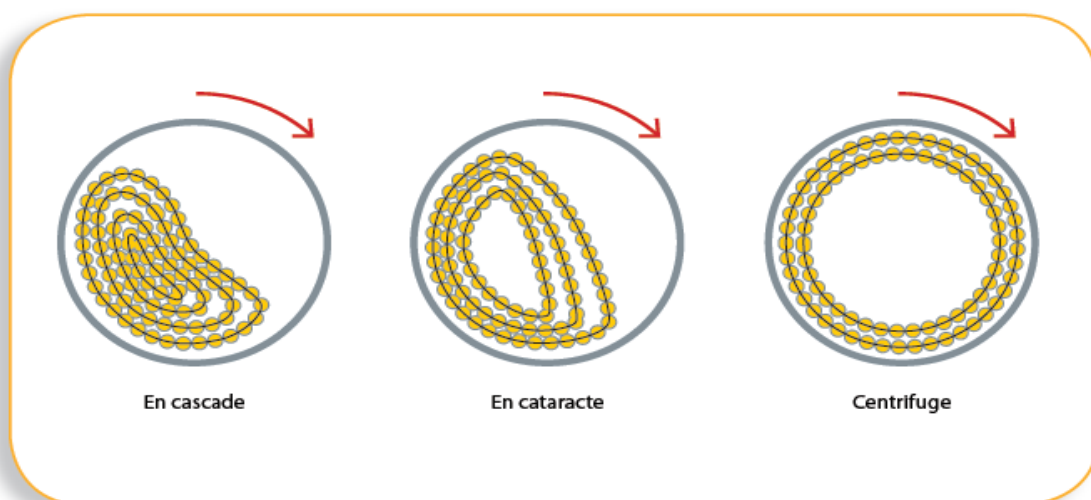


Figure II.30 : Le régime responsable sur l'effet cataracte et cascade [10].

II.13 Temps de passage

À cause de la différence de vitesse des gaz et du passage dans le broyeur [6], le temps de passage n'est pas le même dans les circuits ouverts ou fermés :

- ≥ 12 min pour les circuits ouverts.
- ≥ 5 min pour les circuits fermés.

II.14 Les paramètres influençant le fonctionnement du broyeur

Il existe plusieurs paramètres qui affectent le fonctionnement des broyeurs à boulet [5], on distingue :

• les paramètres liés au broyeur :

- a)- Le volume de cylindre.
- b)- La taille et la nature des éléments broyant.
- c)- Le taux de charge des boulets.
- d)- La vitesse de rotation.

• les paramètres liés au produit à broyer :

- a)- La nature de produit.
- b)- La taille du produit (la distribution granulométrique).
- c)- Le taux de charge dans le broyeur.
- d)- Le taux d'humidité.

II.15 Energie de broyage

- $E = k (1/d - 1/D)$ k dépend du produit et du broyeur.

L'énergie de broyage est proportionnelle à la somme des nouvelles surfaces créées au cours de l'opération. Mais son calcul reste aléatoire. Il faut noter que l'énergie de broyage est faible (~3%) devant l'énergie nécessaire à l'ensemble de l'installation de broyage, notamment en raison des frottements et de l'énergie nécessaire au transport des solides [14].

Conclusion

Les broyeurs utilisent des boulets en acier pour broyer la matière.

Les blindages protègent la virole du choc et de l'usure : blindages releveurs dans le 1^{er} compartiment et blindages classant dans le 2^{ème}.

Les cloisons sont utilisées pour maintenir des charges différentes dans les compartiments de façon à adapter le diamètre des boulets à la taille des particules pour un meilleur rendement de broyage.

- De 100 à 60 mm dans le 1er compartiment pour briser les grosses particules.
- De 50 à 20 mm pour broyer les fines particules.

Les cloisons contrôlent aussi le débit de matière d'un compartiment dans l'autre.

Les flux gazeux ont différentes fonctions :

- Extraire les particules broyées (fines).
- Aider au transport de la matière.
- Refroidisse le clinker.
- Sèche et réchauffe la matière.

La réduction granulométrique est due aux effets de cataracte et de cascade, le régime en cataracte présente une vitesse de rotation allant de 50% à 90% de la vitesse critique de broyage, il est le régime le plus répandre.

Chapitre III

Etude la cinétique de broyage.

Problématique

III.1 Comment Résolution de la cinétique de broyage ?

Pendant la durée de stage a la société ciment Lafarge, et avec l'équipe de mécanique on a visité et inspecter la majorité des mécanismes et pièces du broyeur à boulets au même temps nous somme entrés dans la partie interne pour identifier les différents composants, ce qui nous a permis de comprendre les facteurs et composants qui influent sur le fonctionnement et plus précisément la cinétique du broyage. Après cette visite nous avons fait sortir les points suivants :

III.2 Influence du blindage sur la cinétique de broyage

Dans le broyeur à boulet il ya deux compartiments dans chacun d'eux il y a son propre blindage spécifique [9].

III.2.1 Blindage Releveur (1^{er} compartiment)

Le but des blindages releveurs du broyeur c'est de protéger la virole du broyeur et de soulever les boulets et optimiser le concassage en augmentant le point de chute jusqu'à son optimum

- Des blindages de différentes conceptions peuvent donner un point de chute différent et par conséquent des actions de broyage différent, figure (1)
- Le choix est basé sur :
 1. L'objectif de concassage.
 2. Le diamètre de la virole.
 3. Le % de vitesse critique.

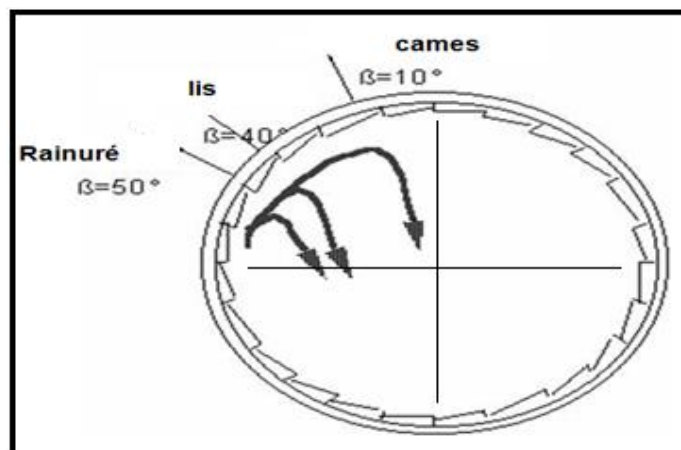


Figure III.1: Schéma de conception de blindage releveur (OSC formation de base).

Comparaison entre le broyeur a boulets a une même vitesse de rotation ($n / n_{cr} = 75\%$) et même charge de boulets et avec une différente forme de blindage.

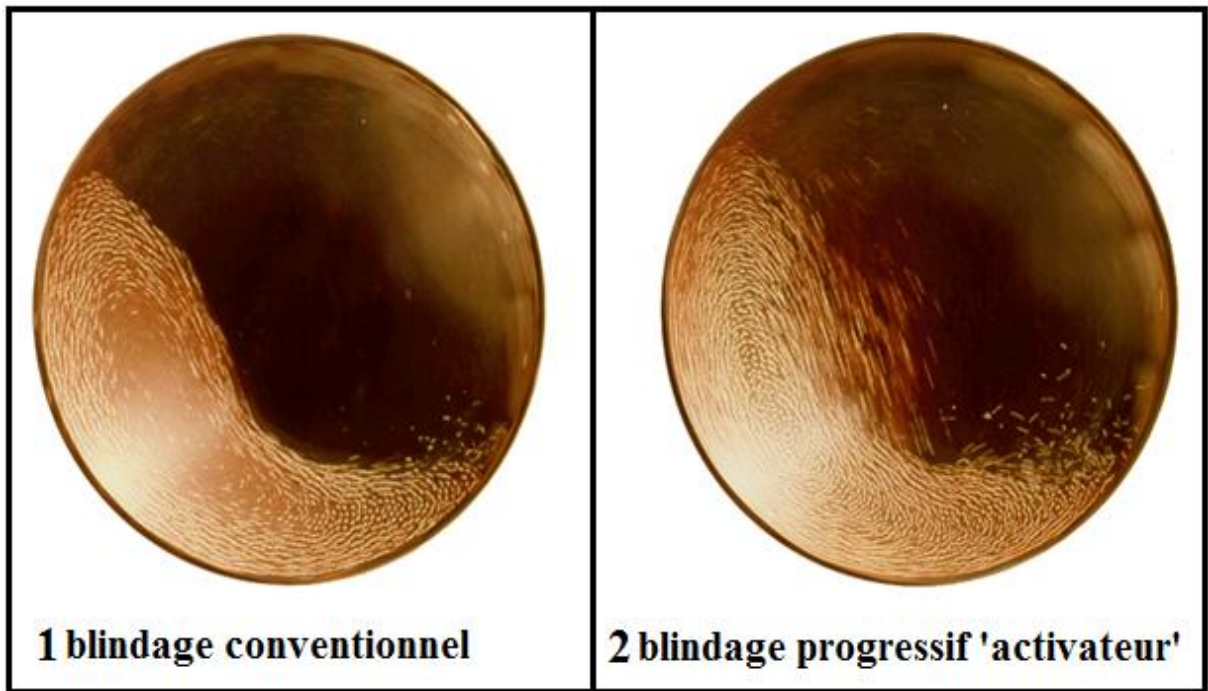


Figure III.2 : Comparaison entre blindage conventionnel (1) et progressif (2).

III.2.2 Les formes de blindage releveur existant

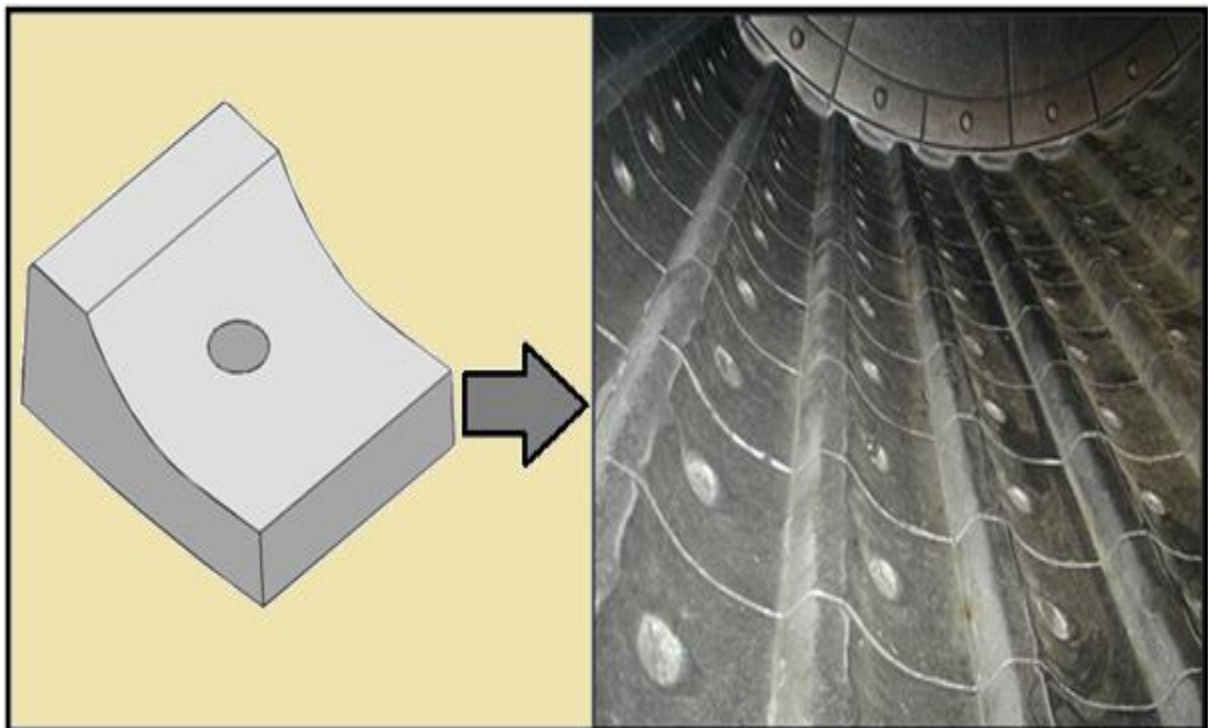


Figure III.3 : Blindage avec rebord.

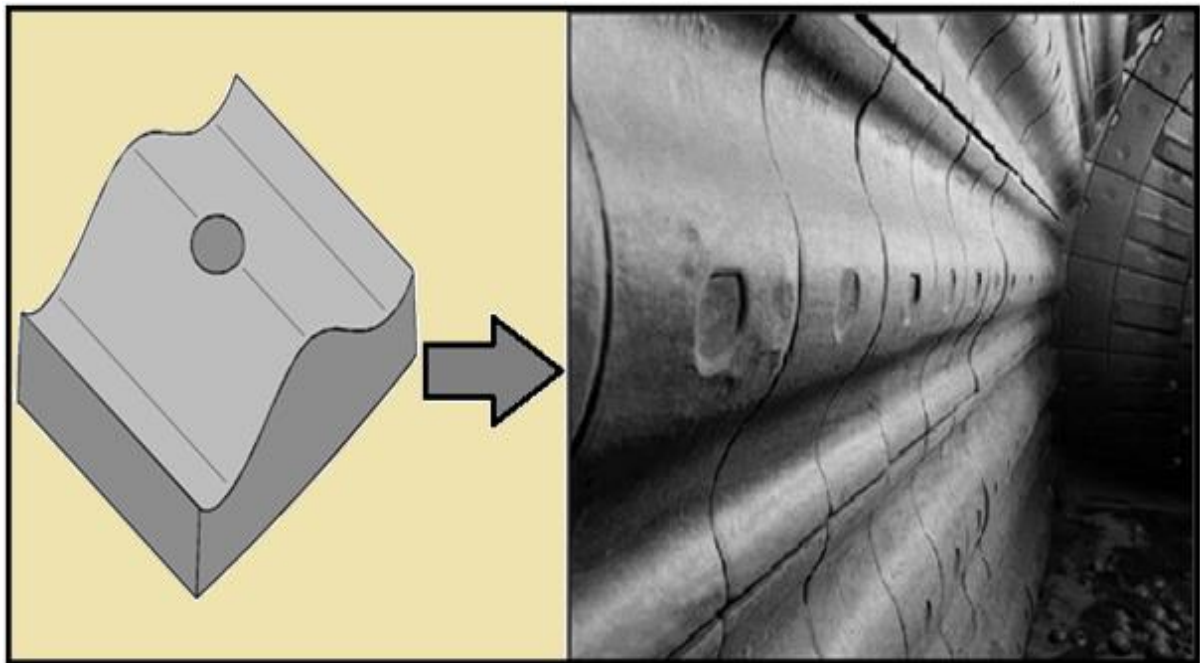


Figure III.4 : Blindage ondulé de type “Duolift” [9]

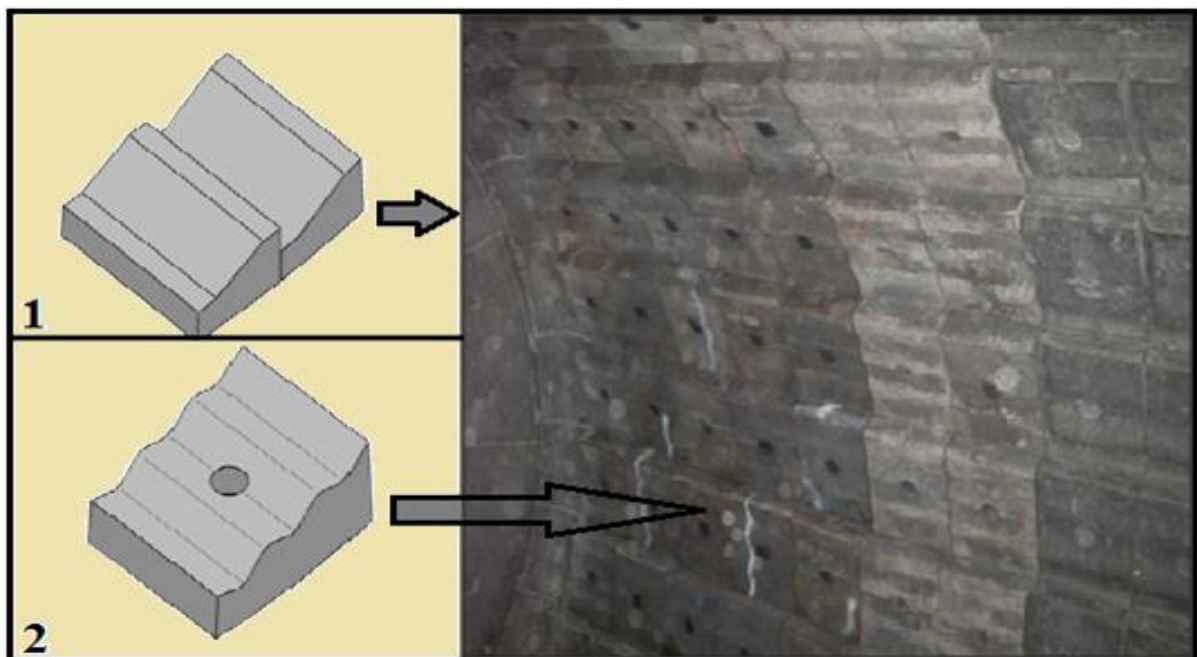


Figure III.5 : Blindage à pas de type “Xlift” (1) et blindage à pas avec profil ondulé (2).

A cause de l'usure du blindage, le point de chute est réduit & le résultat est une énergie de broyage plus basse. Le débit du broyeur peut être affecté et diminuer de 10%.

III.2.3 Blindage classant (2^{ème} compartiment)

Il est utilisé pour réduire la taille de particules de 2,5 mm à une taille moins de 250 μm .

- L'attrition est la conséquence du frottement des boulets sur les particules, elle dépend de la surface de contact (nombre de boulets) et des mouvements des boulets.
- La taille des boulets doit être adaptée à la taille des particules.
- Protégez la virole du broyeur contre l'usure.
- Soulevez les boulets et activez l'attrition en faisant rouler les boulets l'un sur l'autre.

III.2.4 Les formes de blindage classant existant

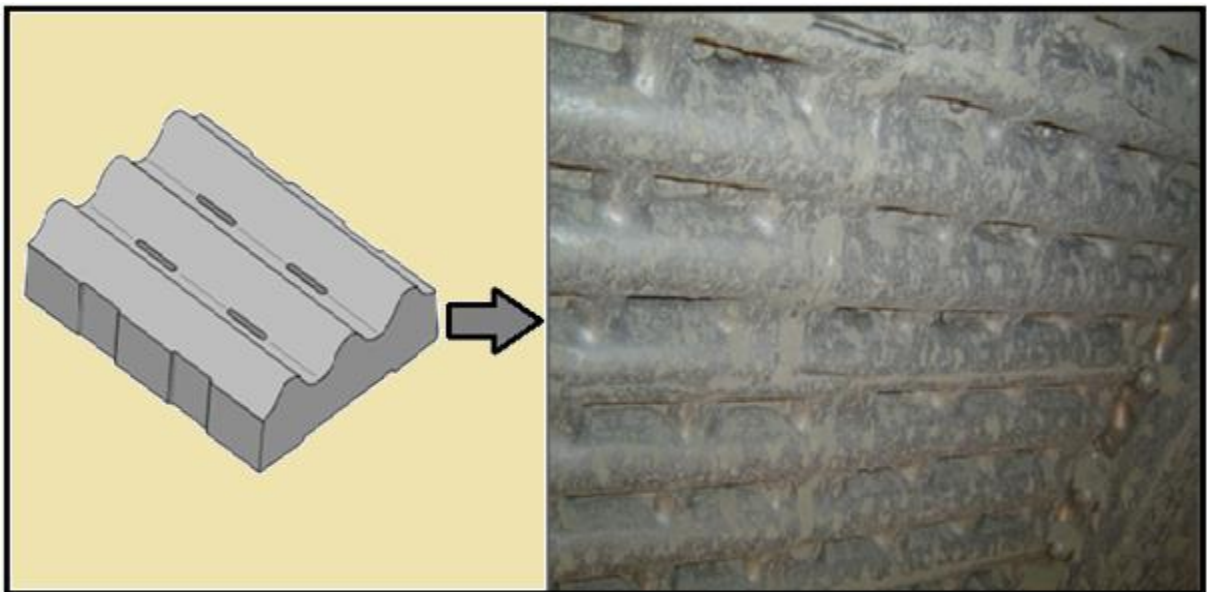


Figure III.6 : Blindage de type ondulé "Traîné".

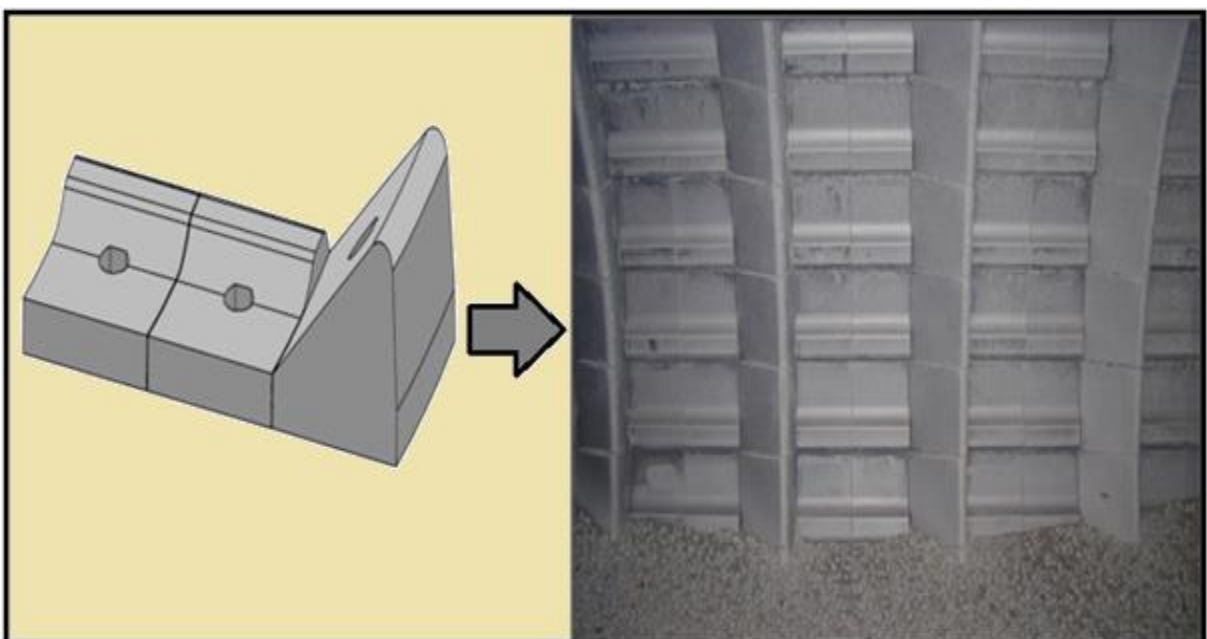


Figure III.7 : Blindage classant avec profil releveur.

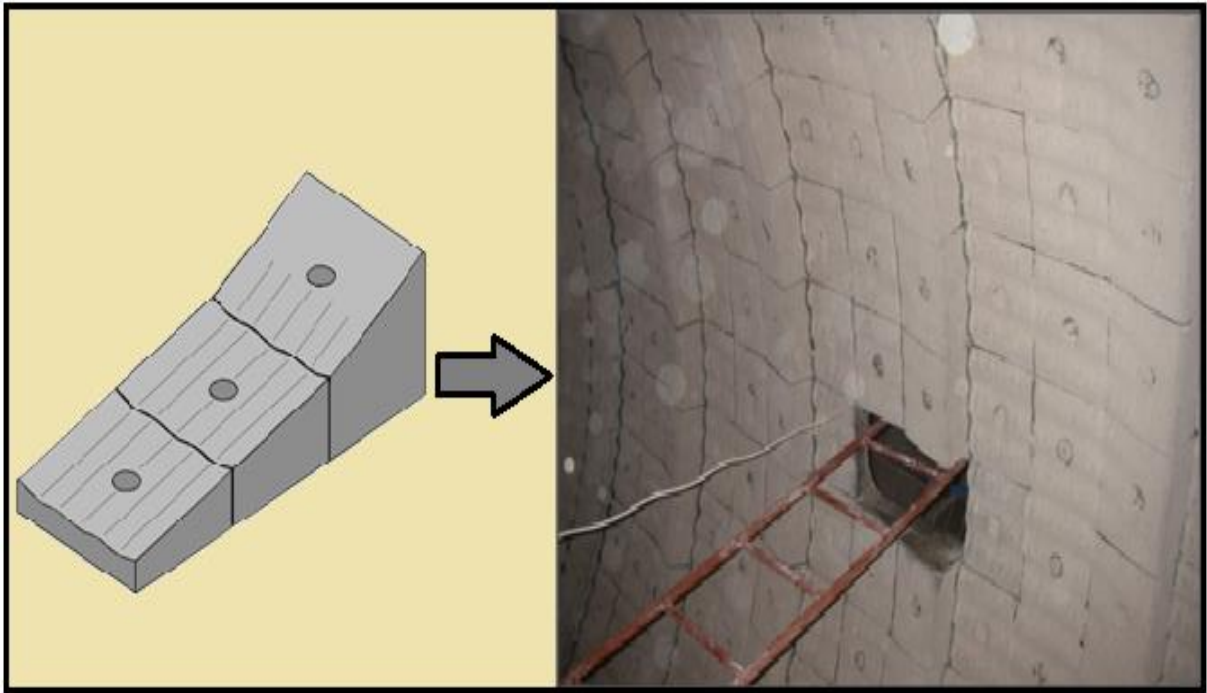


Figure III.8 : Blindage classant conventionnel avec profil ondulé [9].

III.3 Influence des boulets

III.3.1 Les boulets du 1^{er} compartiment

Dans le 1^{er} compartiment les diamètres des boulets vont de 60mm à 90mm :

Tableau donne les poids de chaque boulet dans le 1^{er} compartiment

Ø Boulets	% Poids
90 mm	20,0 %
80 mm	38,4 %
70 mm	25,6 %
60 mm	16,0 %

Tableau III.1: Conception Standard "SLEGTEN".

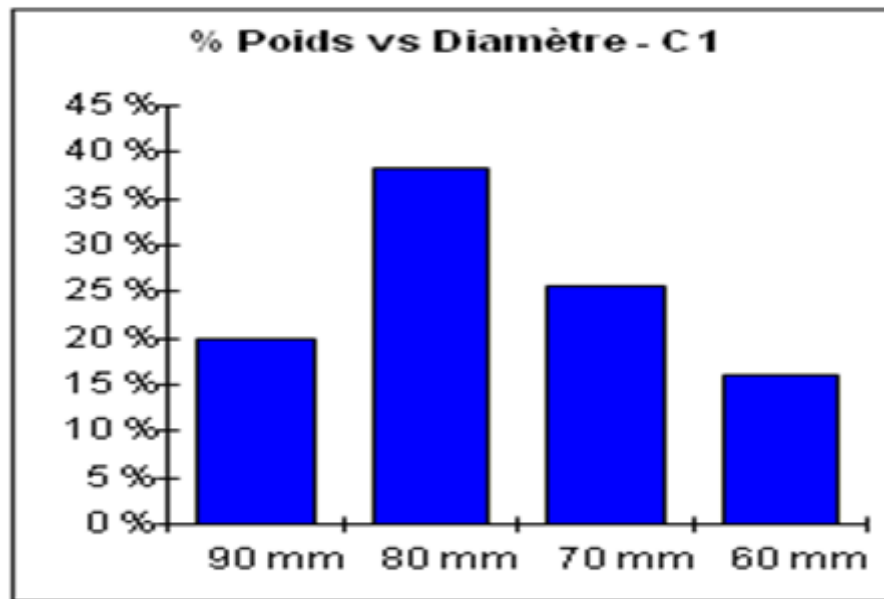


Figure III.9 : Comparaison entre le poids des boulets et le diamètre.

III.3.2 Les boulets à 2^{ème} compartiment

Dans le 2^{ème} compartiment les tailles des boulets est entre 50 mm et 17 mm.

III.3.3 Charge des boulets

Dans le broyeur à boulets, leur travail c'est de broyage, donc la charge de boulets est un paramètre clé de la performance du broyeur.

Le volume de la charge est calculé à partir de la hauteur de vide dans le compartiment permettant de calculer la section occupée par la charge de boulets et exprimée en % du volume total interne du compartiment.

III.4 Le niveau de matière

Visuellement, il devrait être au niveau du sommet de la charge et ce sur toute la longueur du compartiment.

Pour contrôler, un arrêt crash est nécessaire.

Pour surveiller le niveau de matière pendant le fonctionnement de l'installation, les meilleurs outils sont des oreilles électriques ou des micros.

Plus le bruit est fort plus le niveau de matière est bas.

III.4.1 Niveau de matière dans le broyeur dans le 1^{er} compartiment

Le niveau de matière du broyeur peut être mesuré seulement lors d'un arrêt crash.

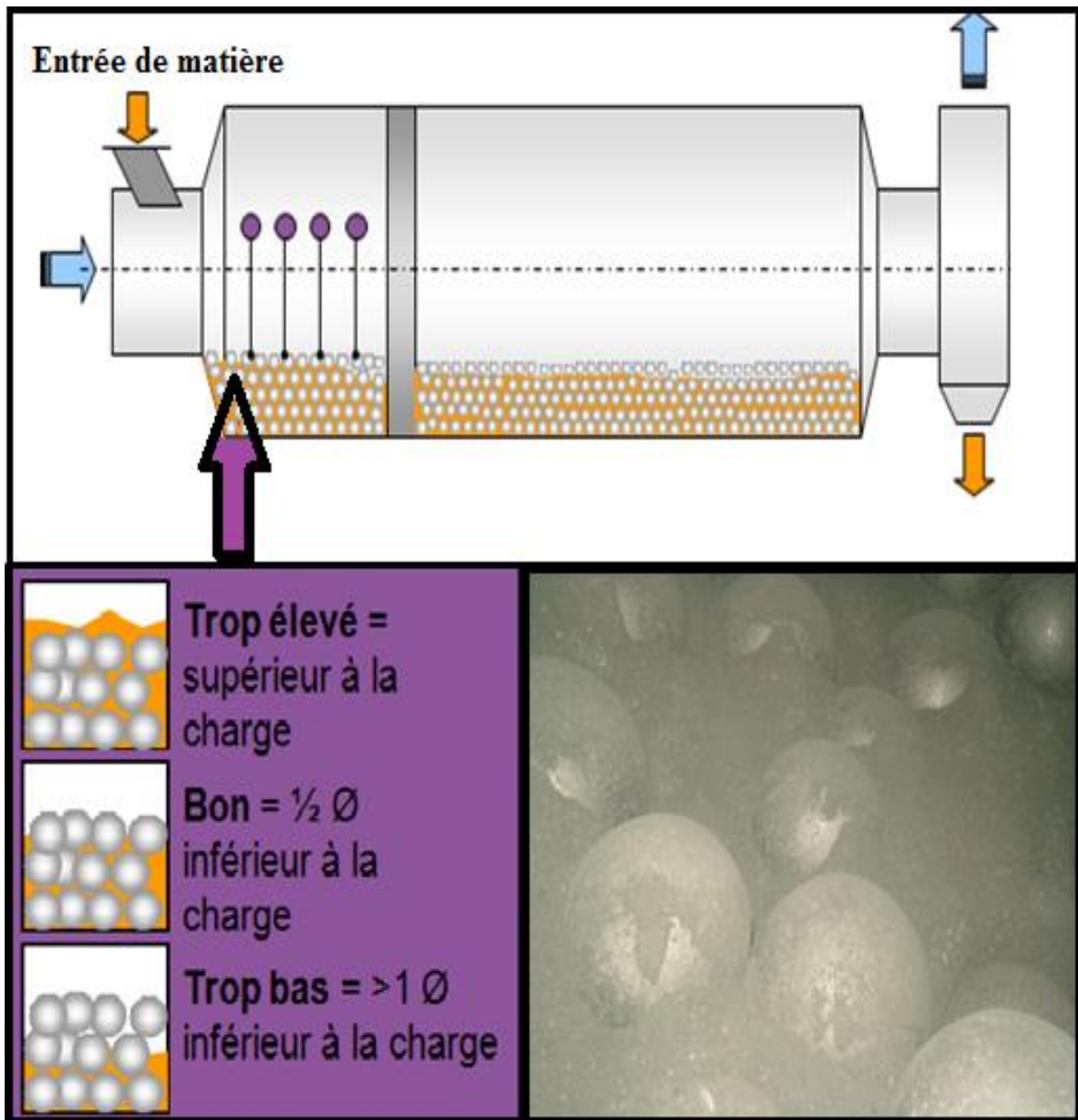


Figure III.10 : Explique le bon niveau de matière dans le 1^{er} compartiment.

Le niveau de la matière :

- Trop bas → pas de protection des blindages.
- Trop élevé → efficacité faible.

III.4.2 Niveau de matière dans le broyeur dans le 2^{ème} compartiment

Le niveau de matière dans le broyeur peut être mesuré, seulement à lors d'un arrêt crash.

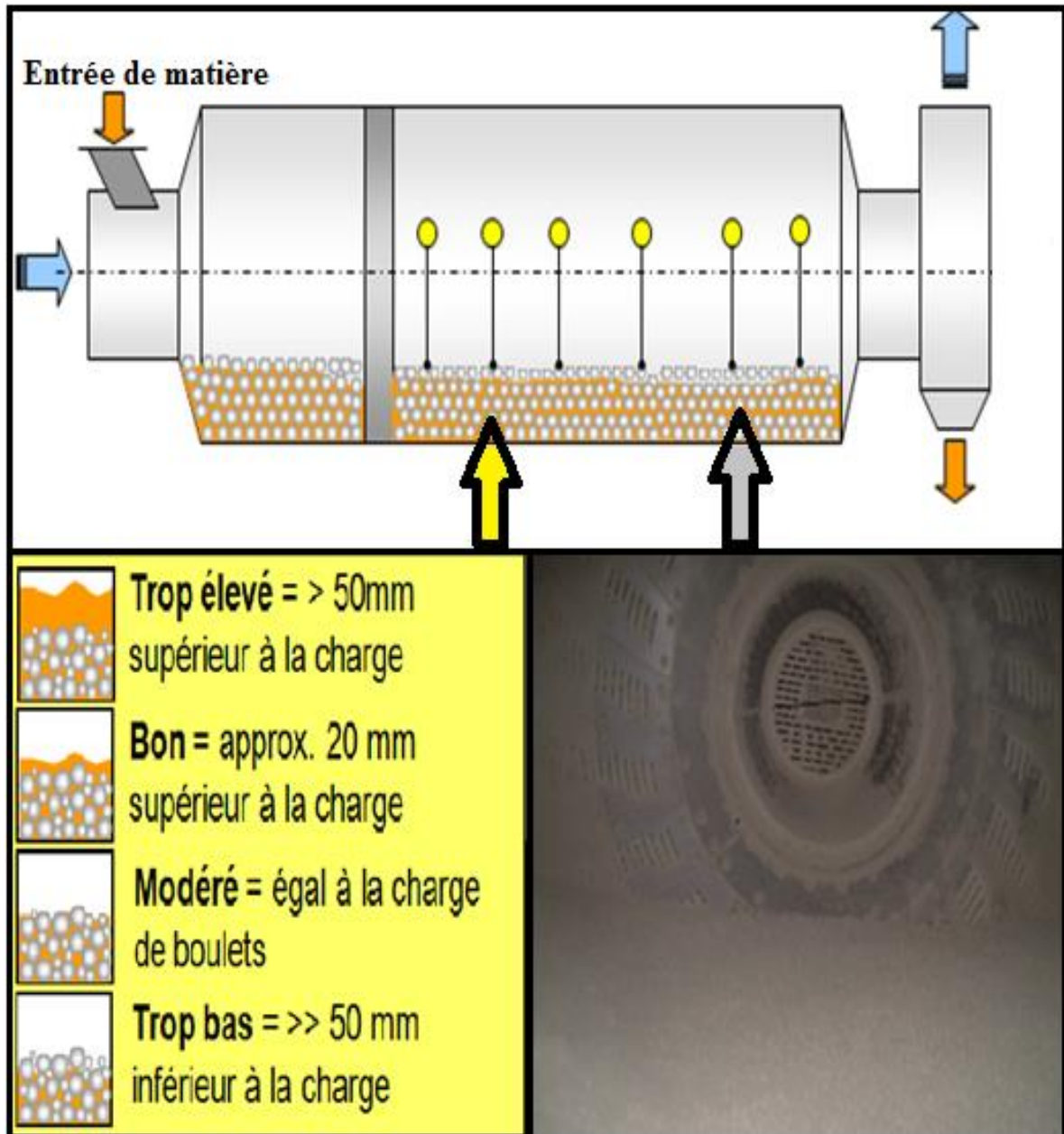


Figure III.11 : Explique le bon niveau de matière pour le 2^{ème} compartiment.

Le niveau de matière :

- Si trop bas → usure des boulets et des blindages + efficacité de l'attrition faible.
- Si trop élevé → efficacité de l'attrition faible.

III.5 Le taux de remplissage

-Le calcul du taux de remplissage:

$$F = \frac{S}{A} \times 100 [\%]$$

A = Surface libre.

S = Surface occupée par la charge.

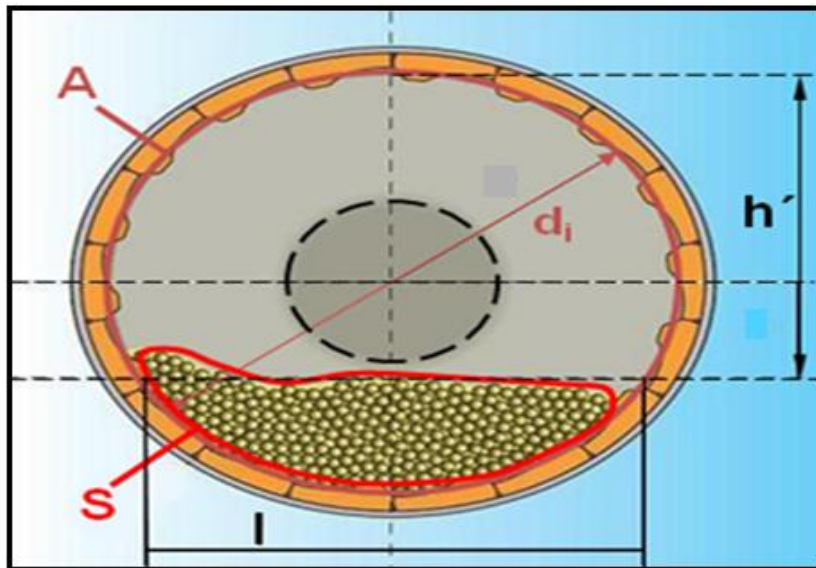


Figure III.12 : Les données nécessaires pour calculer le taux de remplissage.

Le taux de remplissage peut être calculé en mesurant la hauteur libre $[h']$ et le diamètre moyen interne $[d_i]$ seulement.

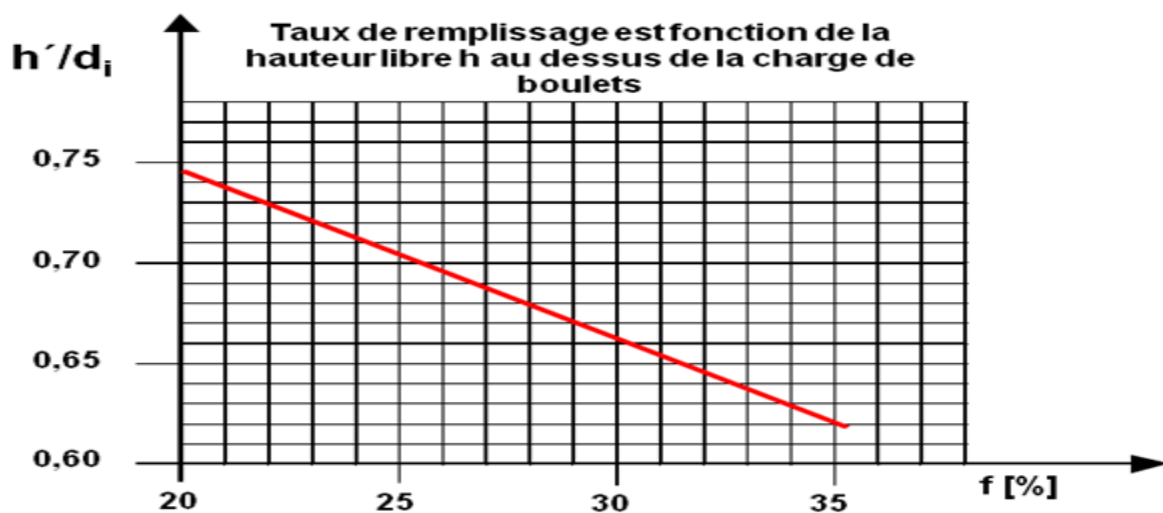


Figure III.13 : Le taux de remplissage en fonction de la hauteur libre h au dessus de la charge de boulets.

- Le taux de remplissage affecte l'efficacité du broyage
- Le taux de remplissage affecte l'effet de cataracte
- La meilleure efficacité de broyage est avec environ 30% de taux de remplissage

Selon la figure en bas on peut choisir le meilleur zone de broyage.

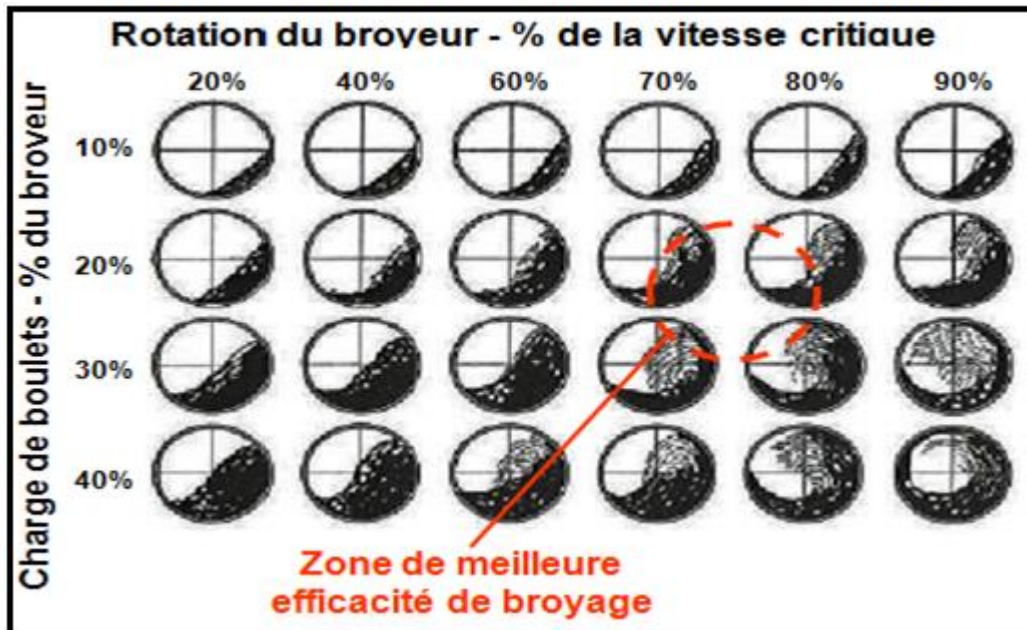


Figure III.14 : la meilleure zone pour une efficacité de broyage selon la charge de boulet et la rotation du broyeur au % de vitesse critique.

Pour optimiser la production du broyeur et la consommation d'énergie, les taux de remplissage recommandés sont

- C1 = 30-32%
- C2 = 28-32%

Plus basses valeurs pour kWh/t minimum

Plus hautes valeurs pour un débit maxima

III.6 La vitesse de rotation et de fonctionnement

La fréquence critique du tambour correspond à une fréquence pendant laquelle la force d'inertie du mouvement de rotation du boulet est égale à sa force de pesanteur [13].

Dans ce cas, le boulet est élevée au point le plus haut du tambour, et tourne en même temps avec lui comme une unité (centrifugeuses), c'est-à-dire elle se trouve en équilibre dynamique et ne se détache pas de la paroi interne du tambour. Ainsi, aucun choc sur la

surface du tambour ni de broyage de la matière n'aura lieu. Considérons le diagramme des forces agissant sur les corps de broyage (une sphère, tige, Galet), dans le broyeur à tambour (Fig.15).

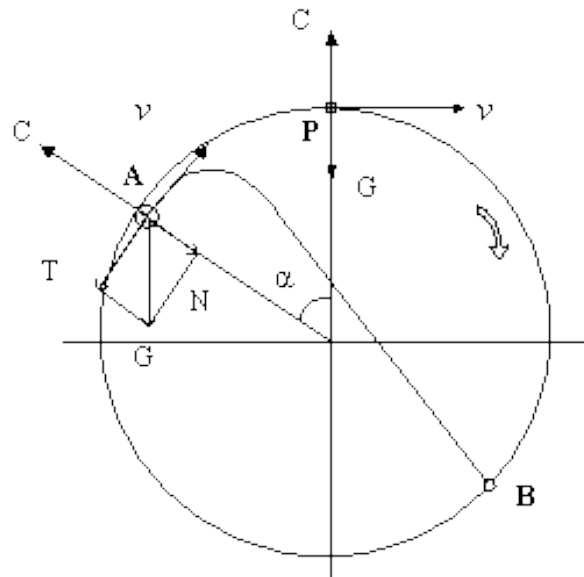


Figure.15 : Forces agissant sur les corps de broyage dans le broyeur à boulets pendant la rotation [13].

Pendant la rotation du tambour du broyeur, les forces agissent sur les boulets sont suivantes:

-Force centrifuge

$$C = m V^2 / R; \quad (\text{III.1})$$

- composante radiale de la gravité

$$N = G \text{ Cos } \alpha; \quad (\text{III.2})$$

Le tambour tournant à vitesse constante et les boulets ne glissant pas par rapport au tambour, la force centrifuge C, conserve sa valeur et sa direction dans toutes les sections du trajet circulaire (ligne VA). L'amplitude et la direction de la composante radiale de la force de gravité N varient et dépendent de la position de la bille sur le trajet circulaire (ligne VA).

À une certaine vitesse de déplacement au point A, la force radiale peut être égale à la force centrifuge. Alors le boulet sous l'action de la gravité se déplacera le long de la trajectoire parabolique AB.

La position du point de séparation du boulet A dépend de l'angle α , qui est déterminé par la vitesse de rotation et les dimensions du tambour.

Au point A :

$$C = N, \quad (\text{III.3})$$

$$M V^2 / R = G \text{ Cos } \alpha = m g \text{ Cos } \alpha, \quad (\text{III.4})$$

$$V^2 = R g \text{ Cos } \alpha. \quad (\text{III.5})$$

Mais la vitesse circonférentielle peut être déterminée à partir de la relation:

$$V = \pi R n / 30. \quad (\text{III.6})$$

Ensuite, après avoir substitué (III.6) à (III.5), on obtient

$$V = \pi R n / 30 \text{ donc } V^2 = \pi^2 R^2 n^2 / 30^2 = R g \text{ Cos } \alpha, \quad (\text{III.7})$$

$$\pi^2 R^2 n^2 / 30^2 = R g \text{ Cos } \alpha,$$

Puisque $n^2 = N^2$ donc :

$$N^2 = 30^2 g \text{ Cos } \alpha / (\pi^2 R); \quad (\text{III.8})$$

$$N = (30 \sqrt{g \text{ Cos } \alpha}) / (\pi \sqrt{R}). \quad (\text{III.9})$$

Lorsque la vitesse critique de rotation est atteinte, le boulet aura tendance à se déplacer vers une trajectoire parabolique, pas au point A, mais au point P. Ici $\alpha = 0$, $\text{Cos } \alpha = 1$. Dans ce cas

$$N = n_{cr} = (30 \sqrt{g}) / (\pi \sqrt{R}). \text{ Ou on simplifié (III.7) } n_{cr} = 42.3 / \sqrt{D}. \quad (\text{III.10})$$

Mais $\sqrt{g} \approx \pi$. Donc :

$$n_{cr} = 30 / \sqrt{R}. \quad (\text{III.11})$$

En tenant compte du fait que $R = D / 2$, on obtient à partir de l'expression (III.11):

Exprimer la vitesse de rotation n en termes de n_{cr} , en utilisant les expressions (III.11) et (III.9). Dans l'expression (III.9), nous remplaçons le rapport $30 / \sqrt{R}$ par n_{cr} . Ensuite, nous obtenons:

$$N = n_{cr} \sqrt{g \cos \beta} / \pi. \quad (\text{III.12})$$

Ici, β c'est une valeur de l'angle α où les boulets de la couche externe qui sont liés au revêtement du tambour du broyeur commencent à se détacher.

En tenant compte du fait que $\sqrt{g} \approx \pi$ nous aurons:

$$N = n_{cr} \sqrt{\cos \beta}. \quad (\text{III.13})$$

Le régime mécanique du broyeur est caractérisé par deux paramètres principaux: le remplissage relatif du broyeur avec les boulets et la vitesse réciproque de rotation relative du tambour.

Le remplissage relatif du broyeur avec les corps de broyage (les boulets) est égal au rapport entre le volume des corps de broyage et le volume interne du broyeur:

$$\varphi = V_c / V. \quad (\text{III.14})$$

où

V_c : est le volume des corps de broyage, [m³].

V : est le volume intérieur du tambour, [m³].

A leur tour, les volumes sont déterminés à partir des relations:

$$V_c = M_c / \gamma_c; \quad V = \pi D^2 L / 4. \quad (\text{III.15})$$

où :

M_c et γ_c sont la masse en Kg et la densité des corps de broyage (boulets de différentes formes) Kg/ m³;

D et L sont le diamètre et la longueur du tambour du broyeur en [m].

Ensuite, en tenant compte des relations (III.15), nous avons:

$$\varphi = 4 M_c / \gamma_c \pi D^2 L \quad (\text{III.16})$$

La fréquence relative de rotation du tambour ψ est égal au rapport de la fréquence relative

de rotation sur la fréquence de rotation critique conditionnelle:

$$\Psi = n / n_{cr}. \quad (\text{III.17})$$

En pratique, prenez $n = (0,55-0,85) n_{cr}$. Il existe des tableaux de calcul pour la valeur de la vitesse critique du tambour, en fonction de sa taille.

La fréquence de rotation relative du tambour sera (voir l'expression III.17):

$$\Psi = n / n_{cr} = \sqrt{\cos \beta}. \quad (\text{III.18})$$

Exemple: calculer la vitesse de rotation du broyeur à boulets ayant le diamètre inférieur de 3,6 m. La marche de ce broyeur est en cataracte ($\psi = 85\%$ ou 0.85).

Solution:

$$n_{cr} = 42.3 / \sqrt{D} = 42.3 / \sqrt{3.6} = 23.7 \text{ tr/min.}$$

$$n = \psi n_{cr} = 0,85 \times 23,7 = 18.9 \text{ tr/min.}$$

Conclusion :

L'étude fait tout long de ce chapitre nous a permis de conclure comme suite:

Le blindage est en principe fait pour protéger le virole, et en plus il est responsable sur les chutes des boulets qui s'explique par le régime (cascade et cataracte) et la trajectoire de mouvement dans les deux compartiments, **donc** la cinétique de broyage est lié a la trajectoire de chute des boulets.

Au cours du fonctionnement du broyeur à boulets, nous remarquons une différence dans le chemin de la chute des boulets en raison de la taille et le poids de chaque boulet en plus la matière de fabrication de boulet, **donc** la taille et le poids des boulets a une relation dans la cinétique de broyage (la concassage et la finesse).

Les propriétés du matière et état (sèche, humide), ce sont deux facteurs sur la cinétique de broyage.

Le remplissage des engins broyant (les boulets) et la matière a broyée, un facteur très important sur le niveau de matière (niveau trop plein, niveau vide), **sa** influe sur la cinétique de broyage (usure, bourrage, accumulation de la matière).

Lorsque changer la vitesse de fonctionnement et la vitesse de rotation, les trajectoires des boulets sont aussi changés automatiquement, le régime cataracte et cascade aussi, **donc** la vitesse est un facteur sensible sur la cinétique de broyage.

Chapitre IV

*Le revêtement en caoutchouc à
broyeur à boulets.*

Introduction

Le caoutchouc est un matériau qui est obtenu par la transformation du latex émis par certains végétaux (hévéa), ou d'une manière synthétique à partir de monomères issus de combustibles fossiles. Il fait partie de la famille des élastomères. Connue des Européens seulement lors de la découverte des Américains, le caoutchouc était utilisé depuis longtemps par les civilisations indiennes qui en faisaient des balles, toiles enduites et des outils utiles à la vie de tous les jours. Son exploitation commencera réellement en Europe avec en 1770 la fabrication des premières gommes à effacer en Grande-Bretagne par Joseph Priestley.

Le caoutchouc dispose de deux fabrications distinctes : Le caoutchouc naturel et synthétiques. Le caoutchouc est omniprésent dans la vie quotidienne de nos jours, vos coques de téléphone, les semelles de chaussures, les pneus....

IV.1 Le caoutchouc

Composé naturel ou synthétique, caractérisé par son élasticité, son imperméabilité et sa résistance électrique. Le caoutchouc naturel est obtenu à partir d'un liquide blanc laiteux appelé latex, fourni par de nombreuses plantes; les caoutchoucs synthétiques sont des élastomères préparés à partir d'hydrocarbures insaturés [17].

IV.2 Caoutchouc naturel

Le caoutchouc naturel provient presque uniquement de la culture de l'arbre *Hevea brasiliensis*.

L'hévéa de la famille des Euphorbiacées originaire de la forêt amazonienne. Le terme

« Caoutchouc » provient de l'expression indienne « Cao Tchu » qui signifie « Bois qui pleure ». Le caoutchouc naturel, également appelé caoutchouc indien, est un élastomère initialement dérivé du latex, un colloïde laiteux produit par certaines plantes.

Une incision est pratiquée dans l'écorce de l'arbre afin d'en prélever le liquide qui s'écoule, celui-ci sera ensuite transformé en caoutchouc exploitable. Ce latex n'est pas la sève de l'arbre, mais un contenu cytoplasmique qui s'écoule des cellules brisées de l'écorce lors de l'entaille. La coagulation du latex colmate la blessure en quelques heures, si bien qu'il faut renouveler les entailles pour obtenir une production régulière. Exposé à l'air, le latex se transforme progressivement en coagulum, la forme polymérisée du latex.

Malgré son origine sud-américaine, c'est en Asie que les premières plantations de caoutchouc naturel ont été développées. En effet, avec comme ambition d'étendre la culture du caoutchouc à des fins industrielles, des graines d'Hévéa ont été rapportées du Brésil vers le Royaume-Uni en 1876. Les graines de l'arbre à caoutchouc ont ensuite été disséminées dans des colonies britanniques tropicales comme le Sri Lanka et la Malaisie, marquant ainsi le point de départ de l'industrie des plantations de caoutchouc en Asie. Aujourd'hui, le continent asiatique représente à lui seul 94 % de la production mondiale de caoutchouc naturel [14].

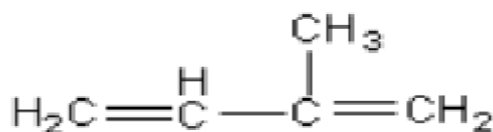


Figure IV.1 : La composition chimique et le motif de caoutchouc naturel [23].



Figure IV.2 : Récolte de caoutchouc naturel (latex) [24].

IV.3 Les caoutchoucs synthétiques

Les caoutchoucs synthétiques (ou artificiels) sont un type d'élastomère, invariablement polymères. Comme les matières plastiques, ils sont souvent issus d'un combustible fossile. Un élastomère possède une meilleure déformation élastique sous contrainte que la plupart des matériaux et revient à sa forme initiale sans aucune déformation permanente. Son premier usage est la fabrication de pneus (où l'on trouve aussi une certaine proportion de caoutchouc réalisé avec du latex naturel, notamment dans les pneus de camions) [14].

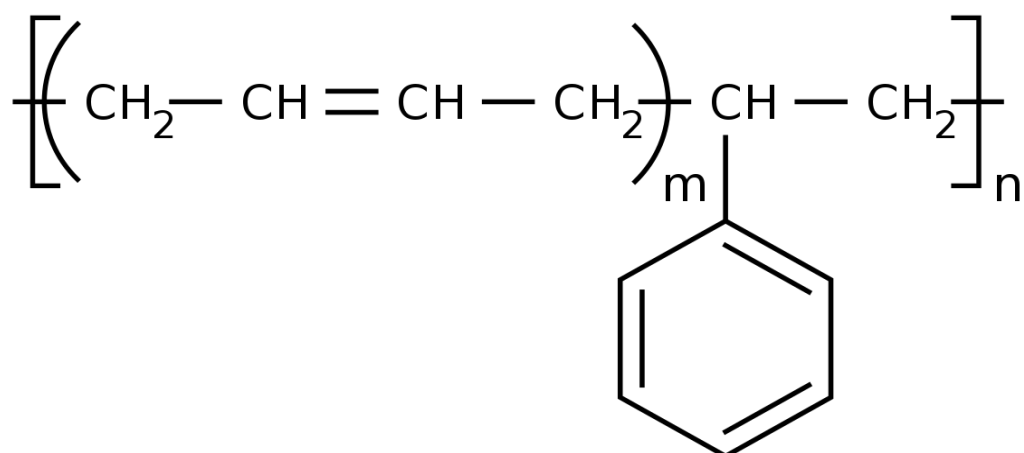


Figure IV.3 : La composition chimique et le motif de caoutchouc synthétique [20].

IV.4 Propriétés du caoutchouc

Les trois principales propriétés des caoutchoucs : élasticité, étanchéité et amortissement.

Les caoutchoucs possèdent de très nombreuses propriétés. Ils sont notamment élastiques, étanches et antivibratoires. La combinaison de ces trois propriétés leur assure un spectre d'utilisation extrêmement large [19] [21].

Elasticité

La propriété d'élasticité peut être très facilement illustrée par quelques applications grand public : l'élastique de bureau ou le saut à l'élastique.

L'élasticité se caractérise par la capacité d'un matériau à se déformer sous contrainte et à reprendre sa dimension initiale lorsque cesse la contrainte.

Les caoutchoucs ne sont pas les seuls matériaux élastiques, mais ils sont les seuls à offrir une telle capacité de déformation. Ainsi, un ressort d'acier n'accepte guère de subir un allongement de plus de 10 %. En revanche, les caoutchoucs peuvent s'allonger couramment jusqu'à 500 % et dans certains cas, jusqu'à 1000 %. On parle alors d'hyper élasticité.

De surcroît, les caoutchoucs conservent leur propriété d'élasticité à très basse température. Leur transition vitreuse, c'est-à-dire la température à laquelle ils se rigidifient se situe en règle générale, aux alentours de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Exemples d'application :

Joints de portière d'automobile, flexibles, profilés pour portes et fenêtres, balles de tennis ou de golf, gants, etc.

Etanchéité

La seconde des grandes propriétés des caoutchoucs est l'étanchéité. Les caoutchoucs sont ainsi imperméables à l'air, aux gaz et à l'eau. Ils ont également une grande capacité à filtrer le bruit.

Exemples d'application :

Tubes et tuyaux, pneumatiques, toiles enduites, revêtement de toiture, bouchons pharmaceutiques, joints, etc.

Amortissement

Le caoutchouc possède également la capacité d'amortir les chocs ou de filtrer les vibrations. Il s'agit là de deux propriétés extrêmement importantes dans le monde des transports (automobile, aéronautique, aérospatial, ferroviaire...), dans celui de l'industrie (production d'énergie, machine / outil...) ou encore du BTP (appuis de pont, plots antisismiques...).

Exemples d'application :

Pneumatique (amortissement des irrégularités de la route), Pièces antivibratoires (filtration des vibrations en provenance du moteur ou des organes de liaison au sol), etc.

IV.5 Domaines d'utilisation de caoutchouc**Industrie**

Le caoutchouc y a de nombreux usages, par exemple dans les courroies, flexibles, pneus et dans les gaines de câbles informatiques.

Médecine

Le latex, très utilisé dans les gants jetables, peut provoquer des « allergies au latex », du fait de la présence de plusieurs protéines issues de l'hévéa et/ou de composés ajoutés lors de la fabrication. Le caoutchouc issu de la guayule, plus pauvre en protéine, semble néanmoins moins allergisant.

Sports et jeux pour enfant

Utilisation croissante pour certains sols de jeux ou de course, comme matériaux des gazons synthétiques (pour le football notamment), ou pour les revêtements de raquettes de tennis de table

Divers

Il a aussi été testé et utilisé pour la conservation de la viande et comme joint des baux de pasteurisation/stérilisation. Plus récemment, des latex magnétisés fonctionnalisés (particules colloïdales magnétiques à cœur de maghémite) ont été conçus pour la pharmaco -chimie ou pour le traitement des eaux usées par adsorption (pour le cuivre et plomb notamment), afin de pouvoir se passer des moyens classiques de centrifugation, sédimentation et filtrations. Ces particules sont réutilisables durant plusieurs cycles (désorption / régénération).

IV.6 Les types de broyeurs utilisés pour les applications de caoutchouc

En général, les broyeurs où se fait le broyage humide sont adaptés pour les revêtements en caoutchouc. Le terrain d'application change entre les broyeurs autogènes alimentés par les plus gros matériaux jusqu'aux broyeurs en billes pour le broyage le plus fin.

Pour le broyage à sec, c'est le revêtement en caoutchouc qui peut être utilisé avec succès mais dans cette situation, il faut bien étudier les conditions de broyage et sa chaleur pour choisir la formulation convenable aux broyeurs [18].

Dans les broyeurs ci-dessous le revêtement en caoutchouc a été utilisé avec succès.

- Broyeurs autogène.
- Broyeurs Semi-autogène.
- Broyeurs à boulets.
- Broyeur à tiges
- Broyeurs à graviers

IV.7 Broyeur à boulet avec revêtement en caoutchouc

Les broyeurs à boulets avec revêtement en caoutchouc sont de la même conception et de même principe de fonctionnement que les autres broyeurs,

-Photos Présente une broyeur à boulet avec revêtement en caoutchouc :

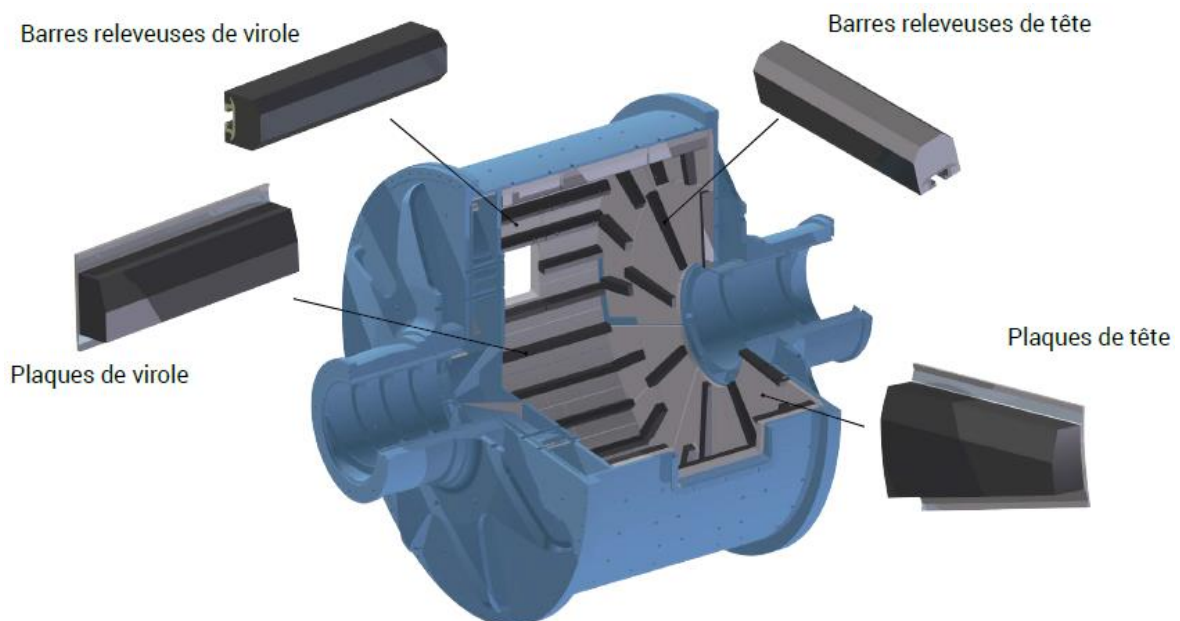


Figure IV.4 : Les composants de broyeur à boulet avec revêtement en caoutchouc [26].



Figure IV.5 : Broyeur à boulet avec revêtement en caoutchouc [25].



Figure IV.6 : Montage et assemblage de revêtement en caoutchouc dans broyeur à boulet [25].



Figure IV.7 : Visite interne de broyeur à boulet avec revêtement en caoutchouc [25].

IV.8 Comparaison du revêtement en caoutchouc et celui en métal

Le revêtement en caoutchouc à plusieurs avantages par rapport au revêtement en acier. Les plus importants de ces avantages sont indiqués ci-dessous [18].

- **Durée de vie**

La durée de vie du revêtement élastique et des lifter bar est de 1 à 5 fois plus longue par rapport à l'acier. Quand il n'y a aucun changement dans le régime du broyage, comme l'abrasion est plus lente la capacité de broyage au temps unitaire est plus élevée. Dans les essais réalisés, la partie où le broyeur autogène est la plus usée est le lifter bar en acier en fonctionnant 600 heures et en traitant 75.000 tonnes de minerai lorsqu'il devient hors service. Quant au lifter élastiqué il fonctionne au minimum 2700 heures et traite 390.000 tonnes de minerai.

- **Poids**

Le revêtement en caoutchouc du broyeur est environ 75% moins lourd par rapport au revêtement en métal et pour cela les lits du broyeur et les problèmes du système de lubrification descendent au minimum.

- **Imperméabilité**

Les trous des boulons du revêtement en métal et du lifter bar se déforment très souvent. Ici des fuites probables pourront endommager les lits du broyeur. Le caoutchouc est imperméable dans le revêtement pour cette situation.

- **Amortissement sonore**

Grâce aux caractéristiques d'isolement du bruit et de l'aspiration le bruit au sein de l'usine est réduit au minimum, un environnement de travail plus sain est donc fourni.

- **Économe**

Le coût unitaire pour chaque tonnage de minerai broyé avec le revêtement en caoutchouc par rapport au revêtement en acier est beaucoup moins élevé.

IV.9 Avantage des revêtements des broyeurs en caoutchouc

- Adaptation par rapport aux conditions de froid.
- Force et durabilité à l'abrasion.
- Facteur de haute disponibilité.
- Environnement de travail amélioré grâce à la réduction du niveau sonore.
- Opération en sécurité.
- Résistance à la corrosion.
- Résistance de la chaleur allant jusqu'à 80°C.
- Poids léger.
- Montage rapide, simple et fiable.
- Baisse du coût unitaire du broyage par rapport à l'acier.

Explication des avantages principale de caoutchouc place sur le broyeur à boulet [18]:

1. Baisse des coûts

Comme le coût par tonne de broyage du minerai est bas, il permet de faire des économies.

2. Durée de vie plus longue

Les revêtements en caoutchouc ont une durée de vie optionnelle plus longue

3. Moins de maintenance

Les revêtements en caoutchouc sont conçus d'une façon où la fréquence de maintenance et l'abrasion sont réduites.

4. Plus rapide/ plus sécurise

Les composants en caoutchouc sont plus légers et sont plus simples à porter.

5. Moins de bruit

Les niveaux de bruits baissent à un niveau assez bas car les coups arrivant à la coque sont absorbés par les revêtements en caoutchouc des moulins.

6. Moins lourd

Le revêtement en caoutchouc de la même taille que le revêtement en acier pèse seulement 1/8ème de son poids.

7. Moins d'inventaire

Les revêtements en caoutchouc comportent sur la probabilité du pourcentage de l'abrasion. Pour cela, la planification de l'inventaire est plus simple.

8. Ne fuit pas

Les broyeurs en revêtement de caoutchouc montrent une performance supérieure contre les fuites.

9. Force réduite

Le léger poids des broyeurs en revêtement de caoutchouc réduit la prise de courant.

Conclusion

L'étude fait tout long de ce chapitre nous a permis de conclure comme si dessous:

-Le caoutchouc utilisé pour le revêtement des broyeurs à boulets est plus commode selon les propriétés des matières a broyé, le cout, montage, Etc. Par rapport au broyeur à boulet au blindage en acier.

- Augmentent la productivité et réduisent les coûts d'exploitation.
- Résistance à la corrosion et à l'abrasion.
- Haute efficacité du broyage.
- Adaptation au matériau à broyer.
- Réduction du bruit.
- Bonne condition du travail.
- Moins de poids 7 fois moins que l'acier.
- Le processus d'assemblage et d'installation est facile et rapide grâce à ces fonctionnalités.

Le seul inconvénient reste et le plus important est le facteur de chaleur qui perturbe les fabricants de ces revêtements parce que le caoutchouc fond à une température de 80 C°, et n'est pas utile dans certains cas de broyage. À titre d'exemple le broyage de ciment (température de broyage de ciment allant de 95 à 105 degrés dans des bonnes conditions).

Conclusion générale

Conclusion générale

Le broyage est une opération de mise en forme des solides, elle vise à diminuer et à maîtriser la granularité des solides cette opération d'une grande importance et largement utilisée dans le domaine industriel, son but est de faciliter les étapes ultérieures du traitement des produits. Il s'effectue dans des appareils de fractionnement en classe suivant les propriétés des matériaux utilisés. Le choix du type de broyeur dépend des propriétés des matériaux à broyer tel que l'abrasivité, la dureté, la granulométrie du départ, Etc.

Selon le premier chapitre on a complété l'étude à travers la description des broyeurs à boulets qui utilisent des boulets en acier de 100 à 60 mm. Dans le 1^{er} compartiment pour briser les grosses particules et de 50 à 20 mm et pour broyer les fines particules dans le 2^{ème} compartiment, les blindages protègent la virole du choc et de l'usure, les blindages relevés dans le 1^{er} compartiment et les blindages classés dans le 2^{ème} est, les cloisons sont utilisées pour maintenir des charges différentes dans les compartiments de façon à adapter le diamètre des boulets à la taille des particules pour un meilleur rendement de broyage. Ainsi pour contrôler le débit de matière d'un compartiment. La réduction granulométrique est due aux effets de cataracte et de cascade, le régime en cataracte présente une vitesse de rotation allant de 50% à 90% de la vitesse critique de broyage, c'est le régime le plus répandu.

Grâce au deuxième chapitre qui nous a permis d'identifier les composants de broyeur à boulets nous avons conclu des facteurs liés à la cinétique de broyage comme suite :

Le blindage est en principe fait pour protéger le virole, et en plus il est responsable des chutes des boulets qui s'explique par le régime (cascade et cataracte) et la trajectoire de mouvement dans les deux compartiments, donc la cinétique de broyage est liée à la trajectoire de chute des boulets. Au cours du fonctionnement du broyeur à boulets, nous remarquons une différence dans le chemin de la chute des boulets en raison de la taille et du poids de chaque boulet en plus la matière de fabrication de boulet. Donc la taille et le poids des boulets ont une relation avec la cinétique de broyage ainsi que (le concassage et la finesse). Les propriétés de la matière et l'état (sèche, humide), ce sont deux facteurs qui influent sur la cinétique de broyage. Le remplissage des engins broyant (les boulets) et la matière à broyée, un facteur très important qui a de l'influence sur le niveau de matière (niveau trop plein, niveau vide).

Lorsqu'on change la vitesse de fonctionnement, les trajectoires des boulets changent aussi automatiquement, ainsi que le régime cataracte et cascade, donc la vitesse est un facteur sensible sur la cinétique de broyage.

Finalement on peut dire que la proposition de caoutchouc utilisé pour le revêtement des broyeurs à boulets est plus commode selon les propriétés des matières à broyer, le coût, de montage, Etc. Par rapport au broyeur à boulet au blindage en acier en raison de l'augmentation de la productivité et peuvent réduire les coûts d'exploitation, résistance à la corrosion et à l'abrasion, haute efficacité du broyage, adaptation au matériau à broyer, réduction du bruit, et moins de poids (7 fois moins que l'acier).

Le seul inconvénient reste et le plus important est le facteur de chaleur qui perturbe les fabricants de ces revêtements parce que le caoutchouc fond à une température de 80 C°, et n'est pas utile dans certains cas de broyage. À titre d'exemple le broyage de ciment se passe dans une température de broyage allant de 95 à 105 degrés dans des bonnes conditions.

Références bibliographique

Bibliographie

[1]. HAMOUDI HOHAMED, HERAIZ CHEIKH.

« Analyse du principe de travail et des problèmes rencontrés par les broyeur de papier recyclé ».

UNIVERSITE DE M'SILA 2012/2013.

[2]. TOUIMER BRAHIM, DJEMAI ADDE NASSER,

« Modélisation de la cinétique de broyage ».

UNIVERSITE DE M'SILA ,2001/2002.

[3] CHENENE MUSTAPHA, KORICHE SAID, SERREH HASSAN.

« Étude de maintenance du broyeur boulet "ACC" -M'SILA- »

UNIVERSITE DE M'SILA, 2007/2008.

[4]. FACULTÉ DU MANAGEMENT CHAIRE DES LANGUES ÉTRANGÈRES.

« Procédés et machines de traitement des minéraux utiles ».2013

[5]. BOUZID ABD ELBASSET.

« Calcul de la productivité d'un broyeur à boulet »

UNIVERSITE DE M'SILA ,2012/2013.

[6]. FLSMIDTH INSTITUE

CECIL Broyage.fr

« Broyeur à boulet »

[7]. FLSMIDTH INSTITUE

(4ème semaine), broyeur à boulet

« Broyeurs à boulets Présentation générale-Rev1_FR ».

[8] CHENENE MUSTAPHA, KORICHE SAID, SERREH HASSAN.

« Étude de maintenance du broyeur boulet "ACC" -M'SILA- »

UNIVERSITE DE M'SILA, 2007/2008.

[9]. FLSMIDTH INSTITUE

(Formation semaine 2), Technologie broyeur a boulets

« 21 Mill Op Basics Ball milltechnology_1 ».

[10]. Cahier technique n°19.

« Aide au choix d'équipements permettant la fragmentation de matières solides sur des bases énergétiques ».

[11]. ESSAIDE ARBIHA.

« Application de l'A.M.E.D.C aux deux broyeurs (a boulet et galets) de LAFARGE MSILA ».

UNIVERSITE DE MS'ILA, 2016/2017.

[12]. FLSMIDTH INSTITUE

(4ème semaine), broyeur à boulet

« Notions procédés sur broyeurs à boulets ».

[13]. ANDREY C.E.PEROV V A ET ZVEREVITCH V.V.

« Concassage ; broyage et criblage des minéraux utiles »

(p 415).Edition NEDRA.

[14]. CHARLES BELANGER BERTRAND

«Essai présenté au Centre universitaire de formation en environnement et développement durable en vue de l'obédience du grade de maître en environnement (M.env.)»

UNIVERSITE DE SHERBROOKE.2014.

Web-graphie

[15]. <http://www.thecementgrindingoffice.com/fr/cemtech.html>

[16]. http://www.azprocede.fr/Cours_GC/fragmentation_introduction.htm

[17]. <http://www.atomer.fr/1/1ac1.html>

[18]. <http://www.fkk.com.tr/madencilik?lang=fr>

[19]. <http://www.lecaoutchouc.com/>

[20]. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Caoutchouc_\(mat%C3%A9riau\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Caoutchouc_(mat%C3%A9riau))

- [21]. <https://www.aquaportail.com/definition-5622-caoutchouc.html>
- [22]. <http://french.ballmilliners.com/>
- [23]. http://forma-tic.net/tpe/?page_id=118
- [24]. <http://www.bio-literie.com/caoutchouc-naturel-latex.html>
- [25]. <http://www.certech.it/>
- [26]. <http://www.groupemundial.com/fr/services/flexarmor/>

Annexes

ANNEXES

Annexe 1. Les indices de mesure de ces propriétés (de Lubac, 1996)

1. Indice de friabilité de Hardgrove

Très utilisé dans les industries du charbon et des phosphates, cet indice caractérisant la friabilité est obtenu à partir d'un test réalisé dans un broyeur vertical à bille, à piste fixe, et l'index s'exprime en fonction de la masse du passant à une maille de 200 mesh soit 74 μm .

2. Indice de Bond

Cet indice est défini par l'énergie consommée pour réduire un matériau de taille initiale théoriquement infinie à un produit dont 80 % en masse passe au travers d'un tamis à mailles carrées de 100 mm de côté. Bond a défini deux protocoles opératoires le premier mettant en œuvre un broyeur à boulets, le second mettant en œuvre un broyeur à barres.

3. Indice d'abrasion

Défini par l'usure d'un matériau de référence SAE 4325 (acier Cr-Ni-Mo) au contact de l'échantillon de matière étudié dans un broyeur constitué d'un tambour rotatif (632 tours/min) dans lequel un barreau témoin placé perpendiculairement à l'axe du tambour tourne dans le même sens (74 tours/min) que ce dernier.

