

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



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



PROJET DE FIN DE CYCLE MASTER

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

Thème

Influence de la géométrie des barres de relevage
sur les performances d'un broyeur à boulets

Préparé par :

M^{elle} MASSINE Amel
M^{elle} MASSINE Ouissam

Soutenu publiquement le : 27 / 06 / 2022, devant le jury composé de :

| | | |
|----------------------|------------------------------------|--------------|
| M. BOUZOUINI Mohamed | "MAA " (Univ. Ibn Khaldoun) | Président |
| M. BENAMAR Badr | "MAA " (Univ. Ibn Khaldoun) | Examineur |
| M. DEBBIH Senouci | "MAA " (Univ. Ibn Khaldoun) | Examineur |
| M. AISSAT Sahraoui | " MCA " (Univ. Ibn Khaldoun) | Encadrant |
| M. SAFA Ali | " Doctorant " (Univ. Ibn Khaldoun) | Co-encadrant |

Année universitaire : 2021 – 2022

*R*emerciements

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements d'abord à « Dieu » qui nous a donné la santé et la patience

Nous adressons nos sincères remerciements à Messieurs Aissat Sahraoui et Safa Ali nos encadreurs pour nous avoir guidées, suivis et encouragées

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury d'avoir accepté de juger ce travail

Enfin, nous remercions particulièrement nos parents pour leur soutien inconditionnel tout au long de nos longues années d'études

Nous n'excluons pas de ces remerciements nos familles et nos amies pour leur soutien moral

Les discussions, les remarques et les commentaires de nos collègues ont été sources d'idées et ont contribué au développement et à l'amélioration de ce travail

Merci à tous

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Ma chère mère et mon cher père que Dieu les protège,

Mes frères, mes sœurs et à toute la famille Massine

Tous les enseignants qui m'ont aidée,

Les étudiants de Génie Mécanique

Surtout les étudiants de 2^{ème} année Master

Promotion 2021 / 2022

Dédicace

Je dédie ce travail :

*À mon cher père qui n'a jamais cessé
de m'aider et de me conseiller*

*À ma chère mère qui m'a toujours encouragée
pendant mes études*

À mes frères, à mes sœurs

À toute ma famille Massine

À tous mes amis.

Amel

Liste des notations

| | |
|---------------------|--|
| HP2: | Profil hélicoidal pas 2000 |
| HP3: | Profil hélicoidal pas 3000 |
| HP4: | Profil hélicoidal pas 4000 |
| V_c : | Vitesse critique [tr/min] |
| D: | Diamètre du broyeur [m] |
| P: | Puissance consommé par un broyeur à boulets [watts]. |
| N: | Vitesse de rotation du broteur [tr/min]. |
| T: | Couple [N.m]. |
| F_n : | Force normal [N]. |
| F_t : | Force tangentielle [N]. |
| F_c : | Force de compression [N]. |
| E_k : | Energie cinétique totale [J]. |
| E^* : | Module de young equivalent [MPa]. |
| m^* : | Masse équivalente. |
| R^* : | Rayon équivalent. |
| R_i : | Distance entre le point de contact |
| G^* : | Module de cisaillement. $\alpha\alpha\alpha\alpha v$ |
| ΔT_{step} : | Nombre de particules. |
| F_n^d : | Force d'amortissement. |
| DEM: | Méthode des éléments discrets. |
| EDEM: | Logiciel de la méthode des éléments discrets. |
| μ_t : | Coefficient de frottement. |
| β : | Rigidité normal. |
| ω_i : | Vecteur de vitesse angulaire de l'objet au point de contact. |
| δ_t : | Tangentielle chevauchement |
| α : | Angele de lifters |
| \vec{v}_t^{rel} : | Composante normale. |
| e : | Coefficient de restitution. |
| ν : | Désignent le coefficient de Poisson. |

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| Introduction générale..... | 02 |
| Chapitre I: Généralités sur les broyeurs à boulets | |
| I.1- Introduction | 04 |
| I.2- Différents types de broyeur | 04 |
| I.2.1- broyeur à barres | 04 |
| I.2.2- broyeur à boulets | 04 |
| I.2.3- broyeur autogènes | 05 |
| I.2.4- broyeur à tour (Tower Mill) | 06 |
| I.2.5- broyeur à cylindres..... | 06 |
| I.2.6- broyeur à galets..... | 07 |
| I.3- Principaux éléments constituant un broyeur à boulets | 08 |
| I.3.1- Virole..... | 08 |
| I.3.2- Portes de visite du broyeur | 08 |
| I.3.3- Goulotte d'entrée..... | 08 |
| I.3.4- Blindages d'entrée..... | 09 |
| I.3.5- Blindages de virole..... | 09 |
| I.3.6- Corps broyants (les boulets de broyage) | 10 |
| I.3.7- Cloison..... | 11 |
| I.3.8- Grilles de cloison..... | 13 |
| I.3.9- Grilles de décharge..... | 14 |
| I.3.10- Paliers de broyeurs | 15 |
| I.3.11- Commande | 15 |
| I.3.12- Pompes de lubrification..... | 16 |
| I.3.13- Ventilation du broyeur..... | 17 |
| I.3.14- Injection d'eau..... | 17 |
| I.4- Usure dans les broyeurs à boulets..... | 18 |
| I.4.1-Usure des massifs..... | 18 |
| I.4.2- Usure des paliers | 18 |
| I.4.3- Usure sur le tourillon..... | 19 |
| I.4.4- Usure du fond d'entrée | 19 |
| I.4.5- Usure de la cloison | 20 |
| I.4.6- Usure de l'accouplement du vileur du broyeur..... | 20 |
| I.4.7- Usure du réducteur du broyeur | 21 |

| | |
|---|----|
| I.4.8- Déformations de la virole | 21 |
| I.5- Différents types de barres de relevage | 22 |
| I.5.1- Blindage releveur (1er compartiment) | 22 |
| I.5.2- Formes de barres de relevage du 1er compartiment..... | 23 |
| I.5.2.1- Blindage avec rebord..... | 23 |
| I.5.2.2- Blindage ondulé de type “Duo lift“ | 24 |
| I.5.2.3- Blindage à pas de type “xlift“ et pas avec profil ondulé | 24 |
| I.5.3- Blindage classant (2eme compartiment) | 24 |
| I.5.4- Formes de barres de relevage du 2eme compartiment | 25 |
| I.5.4.1- Blindage de type ondulé “trainé“ | 25 |
| I.5.4.2- Blindage classant avec profil releveur..... | 25 |
| I.5.4.3- Blindage classant conventionnel avec profil ondulé | 26 |
| I.6- Conclusion..... | 26 |

Chapitre II : Généralités sur la méthode des éléments discrets

| | |
|--|----|
| II.1- Introduction | 28 |
| II.2- Régimes de broyage (cataracte, cascade) | 28 |
| II.2.1- Broyage | 28 |
| II.2.2- Broyeur à boulets..... | 29 |
| II.3- Paramètres influençant l’efficacité de broyage | 30 |
| II.3.1-Vitesse et diamètre du broyeur | 31 |
| II.3.2- Taux de remplissage du broyeur..... | 32 |
| II.3.3- Taille du broyeur et des boulets..... | 33 |
| II.3.4- Influence du profil des barres de relevage..... | 34 |
| II.3.5- Influence de la hauteur du profil rectangulaire | 36 |
| II.3.6- Influence du rapport hauteur-largeur du profil rectangulaire | 37 |
| II.3.7- Influence du nombre de lifters..... | 38 |
| II.4- Principe de la méthode des éléments discrets | 40 |
| II.5- Domaines d’application de la DEM | 41 |
| II.6- Etapes de résolution d’un problème par la DEM | 43 |
| II.6.1- Créateur EDEM (EDEM creator) | 44 |
| II.6.2- Simulateur EDEM (EDEM simulator) | 44 |
| II.6.3- Analyse de simulation EDEM (EDEM Analyst) | 44 |
| II.7- Conclusion..... | 45 |

Chapitre III. Formulation mathématique du problème et résultats expérimentaux

| | |
|---|----|
| III.1- Introduction..... | 47 |
| III.2- Forces impliquées dans le processus de broyage | 48 |
| III.3- Théorie et méthodologie | 48 |
| III.3.1- Simulation par la DEM | 48 |
| III.3.2- Modèle de contact..... | 48 |
| III.3.3- Paramètres de simulation | 51 |
| III.4- Caractéristiques du matériau utilisé pou la simulation..... | 53 |
| III.4.1- Profils des barres de relevage..... | 53 |
| III.4.2- Paramètres du broyeur | 54 |
| III.5- Résultats et discussions..... | 55 |
| III.5.1- Effet des lifters sur le couple et la puissance du broyeur | 55 |
| III.5.2- Nombre de collisions | 56 |
| III.5.3- Efforts de contact moyen en fonction du type de profil | 57 |
| III.5.3.1- Effort de compression moyen F_c | 57 |
| III.5.3.2- Effort normal moyen de contact F_n | 57 |
| III.5.3.3- Effort tangentiel moyen de contact F_t | 58 |
| III.5.3.4- Comparaison des efforts de contact | 59 |
| III.5.4- Energie cinétique totale E_k | 59 |
| III.5.5- Mouvement des boulets | 60 |
| III.5.6- Mouvement des particuls | 61 |
| III.6- Conclusions..... | 62 |
| Conclusion générale | 65 |
| Bibliographie..... | 68 |
| Résumé | |

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les broyeurs à boulets

| | |
|--|----|
| Figure I-1 : Broyeur à barres..... | 04 |
| Figure I-2 : Broyeur à boulets..... | 05 |
| Figure I-3 : Broyeur autogènes..... | 06 |
| Figure I-4 : Broyeur à tour (tower mill)..... | 06 |
| Figure I-5 : Broyeur à cylindres..... | 07 |
| Figure I-6 : Broyeur à galets..... | 07 |
| Figure I-7 : Virole..... | 08 |
| Figure I-8 : Portes de visite du broyeur..... | 08 |
| Figure I-9 : Goulotte d'entrée..... | 09 |
| Figure I-10 : Blindages d'entrée..... | 09 |
| Figure I-11 : Blindage releveur et classant..... | 10 |
| Figure I-12 : Deux profils : releveurs (photo 1) et classant (photo 2)..... | 10 |
| Figure I-13 : Corps broyants..... | 11 |
| Figure I-14 : Cloison d'entrée..... | 12 |
| Figure I-15 : Cloison intermédiaire..... | 12 |
| Figure I-16 : Cloison de sortie..... | 13 |
| Figure I-17 : Grilles de cloison..... | 13 |
| Figure I-18: Evasion des particules à travers les lumières..... | 14 |
| Figure I-19 : Grilles de décharge..... | 14 |
| Figure I-20 : Paliers à patins..... | 15 |
| Figure I-21 : Paliers à tourillons..... | 15 |
| Figure I-22 : Partie commande du broyeur à boulets..... | 16 |
| Figure I-23 : Pompes de lubrification (haut pression et basse pression)..... | 16 |
| Figure I-24 : Ventilation du broyeur..... | 17 |
| Figure I-25 : Injection d'eau..... | 17 |
| Figure I-26 : Fissure des tourillons..... | 18 |
| Figure I-27 : Usure du blindage..... | 19 |
| Figure I-28 : Desserrage des plaques du blindage de fond d'entrée..... | 19 |
| Figure I-29 : Usure de la cloison..... | 20 |
| Figure I-30 : L'accouplement de vibreur du broyeur..... | 20 |
| Figure I-31 : Usure des dents du satellite..... | 21 |
| Figure I-32 : Fissure apparue sur la virole d'une longueur de (375mm et 90mm)..... | 21 |

| | |
|---|----|
| Figure I-33 : Schéma de conception de blindage releveur | 22 |
| Figure I-34 : Blindage avec rebord..... | 23 |
| Figure I-35 : Blindage ondulé de type “Duolift“ | 24 |
| Figure I-36 : Blindage à pas de type “xlift“ (1) et blindage à pas avec profil ondulé (2) | 24 |
| Figure I-37 : Blindage de type ondulé “Trainé“..... | 24 |
| Figure I-38 : Blindage classant avec profil releveur | 25 |
| Figure I-39 : Blindage classant conventionnel avec profil ondulé..... | 26 |

Chapitre II : Généralités sur la méthode des éléments discrets

| | |
|--|----|
| Figure II-1 : Processus de fragmentation dans l’industrie minière | 28 |
| Figure II-2 : Régimes distincts de vitesse de rotation d’un broyeur à boulets..... | 30 |
| Figure II-3 : Evolution de la vitesse de rotation du broyeur..... | 31 |
| Figure II-4 : Effet du pourcentage de vitesse critique sur la puissance du broyeur à boulets | 31 |
| Figure II-5 : Mise en évidence du taux de remplissage..... | 32 |
| Figure II-6 : Influence du taux de remplissage | 32 |
| Figure II-7 : Effet du remplissage du broyeur sur la puissance du broyeur à boulets..... | 33 |
| Figure II-8 : Evolution de la force de frappe des boulets | 34 |
| Figure II-9 : Différents profils des lifters | 35 |
| Figure II-10 : Différentes hauteurs de profils rectangulaires..... | 36 |
| Figure II-11 : Différents rapports hauteur-largeur des lifters rectangulaires..... | 38 |
| Figure II-12 : Différents nombres de barres de relevage..... | 39 |
| Figure II-13 : Cycle de calcul du DEM | 41 |
| Figure II-14 : Organigramme du principe de la DEM..... | 42 |
| Figure II-15 : Organigramme du logiciel EDEM..... | 44 |

Chapitre III : Formulation mathématique du problème et résultats expérimentaux

| | |
|--|----|
| Figure III-1 : Zones à l’intérieur d’un broyeur à boulets (zone morte = vitesse des boulets nulle)..... | 48 |
| Figure III-2 : Illustration des forces normales et tangentielles impliquées dans le contact entre les particules A et B..... | 49 |
| Figure III-3 : Schéma du modèle de contact Hertz-Mindlin simplifié entre deux particules | 50 |
| Figure III-4 : Modèle de particules et particule réelle de quartz..... | 52 |
| Figure III-5 : Configuration des lifters utilisés dans les simulations. | 53 |
| Figure III-6 : Diamètre du broyeur et dimensions des lifters utilisés dans les simulations | 54 |

| | |
|--|----|
| Figure III-7 : Puissance consommée par le broyeur..... | 55 |
| Figure III-8 : Nombre de collisions en fonction du temps de simulation..... | 56 |
| Figure III-9 : Variation de l'effort de compression moyen F_c en fonction de la forme des lifters..... | 57 |
| Figure III-10 : Variation de l'effort de contact normal moyen F_n en fonction de la forme des lifters..... | 58 |
| Figure III-11 : Variation de l'effort de contact tangentiel moyen F_t en fonction de la forme des lifters..... | 58 |
| Figure III-12 : Mise en évidence des efforts de contact | 59 |
| Figure III-13 : Variation de l'énergie cinétique totale E_k en fonction de la forme des lifters..... | 60 |
| Figure III-14 : Diagrammes vectoriels de vitesse des boulets pour les différentes géométries des lifters..... | 60 |
| Figure III-15 : Diagrammes vectoriels de vitesse des particules pour les différentes géométries des lifters..... | 62 |

Liste des tableaux

Chapitre II : Généralités sur la méthode des éléments discrets

| | |
|---|----|
| Tableau II.1: Paramètres de simulation | 35 |
| Tableau I.2: Paramètres de simulation utilisés..... | 36 |
| Tableau II.3: Paramètres de simulation | 37 |
| Tableau II.4: Paramètres de simulation | 39 |

Chapitre III : Formulation mathématique du problème et résultats expérimentaux

| | |
|--|----|
| Tableau III.1: Paramètres DEM utilisés pour les simulations | 52 |
| Tableau III.2: Paramètres du broyeur pour le modèle DEM | 54 |
| Tableau III.3: Valeurs de la puissance consommée calculées à partir l'équation 14..... | 55 |
| Tableau III.4: Récapitulatif des résultats obtenus dans ce travail..... | 62 |



Introduction générale

Les broyeurs sont utilisés à travers le monde depuis des dizaines d'années. Ils ont subi de nombreuses améliorations en utilisant de nouvelles technologies.

Le broyeur à boulets est une machine de broyage équipée d'un certain nombre de boulets d'acier comme moyen de broyage dans un cylindre. Il est largement utilisé dans la production de ciment, de produits à base de silicate, de nouveaux matériaux de construction, de matériaux réfractaires, d'enrichissement de métaux ferreux ou non ferreux, de vitrocéramique, de métallurgie, et d'industries chimiques. Il peut être divisé selon les méthodes d'embrayage en sec et humide. Selon les différentes méthodes de décharge, il peut être divisé en type de grille et type de débordement.

Le broyeur à boulets est principalement composé d'un tambour cylindrique, d'un couvercle d'extrémité, d'un roulement, d'une grande couronne dentée de transmission et d'autres composants.

Le tambour est rempli de billes d'acier ou de barres d'acier d'un diamètre de 25 à 150 mm, appelées corps broyants. Leur dureté Brinell est de l'ordre de 50 à 450, mais exceptionnellement elle peut atteindre 700HB afin d'augmenter leur durée de vie.

Ces corps broyants sont employés pour le broyage de la roche généralement dans des broyeurs à deux chambres (compartiment de concassage ou broyage grossier et compartiment de finition ou broyage fin). Ces dernières sont séparées par une cloison.

Ces boulets sont soulevés par des barres de relevage disposées sur la paroi du corps du cylindre à une certaine hauteur et ils tombent ensuite au fond du broyeur selon les caractéristiques du mouvement interne.

Dans ce projet de fin d'études, nous avons étudié l'effet d'une nouvelle géométrie (hélicoïdale) des barres de relevage sur l'efficacité de broyage (couple et puissance absorbée) d'un broyeur à boulet par simulation DEM des profils droits et des nouveaux profils hélicoïdaux.

Notre mémoire s'articule autour de trois chapitres.

Le premier chapitre présente un aperçu sur les éléments constituant un broyeur à boulets.

Le deuxième chapitre est consacré à des généralités sur la méthode des éléments discrets.

Dans le troisième chapitre, nous présentons la formulation mathématique du problème et les résultats expérimentaux.

Une conclusion générale et des perspectives sont données à la fin de ce travail.

 *Chapitre – I –*

Généralités sur les broyeurs à boulets

I.1. Introduction

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. Les broyeurs utilisés peuvent être à deux ou 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 [1].

Dans ce chapitre nous présentons un aperçu sur les éléments constituant un broyeur à boulets.

I.2. Différents types de broyeurs

I.2.1. Broyeurs à barres

Ils sont considérés à la fois comme des machines à concassage fin et comme des machines à broyage grossier. Ils peuvent traiter des particules aussi grossières que 50 mm et produire des particules de 300 μm et moins avec des rapports de réduction se situant entre 1 :15 et 1 :20.

La caractéristique la plus distincte des broyeurs à barres est le rapport longueur vs le diamètre (1.5 à 2.5).

Ceci est important puisque les barres (seulement quelques centimètres plus courtes que la carcasse) ne doivent pas se mettre de travers dans le broyeur et coincer les barres restantes. Il est bien établi que la longueur des barres ne peut dépasser 6.4 m, car au-delà de cette valeur, les barres risquent de se courber et produire de l'enchevêtrement. La puissance requise par ces broyeurs peut être estimée selon la formule de Bond avec certains facteurs de correction pour des broyeurs à barres. Un moteur typique pour un broyeur de 4.6 m par 6.4 m est de 1640 kW (Figure I.1).

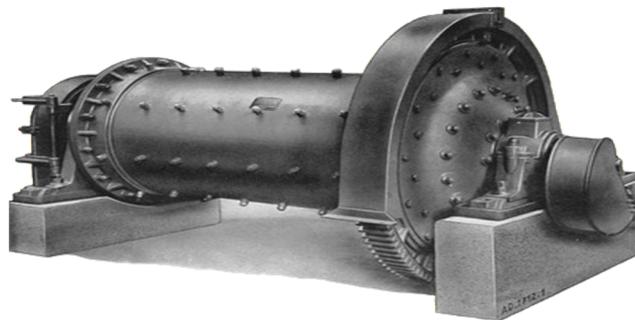


Figure I.1 : Broyeurs à barres

I.2.2. Broyeurs à boulets

Ils servent aux dernières étapes du broyage (broyage fin). La charge broyante est constituée de boulets (bals), des cônes (slug) ou autres formes, leur dimension étant

déterminée par la granulométrie du matériel à broyer. Le rapport longueur/diamètre dans ce type de broyeurs varie entre 1 et 1.5. Il existe cependant des broyeurs avec un rapport supérieur à 3, appelés broyeurs tubulaires (tube Mill) ; ils sont très utilisés dans les cimenteries.

En général, les broyeurs à boulets opèrent à des vitesses plus élevées que celles des broyeurs à barres. Le mécanisme de fragmentation plus important est donc l'impact (cataracte).

Même si le mécanisme d'usure des boulets le plus important est l'abrasion, lors du broyage en milieu humide, l'usure par corrosion est aussi non négligeable, comptant pour 10% de l'usure totale. Les broyeurs à boulets sont aussi classifiés selon leur façon de décharger le produit. On en trouve de deux types : à grille (gratte décharge), et par trop-plein ou par débordement (over flow décharge) (Figure I.2).



Figure I.2 : Broyeurs à boulets

I.2.3. Broyeurs autogènes

Comme son nom l'indique, le broyage autogène utilise le minerai lui-même pour effectuer la fragmentation. Donc, ils n'utilisent pas de charge broyant d'acier (boulets ou barres). En général, pour qu'un tel type de broyage soit possible, le minerai doit avoir certains critères, notamment ceux de dureté et de compétence, qui permettent aux gros morceaux de minerai de broyer les particules plus petites, tout en se broyant eux-mêmes contre le revêtement du broyeur (Figure I.3).

Le broyage autogène peut se faire en milieu sec ou humide. Lorsque la compétence du minerai est faible ou qu'elle varie trop, on utilise une charge réduite de boulets d'acier (6 à 10% du volume du broyeur) pour aider le broyage.

Les avantages de cette méthode de broyage sont un coût de capital inférieur, une bonne habileté à traiter des matériels collants et humides, des circuits plutôt simples, de l'équipement

de grande dimension, une main d'œuvre requise moindre, un minimum de dépenses en boulets ou barres et un produit non contaminé de granulométrie uniforme.

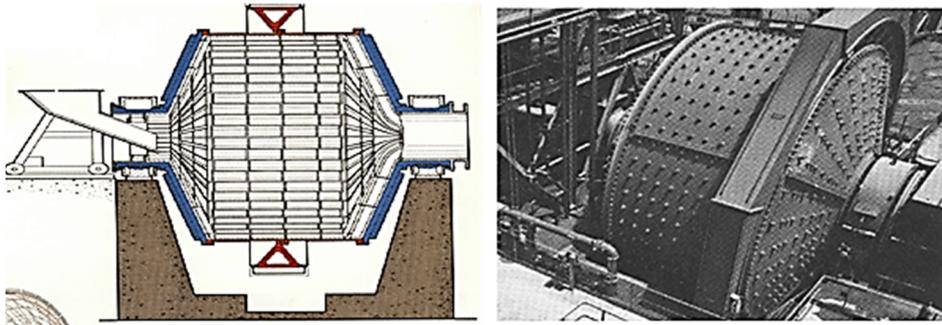


Figure I.3 : Broyeurs autogènes

I.2.4. Broyeur à tour (Tower Mill)

Ils servent à des broyages très fins et incorporent une sorte de classification interne. Ils utilisent des boulets très petits. En général, ils requièrent moins d'espace, sont moins bruyants et très efficaces du point de vue énergétique (Figure I.4). Ils produisent un minimum de surbroyage et les coûts d'installation et d'opération sont aussi inférieurs. Ils sont surtout utilisés dans les circuits de rebroyage.

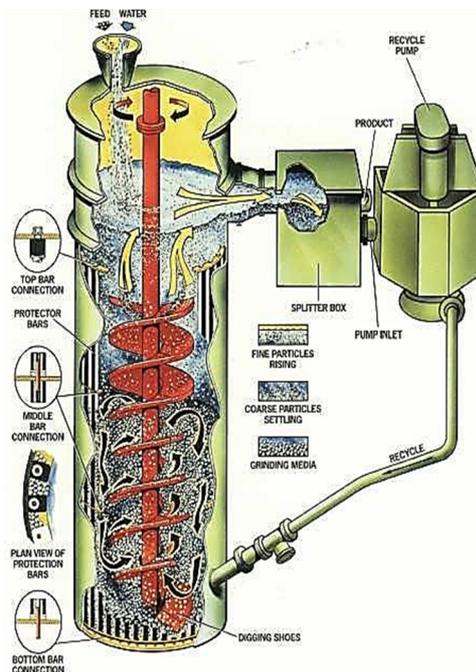


Figure I.4 : Broyeur à tour (Tower Mill)

I.2.5. Broyeur à cylindres

Le broyeur à cylindres permet la réduction grossière ou primaire de matières dures,

abrasives, éventuellement collantes (Figure I.5).

Il est utilisé dans les domaines d'application suivants :

- Environnement et recyclage.
- Minéraux, engrais, chimie minérale.
- Alimentaire, pharmacie, chimie fine.
- Métaux.



Figure I.5 : Broyeur à cylindres

I.2.6. Broyeurs à galets

Les rouleaux de drayage stationnaires roulent sur une plaque de broyage rotative. Le sol est pris entre les rouleaux de broyage et la voie et est mis à la terre par des forces de compression et cisaillement. Les forces de compression nécessaires au meulage sont produites par un système tension hydropneumatique. En raison de la rotation de la plaque de broyage, le matériau broyé il est évacué vers la couronne de buses fixe (Figure I.6).



Figure I.6 : Broyeur à galets

I.3. Principaux éléments constituant un broyeur à boulets

Nous présentons maintenant les principaux éléments d'un broyeur à boulets [2].

I.3.1. Virole

La virole est une tôle d'acier laminée pour constructions soudées. Elle compte des brides en acier coule soudées à ses deux extrémités et servant à la fixation des tourillons. Chacun des deux compartiments est muni d'un trou d'homme (portes visite) permettant des remplacer aisément les plaques de blindage et les boulets de broyage (Figure I.7).



Figure I.7 : La virole

I.3.2. Portes de visite du broyeur

Elles donnent accès au broyeur pour les visites (Figure I.8), la maintenance et les réfections de la charge. La partie 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 I.8 : Les portes de visite du broyeur

I.3.3. Goulotte d'entrée

Elle dirige la matière (et les rejets du séparateur) dans le 1er compartiment du broyeur (Figure I.9). Elle est équipée pour résister à l'usure.

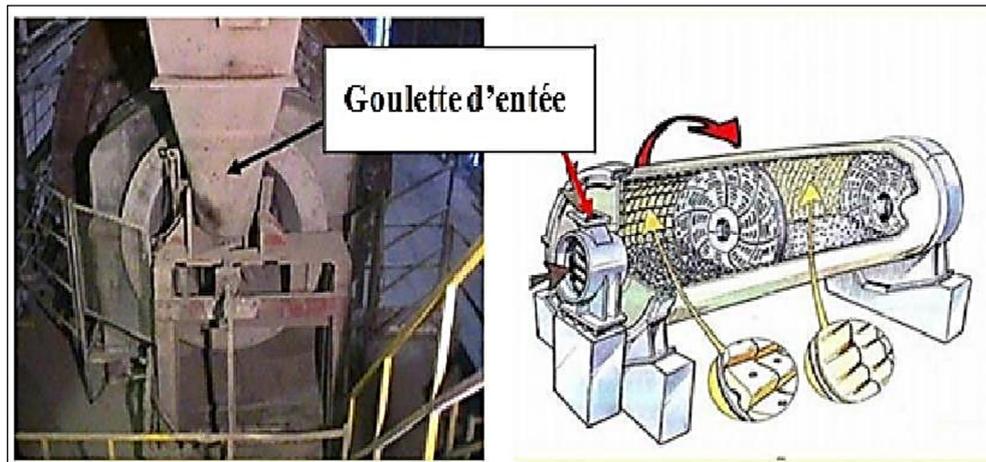


Figure I.9 : La goulotte d'entrée

I.3.4. Blindages d'entrée

Ce sont des blindages d'usure amovibles placés sur fond d'entrée du 1er 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 I.10).



Figure I .10 : Blindages d'entrée

I.3.5. 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 (Figure I.11).

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 y a juste à broyer finement la matière. L'effet de cascade est fourni par des boulets plus petits.

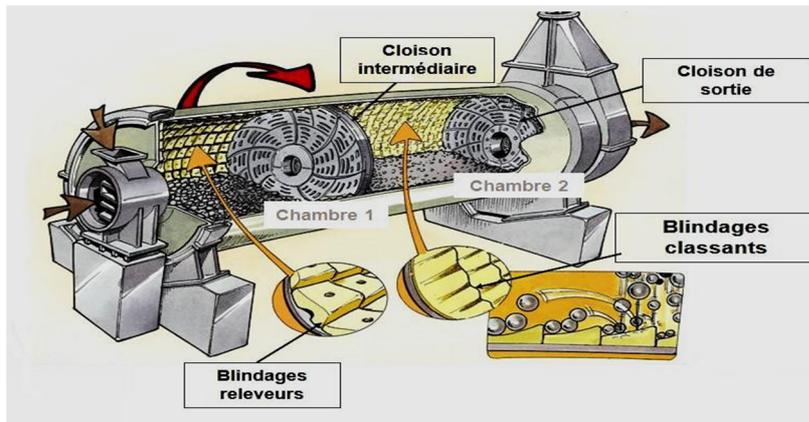


Figure I.11 : Blindage Releveur et Classant [3]

Le profil du blindage est très important pour assurer un bon effet releveur et classant des corps broyants (Figure I.12).

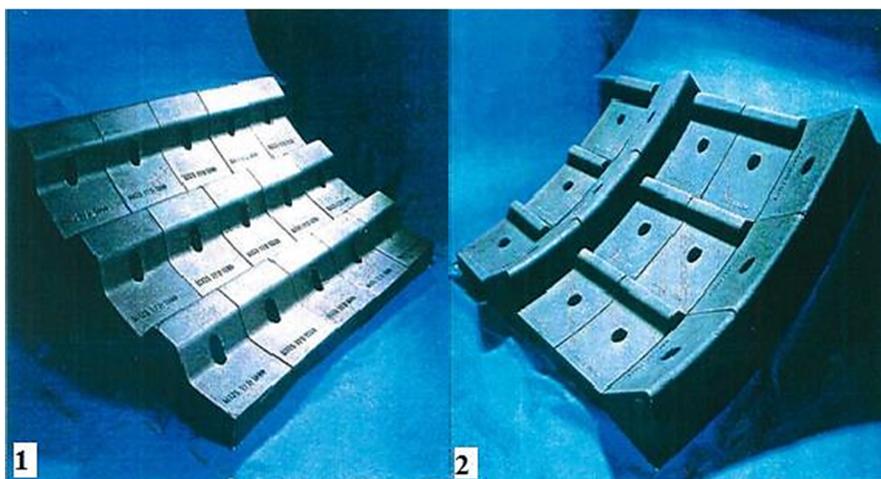


Figure I.12 : Les deux profils : Releveurs (photo 1) et Classant (photo 2) [3]

I.3.6. Corps broyants (les boulets de broyage)

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

Ils sont faits d'acier forge ou moulés à haute teneur en chrome (Figure I.13).

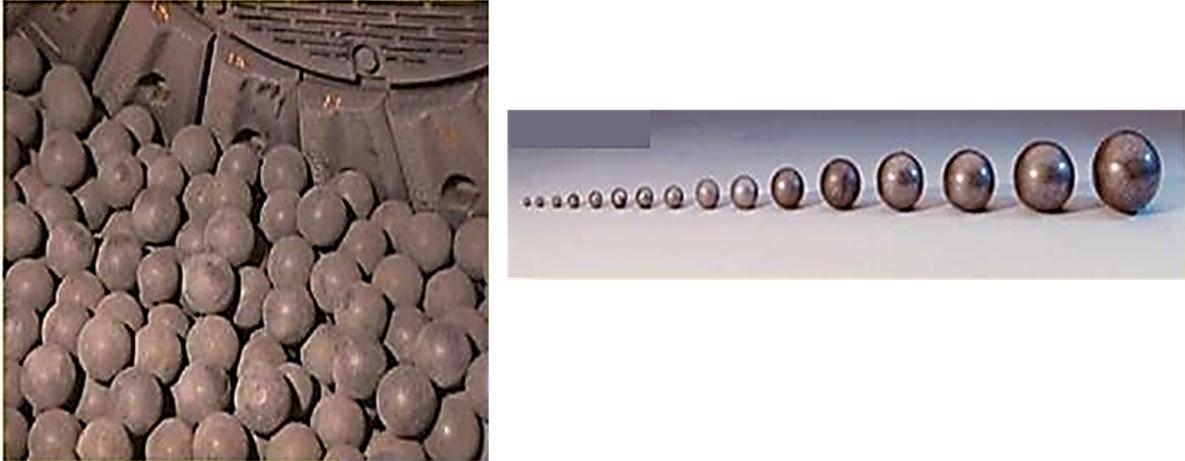


Figure I.13 : Les corps broyant

I.3.7. Cloisons

Elles séparent le broyeur en différents compartiments. Autorisent des charges différentes dans chaque compartiment et 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 peuvent aussi être :

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

a) Cloison d'entrée

La cloison d'entrée permet de laisser entrer la matière à broyer dans le premier compartiment du broyeur (Figure I.14).

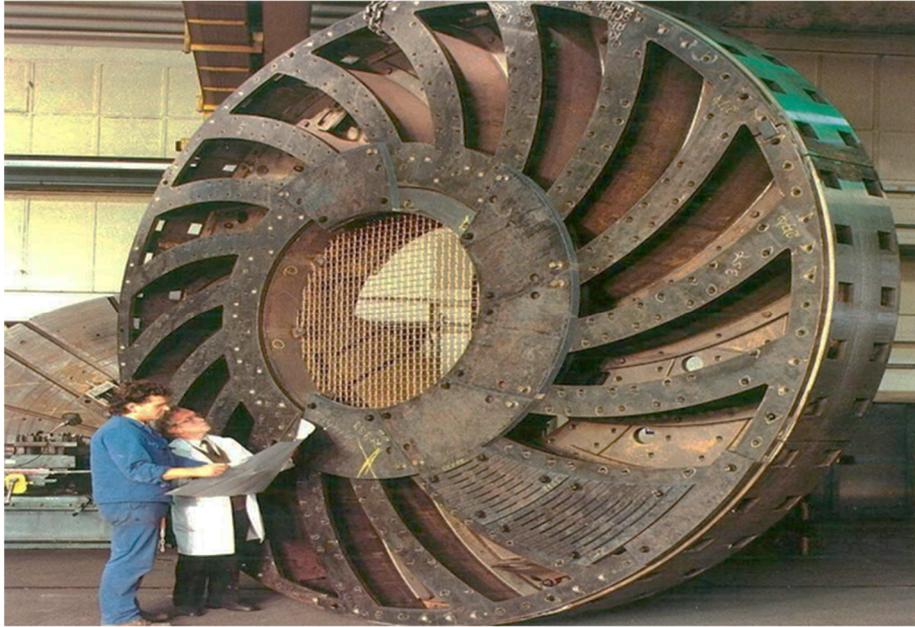


Figure I.14 : Cloison d'entrée [3]

b) Cloison intermédiaire

La cloison intermédiaire sépare les compartiments de broyage (Figure I.15). 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'écopes internes à la cloison et un cône de transfert vers le compartiment suivant.



Figure I.15 : Cloison intermédiaire [3]

c) Cloison de sortie

La cloison de sortie permet de retenir la charge broyante dans le dernier compartiment du broyeur et de laisser sortir la matière (Figure I.16).



Figure I.16 : Cloison de sortie [3]

I.3.8. Grilles de cloison

Elles possèdent des blindages amovibles résistants à l'usure avec des lumières retenant la matière dans le compartiment jusqu'à ce qu'elle soit assez fine pour passer au travers (Figure I.17).

Les lumières se caractérisent par leur double forme évasée (les particules et les fragments de matière ne resteront pas coincés) (Figure I.18).

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 I.17 : Grilles de cloison

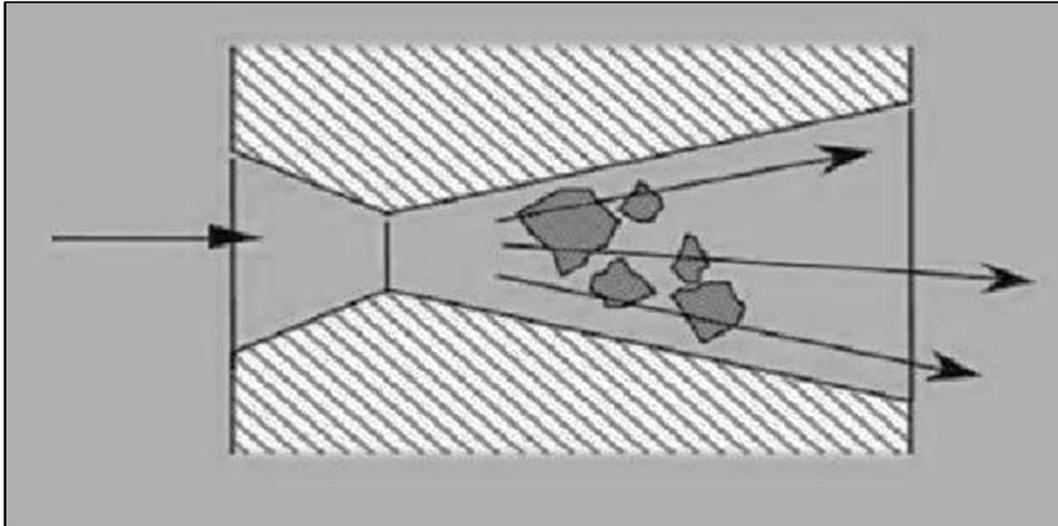
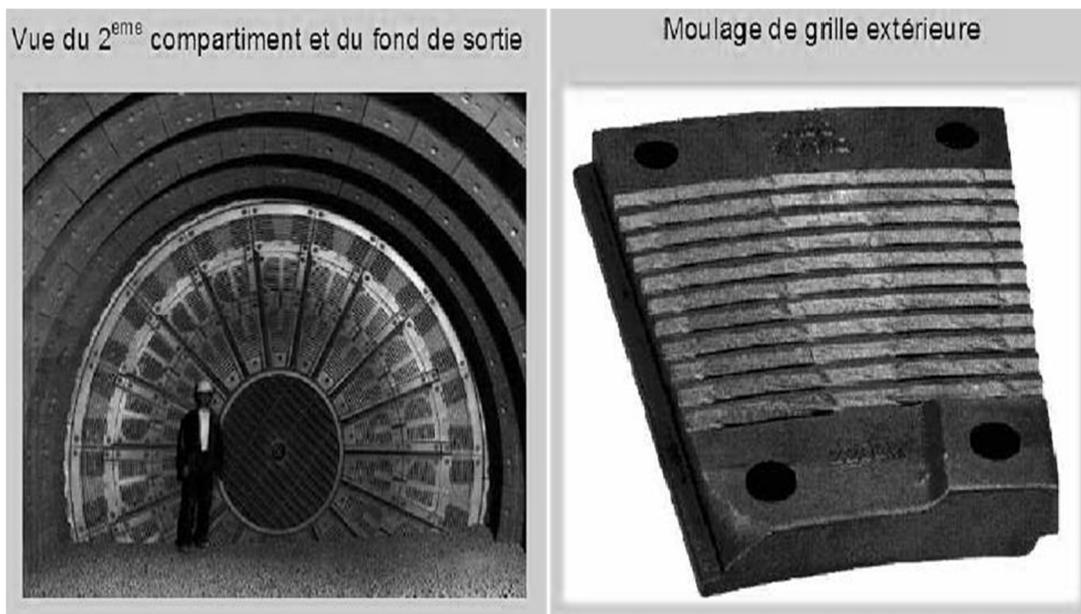


Figure I.18 : Évasion des particules à travers les lumières

I.3.9. Grilles de décharge (Figure I.19)

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 traversent 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.



I.19 : Grilles de décharge

I.3.10. Paliers de broyeurs

Il y a deux types de paliers :

1-A patins

La figure I.20 présente le premier type de paliers à broyeur

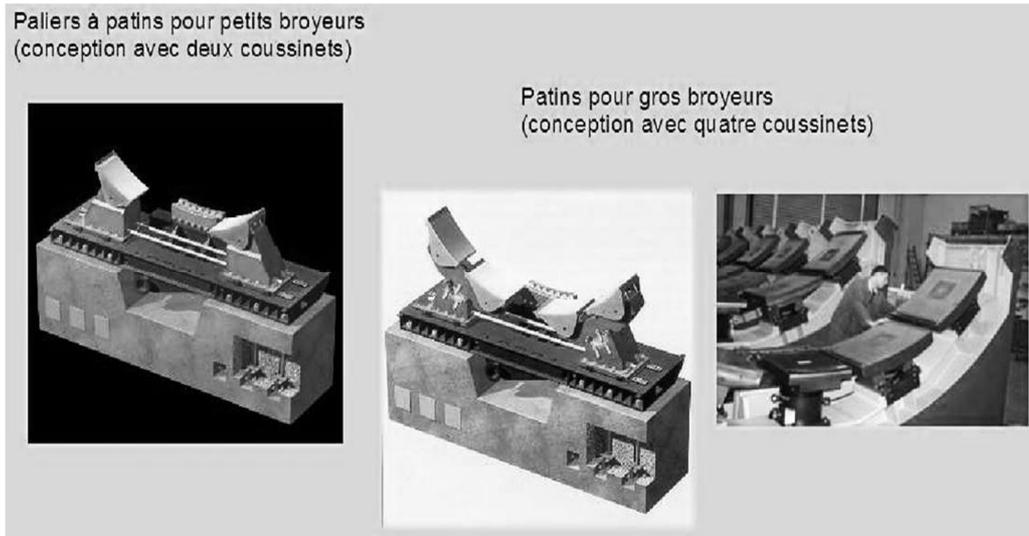


Figure I.20 : Les paliers à patins

2- A tourillons

Les paliers à tourillons sont représentés par la figure I.21



Figure. I.21 : Paliers à tourillons

I.3.11. Commande

Ensemble des éléments électriques et mécaniques nécessaires pour fournir la force motrice au broyeur (Figure I.22). La gamme des puissances de broyeurs va de 200 KWH pour les petits broyeurs, à 8000 KWH 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.

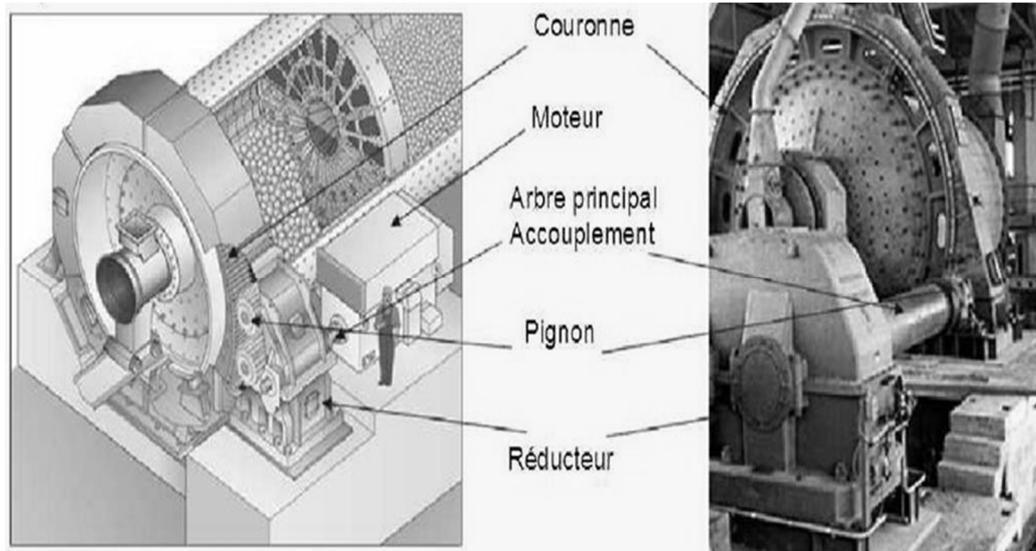


Figure I.22 : La partie commande du broyeur à boulets

I.3.12. Pompes de lubrification

On trouve des pompes à haute et basse pression (Figure I.23) :

- 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 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.

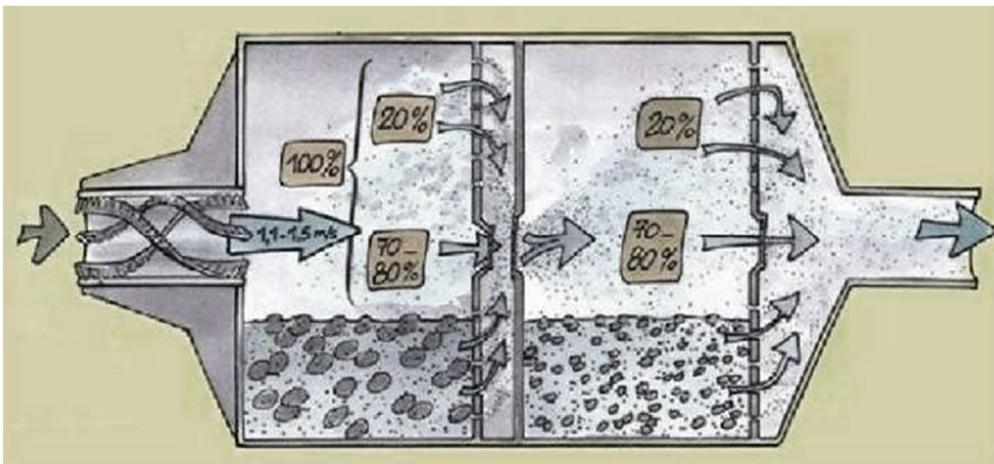
Dans d'autres applications, la pompe haute pression est autonome et s'arrête après le démarrage.



Figure I.23 : Pompes de lubrification (haut pression et basse pression).**I.3.13. Ventilation du broyeur** (Figure I.24)

La ventilation a pour buts :

- 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 I.24 :** 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.

I.3.14. 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 (Figure I.25).

A cause de la température le gypse se déshydrate partiellement pour former 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 I.25 : Injection d'eau.

I.4. Usure dans les broyeurs à boulets

Pendant une période de fonctionnement, la durée de vie d'un équipement est réduite suite à un nombre important de problèmes qui peuvent provoquer leur usure.

L'usure dans les broyeurs à boulets peut affecter les éléments suivants, à savoir :

I.4.1. Usure des massifs :

- Affaissement des fondations entraînant
 - Un désalignement de la commande,
 - Une poussée axiale excessive sur les coussinets du broyeur.
- Fissures du béton causées par :
 - Une infiltration d'huile (mauvaise étanchéité),
 - Les vibrations,
 - La corrosion des ferrillages du béton armé (infiltration d'eau).

I.4.2. Usure des paliers :

- Boulons d'ancrage desserrés ou cassés :
 - En raison des vibrations,
 - En raison d'un mauvais coulage et de la qualité du béton.
- Échauffement causé par :
 - Problème de géométrie (réparation de la fusée du tourillon),
 - Déformation ou voilement,
- Jeu excessif,
 - Mauvaise lubrification ou répartition de l'huile,

- Mauvaise qualité de la surface (rugosité, rayures ...),
- Infiltration d'eau dans l'huile,
- Mauvaise isolation thermique du tourillon.

I.4.3. Usure sur le tourillon :

Les fissures dans des tourillons sont causées par les vibrations et les charges.

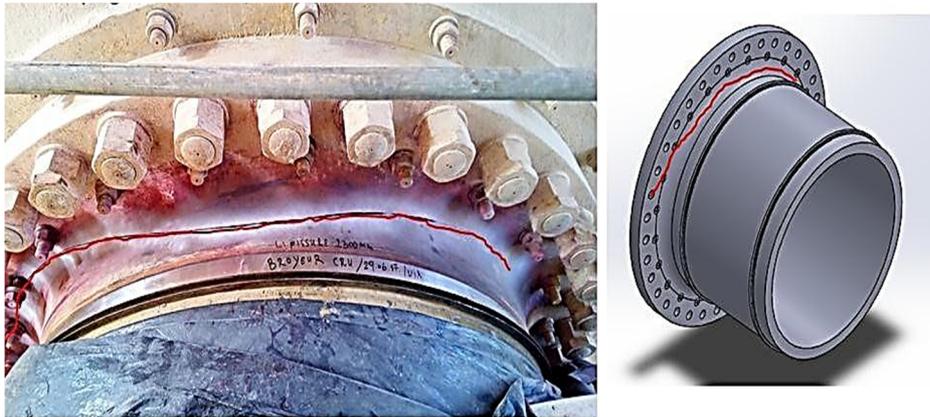


Figure.I.26 : Fissure des tourillons

I.4.4. Usure du fond d'entrée :

- Usure sur l'épaisseur du blindage (Figure I.27).
- Desserrage des plaques du blindage de fond d'entrée (Figure I.28).



Figure I.27 : Usure du blindage



Figure I.28 : Desserrage des plaques du blindage de fond d'entrée

I.4.5. Usure de la cloison (Figure I.29)

- Male fixation des plaques,
- Usure des plaques



Figure I.29 : Usure de la cloison

I.4.6. Usure de l'accouplement du vireur du broyeur

- Présence d'un jeu axial entre l'accouplement et la bague (Figure I.30).



Figure I.30 : L'accouplement de vileur du broyeur

I.4.7. Usure du réducteur du broyeur

- Usure des dents du satellite et des dents de la couronne (Figure I.31),
- Cisaillement des vis de fixation.



Figure I.31 : Usure des dents du satellite

I.4.8 Déformations de la virole

La virole peut être assujetti à :

- La fissure :
 - Principalement circonférentielles (conception, fatigue),
 - Au niveau des trous des boulons des blindages (fatigue, défauts locaux) (Figure I.32).
- Des déformations :
 - Broyeur fonctionnant avec un blindage manquant,
 - Réparation de virole sur fissure circonférentielle.

- L'usure :
 - Surtout sur des points précis (cloisons, nouvelle forme de blindages),
 - En cas de remplacement de cloison, il faut vérifier la virole de l'intérieur (épaisseur et défauts).

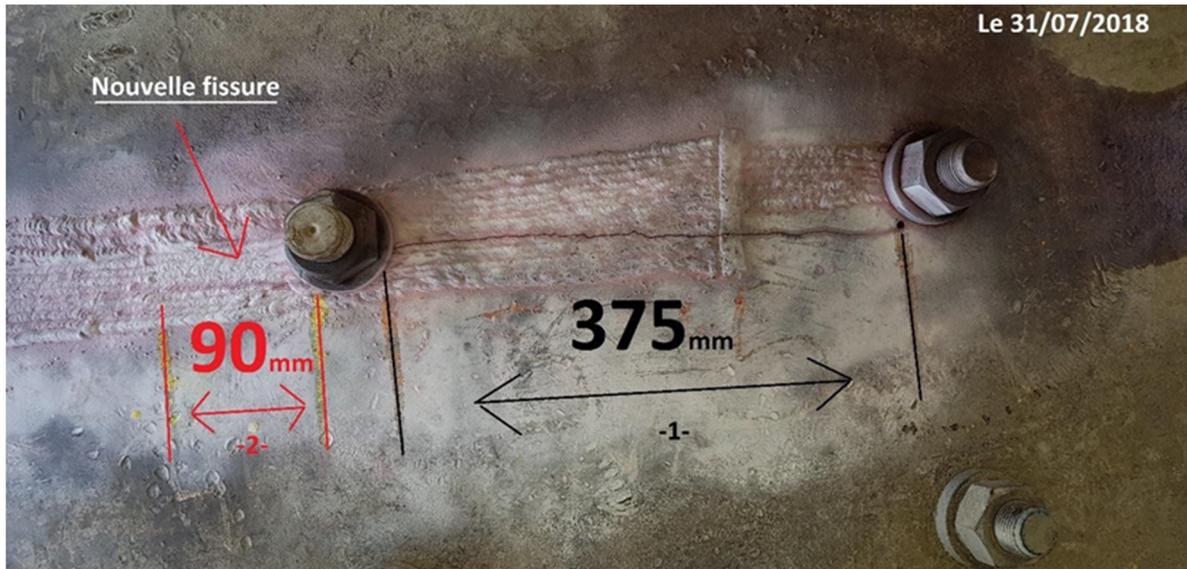


Figure I.32 : Fissure apparue sur la virole d'une longueur de (375mm et 90mm).

I.5. Différents types de barres de relevage

Dans le broyeur à boulet il y a deux compartiments, chacun d'eux a son propre blindage spécifique [4].

I.5.1. Blindage releveur (1er 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 I.33). Le choix est basé sur :

- 1) L'objectif de concassage.
- 2) Le diamètre de la virole.
- 3) Le % de vitesse critique.

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

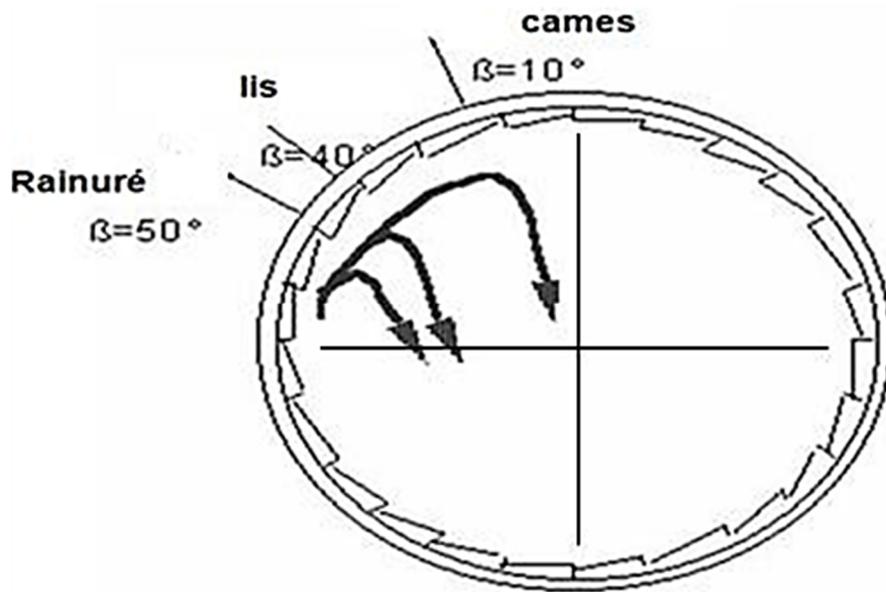


Figure I.33 : Schéma de conception de blindage releveur

I.5.2. Formes de barres de relevage du 1er compartiment

I.5.2.1. Blindage avec rebord (Figure I.34)

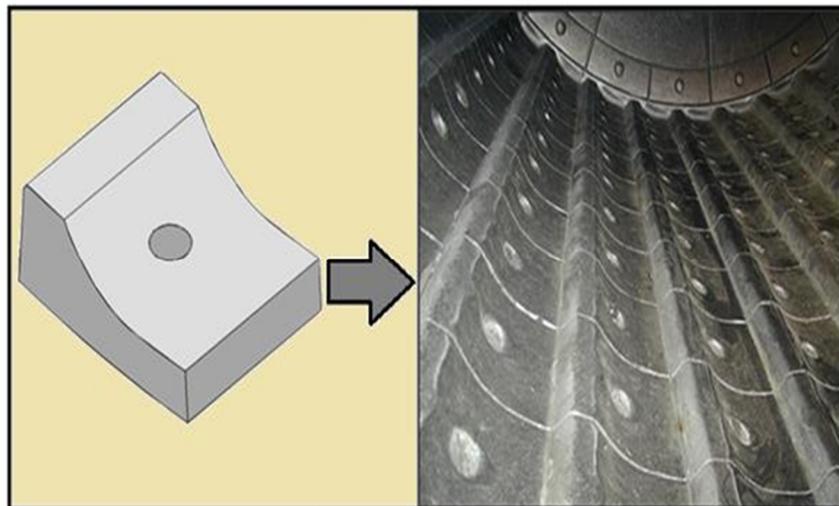


Figure I.34 : Blindage avec rebord

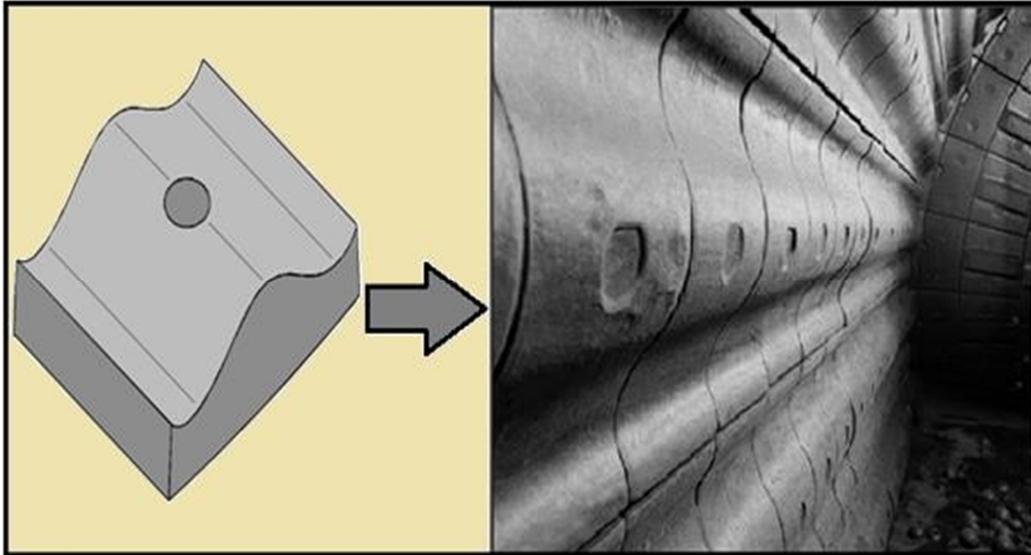
I.5.2.2. Blindage ondulé de type “Duo lift” (Figure I.35)

Figure I.35 : Blindage ondulé de type “Duo lift” [4]

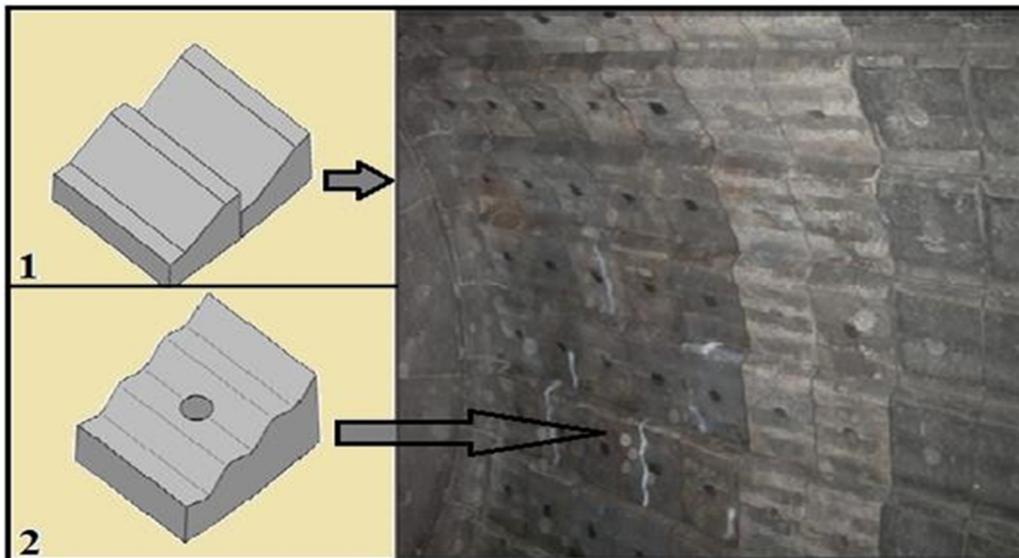
I.5.2.3. Blindage à pas de type “Xlift” et à pas avec profil ondulé (Figure I.36)

Figure I.36 : Blindage à pas de type “Xlift” (1) et blindage à pas avec profil ondulé (2).

I.5.3. 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 , en soulevant les boulets et en activant l'attrition en faisant rouler les boulets les uns sur les autres.

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.

I.5.4 Formes de barres de relevage du 2^{ème} compartiment

I.5.4.1. Blindage de type ondulé “Traîné” (Figure I.37)

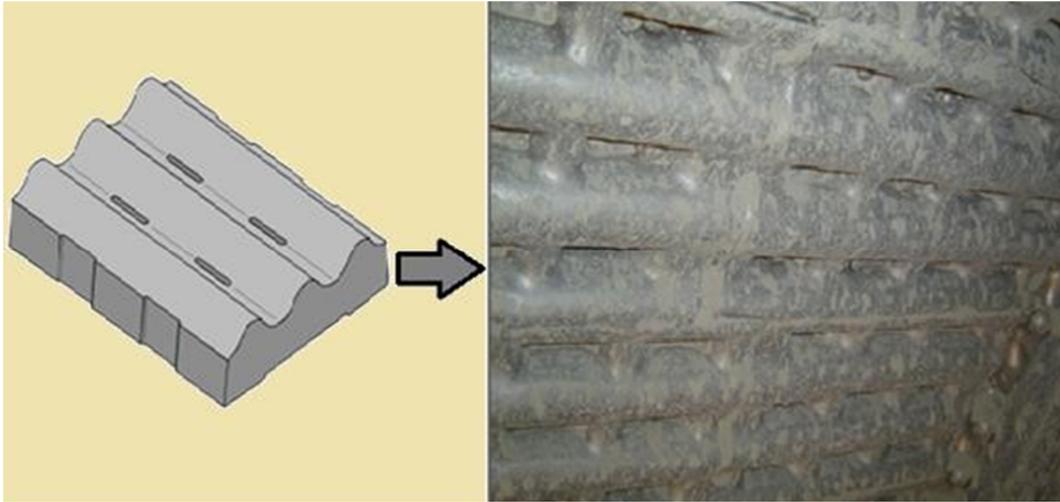


Figure I.37 : Blindage de type ondulé “Traîné”

I.5.4.2. Blindage classant avec profil releveur (Figure I.38)

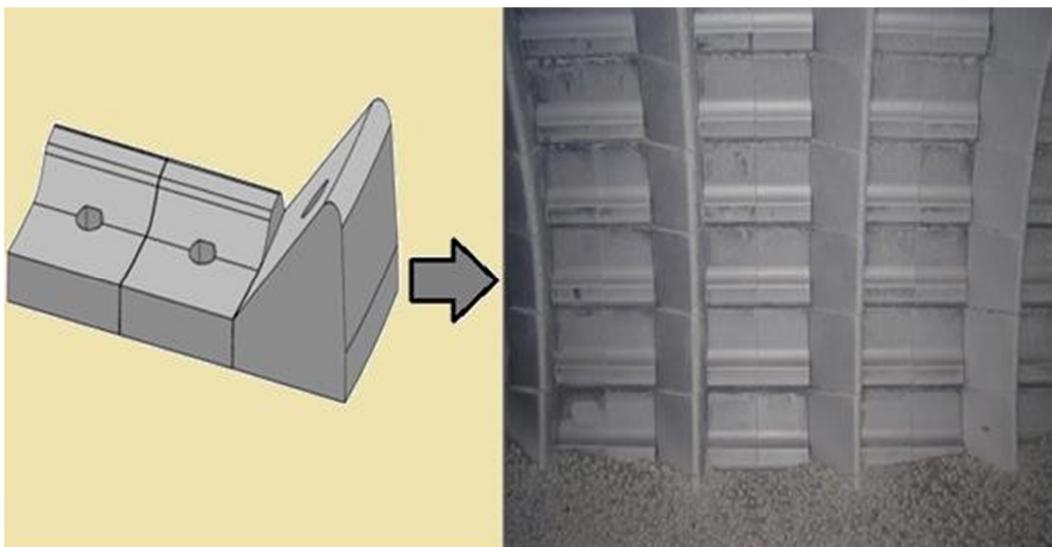


Figure I.38 : Blindage classant avec profil releveur

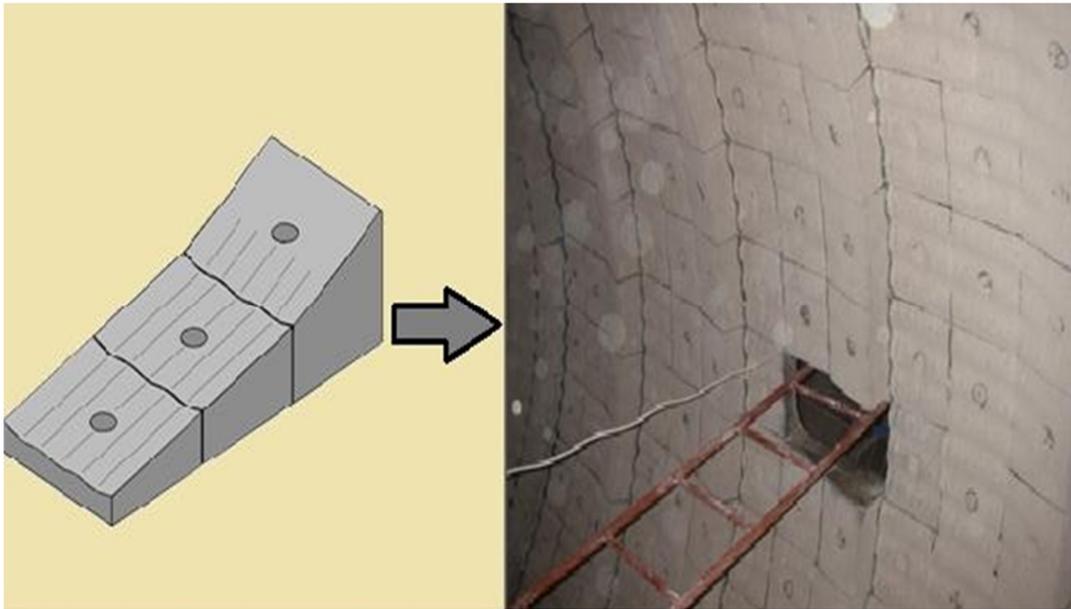
I.5.4.3. Blindage classant conventionnel avec profil ondulé (Figure I.39)

Figure I.39 : Blindage classant conventionnel avec profil ondulé [4]

Conclusion

Dans ce chapitre, de nombreux points ont été évoqués, parmi lesquels nous avons mentionné différents types de broyeurs, et le broyeur à boulets a été choisi pour faire référence à ses éléments de base. Enfin, nous avons évoqué les différents types de barres de relevage.

■ ■ *Chapitre – II –*

Généralités sur la méthode des éléments discrets

II.1. Introduction

Ce chapitre, présente une revue de ce qui a été fait par de nombreux chercheurs pour caractériser et optimiser les paramètres opérationnels influençant le procédé et l'efficacité du broyage dans un broyeur à boulets.

La méthode des éléments discrets (DEM) et plus particulièrement la EDEM est mise en évidence à la fin de ce chapitre.

II.2. Régimes de broyage (cataracte, cascade)

II.2.1. Broyage

Le broyage est défini comme un processus de réduction de la taille qui implique la décomposition du vrac matériaux solides en particules plus petites, sans altérer leur état d'agrégation (Daniel & Tadeusz, 2010). La comminution comprend trois étapes : dynamitage, concassage et affûtage. Chacune des trois étapes possède une machine de broyage particulière [5].

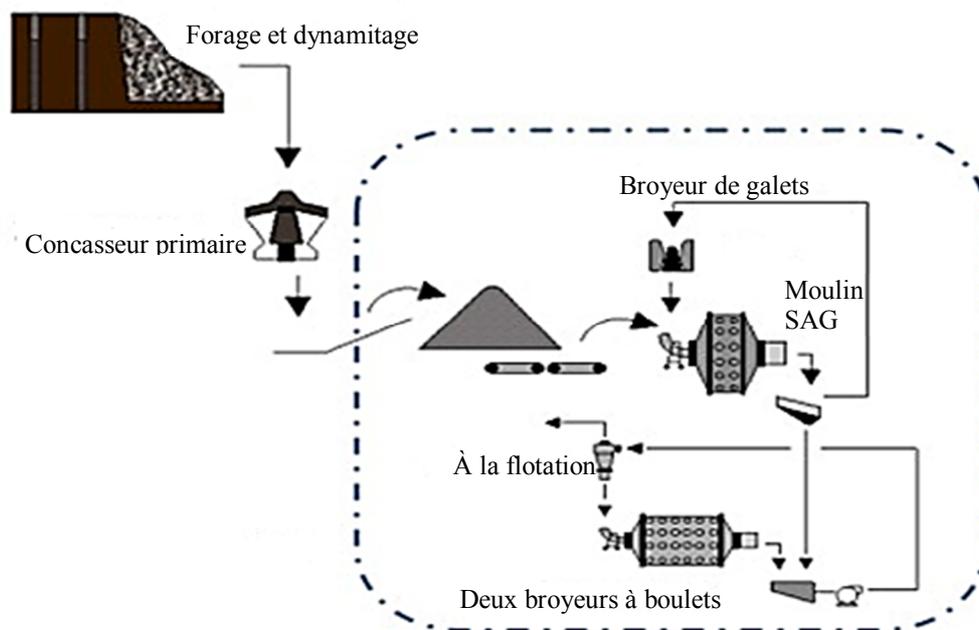


Figure II.1 : Processus de fragmentation dans l'industrie minière

La figure II.1 illustre le processus de fragmentation dans l'industrie minière. La roche est foudroyée et les grosses pierres sont alimentées dans des concasseurs primaires également appelés concasseurs giratoires. Les pierres sont de taille réduite et sont alimentés dans des concasseurs secondaires également appelés concasseurs à mâchoires.

La taille des pierres est encore réduite et est finalement introduite dans un broyeur à boulets pour fournir une très fine particule.

Le dynamitage consiste à percer des trous dans les parois rocheuses ou les banquettes.

Les trous sont remplis avec un explosif chimique pour faire exploser la roche et provoquer la propagation de fissures dans la roche. Le l'explosion libère plusieurs fragments de roche qui se prêtent au concassage.

Le concassage suit le dynamitage. C'est dans ce processus que les grosses roches dynamitées sont réduites à atteindre la taille souhaitée pour le meulage. Le concassage des roches se fait normalement à l'aide de pierre concasseurs. Le minerai concassé du circuit de concassage est acheminé vers la machine de broyage pour produisent des particules qui sont libérées de la gangue. Les particules sont suffisamment petites et se composent principalement d'un minéral.

Le broyage est un processus de réduction du matériau rocheux en très petites particules à l'aide d'un broyeur.

II.2.2. Broyeur à boulets

Les broyeurs à boulets sont utilisés dans de nombreuses applications et leur taille peut varier d'une boulette à petite échelle moulins jusqu'à d'énormes moulins autogènes avec des rendements de centaines de tonnes par heure selon l'application.

Les broyeurs à boulets à petite échelle sont utilisés pour le broyage par lots dans le traitement des minéraux à petite échelle pour broyer les matériaux granulaires et les libérer de la gangue pour obtenir un débit très fin.

On dit que les broyeurs à boulets sont avantageux parce qu'ils fournissent des particules très fines qui sont inférieurs à 10 microns, ils sont également bons pour une application continue et largement utilisés dans le concassage de matériaux très abrasifs en raison de la finesse du débit. Ils ont aussi des inconvénients tels que : le niveau sonore élevé de la machine surtout lorsque le tambour est en métal, le temps de broyage relativement long et la consommation d'énergie élevée.

Les mouvements de rotation des boulets dans les broyeurs à boulets sont classés en trois régimes de rotation distincts : Centrifuge, Cascade et Cataracte. Les broyeurs à boulets sont connus pour fonctionner dans deux régimes de vitesse de rotation : cascade et cataracte, comme le montre la figure II.2 (a), (b). Cataracte est plus susceptible de favoriser les collisions et les bris de corps alors qu'un mouvement en cascade en résulterait en rupture par attrition. Centrifuge est défini lorsque le tambour du broyeur tourne à une vitesse très grande vitesse qui entraîne le déplacement des médias de broyage à côté de la coque du broyeur connue sous le nom de vitesse critique. Dans ce régime, le broyeur à boulets ne peut pas moudre, les boulets de broyage ne tombent pas comme le montre la figure II.2 (c). [6].

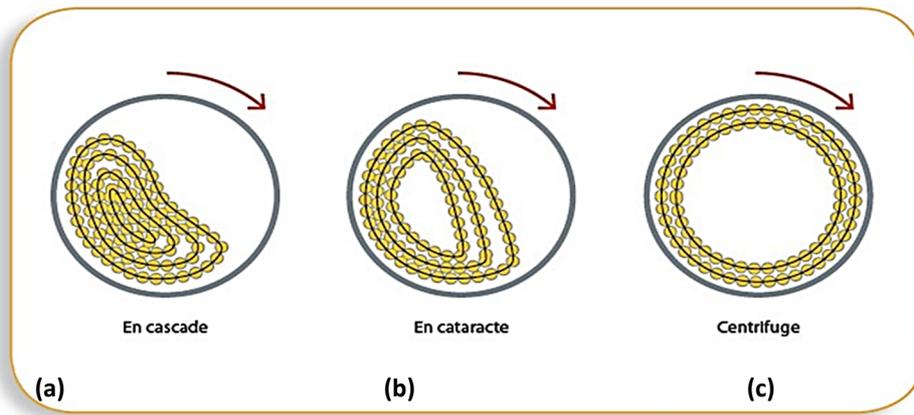


Figure II.2 : Régimes distincts de vitesse de rotation d'un broyeur à boulets [7].

II.3. Paramètres influençant l'efficacité de broyage

Les facteurs suivants ont été étudiés et appliqués dans le broyage à boulets conventionnel afin de maximiser l'efficacité du broyage :

II.3.1. Vitesse et diamètre du broyeur

Lors de la conception d'un broyeur à boulets, il faut tenir compte du diamètre du broyeur et de sa vitesse de fonctionnement, qui font partie des paramètres qui affectent les performances des broyeurs à boulets.

Il a été montré dans les publications de (King, 2000 ; Deniz, 2004) que le diamètre et la vitesse du broyeur ont un impact important sur le processus de broyage des matériaux granuleux.

À faible vitesse, les corps broyants roulent les uns sur les autres sans produire de chocs (régime en cascade).

Si la vitesse augmente (vitesse optimum), ces corps broyants sont soumis à l'action de la pesanteur et de la force centrifuge, ils restent appliqués contre la paroi du broyeur jusqu'à leur point le plus haut, pour retomber presque verticalement (à $35^{\circ}20'$ par rapport à la surface de repos) en produisant leur maximum d'effet (énergie cinétique maximale, régime en cataracte).

À grande vitesse, la force centrifuge l'emporte sur la force de pesanteur, la chute ne se produit plus. Le cylindre, les boulets et le produit (roche) tournent ensemble, et le broyage devient absolument sans aucun effet [8].

La vitesse du broyeur est en relation avec le diamètre du broyeur, comme le montre le graphique ci-dessous (Figure II.3), qui représente l'évolution des vitesses de rotation des broyeurs en fonction de leur diamètre pour différents pourcentages de V_C [9].

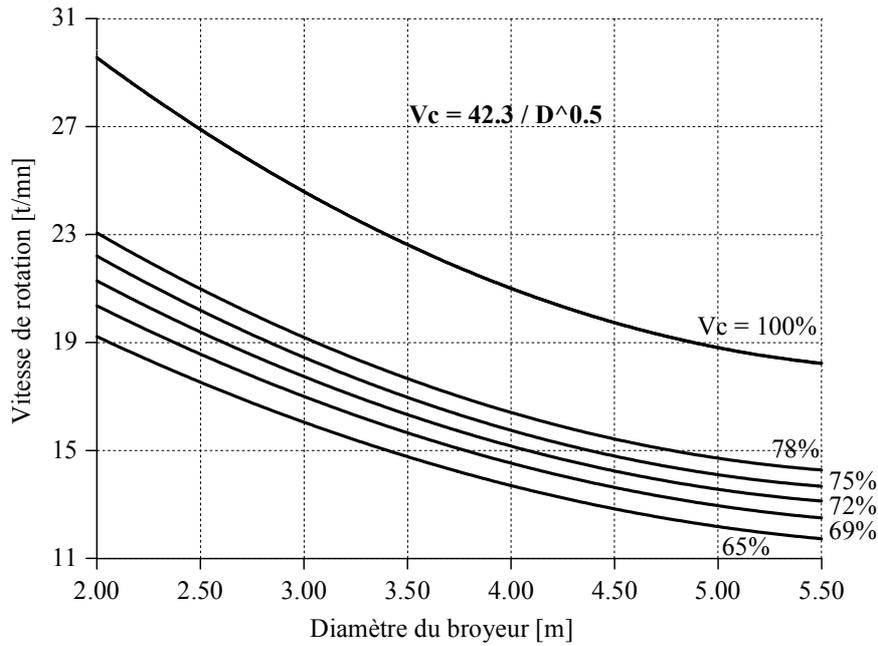


Figure II.3 : Evolution de la vitesse de rotation du broyeur

La vitesse critique exprimée en [tr/min.] est égale à :

$$V_c = 42.3 / (D)^{1/2} \quad , D = \text{diamètre du broyeur exprimé en [m].}$$

Il existe donc pour chaque diamètre une gamme de vitesses pour lesquelles il y a l'assurance d'un débit maximum de ciment et d'une consommation minimum d'énergie.

La vitesse de rotation des broyeurs de grands diamètres est de l'ordre de 75 à 80% V_c (Figure II.4), c'est à dire, les grands broyeurs doivent tourner plus vite, pour garantir des trajectoires des boulets similaires, alors qu'une vitesse plus faible induit un chamboulement des trajectoires.

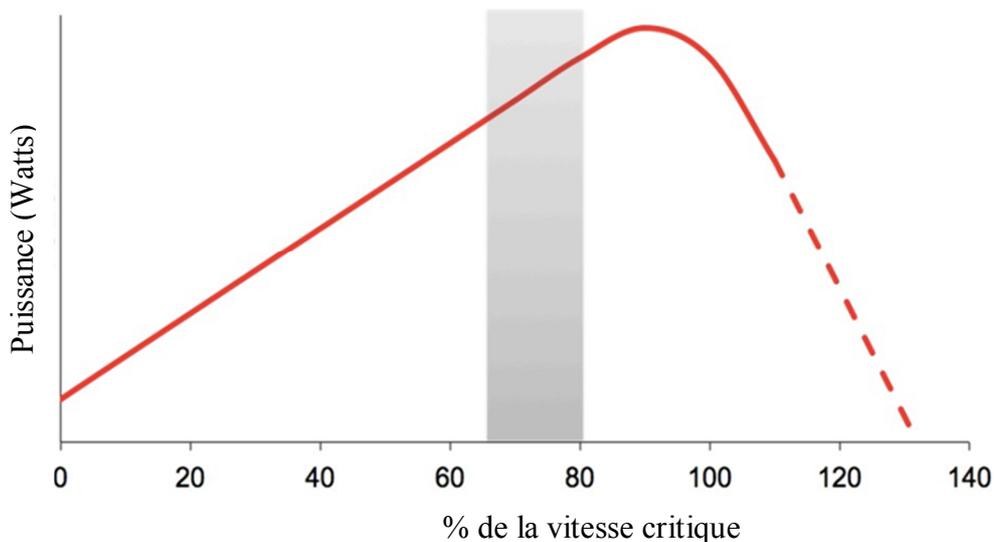


Figure II. 4 : Effet du pourcentage de vitesse critique sur la puissance du broyeur à boulets

II.3.2. Taux de remplissage du broyeur

En broyage, il est important de connaître le taux d'occupation du volume du tambour du broyeur en corps broyants (boulets et matériaux granulaires). Le remplissage du broyeur est défini comme le taux auquel les corps broyants et les interstices entre eux occupent le volume du broyeur. Pour l'apprécier, il y a simplement lieu de mesurer la grandeur " H ", c'est à dire le vide entre la surface de la charge et le haut du broyeur. Le rapport H/D ou D est le diamètre du broyeur, est en relation directe avec le taux de remplissage, comme le montre le graphique de la figure II.5 [9].

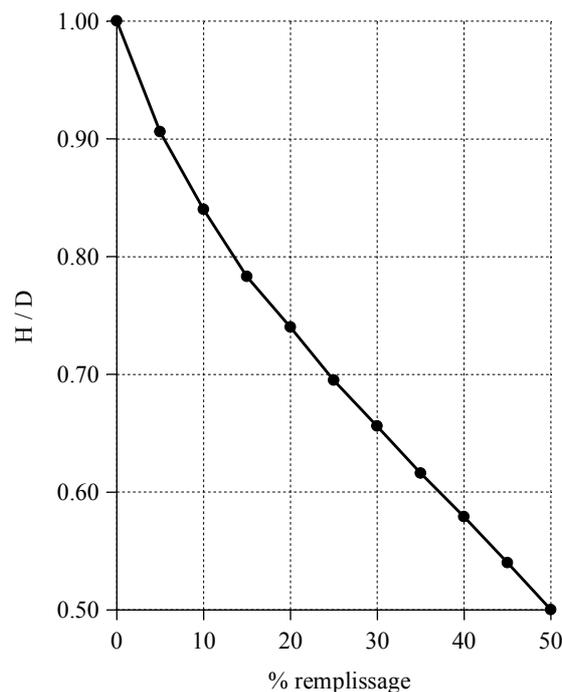


Figure II.5 : Mise en évidence du taux de remplissage

Le taux remplissage usuel assurant un rendement optimum de consommation d'énergie électrique est de 26%, comme le montre la figure II.6 [9].

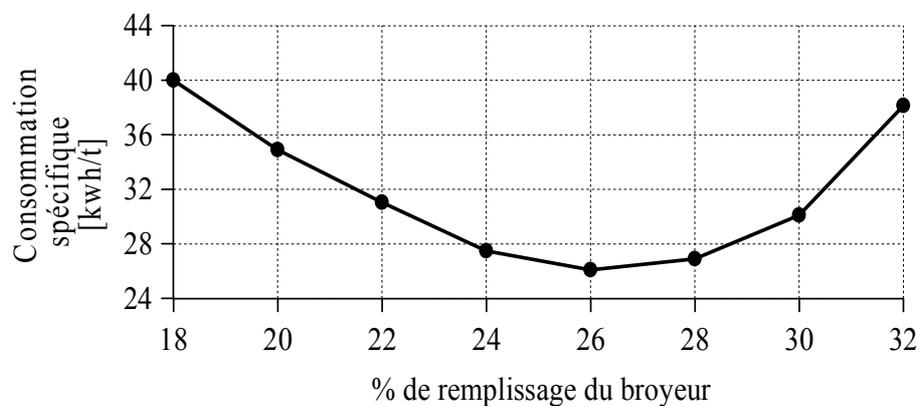


Figure II.6 : Influence du taux de remplissage

La puissance consommée par un broyeur à boulets peut également être calculée à l'aide de l'équation ci-dessous

$$P = 2\pi TN/60$$

N est la vitesse de rotation du broyeur (tr/min) et T est le couple (N.m), c'est le couple nécessaire pour maintenir le décalage du centre de gravité de la charge en cascade à partir de la position de repos.

La variation du taux de remplissage du broyeur peut également affecter la consommation d'énergie ou la puissance du broyeur (Figure II. 7) [10] Le taux usuel le plus fréquemment utilisé est compris entre 30 et 50%.

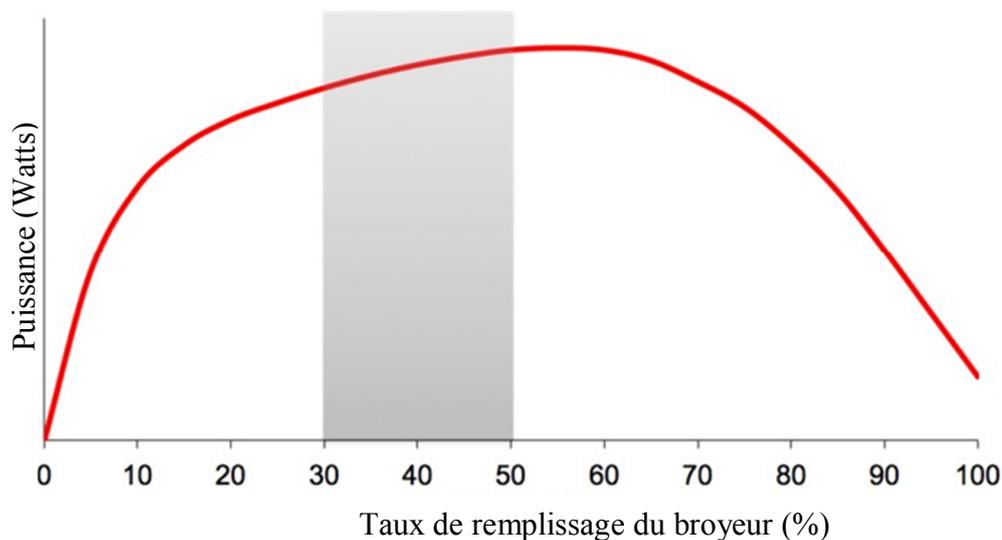


Figure II. 7 : Effet du remplissage du broyeur sur la puissance du broyeur à boulets

II.3.3. Taille du broyeur et des boulets

La taille et la forme du broyeur de broyage ont un effet significatif sur le coût de l'opération de broyage en raison d'une énorme consommation d'énergie ; affectent ainsi la performance globale du broyeur à boulets, l'efficacité du broyeur, la consommation d'énergie et la taille du matériau broyé.

Les boulets de broyage doivent fournir la contrainte maximale exercée sur les particules, qui est supérieure à la dureté des particules. (Ipek, 2007 ; Kanda et al. 1999) ont travaillé sur ce problème en essayant d'évaluer l'effet de la taille du broyeur sur le taux de broyage du matériau et sur la consommation d'énergie du broyeur à boulets.

(Kabezya & Motjotji, 2015) ont étudié l'effet du diamètre des boulets sur l'opération de broyage. Un broyeur à boulets de laboratoire a été utilisé avec différentes tailles de boulets de

10 mm, 20 mm et 30 mm respectivement. Un essai de broyage ayant un mélange des 3 diamètres a également été réalisé.

Il a été constaté que les boulets de diamètre 30 mm utilisés seuls étaient les plus efficaces des trois tailles. Ils ont également suggéré que le mélange de différentes tailles de boulets de broyage peut être utilisé pour un broyeur à boulets plus efficace. En mélangeant les 3 tailles différentes de boulets de broyage, la consommation d'énergie pour le broyeur à boulets a diminué et a donc fourni la force de frappe nécessaire pour la rupture des particules [11].

La finesse du minerai broyé est fonction de l'intensité des chocs mécaniques répétés auxquels les corps broyants sont soumis ; cette intensité dépend de leur force de frappe qui évolue avec leur propre diamètre (d) et aussi avec le diamètre du broyeur (D), comme le montre la figure II.8 [9].

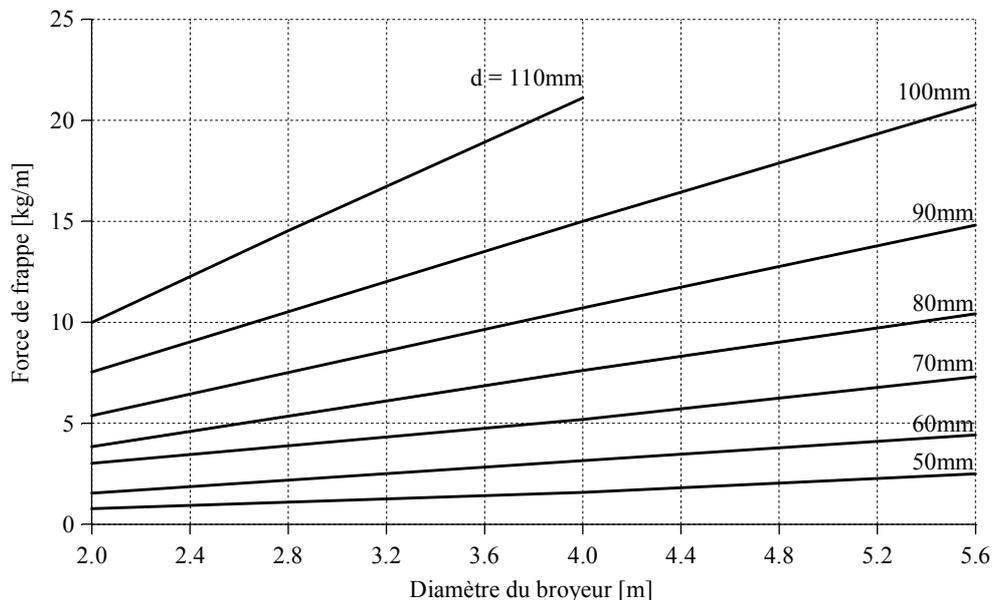


Figure II.8 : Evolution de la force de frappe des boulets

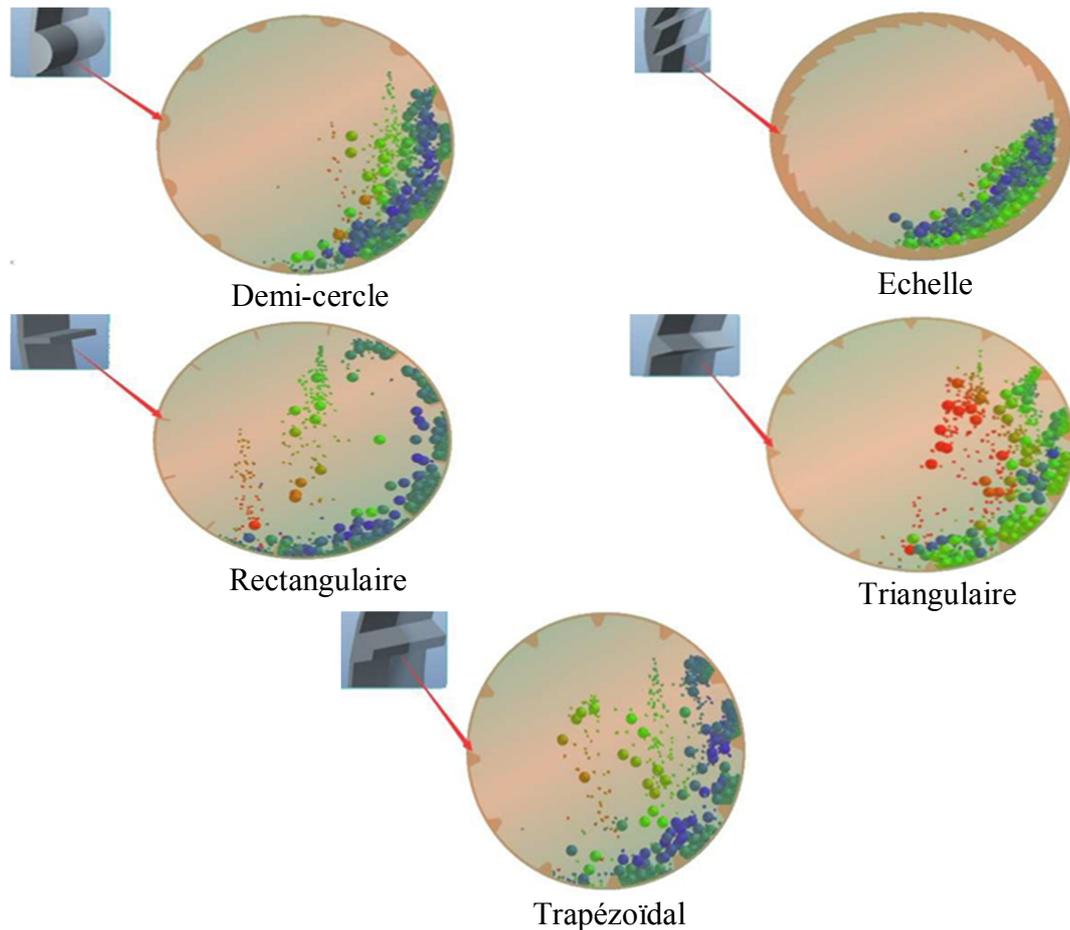
Cette évolution permettra de broyer juste avec la force nécessaire afin de ne pas provoquer le phénomène d'agglomération qui apparaît justement quand la granulométrie du ciment devient plus fine et la force de frappe des boulets devient plus grande.

II. 3. 4. Influence du profil des barres de relevage

Les barres de relevage jouent non seulement un rôle important dans la protection du cylindre, mais élèvent également les boulets à une certaine hauteur pour obtenir un concassage efficace.

Le profil des lifters affecte la trajectoire et la hauteur des corps broyants, ce qui affecte également l'efficacité du broyeur à boulets.

L'influence de la forme des lifters sur l'efficacité de travail du broyeur à boulets est menée par une étude de l'auteur Zhanfu Li, et al. en 2018. L'étude est réalisée sur cinq profils (rectangulaire, trapézoïdal, triangulaire, échelle et demi-cercle) (Figure II.9). Les paramètres de simulation sont présentés dans le tableau II.1.



Figures II. 9 : Les différents profils des lifters [12].

| Forme des barres de relevage | Vitesse de rotation (rad/min) | Numéro de barres (lifters) | Hauteur des lifters (mm) | Temps de simulation (s) |
|--|-------------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> – Rectangle – Trapèze – Triangle – Echelle – Demi-cercle | 5 | 12 | 12 | 10 |

Tableau II.1. : Paramètres de simulation

Il constate que les profils rectangulaire, trapézoïdal et triangulaire ont une influence plus importante sur l'effet de broyage que ceux de forme échelle et demi-cercle, comme le montre les trajectoires des corps broyants pour différents profils des lifters illustrées à la figure II.9

II. 3. 5. Influence de la hauteur du profil rectangulaire

Ce même auteur étudie l'influence de la hauteur du profil rectangulaire avec les paramètres de simulation du tableau II.2.

| Hauteur des lifters rectangulaires (mm) | Largeur lifters (mm) | Vitesse de rotation (rad/min) | Nombre de lifters | Temps de simulation (s) |
|---|----------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------------|
| 5 | 4 | 5 | 12 | 10 |
| 12 | | | | |
| 15 | | | | |
| 18 | | | | |

Tableau II.2. : Paramètres de simulation utilisés

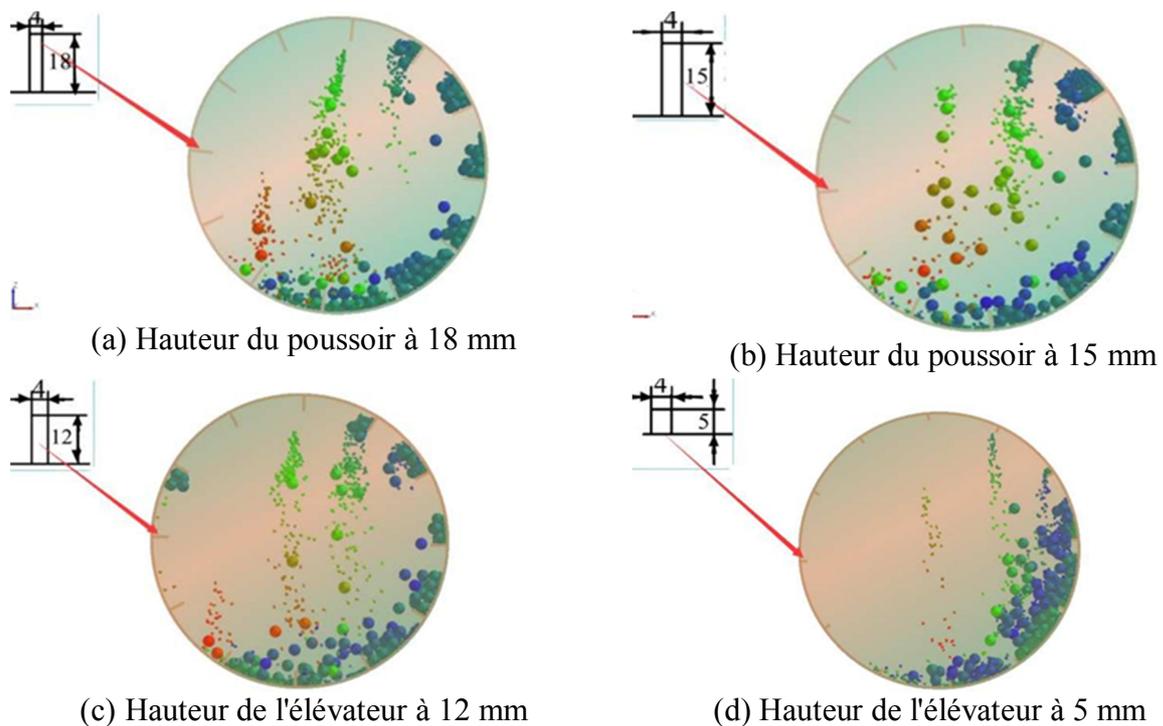


Figure II. 10 : Différentes hauteurs des profils rectangulaires

Il remarque que la hauteur des barres rectangulaires affecte la hauteur de levage des matériaux et la durée de vie du blindage.

Comme illustré sur la figure II.10, lorsque la hauteur des barres était petite, seules les petites particules étaient soulevées, tandis que les grosses particules ne l'étaient pas. Par conséquent, dans cette situation, l'effet de rupture (broyage) était faible.

Lorsque la hauteur des lifters était multipliée, les grosses particules des matériaux à broyer pouvaient être élevées à une position plus élevée et étaient plus propices à l'apparition d'un mouvement de cataracte des particules, entraînant un meilleur concassage.

II. 3. 6. Influence du rapport hauteur-largeur du profil rectangulaire

Les paramètres de simulation et les résultats de l'influence du rapport hauteur-largeur du profil rectangulaire sont donnés au tableau II.3 et à la figure II.11.

| Rapport hauteur-largeur | Hauteur des lifters (mm) | Largeur des lifters (mm) | Vitesse de rotation (rad/min) | Nombre des lifters | Temps de simulation (s) |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------|
| 5 :1 | 12,5 | 2,5 | 6 | 12 | 8 |
| 3 :1 | 12 | 4 | | | |
| 1 :1 | 12 | 12 | | | |
| 1 :3 | 4 | 12 | | | |
| 1 :5 | 2,5 | 12,5 | | | |

Tableau II.3 : Paramètres de simulation

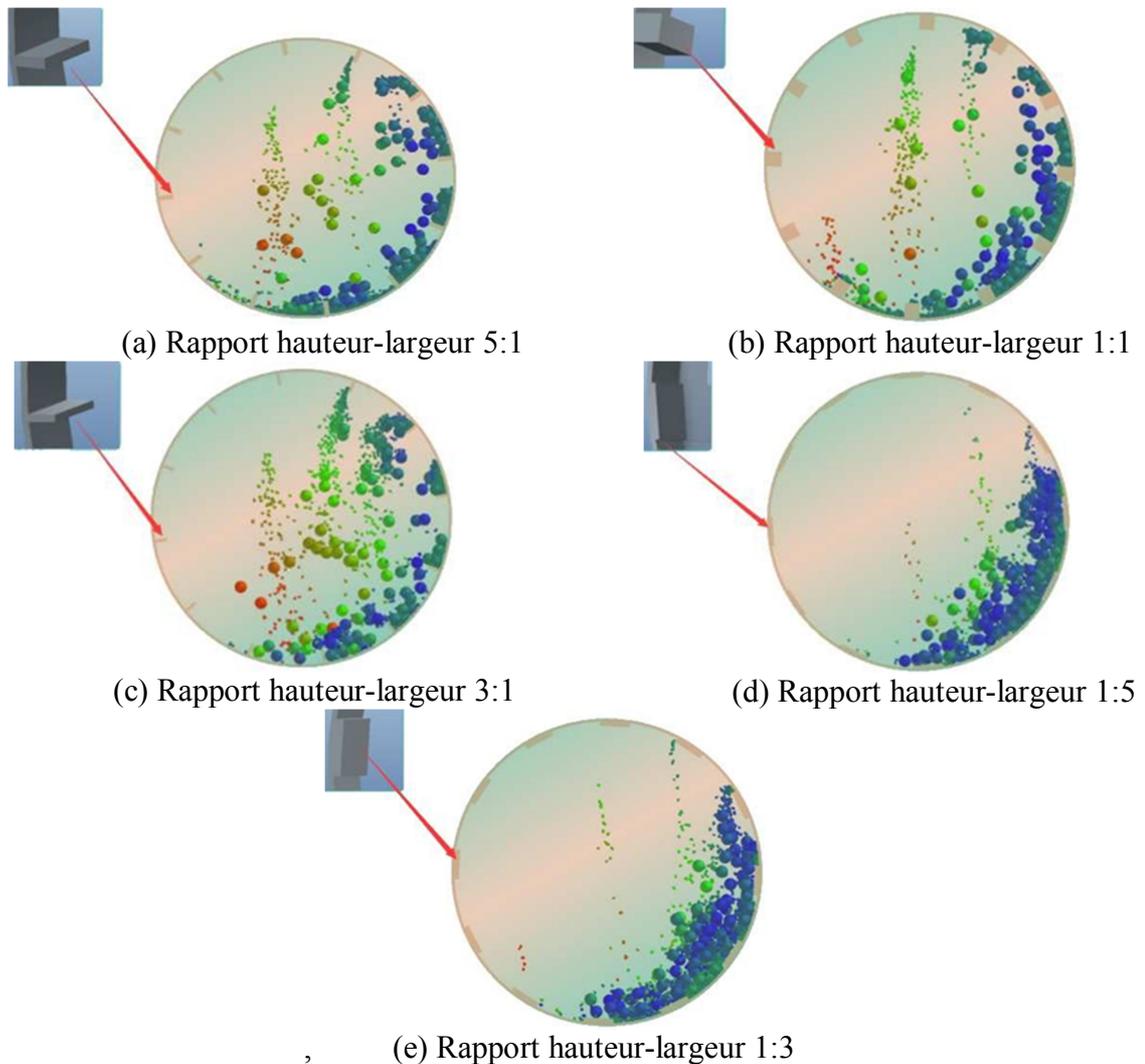


Figure. II.11 : Différents rapports hauteur-largeur des lifters rectangulaires

La figure II.11 montre que les boulets étaient plus susceptibles de suivre un mouvement de cataracte et d'entrer en collision avec les particules de minerai lorsque le rapport hauteur-largeur des élévateurs était de 5:1, 3:1 ou 1:1 et obtenir un broyage plus efficace.

Pour les rapports hauteur-largeur de 1: 3 et 1: 5, l'effet de levage des boulets était médiocre. Les boulets suivaient principalement un mouvement en cascade, qui ne produit pas de collisions avec des particules du minerai (mauvais broyage). De plus, ce cas n'offre pas une protection efficace au cylindre en raison d'un trop grand frottement entre le minerai et le cylindre.

II. 3. 7. Influence du nombre de lifters

L'auteur Zhanfu Li, et al. (2018) a travaillé sur l'influence du nombre de lifters sur les performances d'un broyeur à boulets avec les paramètres de simulation du tableau II.4. Les

trajectoires des corps broyants sont représentées sur la figure II.12.

| Nombre de barres | Hauteur des lifters (mm) | Largeur lifters (mm) | Vitesse de rotation (rad/min) | Temps de simulation (s) |
|------------------|--------------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------|
| 0 | 12 | 4 | 5 | 10 |
| 4 | | | | |
| 8 | | | | |
| 12 | | | | |
| 18 | | | | |

Tableau II.4 : Paramètres de simulation

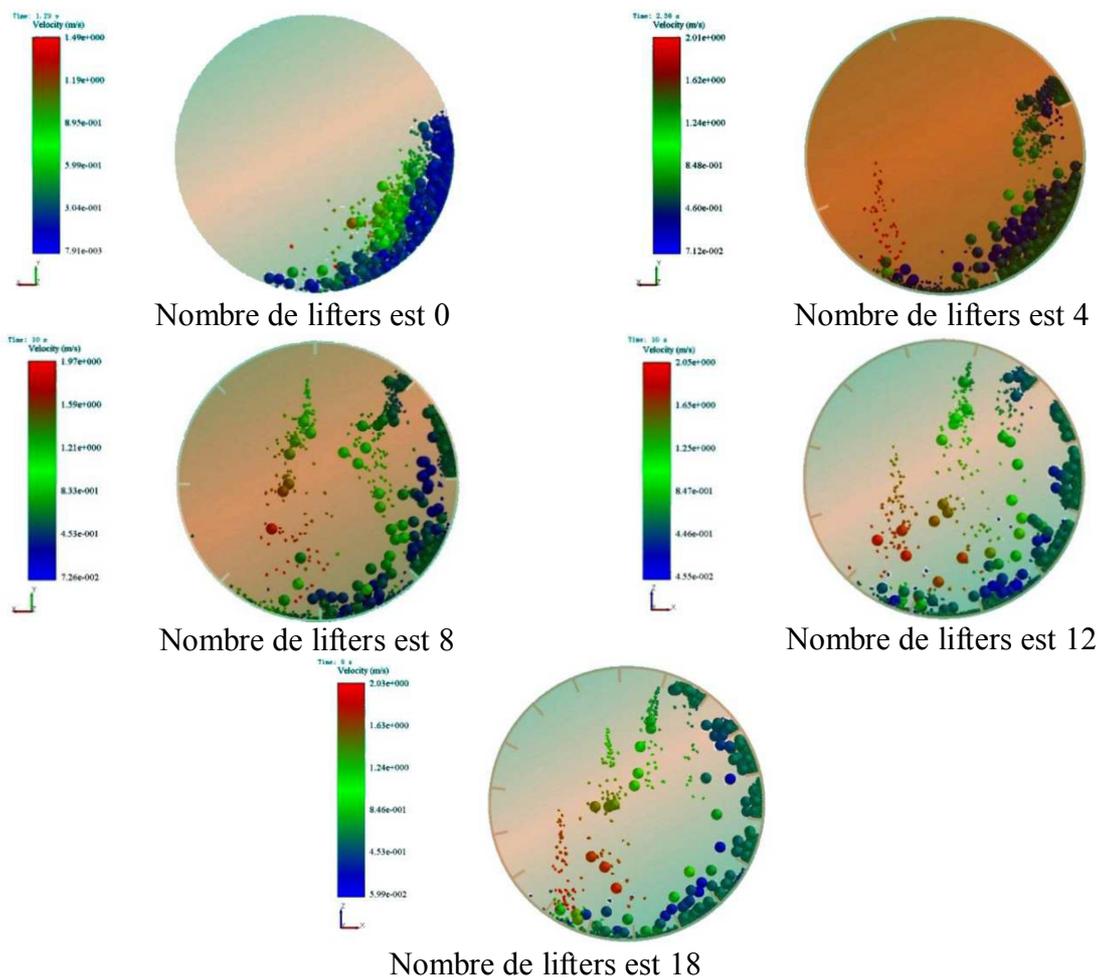


Figure II.12 : Différents nombres de barres de relevage

Le nombre de barres influence la trajectoire et la hauteur de levage du minerai.

Lorsque le nombre de lifters est nul, les boulets et le minerai se fixaient à la paroi du cylindre et suivaient un mouvement en cascade. Parce que ces matériaux (les boulets et le minerai) n'étaient pas suffisamment élevés, l'effet de rupture des particules de minerai est médiocre.

Avec un nombre croissant de barres, la hauteur de chute des corps broyants augmente de sorte que l'effet de broyage du minerai est amélioré. Pour un nombre de barres trop élevé (18 barres), la zone de collision des boulets et du minerai diminuait. Cela affecte sérieusement l'efficacité de production du broyeur à boulets. Donc, le nombre approprié, obtenu par une série d'expériences est compris entre 8 et 16 barres.

II.4. Principe de la méthode des éléments discrets

La méthode des éléments discrets est une technique de modélisation numérique qui permet de décrire le comportement mécanique de matériaux distincts en interaction grâce aux lois de contact. Cette méthode est généralement unique en raison de son inclusion de degrés de liberté de rotation.

La DEM utilise deux théories simples : La deuxième loi de Newton et la loi des déplacements-forces. Cette loi calcule les forces aux contacts entre les particules, puis l'effet de ces forces sur chaque particule est déterminé à partir de la deuxième loi de Newton. La mise à jour de la position de chaque particule est ensuite utilisée pour calculer les nouvelles forces de contact et ce cycle est répété à chaque pas de temps. Ainsi ces deux lois de contact sont utilisées dans les simulations pour indiquer le mouvement des particules dans le broyeur à boulets (Sullivan, 2008).

Ce processus est résumé dans la Figure II.13 [13].

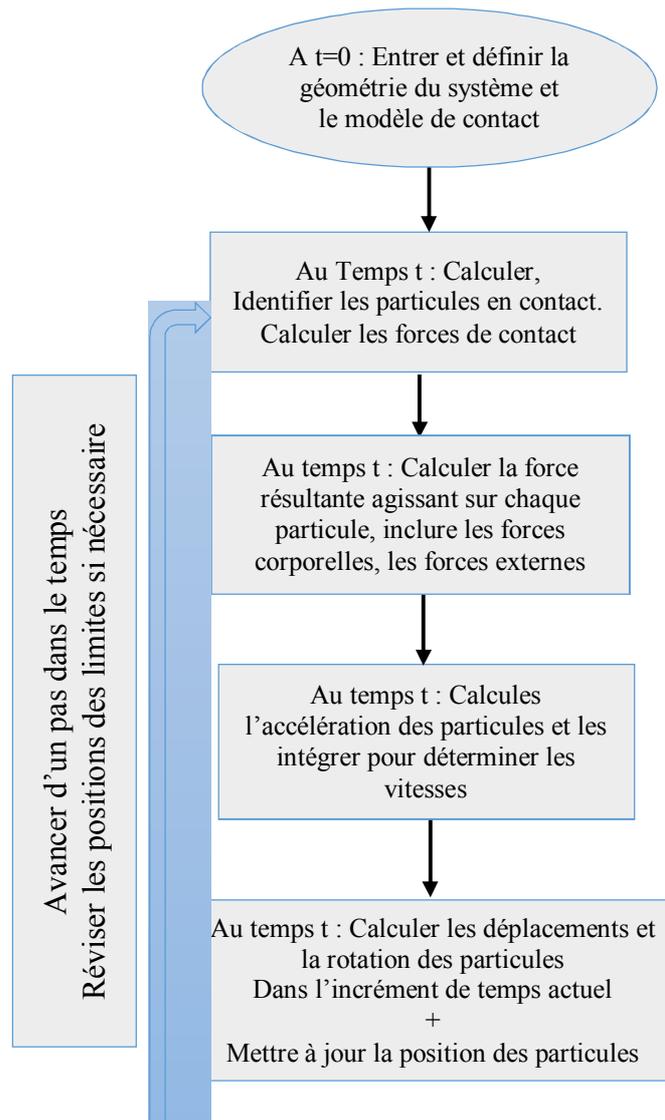


Figure II. 13 : cycle de calcul du DEM

II.5. Domaines d'application de la DEM

La méthode des éléments discrets (DEM) est une technique numérique utilisée pour modéliser l'interaction entre les particules individuelles et les limites pour prédire le comportement des solides en vrac. Cette méthode peut facilement modéliser les frontières mobiles et mieux comprendre la dynamique des flux de particules.

Les connaissances sont donc appliquées pour concevoir des équipements plus performants, optimisant ainsi l'efficacité du processus et la qualité du produit. Cette section présente la méthodologie employée réalisé par les simulations DEM.

Dans la méthode DEM, le mouvement des boulets et leur interaction sont basés sur un processus itératif où les résultats à chaque pas de temps sont basés sur les résultats précédents en raison de la répétition du même algorithme à chaque pas de temps. Un nombre fini de

particules sphériques interagissent avec d'autres, et deux grandeurs sont calculées à chaque pas de temps :

1. Les forces de contact sont générées en fonction des chevauchements entre les particules.
2. Le mouvement des particules est mis à jour en fonction des informations de mouvement précédentes et forces de contact actuelles (Figure II.14).

Dans la première étape, les forces de contact entre les particules voisines sont le facteur dominant dans les changements de force qui en résultent, la loi force-déplacement joue donc un rôle important. Pour à chaque pas de temps, les forces de contact sont modifiées.

Dans la deuxième étape, la deuxième loi de Newton évalue comment la force de contact détermine le mouvement. Prendre une particule dans un pas de temps par exemple, la force résultante sur une particule serait considérée comme la même pendant ce pas de temps ; l'accélération actuelle de la particule serait estimée par la résultante force divisée par la masse, et la nouvelle vitesse et la position de cette particule sont obtenues sur la base de la position précédente, la vitesse plus l'intégration de l'accélération actuelle sur le pas de temps. C'est ce qu'on appelle la loi du mouvement.

Comme on peut le voir, la description ci-dessus ne considère qu'une particule ; la méthode DEM passerait par tout le système pour mettre à jour leur mouvement pour chaque particule et les nouvelles forces de contact pour tous les contacts pour chaque pas de temps.

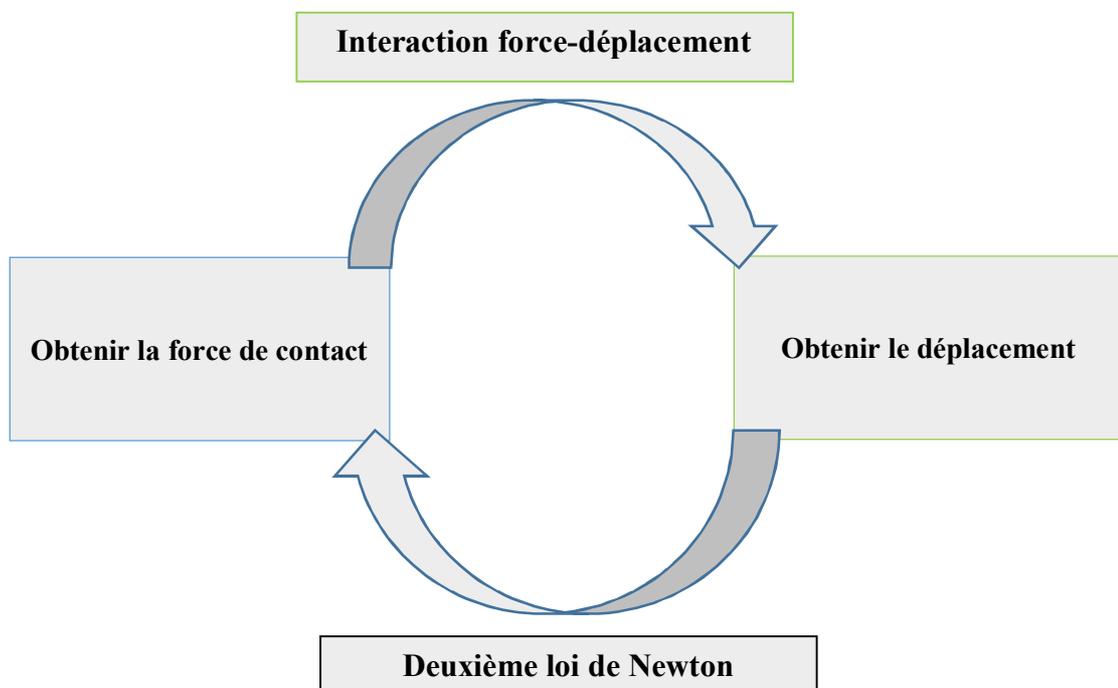


Figure II.14 : Organigramme du principe de la DEM

II.6. Etapes de résolution d'un problème par la DEM

DEM ont été améliorés pour être couplés à d'autres techniques de simulation, par exemple : DEM- Les simulations DEM de broyeurs ont commencé comme une technique de dimensions 2D : Millsoft, et a été amélioré en logiciels 3D, tels que EDEM, qui est sorti avec les progrès de la puissance de calcul.

Récemment, les outils FEM (méthode des éléments finis), DEM-CFD (Computational Fluide Dynamics) et DEM-SPH (hydrodynamique des particules lissées).

Les résultats de la simulation doivent être validés. Les résultats de la DEM doivent être comparés aux résultats expérimentaux. La validation est nécessaire pour vérifier dans quelle mesure la prédiction du modèle concorde avec la réalité observée. Cleary & Hoyer, (2000) ont mené une expérience utilisant une centrifugeuse et des taux de remplissage différents. Leurs données expérimentales se sont avérées en bon accord en termes de prédiction de puissance.

Ils ont réalisé une autre étude pour comparer les données de simulations et les données expérimentales en utilisant un broyeur à boulets avec différents profils de levage. Les résultats obtenus étaient en bon accord en ce qui concerne les positions du haut (shoulder, en anglais) et des pieds de charge (toe, en anglais) comme ainsi que la consommation d'énergie à une large gamme de vitesses critiques.

Djordjevic et al. (2004), ont mené une expérience à l'aide d'un broyeur AG pilote. Ils ont observé que l'erreur de la consommation de puissance prédite à l'aide de la DEM était de 3,1 %. [14].

La variation des méthodes utilisées dans DEM dépend généralement de l'inclusion du degré de liberté de la rotation, ainsi que, des contacts dynamiques et des géométries souvent compliquées (y compris polyédriques).

Aujourd'hui, la DEM est devenu un outil largement accepté pour traiter efficacement les problèmes d'ingénierie dans le traitement des minéraux et des matériaux discontinus, en particulier dans les écoulements granulaires, mécanique des poudres et mécanique des roches.

Récemment, la méthode a été étendue à la méthode des experts en éléments discrets (EDEM) en tenant compte le couplage des outils de la thermodynamique, de la dynamique des fluides et de la méthode des éléments finis (Borner, 2011).

L'EDEM comporte des composants principaux suivants, comme illustré sur la figure II.15 [15].

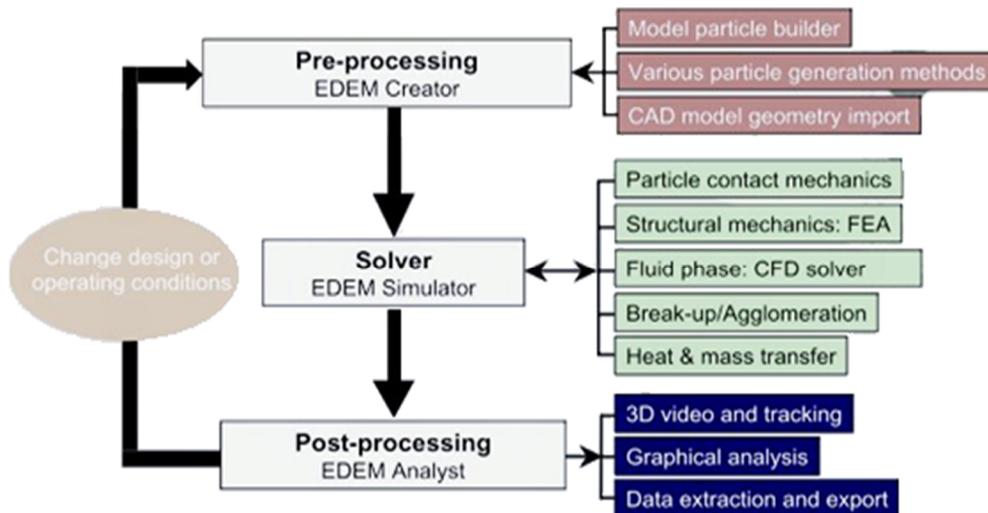


Figure.II.15 : Organigramme du logiciel EDEM [16].

II.6.1. Créateur EDEM (EDEM Creator)

Dans cette section d'EDEM, les entrées de simulation sont définies et les conditions aux limites saisies. Les propriétés des matériaux et leurs interactions doivent être définies. Le coefficient de restitution, coefficient de frottement statique et frottement de roulement sont renseignés. La géométrie, le modèle et les particules à utiliser dans la simulation sont importés et leurs propriétés matérielles sont définies.

II.6.2. Simulateur EDEM (EDEM Simulator)

Dans cette section, la simulation créée dans EDEM Creator est prête à être exécutée. Les paramètres importants d'entrée sont entrés, principalement : le pas de temps, l'intervalle de sauvegarde des données et le temps total de simulation. Le pas de temps est extrêmement important pour produire des résultats précis.

Même si de petits pas de temps augmentent le temps de calcul total, il augmente également la précision du modèle. L'intervalle d'enregistrement des données définit la fréquence à laquelle les données seront stockées, et est donc très important pour l'analyse.

II.6.3. Analyse de simulation EDEM (EDEM Analyst)

L'analyste EDEM est le post-processeur utilisé pour examiner les résultats de votre simulation. Lisez votre simulation sous forme d'animation, créez un graphique de vos résultats, créez une vidéo ou exportez des données pour les examiner ailleurs.

Conclusion

Ce chapitre a exploré les régimes de broyage (cataracte, cascade) et les paramètres qui influencent l'efficacité de broyage.

Nous avons également évoqué le principe de la méthode des éléments discrets et une revue de l'application DEM. Enfin nous avons évoqué les étapes à considérer pour la résolution d'un problème par la DEM.

■ ■ *Chapitre – III –*

Formulation mathématique du problème et résultats expérimentaux

III.1. Introduction

Les broyeurs à boulets sont le principal équipement de broyage dans l'industrie de la transformation des minéraux utilisés dans la production de ciment. Des tonnages de l'ordre de 40 000 à 100 000 tonnes/jour sont traités. Ils reposent sur le broyage et l'impact des boulets de broyage pour le concassage de la matière. Ces boulets sont soulevés par les barres de relevage disposées sur la paroi du corps du cylindre à une certaine hauteur et ils tombent ensuite au fond du broyeur selon les caractéristiques du mouvement interne.

Ces broyeurs consomment d'énormes quantités d'énergie électrique et, par conséquent, le coût de l'énergie peut représenter jusqu'à la moitié du coût total de traitement. Pour cette raison, une grande partie de la recherche actuelle sur la comminution vise à comprendre les mécanismes de broyage et à prédire la consommation électrique du broyeur, la répartition des forces de collision à l'intérieur du broyeur et le taux d'usure des boulets et des barres de relevage.

La Méthode des Eléments Discrets (Discrete Element Method, DEM : en anglais) a été développée pour résoudre des problèmes liés aux milieux discontinus, ou la mécanique des milieux continus n'est plus appropriée pour d'écrire ce type de problème. Cet outil de modélisation peut être extrêmement utile pour améliorer la compréhension des processus de broyage lorsque les limitations expérimentales ou la complexité du système entravent la capacité d'obtenir des informations précieuses.

Au cours des dernières décennies, le nombre de publications utilisant des simulations DEM pour résoudre des problèmes d'ingénierie granulaire, tels que l'écoulement granulaire, le mélange de poudres, la mécanique des poudres et le broyage, a considérablement augmenté [17-19].

Nous avons étudié dans ce chapitre l'effet d'une nouvelle géométrie (hélicoïdale) des barres de relevage sur l'efficacité de broyage, du couple et la puissance absorbée d'un broyeur à boulet. Une étude comparative est menée par simulation DEM des profils droits et les nouveaux profils hélicoïdaux.

Trois pas de la forme hélicoïdale des profils (2, 3 et 4m) sont utilisés, avec une vitesse de rotation de 75% de la vitesse de rotation critique du broyeur et un taux de remplissage de 26%.

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation des barres de relevage à profil hélicoïdal semblent avoir un effet plus significatif sur l'efficacité de broyage, sur le couple et la puissance du broyeur.

III.2. Forces impliquées dans le processus de broyage

Pendant le processus de broyage, les boulets de broyage dans le broyeur sont principalement affectés par deux forces. La première, est la force de frottement formée en raison de la différence de vitesse entre les boulets de broyage adjacents (zone d'abrasion sur la figure III.1). L'autre force, est l'impact généré par l'impact des boulets entre eux-mêmes, le blindage du tambour et la roche (zone d'impact sur la figure III.1). Les deux forces mécaniques donnent lieu à une désintégration mécanique des boulets de broyage. L'effet de ces deux forces est répétitif, il est en fonction du nombre de cycles ou du nombre de tours du broyeur nécessaires pour concasser la roche utilisée pour la fabrication du ciment [20-22].

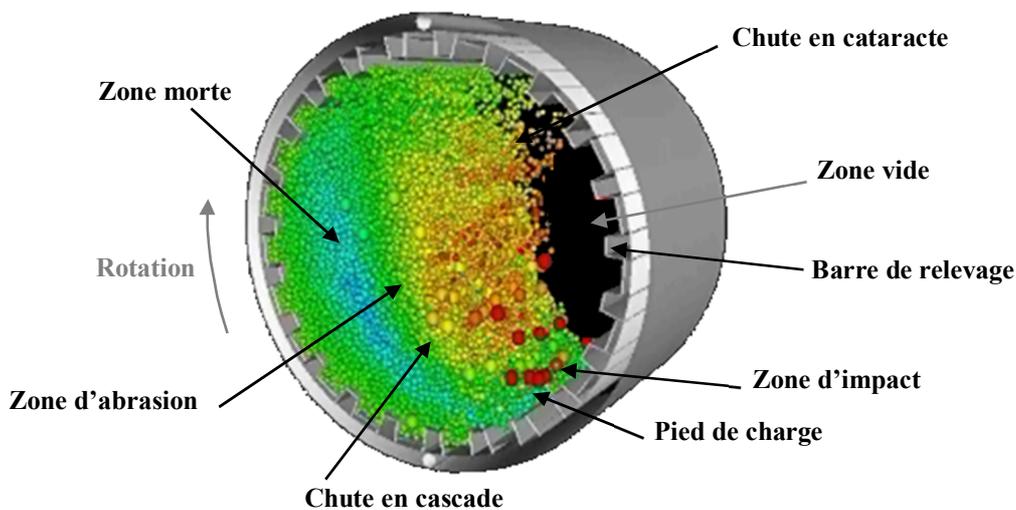


Figure III.1 : Zones à l'intérieur d'un broyeur à boulets (zone morte = vitesse des boulets nulle)

III.3. Théorie et méthodologie

III.3.1. Simulation par la DEM

La méthode des éléments discrets (DEM) est utilisée dans la présente étude comme un outil pour examiner l'effet des barres de relevage sur l'efficacité de broyage, du couple et de la puissance absorbée d'un broyeur à boulets. Le code DEM utilisé dans cette étude est EDEM. Cette méthode a une large application dans différents domaines et est connue pour fournir des résultats fiables.

III.3.2. Modèle de contact

La modélisation du contact entre les particules pourrait être le rôle le plus important dans la simulation DEM. Ceci est effectué par un modèle de contact qui calcule les forces de contact agissant sur la particule-particule et les interactions particule-géométrie. Le modèle de contact peut être catégorisé selon les propriétés physiques des particules telles que l'élasticité, la plasticité, la viscosité, le frottement sec et l'adhérence [23].

Généralement, le contact entre deux particules se produit dans le domaine fini en raison de la déformation de la particule et la distribution de traction de contact dans cette zone se compose du plan normal et tangentiel [24], comme le montre la figure III.2 (C_1 et C_2 : le centre de la particule A et de la particule B ; R_1 et R_2 : le rayon de la particule A et de la particule B ; d : distance entre le C_1 et le C_2 ; δ : l'interpénétration entre la particule A et la particule B ; P : le point central de l'interpénétration ; F_n et F_t : la force de contact dans la direction normale et la force de contact dans la direction tangentielle, respectivement).

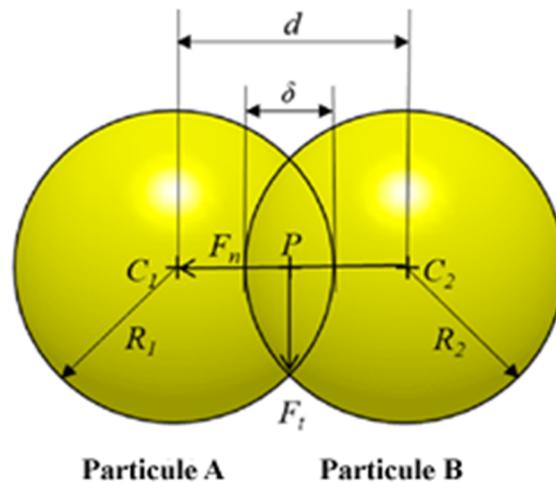


Figure III.2 : Illustration des forces normales et tangentielles impliquées dans le contact entre les particules A et B.

Dans ce travail, le modèle Hertz-Mindlin sans glissement a été utilisé pour résoudre le problème de contact entre les particules. Les efforts tangentiels et les efforts normaux ont été déterminés.

Le mouvement de chaque particule individuelle est régi par les lois de la conservation du moment linéaire et du moment angulaire qui ont été obtenus en résolvant la deuxième loi du mouvement de Newton.

Dans cette étude, la composante de la force normale est calculée en se basant sur la théorie du contact hertzien (Hertz 1882). La force tangentielle est calculée en se basant sur les travaux de Mindlin-Deresiewicz (Mindlin 1949) (Mindlin et Deresiewicz 1953). Les forces normales et tangentielles ont des composantes d'amortissement où le coefficient d'amortissement est lié au coefficient de restitution comme décrit dans (Tsuji, Tanaka et Ishida 1992) (Figure III.3).

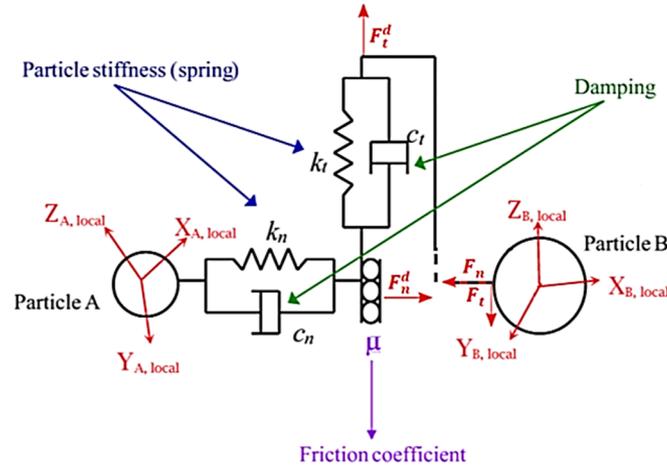


Figure III.3 : Schéma du modèle de contact Hertz-Mindlin simplifié entre deux particules (sphères)

En particulier, la force normale, est fonction de l'interpénétration normale, est donnée par :

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

Ici, E^* est le module de Young équivalent, et R^* est le rayon équivalent

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} + \frac{(1-\nu_j^2)}{E_j} \quad (2)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \quad (3)$$

Avec E_i, ν_i, R_i étant le module de Young, le coefficient de Poisson et le rayon de chaque sphère en contact. De plus, la force d'amortissement F_n^d , est donnée par

$$F_n^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^*} \vec{v}_n^{rel} \quad (4)$$

Où m^* est la masse équivalente

$$m^* = \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_i} \right)^{-1} \quad (5)$$

\vec{v}_n^{rel} est la composante normale de la vitesse relative, β et S_n (la rigidité normale) sont données par :

$$\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}} \quad (6)$$

$$S_n = 2E^* \sqrt{R^*} \delta_n \quad (7)$$

Avec e le coefficient de restitution. La force tangentielle, F_t dépend du tangential chevauchement δ_t et la rigidité tangentielle S_t .

$$F_t = -S_t \delta_t \quad (8)$$

Avec

$$S_t = 8G^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad (9)$$

G^* le module de cisaillement équivalent. De plus, l'amortissement tangentiel est donné par :

$$F_t^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^*} \vec{v}_t^{rel} \quad (10)$$

Où \vec{v}_t^{rel} est la vitesse tangentielle relative.

La force tangentielle maximale (limitée par le frottement de Coulomb) est calculée par :

$$F_{tmax} = \mu_s F_n \quad (11)$$

où μ_s est le coefficient de frottement statique.

Pour les simulations dans lesquelles le frottement de roulement est important, cela est pris en compte en appliquant un couple aux surfaces en contact.

$$\tau_i = -\mu_r F_n R_i \omega_i \quad (12)$$

Où μ_r est le coefficient de frottement au roulement, R_i est la distance entre le point de contact et le centre de masse et ω_i est le vecteur de vitesse angulaire de l'objet au point de contact.

III.3.3. Paramètres de simulation

Généralement, le temps de calcul dans la simulation DEM est exprimé par une combinaison de plusieurs facteurs comme suit : pas de temps (ΔT_{step}), nombre de particules, forme des particules, taille des particules et module de cisaillement.

Le pas de temps, qui est le temps entre chaque itération, est généralement défini pour être inférieur au pas de temps critique défini par la fraction de fréquence propre du système équivalent masse-ressort. Le temps critique (appelé pas de temps de Rayleigh) est calculé comme suit [25] :

$$T_{step} < \Delta T_{critical} = T_{Rayleigh} = \frac{\pi R \sqrt{\frac{\rho}{G}}}{0,1631\nu + 0,8766}$$

Où ν , R , G et ρ : désignent le coefficient de Poisson, le rayon des particules, le module de cisaillement et la densité des particules, respectivement. En d'autres termes, le pas de temps est principalement influencé par la taille des particules, la densité des particules et le module de cisaillement.

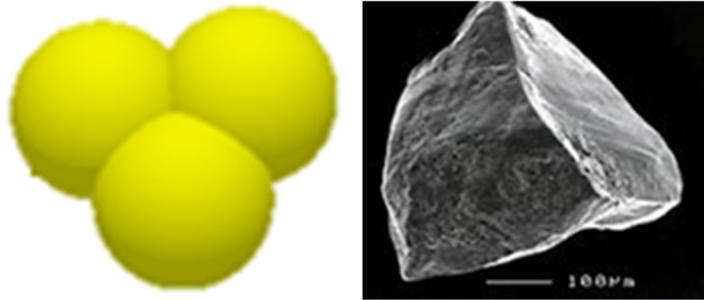
Les particules dans le cylindre sont réparties uniformément dans la direction axiale, le mouvement des particules dans la direction axiale peut être négligé [26].

Afin de raccourcir le temps de simulation et améliorer l'efficacité du calcul, une tranche de 200 mm de largeur du cylindre seulement est simulée.

Parmi toutes les formes 3D, les sphères offrent la méthode la plus efficace de détection de contact et plus précisément l'évaluation du chevauchement des contacts. Cela fournit un calcul rapide et fiable pour les forces de contact. Théoriquement, toute forme de particule peut

être modélisée en augmentant le nombre de sphères qui se chevauchent tant que les calculs sont dans une fourchette raisonnable de complexité. Le modèle de matériau final est généralement un équilibre entre une représentation détaillée des particules réelles et l'efficacité de calcul.

On suppose que les particules aient des formes à triple sphère (Figure III.4) avec un diamètre de 6 mm, les autres paramètres de notre simulation sont indiqués dans le tableau III.1.



Modèle de particules de quartz

Particule de quartz réelle

Figure III.4 : Modèle de particules et particule réelle de quartz

| Paramètres | Boulets | Sable de Quartz | de Barre de relevage |
|--|----------|-----------------|----------------------|
| Coefficient de Poisson | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| Module de cisaillement (Pa) | 7E+10 Pa | 1E+07 Pa | 1E+07 Pa |
| Densité (kg/m ³) | 7800 | 1600 | 7800 |
| Coefficient de restitution | 0.5 | 0.2 | 0.5 |
| Coefficient de frottement statique | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| Coefficient de frottement de roulement | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| Taille, (mm) | 30 | Env. 6 | |
| Masse | 41.28 Kg | 2.50 Kg | |
| Temps de Simulation (s) | 10 | | |

Tableau III.1 : Paramètres DEM utilisés pour les simulations

III.4. Caractéristiques du matériau utilisé pour la simulation

III.4.1. Profils des barres de relevage

Dans la méthode EDEM, les collisions sont les impacts qui se produisent entre les éléments aux points d'écriture des données (data write-out points). En d'autres termes, le contact est en cours lorsque l'écriture a lieu. Si deux éléments restent en contact l'un avec l'autre pendant un certain temps, par exemple sur 4 points d'écriture, quatre collisions seront stockés et chacun d'entre eux peut avoir une force, une position différente, etc.

Les collisions sont des impacts complets. Lorsque deux éléments entrent en collision, il sera enregistré comme une seule collision, quelle que soit la durée pendant laquelle les éléments restent en contact. Des collisions peuvent se produire entre les inscriptions et ne jamais s'enregistrer en tant que collisions [27].

Les particules dans le broyeur sont réparties uniformément dans la direction axiale, le mouvement des particules dans la direction axiale peut être négligé.

Afin de raccourcir le temps de simulation une tranche de 200 mm de largeur du cylindre seulement est simulée.

Les barres de relevage (lifters en anglais) jouent non seulement un rôle important dans la protection du cylindre mais aussi élever les particules à un endroit élevé pour réaliser l'écrasement. Le profil de ces lifters affecte la trajectoire et la hauteur de particule, ce qui affecte également l'efficacité du broyeur à boulet.

Dans nos simulations, quatre profils (droit, hélicoïdale de pas 2, 3 et 4 m) ont été utilisés pour analyser leur influence (Figure III.5).

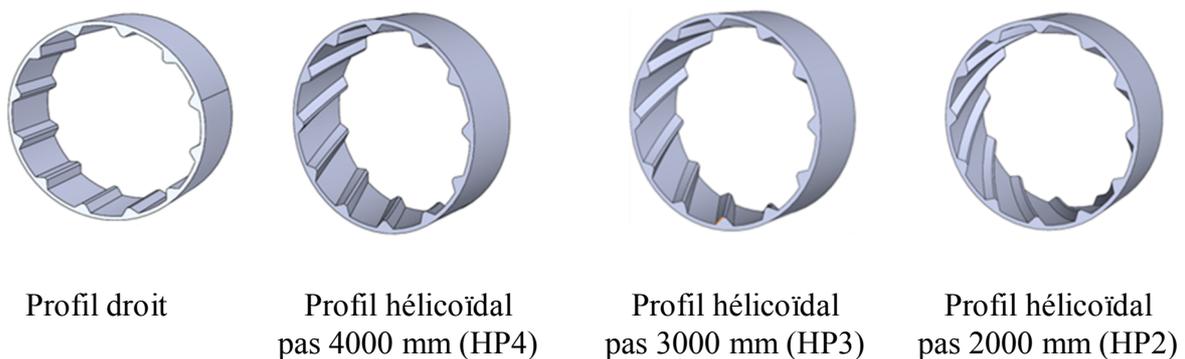


Figure III.5 : Configuration des lifters utilisés dans les simulations

Le diamètre du broyeur et les dimensions des barres de relevage de forme trapézoïdale sont données dans la figure III.6.

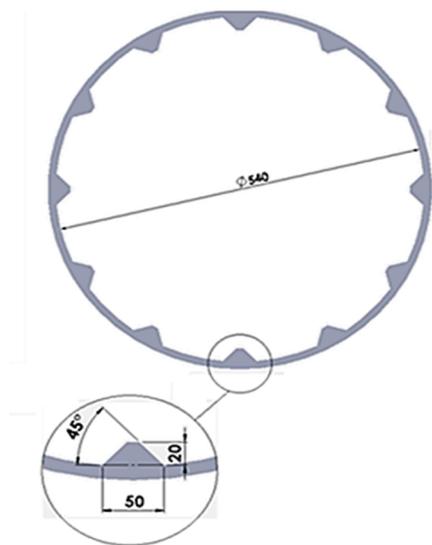


Figure III.6 : Diamètre du broyeur et dimensions des lifters utilisés dans les simulations

III.4.2. Paramètres du broyeur

Les paramètres du broyeur utilisés pour les simulations sont répertoriés dans le tableau III.2. La vitesse du broyeur (75 % de la vitesse critique) et le taux de remplissage ont été adoptés à partir de la littérature pour la meilleure performance du broyeur à boulets.

| – Paramètres | – Valeurs |
|---------------------------|------------------------------------|
| Diamètre | 540 mm (barres de relevage inclus) |
| Largeur | 200 mm |
| Volume | 0.0444 m ³ |
| Nombre des lifters | 12 |
| Masse des boulets | 41.28 g |
| Masse des particules | 41.29 g |
| Vitesse de broyeur, rad/s | 4,52 (75 % de la vitesse critique) |
| Taux de remplissage | 26 % |

Tableau III.2 : Paramètres du broyeur pour le modèle DEM

III.5. Résultats et discussions

III.5.1. Effet des lifters sur le couple et la puissance du broyeur

Lorsque le taux de rotation est compris entre 60% et 90%, les résultats de la simulation DEM et les résultats standards sont sensiblement similaires. Cette similitude démontre que le DEM est une méthode de calcul numérique précise qui peut prédire la consommation d'énergie des broyeurs à boulets plus précisément que d'autres méthodes [28].

La puissance consommée par le broyeur était généralement donnée comme suit:

$$P = \frac{2\pi NT}{60} \tag{14}$$

Où N est la vitesse du broyeur en tours par minute, T est le couple exercé par la charge (Moys, 1993).

Les valeurs du couple maximum T sont extraites du logiciel EDEM et celles de la puissance absorbée sont calculées par l'équation 14 (Tableau III.3). Ces valeurs sont représentées sur la figure III.7.

| Profils | Couple T [Nm] | Vitesse de rotation N [tr/min] (75 % de la vitesse critique) | Puissance (P=2πNT/60) [Watt] |
|---------------------|---------------|--|------------------------------|
| Droit | 69,4 | 43,17 | 313,68 |
| Hélicoïdal Pas 2000 | 101,3 | 43,17 | 418,1 |
| Hélicoïdal Pas 3000 | 63,5 | 43,17 | 287,02 |
| Hélicoïdal Pas 4000 | 92,5 | 43,17 | 457,87 |

Tableau III.3 : Valeurs de la puissance consommée calculées à partir l'équation 14

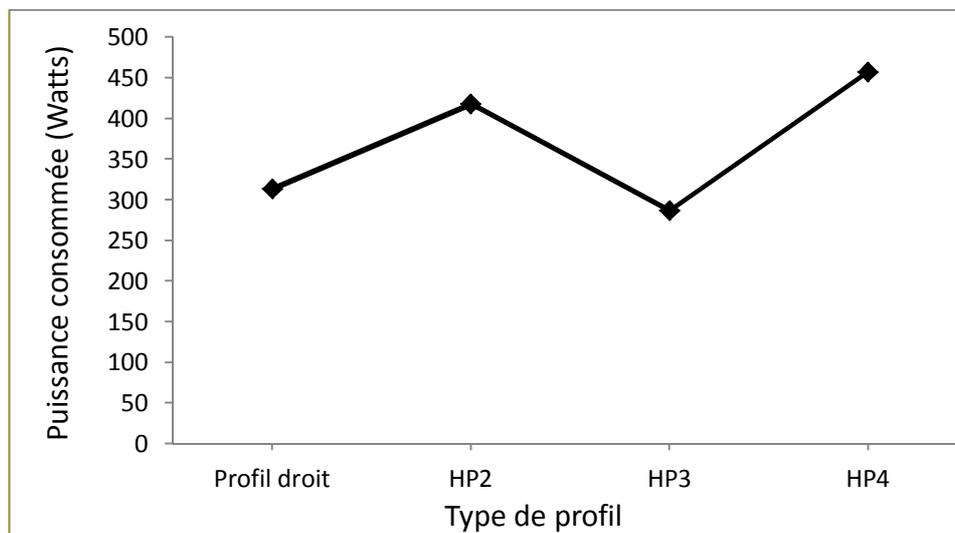


Figure III.7 : Puissance consommée par le broyeur

L'utilisation des barres de relevage hélicoïdales de pas 3000 permet de diminuer la puissance consommée par le broyeur de 13,33 Watts par rapport aux lifters droits. Des écarts moyens très importants de la puissance consommée sont à prélevées entre le profil droit et les deux autres profils (HP2 et HP4). Il est de l'ordre de 52 et 72 Watts.

Les barres de relevages trapézoïdales (profil droit) avec un angle de face de 20° ont besoins d'une puissance plus élevée que les barres hélicoïdales avec un pas moyen de 3000 mm, qui empêche une utilisation excessive du couple pour soulever et propulser les matériaux vers la zone d'impact, ce qui entraîne moins de puissance.

Le HP2 et le HP4 consomment plus de puissance que les deux autres profils car le couple nécessaire pour soulever les matériaux coulissants le long du profil HP2 (de pas très faible) et le long du profil HP4 (de très grand pas) est plus élevé.

III.5.2. Nombre de collisions

Le nombre de collisions en fonction du temps de simulation des profils considérés est exprimé par la figure III.8.

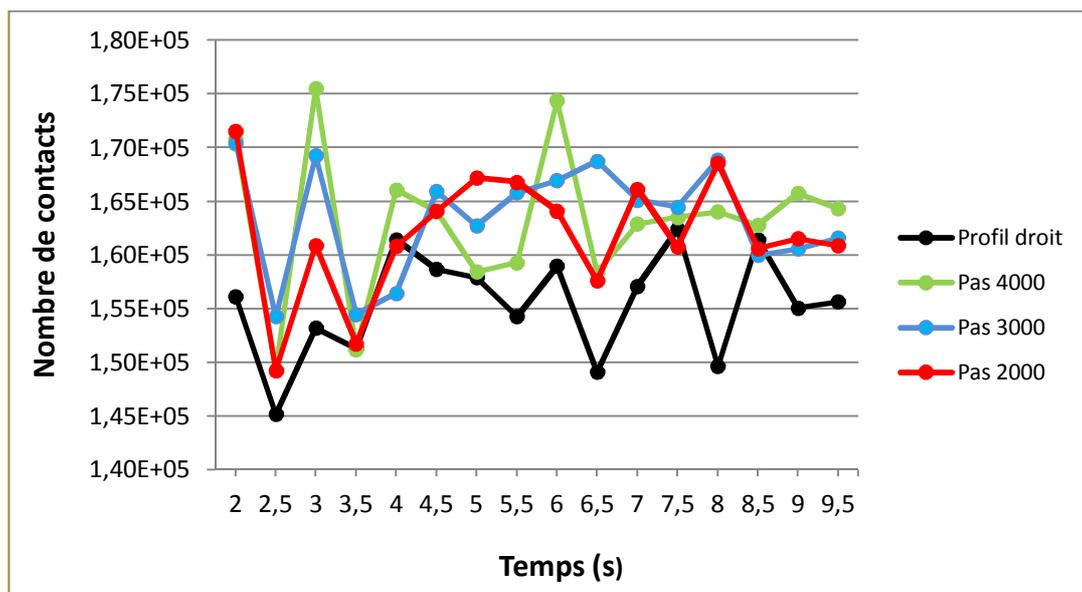


Figure III.8 : Nombre de collisions en fonction du temps de simulation

La première phase de 1,5 s de la simulation consiste au remplissage du cylindre, elle n'est pas prise en considération pour la détermination du nombre de collisions, le nombre de collisions est comptabilisé à partir de 2 s. cette phase témoigne des mécanismes élémentaires mis en jeux lors du procédé de broyage.

On remarque que le nombre total de collisions des barres de relevage hélicoïdales augmente d'environ 25 % par rapport aux barres de relevage à profil droit. Cette

augmentation du nombre de collisions a une influence considérable sur l'efficacité de broyage et le produit final.

III.5.3. Efforts de contact moyen en fonction du type de profil

III.5.3.1. Effort de compression moyen F_c

L'effort de compression moyen (force d'impact ou impact load en anglais)) pour les différentes géométries des lifters est représenté par la figure III.9.

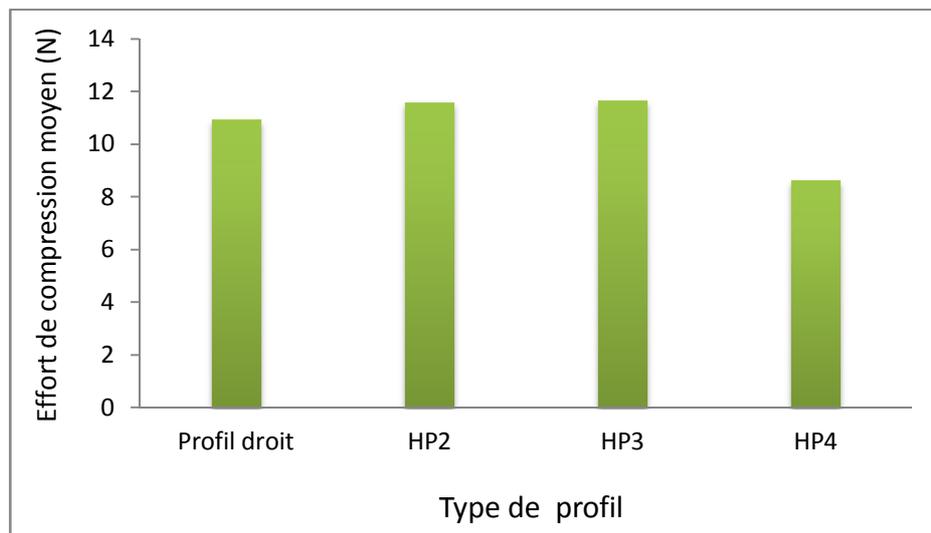


Figure III.9 : Variation de l'effort de compression moyen F_c en fonction de la forme des lifters

L'effort moyen de compression F_c présente une légère augmentation en passant du profil droit au profil hélicoïdal de pas 2000 et 3000. Cet effort chute pour le quatrième lifter HP4.

III.5.3.2. Effort normal moyen de contact F_n

L'évolution de l'effort normal moyen de contact F_n pour les différentes géométries des lifters est donnée par la figure III.10.

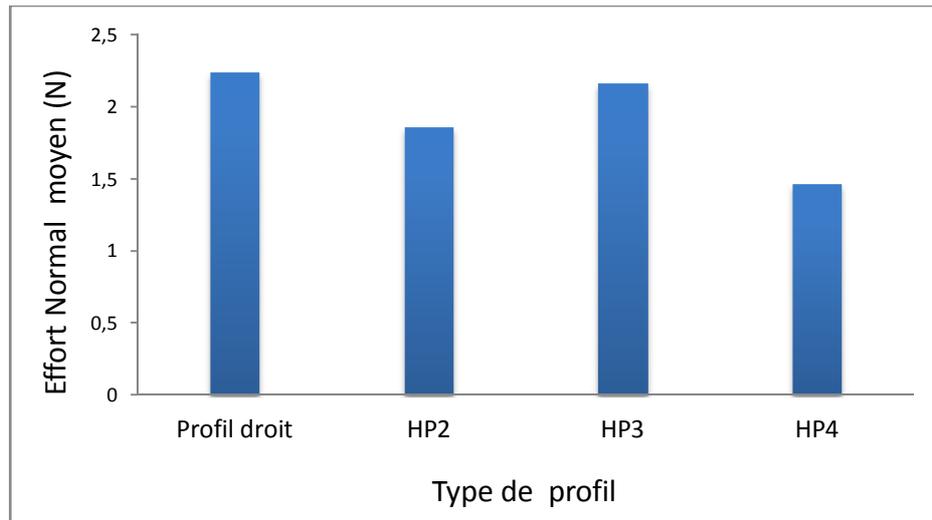


Figure III.10 : Variation de l'effort de contact normal moyen F_n en fonction de la forme des lifters

L'effort normal moyen F_n représente des valeurs plus petites pour les profils HP2 et HP4 que pour le profil droit et le HP3.

III.5.3.3. Effort tangentiel moyen de contact F_t

La figure III.11 représente l'évolution de l'effort tangentiel moyen de contact F_t en fonction des différentes géométries des lifters.

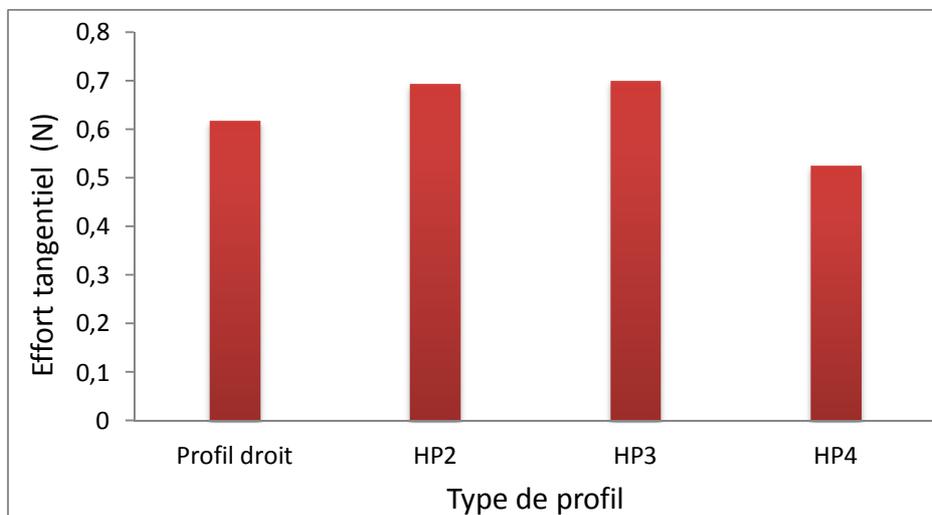


Figure III.11 : Variation de l'effort de contact tangentiel moyen F_t en fonction de la forme des lifters

Le HP4 présente des valeurs plus petites de l'effort de contact tangentiel moyen F_t que pour le reste des profils.

III.5.3.4. Comparaison des efforts de contact

La figure III.12 illustre l'effet du type de profil des barres de relevage sur les efforts de contact des boulets. Les simulations ont été réalisées en utilisant les paramètres du tableau III.2. Cette figure, nous montre que l'effort de compression ou l'effort d'impact présente des valeurs plus importantes que celles des efforts normal et tangentiel, dues à une énergie d'impact élevée après que les matériaux soient soulevés plus haut par la face de contact des lifters et frappent la zone d'impact au pied de charge (figure III.), ce qui joue un rôle très important sur l'efficacité de broyage. Cet effort représente une moyenne de 10,70 N et un écart moyen de 1,04 pour les quatre profils.

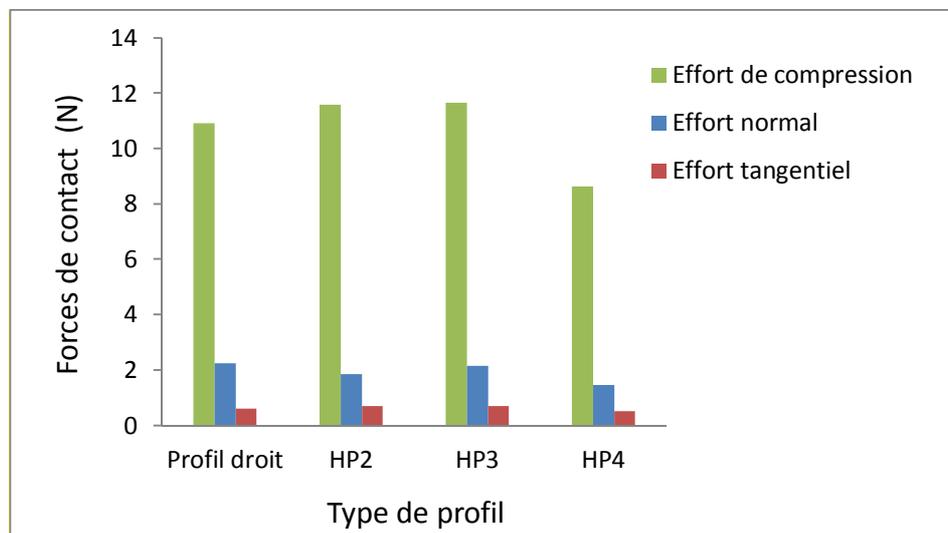


Figure III.12 : Mise en évidence des efforts de contact

III.5.4. Énergie cinétique totale E_k

Les résultats de l'énergie cinétique totale en fonction du type de profil sont représentés sur la figure III.13.

Les lifters à profil droit possédant un angle de face de 20° soulèvent les matériaux plus hauts pour augmenter leur hauteur de chute et leur énergie cinétique.

Les profils HP2, HP3 et HP4 représentent des énergies cinétiques plus faibles avec un écart moyen de 0,42 Joule. Ce résultat se produit car les boulets quittent plus tôt la face de contact des lifters avant d'atteindre leur hauteur de chute maximale.

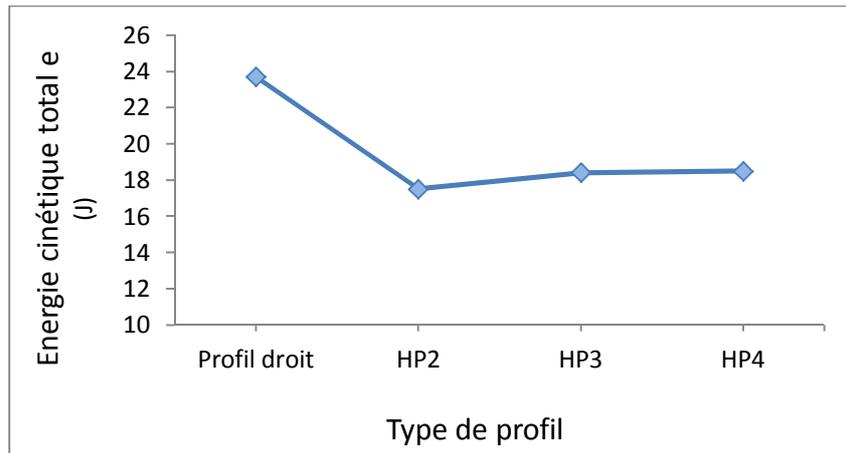


Figure III.13 : Variation de l'énergie cinétique totale E_k en fonction de la forme des lifters

III.5.5. Mouvement des boulets

Le graphique vectoriel de vitesse des boulets pour le profil droit et les profils hélicoïdaux à différents pas est illustré à la figure III.14.

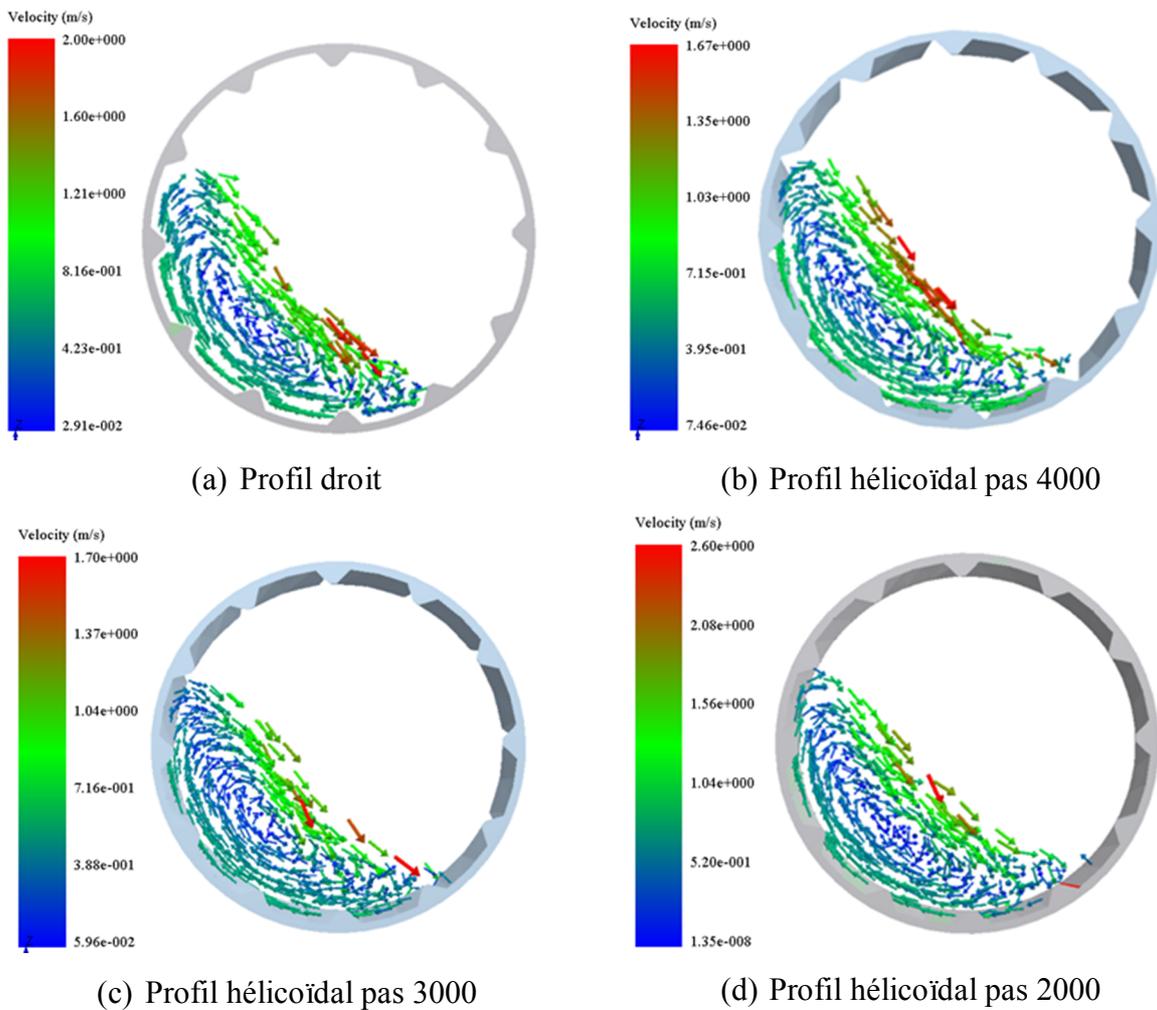


Figure III.14 : Diagrammes vectoriels de vitesse des boulets pour les différentes géométries des lifters

En analysant les résultats des simulations DEM, la vitesse des boulets dans la zone d'impact était de 2,0 m/s pour les profils droits. Cette vitesse chute à 1,67 et 1,7 m/s pour les profils hélicoïdaux de pas 4000 et 3000 respectivement et elle aux alentours de 1,50 m/s pour le profil hélicoïdal de pas 2000.

Dans le cas (b) et (c), nous avons prélevé des vitesses importantes au pied de charge. Cela montre que les lifters de pas 4000 et 3000 entraînent un mouvement extrêmement agressif des boulets en les projetant dans la zone d'impact, ce qui rend le processus de broyage plus efficace.

La zone morte en bleu sur la figure III.14 représente les vitesses proches de zéro des boulets.

III.5.6. Mouvement des particules

Le mouvement des particules à l'intérieur du broyeur pour le profil droit et ceux hélicoïdaux est illustré à la figure III.15 au moyen des vecteurs de vitesse.

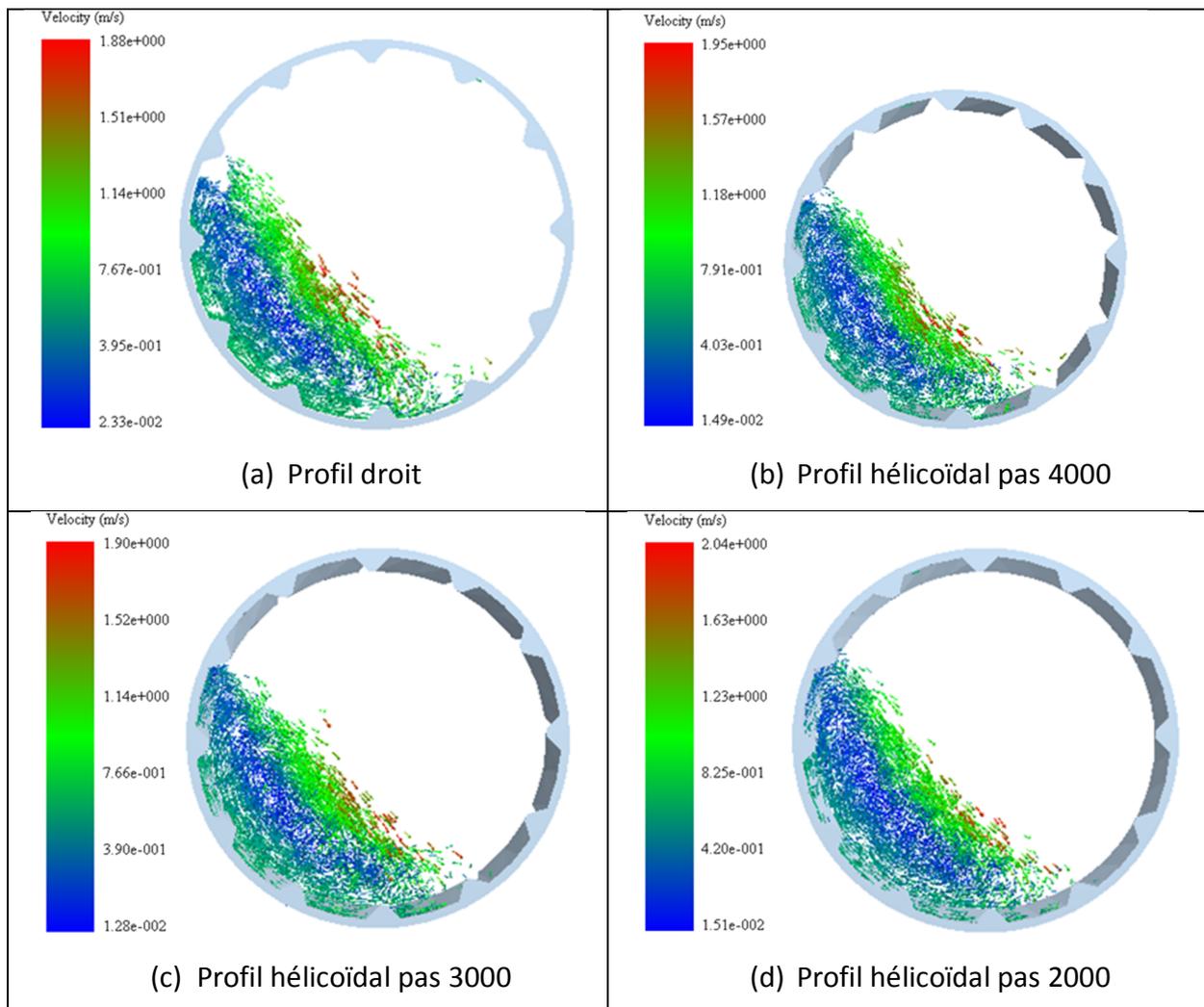


Figure III.15 : Diagrammes vectoriels de vitesse des particules pour les différentes géométries des lifters

Les diagrammes vectoriels de vitesse des particules mettent en évidence un mouvement régulier des particules et les vecteurs de vitesse ne sont pas significativement influencés par le changement de la géométrie des lifters. La vitesse des particules varie entre 1,88 et 2,04 m/s.

Conclusions

Une nouvelle conception des lifters est proposée dans ce travail. Le but était de comparer le nombre de contact, l'effort de compression moyen F_c , l'effort de contact normal moyen F_n , l'effort de contact tangentiel moyen F_t , énergie cinétique totale E_k et la puissance d'un broyeur à boulets revêtu de barres de relevage à profil droit et ceux d'un nouveau profil hélicoïdal avec différents pas en utilisant un modèle multiéléments dans le code EDEM.

En consultant le tableau III.4 récapitulant les résultats obtenus dans ce travail, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

| Profil | Puissance | Nombre de collisions moyen | F_c | F_n | F_t | E_k |
|--------------|-----------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Droit | 313,68 | 1,555E+05 | 10,93 | 2,24 | 0,618 | 23,7 |
| HP2 | 418,1 | 1,6204E+05 | 11,6 | 1,86 | 0,694 | 17,5 |
| HP3 | 287,02 | 1,6348E+05 | 11,67 | 2,16 | 0,701 | 18,4 |
| HP4 | 457,87 | 1,632E+05 | 8,63 | 1,46 | 0,524 | 18,5 |

Tableau III.4 : Récapitulatif des résultats obtenus dans ce travail

- La puissance consommée par le broyeur affiche ces valeurs les plus basses pour les nouvelles barres de relevage hélicoïdales de pas 3000 (HP3). Cela représente un avantage considérable dans l'économie du coût final de l'énergie total consommée par le broyeur.
- Pour ce même profil, le nombre total de collisions, l'effort de compression, l'effort normal et l'effort tangentiel représentent des valeurs plus importantes que les autres profils, ce qui présente un avantage plus significatif sur l'efficacité de broyage et sur la qualité du produit final.
- L'énergie cinétique totale est plus faible que celle du profil droit.
- Une plus grande vitesse des boulets dans la zone d'impact est attribuée au profil hélicoïdal de pas 3000 et 4000.

D'une manière générale, le lifter HP3, proposé comme une nouvelle conception des barres de relevage dans ce travail, représente les meilleures performances, nécessaires pour un processus de broyage efficace d'un broyeur à boulets.



Conclusion Générale

Dans cette étude, la modélisation DEM a été utilisée pour étudier l'effet de la géométrie des barres de relevage (lifters) sur la consommation d'énergie ainsi que sur les efforts d'impact dans un broyeur à boulets. Cette méthode est utilisée aussi; pour optimiser le processus de broyage et de connaître la vitesse avec laquelle les boulets tournent dans un broyeur pour des performances efficaces.

En bref, ce qui suit des conclusions peuvent être tiré des simulations DEM réalisées sur le logiciel EDEM, ainsi :

- Il a été observé que le profil de levage hélicoïdal de pas 3000 (HP3) affecte de manière significative la puissance consommée par le broyeur. Une diminution de 13,33 Watts est à prélever par rapport aux lifters droits. Cela peut être attribué au changement de face de contact des lifters hélicoïdaux. Un pas de 3000 semble être le pas optimum. Les profils de pas 2000 et 4000 augmente énormément cette consommation.

- Il a été conclu que, les barres de relevage de pas 3000 peuvent être utilisés efficacement dans les broyeurs à boulets, à cause des efforts d'impact plus élevés par rapport aux autres profils.

- Il a été conclu que le broyeur à boulets peut atteindre les meilleures performances avec un nombre de collisions plus important. Ce nombre est obtenu pour les profils hélicoïdaux de pas 3000.

- Une plus grande vitesse des boulets dans la zone d'impact est attribuée au profil hélicoïdal de pas 3000 et 4000.



Références bibliographiques

- [1] BOUZID Abd Elbasset, Calcul de la productivité d'un broyeur à boulet, 2012/2013.
- [2] FLSMIDTH Institut Cecil Broyage.fr « Broyeur à boulet »
- [3] FLSMIDTH Institut, broyeur à boulet
- [4] FLSMIDTH Institut, Technologie broyeur à boulets « 21 Mill Op Basics Ball milltechnology_1 ».
- [5] Daniel, S., & Tadeusz, T. Aspects of comminution flowsheets design in processing of mineral raw materials. *Gospod. Surowcami Miner. / Miner. Resour. Manag.*, 2010.
- [6] Cleary, P. W., & Morrison, R. D. (2011a). Understanding fine ore breakage in a laboratory scale ball mill using DEM. *Miner. Eng.*, 24(3-4), 352–366, 2011.
- [7] Cahier technique n°19, Aide au choix d'équipements permettant la fragmentation de matières solides sur des bases énergétiques.
- [8] Fabrication et dimensionnement en cimenterie, Tome I ", 1992.
- [9] Fabrication et dimensionnement en cimenterie, Tome II ", 1992.
- [10] Francioli, D. M. Effect of operational variables on ball milling (Unpublished doctoral dissertation), (2015).
- [11] Kabezya, & Motjotji, H. The Effect of Ball Size Diameter on Milling Performance. *J. Mater. Sci. Eng.*, 4(1), 4–6, 2015.
- [12] Powell, M. S., & Cleary, P. W. (2014). Selection and design of mill liners. *Adv. Comminution*, 2006.
- [13] Sullivan, C. O. Particle-Based Discrete Element Modelling a Geomechanics Overview. In 12th int. conf. int. assoc. comput. Methods adv. geomech. (pp. 1–6), 2008.
- [14] Djordjevic, N., Shi, F. N., & Morrison, R. Determination of lifter design, speed and filling effects in AG mills by 3D DEM. *Miner. Eng.*, 17(11-12), 1135–1142, 2004.
- [15] Börner, M. Discrete Element Method (DEM) (Tech. Rep.), 2011.
- [16] Sergio, M., Matos, V., Luiz, A., Mesquita, A., Mascarenhas, F. P., & Carlos, L. Study of Influence Of Vibration Parameters On The Efficiency Of Horizontal Vibrating Screen Using The Discrete Element Method 2. *Discrete Element Method (Dem)*, 2013.
- [17] Italo Leite de Camargo, , João Fiore Parreira Lova, , Rogério Erberelia , Carlos Alberto Fortulana, Influence of Media Geometry on Wet Grinding of a Planetary Ball Mill, *Materials Research*. 22(6), 2019.
- [18] B. K. Mishra and Raj K. Rajamani, The discrete element method for the simulation of ball mills, *Appl. Math. Modelling*, Vol. 16, 1992.
- [19] Domenico Daraio, Jose Villoria , Andrew Ingram, Alessio Alexiadis, E. Hugh Stitt and Michele Marigo, Validation of a Discrete Element Method (DEM) Model of the Grinding

- Media Dynamics within an Attritor Mill Using Positron Emission Particle Tracking (PEPT) Measurements, *Appl. Sci.* 9, 4816, 2019.
- [20] <http://www.thecementgrindingoffice.com/fr/millsinternals.html>, "Équipements internes des broyeurs à boulets", The Cement Grinding Office, 2014.
- [21] <http://hmsteelball.fr/profile/grinding-media-abrasion-mechanism.html/142843/0>, "Mécanisme d'abrasion des corps broyants", 2012.
- [22] <https://www.youtube.com/watch?v=gEWynTtguPo>, 2014.
- [23] Horabik, J.; Molenda, M. Parameters and contact models for dem simulations of agricultural granular materials: A review. *Biosyst. Eng.* 147, 206–225, 2016
- [24] Lu, G.; Third, J.; Müller, C. Discrete element models for non-spherical particle systems: From theoretical developments to applications. *Chem. Eng. Sci.* 127, 425–465, 2015.
- [25] Marigo, M.; Stitt, E.H. Discrete element method (DEM) for industrial applications: Comments on calibration and validation for the modelling of cylindrical pellets. *KONA Powder Part. J.* 32, 236–252, 2015.
- [26] Zhanfu Li, Yaokun Wang Study on the Performance of Ball Mill with Liner Structure based on DEM, *J. Eng. Technol. Sci.*, Vol. 50, No. 2, 157-178, 2018.
- [27] EDEM 2018 User Guide, DEM Solut. Ltd., 2017.
- [28] Bian, X., Wang, G., Wang, H., Wang, S. & Lu, W., Effect of Lifters and Mill Speed on Particle Behavior, Torque, and Power Consumption of a Tumbling Ball Mill: Experimental Study and DEM Simulation, *Minerals Engineering*, 105, pp. 22-35, 2017.

Résumé

Un broyeur à boulets est un appareil largement utilisé dans le traitement des minerais, il est destiné à moudre et diminuer progressivement la taille des particules du minerai. L'intérieur du broyeur contient des barres horizontales connues sous le nom de barres de relevage (lifters) assignées à soulever la charge.

Des travaux de recherche ont été menés sur divers paramètres affectant la consommation d'énergie du broyeur à boulets. Il a été constaté que la consommation d'énergie dans le broyeur à boulets dépend généralement du taux de remplissage, de la géométrie des lifters, de la vitesse du broyeur, ...etc.

Dans ce travail, nous avons proposé une nouvelle géométrie (hélicoïdale) des barres de relevage et étudié son influence sur les performances d'un broyeur à boulets, à savoir ; La puissance absorbée, les efforts de contact et le nombre de collisions.

Les simulations par la méthode des éléments discrets (DEM), nous ont permis de prédire de manière satisfaisante ces paramètres. Les barres de relevage hélicoïdales de pas 3000 représentent les meilleures performances, nécessaires pour un processus de broyage efficace d'un broyeur à boulets.

Mots clés : Barres de relevage (lifters), broyeur à boulets, puissance absorbée, efforts de contact, nombre de collisions, DEM.

ملخص

المطحنة ذات الكريات هي جهاز يستخدم على نطاق واسع في معالجة الخامات، ويهدف إلى طحن وتقليل حجم جزيئات الخام تدريجياً . يحتوي الجزء الداخلي من الكسارة على قضبان أفقية تعرف باسم قضبان الرفع (الرافعات) المخصصة لرفع الحمولة.

تم إجراء عمل بحثي على معايير مختلفة تؤثر على استهلاك الطاقة لمطحنة الكرة. لقد وجد أن استهلاك الطاقة في المطحنة الكروية يعتمد بشكل عام على نسبة الملء وهندسة الرافعات وسرعة المطحنة ... إلخ.

في هذا العمل، اقترحنا هندسة جديدة (حلزونية) لقضبان الرفع ودرسنا تأثيرها على أداء طاحونة الكرة، وهي: القوة الممتصة، قوى التلامس وعدد الاصطدامات.

سمحت لنا المحاكاة باستخدام طريقة العناصر المنفصلة (DEM) بالتنبؤ بهذه المعلومات بشكل مرض. تمثل قضبان الرفع الحلزونية ذات 3000 درجة أفضل أداء مطلوب لعملية طحن فعالة لمطحنة كروية.

كلمات المفتاح : قضبان الرفع (رافعات)، طاحونة ذات الكريات، طاقة ممتصة، قوى تلامس، عدد الاصطدامات، ديم.

Abstract

A ball mill is a device widely used in the processing of ores, it is intended to grind and gradually reduce the size of the particles of the ore. The inside of the crusher contains horizontal bars known as lifting bars (lifters) assigned to lift the load.

Research work has been conducted on various parameters affecting the energy consumption of the ball mill. It has been found that the energy consumption in the ball mill generally depends on the filling ratio, the geometry of the lifters, the speed of the mill, etc.

In this work, we proposed a new geometry (helical) of the lifting bars and studied its influence on the performance of a ball mill, namely; the power absorbed the contact forces and the number of collisions.

Simulations by the discrete element method (DEM) allowed us to predict these parameters satisfactorily. The 3000 pitch helical lift bars represent the best performance required for an efficient grinding process of a ball mill.

Key words: Lifting bars (lifter), Ball Mill, absorbed power, contact forces, number of collisions, DEM.