

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



Laboratoire de Recherche des Technologies Industrielles

THÈSE

Pour l'obtention du diplôme de
Doctorat 3^{ème} cycle LMD

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

Thème

**Amélioration de la longévité du boulet
de broyage destiné aux cimenteries**

Présentée par :
Monsieur SAFA Ali

Soutenue publiquement le 02/07/2024, devant le Jury composé de :

MM.

MOULGADA Abdelmadjid	Professeur (Université de Tiaret)	Président
AISSAT Sahraoui	Professeur (Université de Tiaret)	Encadrant
ABED Belkacem	MCA (Université de Tiaret)	Examineur
BALTACH Abdelghani	MCA (Université de Tiaret)	Examineur
MENDAS Mohamed	Professeur (Université de Chlef)	Examineur
HAMMOU Abdelkader Djilali	MCA (Université de Laghouat)	Examineur

Remerciements

Ce travail de recherche a été réalisé au sein du laboratoire de Recherche des Technologies Industrielles de l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret.

Je tiens à remercier son directeur, le **Professeur** Haddouche Kamel, qui m'a fourni un environnement de travail très agréable.

Je remercie particulièrement le **Professeur** Aissat Sahraoui, mon directeur de thèse, pour sa confiance, son aide et ses remarques précieuses, qui m'ont permis d'apprendre et de progresser tout au long de ma thèse. Je suis également reconnaissante sa disponibilité, qui a été un véritable atout.

Mes sincères remerciements vont au **Docteur** Sassi Ahmed, qui m'a proposé le thème de ce travail.

Je remercie le **Professeur** Moulgada Abdelmadjid de l'université de Tiaret, de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse.

Ma profonde gratitude va aussi au **Docteur** Hammou AEK de l'Université de Laghouat et au **Professeur** Mendes Mohamed de l'Université de Chlef, ainsi qu'au **Docteur** Baltach Abdelghani et au **Docteur** Abed Balkacem de l'université de Tiaret qui ont bien voulu me faire l'honneur de participer au jury. Je les remercie pour toutes les remarques constructives qu'ils ont formulées pour ce travail.

Toute ma reconnaissance à mes collègues et mes amis pour leurs conseils, leurs aides quotidiennes et leur soutien de chaque instant.

Que toute personne ayant participé à la réalisation de ce travail trouve ici ma gratitude pour son aide.

Dédicace

À mes parents, qui m'ont toujours soutenu et encouragé dans mes projets.

À mon épouse, qui a toujours cru en moi, même lorsque je doutais de moi-même

À mes enfants Mohamed et Iyad, qui sont ma source de motivation et d'inspiration

À mes frères

À mes sœurs

Et à tous mes amis

SAFA ALI

ملخص

الطحن بالكرات هي المرحلة النهائية في تفتيت المواد لإنتاج الأسمنت. وتتعرض هذه الكرات لإجهادات ميكانيكية شديدة وظروف طحن شديدة.

في هذا العمل البحثي، نولي أهمية خاصة للتكوين الهندسي لأعمدة الرفع، ونقدم تصميمًا جديدًا لهذه الأعمدة يهدف إلى تحسين كفاءة المطاحن الكروية، وتقليل استهلاك الطاقة، وتقليل التآكل على كرات الطحن وزيادة عمرها التشغيلي. تم تطبيق طريقة العناصر المنفصلة (DEM) ، التي يتم استخدامها بشكل متزايد في السياقات الصناعية والأكاديمية، في هذا البحث لمحاكاة سلوك الجسيمات داخل مطحنة كريات.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها اتساقًا واتفاقًا مع النتائج التجريبية لبعض الباحثين.

الكلمات المفتاحية: كرات الطحن، عمر الخدمة، التآكل، DEM، الرافعات.

Résumé

Le broyage par boulets constitue la phase finale de la fragmentation des matériaux destinés à la fabrication du ciment. Ces boulets sont assujettis à des contraintes mécaniques et à des conditions de broyage sévères.

Dans ce travail de recherche, une importance particulière est accordée à la configuration géométrique des barres de levage, et nous présentons une nouvelle conception de ces barres visant à améliorer l'efficacité des broyeurs à boulets, à réduire la consommation d'énergie, à réduire l'usure des boulets de broyage et augmenter leur durée de vie. La DEM en anglais ou la méthode des éléments discrets, de plus en plus employée dans des contextes industriels et académiques, a été appliquée dans cette recherche afin de simuler le comportement des particules au sein d'un broyeur à boulets.

Les résultats obtenus démontrent une cohérence et une concordance avec les résultats expérimentaux de certains chercheurs.

Mots clés : Boulets de broyage, durée de vie, usure, DEM, lifters.

Abstract

Ball milling is the final stage in the comminution of cement materials. These balls are subjected to severe mechanical stresses and grinding conditions.

In this research work, particular emphasis is placed on the geometric configuration of the lifting bars, and we present a new design of these bars aimed at improving ball mill efficiency, reducing energy consumption, reducing grinding ball wear and increasing ball life. The Discrete Element Method (DEM), increasingly used in industrial and academic contexts, was applied in this research to simulate particle behavior within a ball mill.

The results obtained show consistency and concordance with the experimental results of some researchers.

Key words: Grinding balls, service life, wear, DEM, lifters

Sommaire

Sommaire	ii
Liste des figures	v
Liste des tableaux	ix
Nomenclature	x
Introduction générale	1

Chapitre I Études sur le procédé de broyage et les boulets de broyage

I.1. Introduction.....	5
I.2. Broyeurs à tambour ou culbuteurs	5
I.2.1. Broyeurs à barres	6
I.2.2. Broyeurs semi-autogène (SAG).....	6
I.2.3. Broyeurs à boulets	7
I.3. Généralités sur les boulets de broyage.....	8
I.3.1. Production de boulets de broyage	9
I.3.2. Matériaux et composition des boulets de broyage.....	12
I.3.3. Taille des boulets de broyage.....	15
I.3.4. Mouvement de la charge broyante.....	16
I.3.5. Mécanisme de broyage	18
I.4. Conclusion	19

Chapitre II Dégradation des boulets de broyage

II.1. Introduction	21
II.2. Défauts identifiés lors du processus de fabrication des boulets	21
II.3. Anomalies identifiées au cours de l'exploitation	25
II.3.1. Corrosion	25
II.3.2. L'usure par corrosion des boulets de broyage	26
II.3.3. L'usure par abrasion.....	27
II.3.4. L'usure par impact.....	28
II.4. Tests d'usure	30
II.4.1. Test d'impact répété balle-sur-balle.....	31
II.4.2. Test d'usure abrasive	32
II.5. Facteurs influençant l'usure des boulets de broyage.....	34
II.5.1. Influence du taux de remplissage et du diamètre du broyeur	34

II.5.2. Influence de la vitesse de rotation du broyeur.....	35
II.5.3. Influence du diamètre des boulets	35
II.6. Conclusion.....	36

Chapitre III Facteurs déterminants influençant la longévité des boulets de broyage

III.1. Introduction.....	38
III.2. Choix du matériau des boulets (addition des éléments d'addition)	38
III.3. Influence des traitements thermiques.....	40
III.3.1. Différents types de traitements thermiques appliquées aux boulets de broyage.....	41
III.3.2. Influence des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques des boulets de broyage.....	42
III.4. Conception de broyeurs avec revêtement en caoutchouc et en composite	44
III.4.1. Blindages en caoutchouc.....	44
III.4.2. Blindages composites en caoutchouc et métal.....	45
III.5. Conception des barres de levage (lifters)	45
III.5.1. Effet de la hauteur de lifter.....	47
III.5.2. Effet du nombre de lifters	49
III.5.3. Effet de la forme de lifter	50
III.6. Conclusion	50

Chapitre IV Approche par éléments discrets

IV.1. Introduction.....	52
IV.2. Description de la méthode	52
IV.3. Applications de la Méthode des éléments discrets	53
IV.4. Principe de la méthode des éléments discrets.....	54
IV.4.1. Modèle de sphère dure	54
IV.4.2. Modèle de sphère souple.....	54
IV.4.3. Calculs du mouvement des particules.....	55
IV.4.4. Forces de contact (figure IV.4)	56
IV.4.5. Forces de non-contact.....	57
IV.4.6. Pas du temps	57
IV.4.7. Calcul de la nouvelle position	59
IV.5. La modélisation discrète	60
IV.5.1. Modèles de contact élastique	61

IV.6. Modélisation de la déformation géométrique due à l'usure	64
IV.6.1. Le model d'usure relative	64
IV.6.2. Le modèle d'usure abrasive (modèle d'Archard)	65
IV.6.3. Modèle d'usure d'érosion (modèle d'Oka).....	66
IV.7. Conclusion	67
Chapitre V Simulation par Éléments Discrets : Études et Applications	
V.1. Introduction	69
V.2. Paramètres d'entrée pour la simulation DEM.....	69
V.2.1. Géométries dans les simulations DEM	69
V.2.2. Taille des particules.....	70
V.2.3. Propriétés des matériaux (Module d'Young, module de cisaillement et coefficient de Poisson).....	70
V.2.4. Paramètres d'interaction	71
V.3. EDEM Software	73
V.3.1. EDEM Creator.....	73
V.3.2. EDEM Simulator.....	74
V.3.3. EDEM Analyst	74
V.4. Applications Pratiques	74
V.4.1. Configuration de la simulation.....	74
V.4.2. Validation des résultats de simulation.....	80
V.5. Effets des Barres de Levage Hélicoïdales (investigation nouvelle).....	84
V.5.1. Influence de la géométrie des lifters et du taux de rotation sur le couple du broyeur	85
V.5.2. Influence de la géométrie des lifters et de la vitesse de rotation sur la puissance consommée par broyeur	87
V.5.3. Influence de la géométrie des lifters et de la vitesse de rotation sur le comportement des particules.....	87
V.5.4. Influence de la géométrie des lifters et de la vitesse de rotation sur les forces de contact	91
V.5.5. Influence de la géométrie des lifters et de la vitesse de rotation sur l'énergie cinétique moyenne E_k	93
V.5.6. Influence de la géométrie des lifters sur l'usure des chemises	94
V.6. Conclusion.....	98
Conclusion générale.....	100
Références bibliographie.....	102

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : (a) Broyeur à barres, (b) Barres en acier haute résistance	6
Figure I.2 : Vue intérieur du broyeur à barres	6
Figure I.3 : Broyeur semi-autogène (SAG)	7
Figure I.4 : Vue intérieur du broyeur à boulets	7
Figure I.5 : Composantes du broyeur à boulets à compartiments.....	8
Figure I.6 : boulets de broyage	8
Figure I.7 : Confection de moules en sable pour la production des boulets de broyage	9
Figure I.8 : Chauffe uniforme	10
Figure I.9 : Forge par estampage	11
Figure I.10 : Traitement thermique.....	11
Figure I.11 : Influence de la vitesse de rotation du broyeur sur son régime de fonctionnement...	16
Figure I.12 : Caractérisation de la vitesse critique	17
Figure I.13 : Zones distinguées lors du procédé de broyage	17
Figure I.14 : Types de charges mécaniques que les boulets peuvent subir	19

Chapitre II

Figure II.1 : Les principaux facteurs de corrosion.....	25
Figure II.2 : Corrosion sèche et humide	26
Figure II.3 : Représentation de l'usure par corrosion pour (a) une cellule d'abrasion différentielle (b) une cellule galvanique de broyage de boulets. (Aldrich 2013).....	27
Figure II.4 : Usure abrasive des boulets de broyage.....	28
Figure II.5 : Usure par impact.....	29
Figure II.6 : Ruptures des boulets après un test d'impact.....	29
Figure II.7 : Déformations des boulets après un test d'impact	29
Figure II.8 : Ecaillage de la surface des boulets	30
Figure II.9 : Test d'impact réalisé dans un tambour en rotation.....	31
Figure II.10 : Test de chute sur les boulets de broyage	32
Figure II.11 : Test d'abrasion Taber.....	32
Figure II.12 : Test d'abrasion à la roue à jet d'abrasif	33

Figure II.13 : Test d'abrasion par glissement.....	33
Figure II.14 : Essais d'usure micro-abrasifs utilisant la méthode du boulet rotative	34
Figure II.15 : Impact du taux de remplissage et du diamètre du broyeur sur la durée de réduction du diamètre des boulets	35
Figure II.16 : Evolution de la vitesse de rotation du broyeur (V_c : vitesse critique).....	35
Figure II.17 : Evolution de la force de frappe des boulets.....	36

CHAPITRE III

Figure III.1 : Le cycle thermique	40
Figure III.2 : Différents types de traitements thermiques	42
Figure III.3 : Broyeur à boulet avec revêtement en caoutchouc	44
Figure III.4 : Blindages composites en caoutchouc et métal (POLYCORP).....	45
Figure III.5 : Différence de coût total de broyage entre une conception des barres de levage.....	46
Figure III.6 : Principaux configurations de blindage (a) blindage droite, (b) blindage à nervure (c) blindage ondulé, (d) blindage étagé.....	47
Figure III.7 : Comportement des particules avec des lifters de différentes hauteurs : (a) aucun lifter, (b) lifters de 5 cm, (c) lifters de 10 cm, (d) lifters de 15 cm, (e) lifters de 20 cm, et (f) lifters de 25 cm	48
Figure III.8 : Effet de la hauteur du lifter sur le comportement des particules pour le broyeur boulets à 75 % de la critique et un niveau de remplissage de 35% : (a) $H_L=25\text{mm}$, (b) $H_L=17\text{mm}$, (c) $H_L=10\text{mm}$, (d) $H_L=5\text{mm}$, (e) $H_L=3\text{mm}$ et (f) $H_L=0\text{mm}$	48
Figure III.9 : Effet du nombre de lifters sur le comportement des particules (a) $NL=0$,.....	49
Figure III.10 : Lifters avec un angle de face : (a). 80° , (b). 60° , (c). 45° et (d). 22.5°	50

Chapitre IV

Figure IV.1 : Quelques exemples d'applications industrielles de la méthode des éléments discrets	53
Figure IV.2 : Schéma simple de (a) modèle de sphère dure et (b) modèle de sphère molle	55
Figure IV.3 : Calcul du mouvement des particules	56
Figure IV.4 : Forces de contact.....	56
Figure IV.5 : Modélisation des forces de contact (Li et al. 2019)	57
Figure IV.6 : Force de non-contact.....	57
Figure IV.7 : Choix du pas de temps (Δt) (EDEM TM).....	58
Figure IV.8 : Calcul du mouvement d'un seul élément en termes d'accélération, de vitesse et de la position dans le DEM	59

Figure IV.9 : Principe de la DEM.....	60
Figure IV.10 : Classification des modèles de force d'interaction des particules par	60
Figure IV.11 : Relation entre la force et le déplacement dans différents modèles de contact :.....	61
Figure IV.12 : Modèle Hertz-Mindlin	62
Figure IV.13 : Profondeur d'usure d'après le modèle d'Oka	66

Chapitre V

Figure V.1 : Représentation d'une graine à l'aide de 5, 10, 15 et 20 sphères collées.	70
Figure V.2 : Représentation du modèle de matériau final par des sphères collées	70
Figure V.3 : Illustration des paramètres d'interaction : (a) coefficient de restitution, (b) coefficient de frottement statique, (c) coefficient de frottement glissant et (d) coefficient de frottement roulant	72
Figure V.4 : Réglage global des propriétés des matériaux et d'interaction dans EDEM.....	75
Figure V.5 : Boulets créés par EDEM	76
Figure V.6 : Tambour intégré dans EDEM	77
Figure V.7 : Réglage de l'usine de particules statiques utilisée dans EDEM	78
Figure V.8 : Modèles physique (EDEM TM).....	78
Figure V.9 : Choix des modèles de contact	79
Figure V.10 : Capture d'écran de la configuration de simulation utilisée dans le logiciel EDEM	79
Figure V.11 : Détails géométriques des lifters : (a) LH = 10 mm, (b) LH = 17 mm	80
Figure V.12 : Couple moyen en fonction de la vitesse du broyeur liner, HL =10 mm	81
Figure V.13 : Couple moyen en fonction de la vitesse du broyeur liner, LH =17 mm	81
Figure V.14 : La puissance en fonction de la vitesse du broyeur liner, LH =10 mm.....	81
Figure V.15 : La puissance en fonction de la vitesse du broyeur liner, LH =17 mm.....	81
Figure V.16 : Comparaison du comportement des particules 3D DEM avec le broyeur à boulets expérimental pour différents vitesse de rotation : (a) $\omega=0\%$, (b) $\omega=60\%$, (c) $\omega=70\%$, (d) $\omega=75\%$, (e) $\omega=80\%$ et (f) $\omega=90\%$	83
Figure V.17 : Configuration des lifters utilisés dans les simulations : (a) Profilé droit, (b) Profilé hélicoïdal pas 2000 mm (HP2), (c) Profilé hélicoïdal pas 3000 mm (HP3), (d) Profilé hélicoïdal pas 4000 mm (HP4).....	85
Figure V.18 : Évolution du couple en fonction de la géométrie des lifters et de la vitesse de rotation du broyeur.	86
Figure V.19 : Évolution de la puissance en fonction de la géométrie des lifters et de la vitesse de rotation du broyeur	87

Figure V.20 : Effet de la géométrie des lifters droits sur le comportement des particules du broyeur à boulets pour différentes vitesses de rotation : (a) $\omega=60\%$, (b) $\omega=70\%$, (c) $\omega=75\%$,	88
Figure V.21 : Effet de la géométrie des lifters HP2 sur le comportement des particules du broyeur à boulets pour différentes vitesses de rotation : (a) $\omega=60\%$, (b) $\omega=70\%$, (c) $\omega=75\%$,	88
Figure V.22 : Effet de la géométrie des lifters HP3 sur le comportement des particules du broyeur à boulets pour différentes vitesses de rotation : (a) $\omega=60\%$, (b) $\omega=70\%$, (c) $\omega=75\%$,	89
Figure V.23 : Effet de la géométrie des lifters HP4 sur le comportement des particules du broyeur à boulets pour différentes vitesses de rotation : (a) $\omega=60\%$, (b) $\omega=70\%$, (c) $\omega=75\%$,	89
Figure V.24 : Comparaison des vitesses des particules du lifter droit et hélicoïdaux.	91
Figure V.25 : Forces de contact (normales et tangentielles)	91
Figure V.26 : Variation de l'effort de contact normal F_n en fonction de la forme des lifters et de la vitesse de rotation	92
Figure V.27 : Variation de l'effort de contact tangentiel total F_t en fonction de la forme des lifters et de la vitesse de rotation.....	92
Figure V.28 : Comparaison entre les forces normales et les forces tangentielles à $\omega=75\%$	93
Figure V.29 : Variation de l'énergie cinétique moyenne E_k en fonction de la forme des lifters...	94
Figure V.30 : Comparaison de la force de contact cumulée normale et tangentielle pour le broyeur à lifter droit et à lifter hélicoïdal HP2, $\omega=75\%$	95
Figure V.31 : Force cumulative tangentielle en fonction du temps.....	96
Figure V.32 : Force cumulative normale en fonction du temps	96
Figure V.33 : Contour d'usure d'Archard du profil droit : (a) l'ensemble du broyeur,.....	97
Figure V.34 : Contour d'usure d'Archard du profil HP2 : (a) l'ensemble du broyeur,	97
Figure V.35 : Relation entre l'usure d'Archard et le temps de simulation	98

Listes tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Composition chimique des boulets de broyage typiques (% en poids).....	12
Tableau I.2 : Composition (en % en poids) des fontes résistantes à l'abrasion selon la norme ASTM A532-87(Jiyang 2011).....	14
Tableau I.3 : Diamètre nominal des boulets de broyage	15

Chapitre II

Tableau II.1 : Principaux défauts de fonderie dans les boulets de broyage.....	21
--	----

Chapitre III

Tableau III.1 : Matériaux utilisés pour la fabrication des boulets de broyage	39
Tableau III.2 : Influence des éléments d'alliage sur les propriétés mécaniques des fontes alliées	40

Chapitre V

Tableau V.1 : Propriétés des matériaux et paramètres d'interaction	75
Tableau V.2 : Distribution du diamètre des boulets	75
Tableau V.3 : Paramètres de simulation du broyeur	76
Tableau V.4 : Comparaison des résultats simulés et des résultats expérimentaux LH 10mm	82
Tableau V.5 : Comparaison des résultats simulés et des résultats expérimentaux LH 17mm	82

Nomenclature

DEM	Méthode des éléments discrets	
HP2	Profils de forme hélicoïdale, pas=2m	
HP3	Profils de forme hélicoïdale, pas=3m	
HP4	Profils de forme hélicoïdale, pas=4m	
a	Accélération, rayon de contact	(m/s ²), (m)
A	Surface	(m ²)
A _r	La surface réelle de contact	(mm ²)
e	Le coefficient de restitution	(-)
d _w	Profondeur d'usure	(m)
D	Diamètre du broyeur	(m)
D _p	Diamètre des particules	(m)
E, E*	Module de Young, Module de Young équivalent	(Pa)
E _n	Energie de contact cumulée normale	(J)
E _t	Energie de contact cumulée tangentielle	(J)
E(α)	Volume d'usure par unité de masse	(m ³ /kg)
F _c	Forces résultantes de contact	(N)
F _{DMT}	Force de contact dans le modèle DMT	(N)
F _g	Force gravitationnelle	(N)
F _n ^d	Force d'amortissement normal	(N)
F _n	Forces normal de contact, force cumulée normale	(N)
F _{nc}	Forces résultantes de non-contact	(N)
F _e ^N	Force élastique selon la direction normale du contact	(N)
F _r	Force de frottement de roulement	(N)
F _{sl}	Force de frottement de glissement	(N)
F _{st}	Force de frottement statique	(N)
F _t ^d	Force d'amortissement tangentiel	(N)
F _{tmax}	Force tangentielle maximale	(N)
F _t	Forces tangentiel de contact, force cumulée tangentielle	(N)
g	accélération due à la gravité	(m/s ²)
g(α)	Dépendance de l'angle d'impact de l'érosion normalisée	(-)
G	Constante de gravitation, Le module de cisaillement	(-), (Pa)
H	Dureté	(Pa)
Hv	Dureté Vickers	GPa
I	Moment d'inertie	(kg/m ²)
k _n	Constant de ressort (normal)	(N/m)
k _t	Raideurs de ressort (tangentiel)	(N/m)
LH	Hauteur du poussoir	(m)
N	Vitesse de rotation	(tr/min)
N _c	Vitesse critique	(tr/min)
m, m*	Masse, Masse effective	(Kg)
m _p	Masse de la particule	(kg)

N	Vitesse de rotation	(tr/min)
P	Puissance	(Watt)
Q	Volume de matériau enlevé	(m ³)
R _i	Distance entre le point de contact et le centre de masse	(m)
t	Temps	(s)
T	Couple	(N.m)
V	Vitesse	(m/s)
V _n	Vitesse relative normale	(m/s)
V _t	Vitesse relative tangentielle	(m/s)
w	Constante d'usure	(-)
W	Travail thermodynamique d'adhésion	(J/m ²)
α	Angle d'impact des particules	(°)
γ	Énergie de surface	(J/m ²)
δ _n	Déplacement normal entre deux particules (overlap)	(m)
δ _t	Déplacement tangential entre deux particules (overlap)	(m)
δ _{t0}	Déformation finale subie par une particule	(m)
ε	Déformation	(-)
η _n	Coefficient d'amortissement normal	(-)
η _t	Coefficient d'amortissement tangential	(-)
μ _r	Coefficient de frottement au roulement	(-)
μ _{sl}	Coefficient de frottement de glissement	(-)
μ _{st}	Coefficient de frottement statique	(-)
ν	Coefficient de Poisson	(-)
ρ	Densité	(Kg/m ³)
σ	Contrainte	(MPa)
ω	Vitesse angulaire	(rad/s)
v	Vitesse de translation	(m/s)
\vec{v}_n^{rel}	Vitesse normale relative	(m/s)
\vec{v}_t^{rel}	Vitesse tangentielle relative	(m/s)
Δt	Pas de temps	(s)
τ	Contrainte de cisaillement	(MPa)
l	Déformation de cisaillement	(-)

Introduction Générale

La comminution, souvent désignée sous le terme de fragmentation, représente un concept fréquemment employé dans divers secteurs tels que l'industrie minière, la science des matériaux et le domaine pharmaceutique. Elle fait référence au processus de réduction de la taille des matériaux solides en particules ou fragments plus petits. Cette réduction de taille peut être réalisée de différentes manières mécaniques et en utilisant divers équipements de broyage. Les méthodes utilisées dépendent de facteurs tels que la nature du matériau traité, la taille des particules requise, le produit final souhaité, l'efficacité énergétique et les aspects économiques à prendre en compte. Le processus de broyage comprend plusieurs étapes qui nécessitent l'utilisation de divers équipements afin d'atteindre les résultats souhaités. Par exemple, on peut utiliser des concasseurs à mâchoires, à cônes, à percussion, giratoires, des broyeurs à boulets, des broyeurs à tiges et des broyeurs SAG (broyage semi-autogène).

Un broyeur à boulets est un équipement de broyage largement employé dans l'industrie minière, la métallurgie, la chimie, la céramique et d'autres secteurs. Le processus de broyage dans les broyeurs à boulets peut être humide ou sec, et cela repose sur les caractéristiques du matériau en traitement ainsi que des besoins particuliers de l'application. Leur taille peut varier, depuis les équipements de laboratoire utilisés pour la recherche et le développement jusqu'aux grands broyeurs à l'échelle industrielle utilisés dans les processus de production.

Les boulets de broyage sont des composants cruciaux d'un broyeur à boulets, car ils sont responsables de la fragmentation du matériau à broyer en particules plus petites. La qualité et le choix approprié des boulets revêtent une importance cruciale pour assurer l'efficacité du procédé de broyage industriel. Ils sont soulevés et projetés par des barres de levage installées à l'intérieur du broyeur à boulets et ils sont assujettis à des contraintes mécaniques et à des conditions de broyage sévères. Ils sont fabriqués en plusieurs matériaux et sont disponibles dans différentes tailles.

Les boulets subissent une usure progressive de leur surface en raison de leur contact constant avec d'autres boulets, le matériau à broyer et le blindage des broyeurs. Avec le temps, cette usure se manifeste par une réduction progressive de leur diamètre et une perte de leur matière. De plus, les chocs répétés qu'ils subissent peuvent occasionner des fissures et des cassures, réduisant ainsi leur durée de vie. Dans certaines situations, comme dans le broyage humide, les conditions

chimiques peuvent également causer la corrosion des boulets, ce qui accélère leur détérioration en entraînant une perte de matière.

Le choix des matériaux, la maîtrise des paramètres régissant la qualité des boulets (composition chimique et la microstructure), le contrôle des variables liées au processus de broyage (comme la vitesse de rotation du broyeur, le niveau de remplissage, la dimension des boulets, etc.) Joue un rôle important sur les performances et la longévité des boulets de broyage.

Le but de cette thèse consiste à explorer et à saisir l'impact de ces facteurs susceptibles d'accroître l'efficacité et de prolonger la durabilité des boulets de broyage dans les opérations de broyage industrielles.

Plusieurs recherches ont été menées pour analyser l'influence des éléments d'alliage et des procédés de traitement thermique sur les caractéristiques mécaniques et microstructurales des boulets de broyage. D'autres investigations se sont focalisées sur l'étude des variables liées au procédé de broyage, comme la vitesse de rotation du broyeur, le niveau de remplissage du broyeur et les dimensions des boulets, sur l'efficacité du processus de broyage et la durabilité des boulets de broyage. Récemment, des investigations se sont également penchées sur l'évaluation de l'influence de la conception des organes des broyeurs, en particulier des barres de levage (connus sous le nom de lifters en anglais), sur l'efficacité du processus de broyage et longévité des boulets de broyage.

Dans ce travail de recherche, une importance particulière est accordée à la configuration géométrique des barres de levage, et nous présentons une nouvelle conception de ces barres visant à améliorer l'efficacité des broyeurs à boulets, réduire la consommation d'énergie et augmenter la durée de vie des boulets. La "Discrete Element Method" (DEM) en anglais ou la méthode des éléments discrets, de plus en plus employée dans des contextes industriels et académiques, a été appliquée dans cette recherche afin de simuler le comportement des particules au sein d'un broyeur à boulets.

Pour parvenir à cette finalité, notre travail se structure en cinq chapitres, conclues par une synthèse générale.

Dans le premier chapitre, nous effectuons une étude des dispositifs de broyage, en soulignant l'importance fondamentale des boulets de broyage au sein d'un broyeur à boulets.

Le second chapitre se penche sur les dégradations possibles que peuvent connaître les boulets de broyage tant lors de leur production que lors de leur utilisation. Nous étudions les répercussions de ces défauts sur l'efficacité du procédé de broyage ainsi que sur la quantité d'énergie consommée.

Le troisième chapitre examine les éléments susceptibles d'améliorer la qualité et la longévité des boulets, tout en évitant les problèmes évoqués dans le chapitre précédent.

Le quatrième chapitre se concentre sur l'application étendue de la méthode des éléments discrets (DEM) dans cette étude. Ce chapitre aborde les méthodes numériques employées pour résoudre les équations qui gouvernent le déplacement des particules, les conditions aux limites, les modèles de contact, les modèles d'usure, ainsi que l'exploitation de la DEM pour la simulation du couple, de la consommation d'énergie, du comportement des particules des forces de contact, et estimer la profondeur d'usure des surfaces géométriques dans le broyeur à boulets.

Enfin, le cinquième chapitre explore les effets des nouvelles formes de barres de levage (lifters) proposées dans cette étude sur le couple, la consommation électrique, le comportement des particules et les forces de contact au sein du broyeur à boulets. Les résultats de la simulation par éléments discrets obtenus dans cette étude ont été confrontés aux résultats expérimentaux de certains chercheurs.

Chapitre I

Études sur le procédé de broyage et les boulets de broyage

I.1. Introduction

La fragmentation fine, également connue sous le nom de broyage, représente la dernière étape du processus de fragmentation, ayant pour objectif de diminuer la taille des particules de 5 à 250 millimètres afin d'obtenir une dimension finale située entre 10 et 300 micromètres. Au cours de cette phase, la réduction des particules se réalise par le biais d'impact ou d'abrasion. Cette opération peut être effectuée aussi bien en environnement sec qu'en environnement humide, bien que la deuxième option soit plus fréquemment utilisée.

La fragmentation se réalise au sein de cuves cylindriques rotatives en acier, appelées broyeurs, renfermant des éléments broyants mobiles à l'intérieur. Ces derniers peuvent se déplacer librement dans le broyeur, facilitant ainsi la réduction des particules de minerai. Parmi les types de broyeurs utilisés en fragmentation fine, on peut identifier :

I.2. Broyeurs à tambour ou culbuteurs

Ces broyeurs sont constitués d'un tambour cylindrique horizontal revêtu d'une garniture renouvelable, laquelle subit une détérioration graduelle au cours de son fonctionnement. En règle générale, les modèles de grande taille sont propulsés par leur propre axe, tandis que les plus petits reposent sur des cylindres en rotation. La pression appliquée sur les granulats solides pendant le processus de broyage dépend du diamètre du broyeur. En conséquence, un broyeur avec un plus grand diamètre sera nécessaire lorsque les granulats comportent des blocs plus importants.

Les broyeurs à tambour peuvent renfermer une charge de broyage telle que des boulets ou des barres, qui sont libres de se déplacer à l'intérieur du cylindre. Le contact entre cette charge et les parois engendre leur mise en mouvement, la majeure partie de l'énergie étant utilisée pour déplacer la charge broyante.

Il existe trois types de broyeurs culbuteurs, tous convenants aussi bien à une utilisation en milieu sec qu'en milieu humide.

- Broyeurs à Barres (Rod Mills) ;
- Broyeurs autogène (Autogenous Mills) ;
- Broyeurs à boulets (Ball Mills) ;

I.2.1. Broyeurs à barres

Dans ce cas, on utilise des barres comme corps broyants au lieu de boulets. Ces barres sont habituellement fabriquées à partir d'acier très résistant, avec une haute teneur en carbone.

En raison de la forme géométrique particulière des éléments de broyage, le broyeur à barres produit des granulats qui sont généralement de taille plus importante et présentent une plus grande diversité. (Figures I.1 et I.2).



Figure I.1 : (a) Broyeur à barres, (b) Barres en acier haute résistance



Figure I.2 : Vue intérieure du broyeur à barres

Il existe également des broyeurs polyvalents sur le marché qui combinent l'utilisation de boulets et de barres.

I.2.2. Broyeurs semi-autogène (SAG)

Les broyeurs SAG (figure I.3) sont souvent utilisés comme étape primaire dans le processus de broyage dans les opérations de traitement des minéraux. Après le broyeur SAG, le minerai concassé est généralement broyé plus finement dans un broyeur à boulets ou un broyeur

à barres pour atteindre la taille de particule souhaitée. Dans ce cas, les particules de minerai et les grosses roches dans le broyeur agissent comme des boulets de broyage, ce qui fait référence au terme "autogène". Dans certains cas, surtout si le minerai n'est pas assez dur pour se fragmenter seul, des boulets d'acier sont ajoutés au broyeur (broyage semi-autogène).

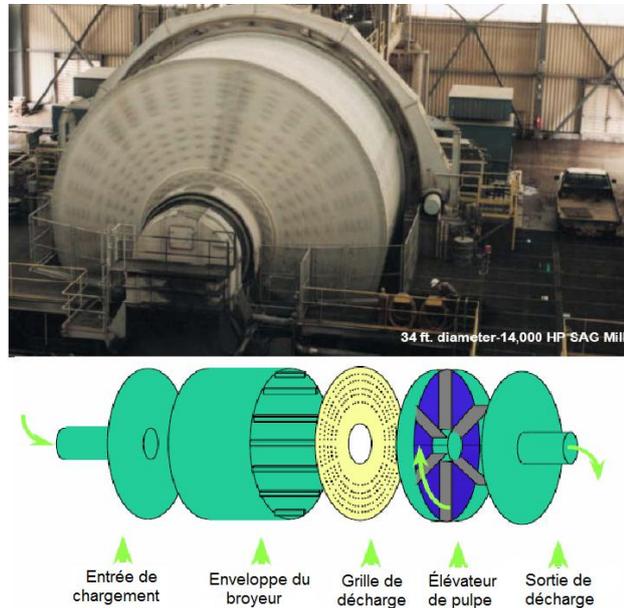


Figure I.3 : Broyeur semi-autogène (SAG)

I.2.3. Broyeurs à boulets

Ce sont des équipements utilisés dans l'industrie pour réduire la taille des particules solides. Ils sont largement utilisés dans le processus de broyage fin dans diverses industries, y compris l'industrie du ciment (broyage du clinker), des minéraux, des produits chimiques, des matériaux de construction, etc.

Ils sont constitués d'un tambour horizontal partiellement chargé avec le matériau à concasser et les corps broyants (figure I.4). L'intérieur du broyeur est doté de lifters (barres releveuses) pour soulever les boulets, facilitant ainsi leur chute sur le matériau à broyer.



Figure I.4 : Vue intérieur du broyeur à boulets

Les corps broyants sont généralement des boulets de différents matériaux. Le taux de remplissage du broyeur en boulets représente 30% du taux global.

Ce type de broyeur peut être divisé en compartiments, chaque chambre étant équipée de boulets de taille et de quantités différentes. Cette configuration vise à optimiser le processus en fonction de la taille du produit traversant chaque chambre (figure I.5).

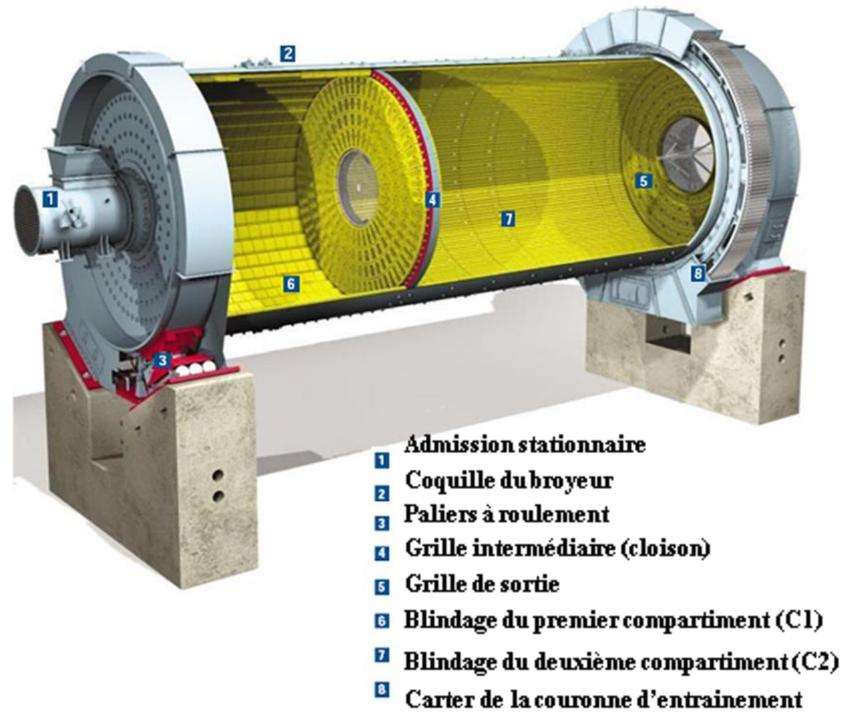


Figure I.5 : Composantes du broyeur à boulets à compartiments

I.3. Généralités sur les boulets de broyage

Les boulets de broyage sont les composants clé dans un broyeur à boulets. Ils doivent être fabriqués de manière à offrir les meilleures performances possibles en termes de taux d'usure et de rapport de transfert de broyage au coût (figure I.6).



Figure I.6 : boulets de broyage

I.3.1. Production de boulets de broyage

Les boulets sphériques sont meilleurs pour broyer les grosses particules par impact en raison de leur point de contact entre les boulets de broyage et le minerai.

Les fabricants de boulets adoptent diverses techniques de production, lesquelles sont déterminées par les caractéristiques, les dimensions et la composition chimique du produit. Les principales techniques de formage des boulets sont le forgeage à froid et à chaud, le forgeage au rouleau et au rouleau incliné, et le moulage en matrice et au sable. Les balles destinées à différents environnements de broyage nécessitent des propriétés différentes, ce qui influence le choix du procédé de fabrication (Jankovic, Wills et al. 2016).

I.3.1.1. Boulets de broyage de fonderie

Les boulets de broyage sont coulés en fonte blanche. Cette dernière est élaborée dans des fours à induction à haute fréquence à 1600°C. La fonte liquide ainsi préparée, est reçue dans des poches de fonderie à 1500°C, garnis de briques réfractaires.

Les poches, sont vidées dans des moules en sable à vert confectionnés au préalable et destinés à la réalisation des boulets de broyage (figure I.7). Ces pièces sont fabriquées avec différents diamètres qui varient entre 20mm et 120 mm.

Cette méthode de fabrication est moins coûteuse que la forge, mais elle donne des boulets avec une microstructure moins homogène et une résistance à l'usure plus variable.



Figure I.7 : Confection de moules en sable pour la production des boulets de broyage

I.3.1.2. Boulets de broyage en acier forgé

Les boulets de broyage forgés sont fabriqués à partir d'une barre d'acier qui est chauffée et martelée jusqu'à la forme souhaitée. Ce processus de fabrication garantit l'obtention de boulet présentant une microstructure uniforme et une excellente résistance à l'usure. Le processus de fabrication des boulets de broyage par forgeage comprend les étapes suivantes :

- Chauffe,
- Forge par estampage,
- Traitement thermique.

La chauffe de l'acier est régulière et uniforme (figure I.8), avec la même température de forgeage du noyau et de la périphérie, de sorte que pendant le processus de forgeage la déformation se fasse dans toute la structure du boulet.



Figure I.8 : Chauffage uniforme

Le forgeage (figure I.9) donne sa forme au boulet et le soumet à des forces de compression et de traction. Ces forces améliorent les propriétés suivantes :

- Orientation des fibres : L'orientation longitudinale des fibres dans la barre est transformée en une orientation sphérique par le forgeage. Cette nouvelle orientation équilibre les propriétés mécaniques radialement, ce qui augmente la résistance des boulets.
- Taille des grains : Le forgeage affine la taille des grains, ce qui améliore les propriétés mécaniques du produit.
- Compactage du noyau : Le forgeage compacte le noyau des boulets, ce qui augmente leur résistance à la cassure par coups.



Figure I.9 : Forge par estampage

Après le processus de forgeage, les boulets sont soumis à un cycle de traitement thermique (figure I.10) de trempe et de revenu pour en améliorer les propriétés mécaniques.

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



Figure I.10 : Traitement thermique

Les boulets de broyage forgés ont généralement une dureté plus élevée que les boulets de broyage moulés. Cela est dû à la microstructure homogène des boulets forgés, qui est plus résistante à l'abrasion, avec une dureté volumique de 57 à 64HRC. Ils ont également une meilleure résistance aux chocs que les boulets de broyage moulés. Cela est dû à la structure plus compacte des boulets forgés, qui est moins susceptible de se fissurer sous l'impact, avec une ténacité aux chocs supérieure à $12\text{J}/\text{cm}^2$.

I.3.2. Matériaux et composition des boulets de broyage

Les boulets de broyage sont les principaux composants du processus de broyage dans un broyeur à boulets. Des recherches ont été menées pour identifier les matériaux les plus adaptés à la fabrication du boulet de broyage améliorés. Les bons boulets de broyage doivent avoir une dureté élevée, une ténacité à la rupture, une résistance à l'usure et une résistance à la corrosion, mais en même temps, ils doivent avoir une ductilité suffisante pour minimiser les ruptures soudaines et les éclats. La dureté élevée est nécessaire pour que les boulets de broyage puissent briser les particules de minerai. Une ténacité à la rupture élevée est également nécessaire pour que les boulets de broyage puissent résister aux chocs et aux contraintes sans se casser. Une résistance à l'usure élevée est nécessaire pour que les médias de broyage puissent durer dans un environnement agressif de broyage. Une résistance à la corrosion est nécessaire pour que les médias de broyage ne se détériorent pas dans les milieux corrosifs. Enfin, une ductilité suffisante est nécessaire pour que les médias de broyage puissent se déformer sous contrainte sans se rompre brusquement. Cela permet de minimiser les éclats et les ruptures soudaines qui peuvent endommager le broyeur à boulets et les particules de minerai. Le tableau I.1 présente la composition chimique des boulets de broyage selon Chenje et al. (2004).

Tableau I.1 : Composition chimique des boulets de broyage typiques (% en poids)
(Chenje, Simbi et al. 2004)

Matériau des boulets	C	Mn	Si	Cr	S	P
Acier faiblement allié	0.50	1.07	0.43	1.15	0.02	0.02
Acier eutectoïde	0.85	0.65	0.69	<0.15	0.01	0.01
Fonte grise à chrome moyen	3.00	0.57	0.61	17.81	0.04	0.02
Fonte brute	3.00	0.55	0.62	0.58	0.02	0.02
Semi-acier moulé	2.18	0.68	0.87	<0.15	0.02	0.02

I.3.2.1. Boulets de broyage en fonte

La fonte peut être de la fonte grise ou de la fonte blanche, mais les fontes blanches sont couramment utilisées dans les applications d'usure abrasive impliquées dans le processus de broyage. Les boulets de broyage en fonte sont l'un des anciens boulets utilisés en premier dans le traitement des minéraux (Lameck, Kiangi et al. 2006). Ces fontes contenaient des carbures de fer. Dans les broyeurs à boulets de grand diamètre, elles présentaient une résistance moyenne à l'abrasion et une ténacité au choc insuffisante. À ce jour, le reste du monde a abandonné l'utilisation de la fonte non alliée. Vers les années 1960, des boules en fonte améliorées ont été

fabriquées en fonte ductile à manganèse moyen (5-6% Mn) qui a été appliquées dans l'industrie minière. Cependant, ces boulets présentaient un grave éclatement par fatigue et des bris en service causés par l'austénite résiduel et les carbures eutectiques dans sa matrice, mais ont ensuite été améliorées par l'étude de la fonte ductile martensitique, de la fonte ductile bainitique, de la fonte ductile austempérée et de la fonte ductile perlitique telle qu'elle est coulée. Les boulets résultants avaient une coopération appropriée entre la résistance à la fatigue par impact et la résistance à l'usure abrasive. Elles présentaient également une casse moindre, un éclatement par fatigue moindre et des coûts de production réduits (Kotake, Daibo et al. 2004).

Les boulets en fonte à haute teneur en chrome (HCCI), développés par Rahman et al. (Rahman, Sharif et al. 2010) ont démontré une résistance à l'usure exceptionnelle, ce qui les rend adaptés à un large éventail d'applications dans les industries du traitement des minerais, du charbon et du ciment. Le HCCI est un alliage ferreux contenant 11 à 35 %pds de chrome et 1,8 à 7,5 %pds de carbone. Sa remarquable résistance à l'usure résulte de la proportion élevée de carbures de chrome durs présents dans sa structure, qui se forment in situ pendant le refroidissement de l'état fondu, dans une matrice ductile plus tendre. Lors de la coulée, les boulets HCCI présentent une dureté, une ténacité à l'impact et une résistance à l'usure remarquables.

Ngqase et al. ont fourni un aperçu des alliages de fonte blanche, notamment des alliages de fonte blanche à haute teneur en chrome. Ils ont abordé les classifications, les normes, les principaux usages et les nouveaux développements de ces alliages (Ngqase and Pan 2020).

La fonte blanche est le seul membre de la famille des fontes dans lequel le carbone est présent uniquement sous forme de carbure. En raison de l'absence de graphite, elle a un aspect clair. La présence de différents carbures rend les fontes blanches extrêmement dures et résistantes à l'abrasion, mais très fragiles. Les fontes blanches sont largement utilisées dans les applications d'usure abrasive impliquant le broyage, le meulage, le fraisage et la manutention de matériaux abrasifs tels que les minéraux et les minerais, à la fois secs et sous forme de bouillies.

La fonte blanche peut être divisée en trois classes (Jiyang 2011):

- Fonte blanche normale - cette fonte contient du C, Si, Mn, P et S, sans autres éléments d'alliage

- Fonte blanche à faible teneur en alliage - la teneur des éléments d'alliage est inférieure à 5 %

- Fonte blanche à haute teneur en alliage - la teneur des éléments d'alliage est supérieure à 5%.

Les trois classes de fontes résistantes à l'abrasion couvertes par la norme ASTM A532-87 sont données au tableau I.2.

Tableau I.2 : Composition (en % en poids) des fontes résistantes à l'abrasion selon la norme ASTM A532-87(Jiyang 2011)

Classe	Type	Désignation	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
I	A	Ni-Cr-HC	2.8-3.6	2	0.8	0.3	0.15	1.4-4.0	1	3.3-5.0	-
	B	Ni-Cr-LC	2.4-3.0	2	0.8	0.3	0.15	1.4-4.0	1	3.0-5.0	-
	C	Ni-Cr-GB	2.5-3.7	2	0.8	0.3	0.15	1.0-1.5	1	4	-
	D	Ni-HiCr	2.5-3.6	2	2	0.1	0.15	7.0-11	1.5	4.5-7.0	-
II	A	12%Cr	2.0-3.3	2	1.5	0.1	0.06	11-14	3	3	1.2
	B	15%Cr-Mo	2.0-3.3	2	1.5	0.1	0.06	14-18	3	3	1.2
	C	20%Cr-Mo	2.0-3.3	2	1.0-2.2	0.1	0.06	18-23	3	3	1.2
III	A	2%Cr	2.3-3.3	2	1.5	0.1	0.06	23-30	3	3	1.2

I.3.2.2. Boulets de broyage en acier

Les boulets de broyage en acier sont généralement forgés et trempés à l'eau. Leurs propriétés sont régies par leur teneur en carbone, leur teneur en éléments d'alliage et leur traitement thermique.

A. Acier faiblement allié

Aujourd'hui, la plupart des boulets de broyage commerciaux sont produits à partir d'aciers martensitiques faiblement alliés, qui peuvent être forgés ou moulés. Ils peuvent s'adapter à la plupart des conditions de broyage et présentent un rapport coût-usure favorable. Les aciers faiblement alliés à haute teneur en carbone sont utilisés car ils sont les plus résistants, les plus durs et les moins ductiles. Ils offrent donc une résistance élevée à l'usure abrasive par rapport aux autres aciers lorsqu'ils sont utilisés à l'état trempé(Usman, Fonna et al. 2021).

La plupart des usines de flottation utilisent des boulets de broyage forgés à faible teneur en carbone et à faible alliage avant la flottation en raison de leur faible coût par rapport aux autres boulets, mais ils présentent des problèmes dans le circuit de flottation car ils forment une cellule galvanique constituée d'un système de médias de broyage-minéral sulfuré. Habituellement, les boulets d'acier forgé agissent comme anode tandis que le minéral sulfuré sera la cathode.

B. Acier à haute teneur en alliages

Les boulets de broyage en acier à haute teneur en alliages sont des matériaux utilisés dans les broyeurs pour réduire la taille des particules de minerai. Ils sont fabriqués à partir d'un alliage d'acier qui contient une forte teneur en éléments d'alliage tels que le chrome, le molybdène et le

manganèse. Ces éléments d'alliage augmentent la résistance à l'usure du boulets de broyage, ce qui lui permet de durer plus longtemps dans l'environnement abrasif du broyeur.

Les boulets de broyage en acier à haute teneur en alliages sont généralement plus coûteux que les boulets de broyage en acier faiblement allié, mais ils offrent une durée de vie plus longue et un meilleur rendement de broyage. Ils sont utilisés dans de nombreuses d'applications, notamment le broyage de minerais, de roches et de métaux.

I.3.3. Taille des boulets de broyage

La taille des boulets utilisées dans le broyage doit être suffisamment grande pour briser les particules de minerai les plus grosses et les plus dures. La taille des boulets de broyage dépend de plusieurs facteurs, notamment la granulométrie de l'alimentation, les dimensions du broyeur et les propriétés du minerai. En général, les boulets plus grosses broient efficacement les particules de minerai grossier et les boulets plus petites broient plus efficacement les particules fines (Cho, Kwon et al. 2013). Les boulets plus gros cassent les particules par impact, tandis que les boulets plus petits cassent par abrasion.

(Kotake, Daibo et al. 2004) ont étudiés les effets du diamètre du boulet de broyage et de la taille des particules d'alimentation sur la constante de vitesse de broyage des matériaux. La tendance dans la variation de la constante de vitesse de broyage en fonction de la taille de l'alimentation était similaire pour tous les matériaux utilisés, mais était indépendante du diamètre du boulet.

La taille des boulets de broyage, selon le tableau I.3, varie de 20 à 150 mm.

Tableau I.3 : Diamètre nominal des boulets de broyage

Diamètre Nominal (mm)	Tolérance dimensionnelle (mm)	Sphéricité%
Ø 20	±2	≤ 2.0
Ø 25		
Ø 30		
Ø 35		
Ø 40		
Ø 50		
Ø 60	+3, -2	≤ 3.0
Ø 70		
Ø 75		
Ø 80		
Ø 90	+4, -3	≤ 4.0
Ø 100		
Ø 120		
Ø 130	≤ 5.0	≤ 5.0
Ø 150		

I.3.4. Mouvement de la charge broyante

Dans un broyeur à boulets, la dynamique de la charge broyante revêt une importance cruciale, car elle exerce une influence significative sur le processus de broyage et la qualité finale du produit broyé.

Comme illustré dans la figure I.11 a, le régime est qualifié de « régime en cascade ». Dans ce cas, la charge broyante roule à 60% de la vitesse critique (faible vitesse) jusqu'au point bas du cylindre. Il se produit un broyage par abrasion des granulats en raison de la pression exercée par cette charge broyante. Cette action entraîne la génération de particules fines. Ce mode de fonctionnement n'est généralement pas privilégié en raison de l'usure importante du broyeur provoquée par l'abrasion, ce qui peut entraîner des dépenses supplémentaires pour son entretien.

En élevant la vitesse de rotation du broyeur à 90 % de sa vitesse critique (figure I.11b), il atteint le régime de cataracte. Dans cette situation, la charge de broyage est propulsée sur les agrégats à broyer suivant des trajectoires paraboliques, impactant et se dispersant sur ces derniers.

À une vitesse équivalente à 100% de la vitesse critique, le régime est dénommé centrifuge. À cette vitesse, le processus de broyage devient inefficace, entraînant le minerai et les boulets de broyage à être pressés contre les parois du broyeur (figure I.11 c).

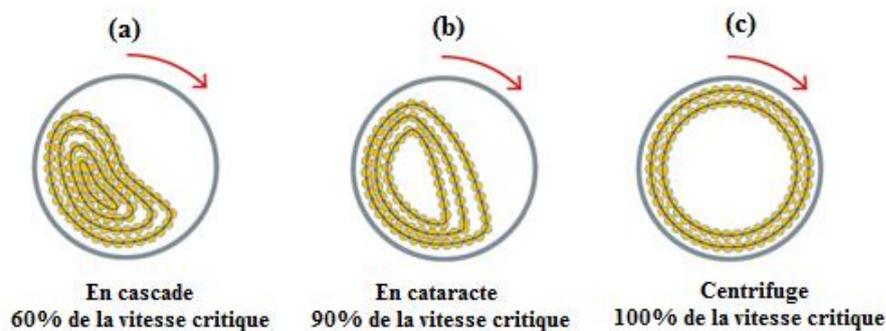


Figure I.11 : Influence de la vitesse de rotation du broyeur sur son régime de fonctionnement

La vitesse critique est déterminée en considérant un boulet, qui est soulevé dans la coquille d'un broyeur de rayon R (mètres), tournant à N (tr/min) (figure I.12). Le boulet abandonne sa trajectoire circulaire pour une trajectoire parabolique au point P lorsque le poids du boulet est juste équilibré par la force centrifuge, c'est-à-dire lorsque :

$$mV^2/R = mg \cos \alpha \quad \text{I.1}$$

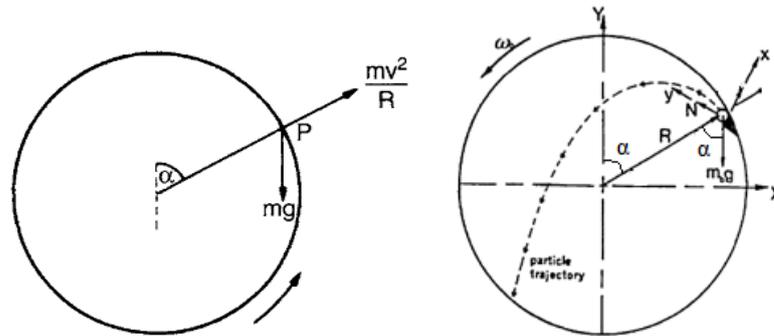


Figure I.12 : Caractérisation de la vitesse critique

Où m est la masse du boulet (kg), V est la vitesse linéaire de boulet (ms^{-1}) et g est l'accélération due à la gravité (ms^{-2}).

$$V = \frac{2\pi RN}{60} \tag{I.2}$$

$$\cos \alpha = \frac{4\pi^2 N^2 R}{60^2 g} \tag{I.3}$$

$$\cos \alpha = 0.0011 N^2 R \tag{I.4}$$

Lorsque le diamètre du boulet est pris en compte, le rayon de la trajectoire extérieure est $(D - d)/2$, D étant le diamètre du broyeur et d représente le diamètre du boulet, exprimés en mètres.

$$\cos \alpha = \frac{0.0011 N^2 (D-d)}{2} \tag{I.5}$$

La vitesse critique du broyeur se produit lorsque $\alpha = 0$, c'est-à-dire lorsque que le boulet abandonne sa trajectoire circulaire au point vertical le plus élevé. En ce point, $\cos \alpha = 1$. Donc

$$N_c = \frac{42.305}{\sqrt{D-d}} \text{ (tr. min}^{-1}\text{)} \tag{I.6}$$

En pratique, les broyeurs sont généralement exploités à des vitesses situées entre 50 et 90 % de leur vitesse critique, cette sélection étant motivée par des considérations économiques (Napier-Munn 2005). Trois zones sont identifiées pendant le processus de broyage, comme le montre la figure I.13.

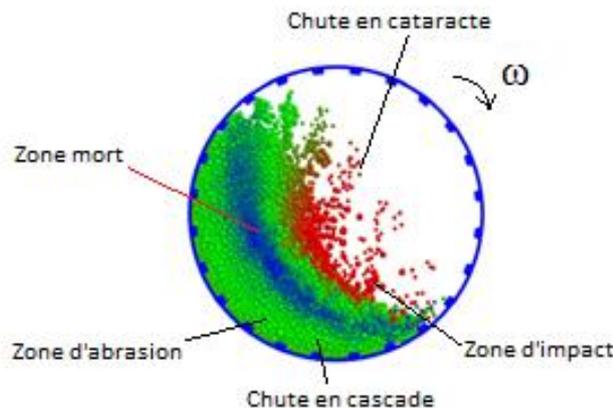


Figure I.13 : Zones distinguées lors du procédé de broyage

A. Zone d'abrasion

Cette zone représente l'emplacement où se produit la réduction maximale des dimensions des particules jusqu'à atteindre une taille infiniment petite. Cette réduction s'effectue soit par attrition, par abrasion, ou par compression.

B. Zone d'impact

Dans cette région, les boulets accélèrent la fragmentation du minerai, qui est ensuite soumis au processus de broyage dans la zone d'abrasion, avant d'être dispersé dans la charge active. Une fraction de l'énergie cinétique gagnée par les boulets est convertie en énergie de concassage, tandis que l'autre partie est entièrement transformée en chaleur et en énergie de choc, entraînant l'usure des lifters ou la déformation des boulets. Cette conversion d'énergie est étroitement liée à la vitesse de rotation du broyeur.

C. Zone morte (vitesse des boulets nulle)

La zone morte est la zone où les boulets sont à l'arrêt, là où les particules sont trop denses pour être emportées par le mouvement de rotation du broyeur.

I.3.5. Mécanisme de broyage

Le mécanisme de broyage dans un broyeur à boulets est basé sur l'impact et l'abrasion. Les boulets, qui sont généralement en acier ou en fonte, sont soulevés par la rotation du broyeur et chutent ensuite sur le matériau à broyer. Les boulets frappent le matériau avec une force importante, ce qui le casse en petits morceaux. En plus de l'impact, les boulets exercent également une force d'abrasion sur le matériau.

La vitesse de rotation des boulets et la taille des boulets sont des facteurs importants qui influencent le mécanisme de broyage. Une vitesse de rotation plus élevée entraîne un impact plus important des boulets, ce qui conduit à un broyage plus fin. Des boulets plus gros exercent une force d'abrasion plus importante, ce qui conduit également à un broyage plus fin. Sur la figure I.14, nous voyons que les particules peuvent être cassées de différentes manières :

- a) Elles sont éjectées sur la paroi du tambour (figure I.14 a),
- b) Elles sont écrasées entre la paroi et un boulet qui s'approche (figure I.14b),
- c) Elles sont entre deux corps de broyage qui peuvent se comprimer, se cisailer ou s'user la particule (figure I.14c),
- d) Elles subissent l'impact et / ou la charge pondérale d'un boulet avec un lit de particules (figure I.14 d).

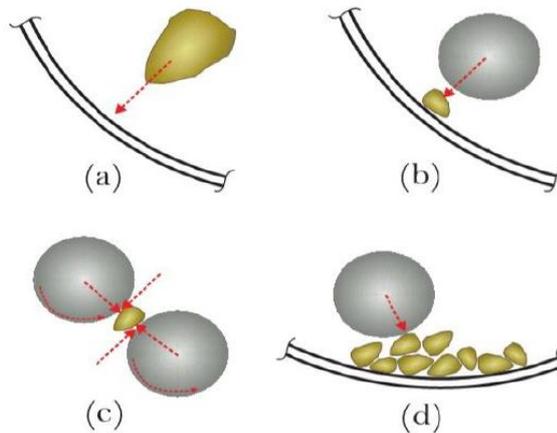


Figure I.14 : Types de charges mécaniques que les boulets peuvent subir

I.4. Conclusion

Ce chapitre a présenté une exploration approfondie du procédé de broyage et des boulets de broyage, éléments essentiels dans de nombreuses industries.

En premier lieu, les différents types de broyeurs à tambour ou culbuteurs ont été décrits, comprenant les broyeurs à barres, les broyeurs semi-autogènes (SAG) et les broyeurs à boulets. Chaque type de broyeur présente des caractéristiques et des applications spécifiques, s'adaptant à divers besoins de broyage.

Ensuite, une analyse détaillée des médias de broyage a été fournie, en se concentrant sur la production des boulets de broyage, les matériaux et la composition de ces médias, leur taille et leur mouvement au sein de la charge broyante. Le mécanisme de broyage a également été expliqué, illustrant les forces et les interactions qui contribuent à la fragmentation des matériaux.

En conclusion, ce chapitre a posé les bases d'une compréhension solide du broyage et des boulets de broyage. Les connaissances acquises ici sont essentielles pour sélectionner le broyeur et les médias de broyage adéquats pour une application donnée, garantissant ainsi un processus de broyage optimal en termes d'efficacité, de performance et de rentabilité.

Chapitre II

Dégradation des boulets de broyage

II.1. Introduction

Les boulets de broyage, éléments essentiels dans les processus de broyage industriel, sont soumis à de multiples formes de dégradation au cours de leur cycle de vie. Cette introduction explorera les différents mécanismes de dégradation qui affectent les boulets de broyage, tant lors de leur fabrication que pendant leur exploitation.

Nous commencerons par examiner les mécanismes de dégradation qui surviennent lors de leur fabrication, tels que les défauts de moulage et les microfissures. Ensuite, nous nous pencherons sur les dégradations qui se produisent pendant l'exploitation, en nous concentrant sur les trois principaux types d'usure : la corrosion, l'usure abrasive et l'usure par impact. Enfin, nous passerons en revue les différents tests d'usure utilisés pour évaluer la résistance des boulets de broyage à ces phénomènes de dégradation.

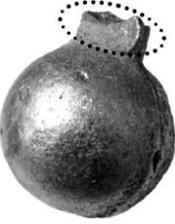
II.2. Défauts identifiés lors du processus de fabrication des boulets

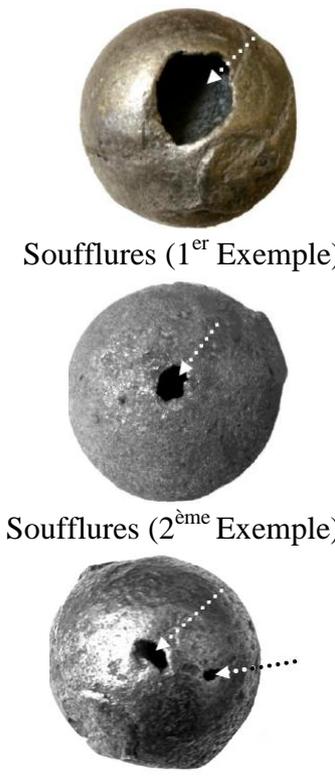
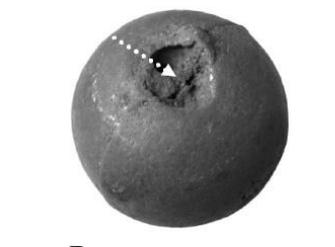
Les pièces moulées doivent être exemptes de défauts, présenter la forme et les dimensions requises, et avoir une résistance suffisante pour résister aux sollicitations.

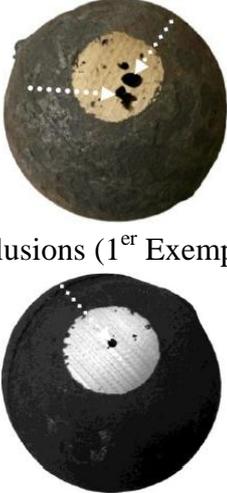
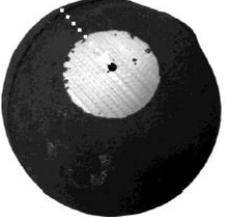
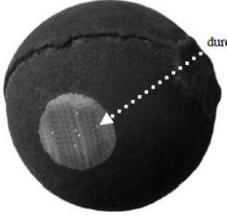
Dans ce chapitre, nous identifions les principaux défauts de fonderie affectant les boulets de broyage lors de leur fabrication, leurs causes et les moyens de les éviter. Les défauts visibles à l'œil nu sont les plus courants (tableau II.1)

Tableau II.1 : Principaux défauts de fonderie dans les boulets de broyage

Défaut	Causes possibles	Remèdes
 <p>Affaissement d'un boulet de broyage</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Surchauffe exagérée du moule supérieur, • Temps de remplissage lent. 	<ul style="list-style-type: none"> • Réduire le temps de remplissage. • Réduire la température de coulée.

 <p>Arrachement (1^{er} Exemple)</p> <p>Arrachement (2^{ème} Exemple)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Propriétés mécaniques du sable insuffisantes (faible résistance au cisaillement du sable). 	<ul style="list-style-type: none"> • Revoir la qualité du sable de coulage (élever la résistance au cisaillement).
 <p>Déformation (1^{er} Exemple)</p> <p>Déformation t (2^{ème} Exemple)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Boulet non dense (présence de cavités internes), • Faible dureté, • Retrait irrégulier, causé par un décochage prématuré. 	<ul style="list-style-type: none"> • Eviter les cavités internes, • S'assurer de la conformité de la dureté, • Laisser la pièce se refroidir le temps nécessaire dans le moule.
 <p>Désaxage</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mauvaise réalisation du modèle, • Machine à mouler défectueuse. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne réalisation du modèle, • Réparation de la machine à mouler.
 <p>Bavure</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mauvaise fermeture du moule. 	<ul style="list-style-type: none"> • Soigner l'exécution des modèles et des moules, • Contrôler leurs dimensions, • Assurer une bonne fermeture du moule (cramponnage).

 <p>Soufflures (1^{er} Exemple)</p> <p>Soufflures (2^{ème} Exemple)</p> <p>Piqûres et soufflures en même temps</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Teneur en gaz du bain trop élevée (matières premières, mode de fusion, atmosphère, etc...) ; le gaz dissous se dégage lors de la solidification, • S'agissant d'acier moulé, de fonte : formation d'oxyde de carbone, par réaction du carbone avec l'oxygène présent comme gaz ou à l'état d'oxyde. ✓ Trop forte humidité des moules, ✓ Noirs et couches ayant une trop forte tendance à libérer des gaz. • Gaz retenu mécaniquement ✓ Insuffisance d'évacuation de l'air et des gaz remplissant l'empreinte, ✓ Insuffisance de perméabilité du moule, ✓ Entraînement d'air par suite de turbulence dans le jet de coulée. 	<ul style="list-style-type: none"> • Prévoir largement l'évacuation de l'air et des gaz de l'empreinte (événements et tirage d'air), • Augmenter la perméabilité du moule, • Contrôler le système de coulée, • Dans le cas du moulage à vert, contrôler l'humidité du sable, • Employer des noirs ou des couches à réaction réductrice, • Engorger la coulée et réduire la hauteur de chute.
 <p>Retassure externe</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Humidité du sable trop élevée, • Contraction de volume subie par le métal en passant de l'état liquide à l'état solide, • Les gaz dégagés par le moule. 	<ul style="list-style-type: none"> • Respecter le taux d'humidité, • Utiliser un alliage ne présentant qu'une contraction de solidification faible ou nulle, • Limiter, dans la mesure du possible, la température de coulée afin de réduire la contraction à l'état liquide, • Augmenter la rigidité du moule soit par serrage plus intense des moules à vert, soit par passage au sable étuvé au sable durci ou à la coulée en coquille.

 <p>Inclusions (1^{er} Exemple)</p>  <p>Inclusions (2^{ème} Exemple)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Grains de sable introduits involontairement dans le métal, • Corps étrangers (morceaux de pièce), • Eléments d'alliage (par exemple les ferroalliages) qui ne se sont pas complètement dissous dans le bain. 	<ul style="list-style-type: none"> • Veiller à la propreté des charges, éliminer les métaux étrangers par nettoyage du moule avec l'air comprimé, • Employer des éléments d'alliage en morceaux de petite dimension. Ne pas faire les additions à un moment trop proche de la coulée.
 <p>Ecaillage</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Surchauffe et temps de maintien lent. 	<ul style="list-style-type: none"> • Respecter le temps de maintien, • Respecter température de chauffage.
 <p>Manque de dureté</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Application incorrecte des traitements thermiques, • Mauvaise composition chimique. 	<ul style="list-style-type: none"> • Respecter les consignes de traitement, • Respecter le temps de maintien, • Respecter la température de chauffage.
 <p>Fissure horizontale</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Présence de fissures internes, • Sévérité du milieu de trempe trop élevée 	<ul style="list-style-type: none"> • Respecter les températures de traitement, • Éviter la trempe brutale (utiliser l'air soufflé au lieu de l'huile ou l'eau).
 <p>Rupture d'un boulet au cours d'exploitation</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pièce fragile, • Présence de tensions internes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Assurer un bon traitement thermique, • Vérifier la structure (martensitique > 96%), • Éviter la présence d'austénite exagérée.

II.3. Anomalies identifiées au cours de l'exploitation

L'usure est la dégradation progressive d'une surface due à l'action de forces mécaniques, chimiques ou thermiques.

Les divers types d'usure des surfaces des boulets soumises à des sollicitations cycliques peuvent être regroupés en plusieurs catégories.

- L'usure par corrosion (fatigue-corrosion)
- L'usure par abrasion (fatigue-abrasion)
- L'usure par impact (fatigue-impact)

Le taux d'usure des boulets de broyage dans un broyeur à boulets est un facteur important qui affecte l'efficacité et le coût du processus de broyage. Il est influencé par divers facteurs, notamment la composition, la dureté et la structure de phase des boulets, ainsi que les propriétés corrosives et abrasives de la pulpe à broyer.

Les mécanismes d'usure impliqués dans un broyeur à boulets sont complexes et interagissent entre eux, ce qui rend difficile de quantifier précisément leurs contributions individuelles (Johnson 1987)

II.3.1. Corrosion

La corrosion est une interaction entre un matériau métallique et son environnement qui entraîne une dégradation du matériau, c'est-à-dire des modifications de ses propriétés susceptibles de conduire à un dysfonctionnement du système technique auquel il participe (norme NF EN ISO 8044).

L'étude de la corrosion se situe à croisée de divers domaines : Electrochimie, physique du solide, métallurgie, chimie, physique, thermodynamique. Outre son caractère scientifique interdisciplinaire, elle répond à un enjeu industriel important. La corrosion dépend du milieu et du matériau comme illustré à la figure II.1.

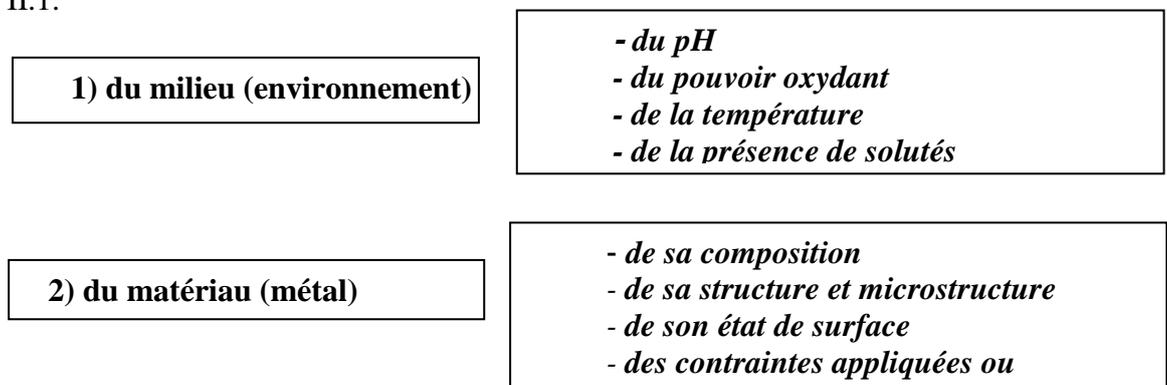


Figure II.1 : Les principaux facteurs de corrosion

La corrosion peut se produire de différentes manières, notamment sous forme de corrosion sèche et humide.

La corrosion sèche se produit dans un environnement où l'humidité est faible ou inexistante. Elle peut être causée par des réactions chimiques avec des gaz atmosphériques tels que l'oxygène, le dioxyde de soufre ou le chlorure d'hydrogène et se manifeste sous forme de corrosion atmosphérique, où les métaux réagissent avec les composants gazeux de l'air pour former des oxydes ou d'autres composés (figure II.2).

La corrosion humide se produit en présence d'un électrolyte (eau ou d'humidité) facilitant les réactions électrochimiques qui conduisent à la corrosion.. C'est le type de corrosion le plus courant et le plus destructeur.

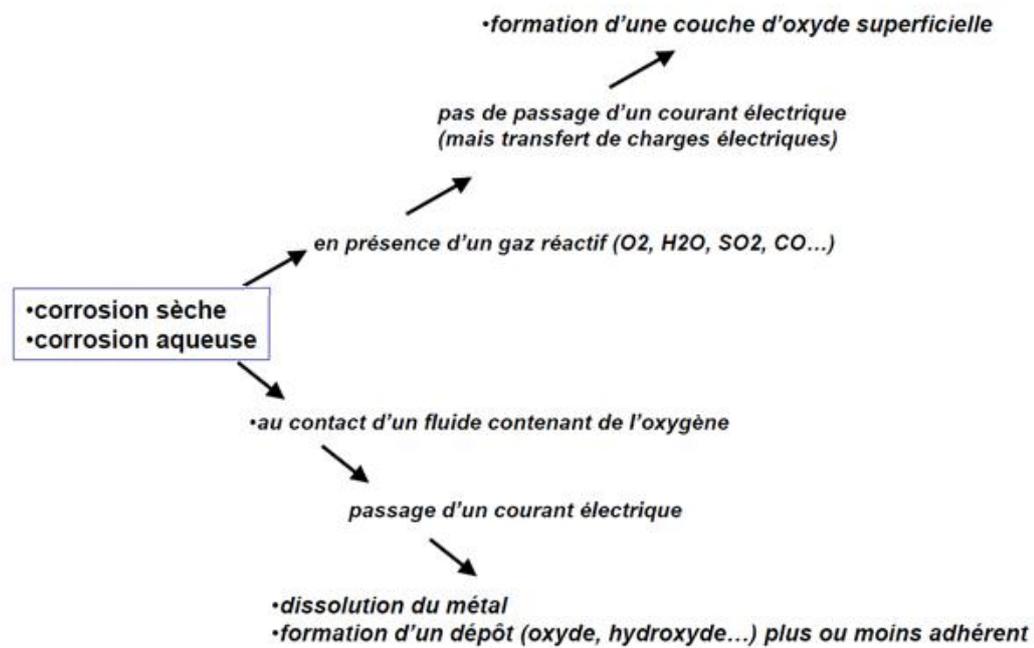


Figure II.2 : Corrosion sèche et humide

II.3.2. L'usure par corrosion des boulets de broyage

L'usure par corrosion est la perte de matière à la surface des boulets de broyage en raison d'interactions galvaniques entre le minerai (cathode) et les boulets de broyage (anode) ou entre les points abrasés et non abrasés à la surface des boulets de broyage en raison de différences de potentiels électrochimiques (Aldrich 2013) comme illustré à la figure II.11.

L'usure par corrosion est plus importante dans le broyage humide car l'eau favorise la présence d'oxygène dans le broyeur. Elle est également plus importante lorsque les supports de broyage sont en contact avec des minerais abrasifs ou électroactifs.

L'usure des boulets de broyage est influencée par plusieurs facteurs, notamment la composition du minerai, les propriétés des boulets et les conditions du processus, comme le pH. Rajagopal and Iwasaki 1992 ont proposé une relation de proportionnalité directe entre la résistance à la corrosion des matériaux de broyage de toute composition et le pH de la boue. Le pH, ainsi que le potentiel de la solution métallique et la composition de la solution métallique, jouent un rôle important dans le maintien d'une fine couche passive à faible conductivité électrique qui est stable sur la surface des boulets, renforçant ainsi la résistance à la corrosion.

Dans certains cas, la corrosion est accélérée par l'abrasion lorsqu'elle produit des produits qui se fixent faiblement à la surface et sont facilement abrasés. L'abrasion y parvient en brisant le film passif fragile et superficiel qui protège les alliages métalliques contre la corrosion. Le taux d'usure aurait alors tendance à dépendre du processus de repassivation.

L'usure par corrosion peut entraîner une diminution de la taille des supports de broyage, ce qui peut avoir un impact négatif sur l'efficacité du broyage est influence la longévité des médias de broyage et du blindage. Elle peut également entraîner une augmentation de la consommation de supports de broyage, ce qui peut entraîner des coûts supplémentaires.

Par conséquent, l'usure par corrosion des boulets est plus importante dans le broyage des minerais sulfurés. En effet, la plupart des minéraux sulfurés sont plus nobles que les médias utilisés lors du broyage, ce qui entraîne un couple galvanique entre le boulet et le minéral sulfuré. Ainsi, cela augmente la dissolution des ions ferreux du milieu, qui sont généralement précipités à la surface des minéraux sulfurés.

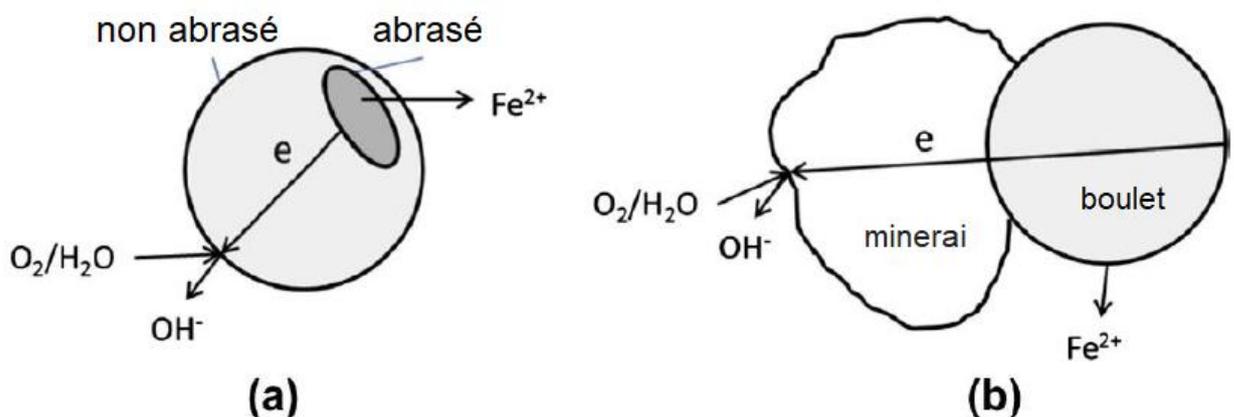


Figure II.3 : Représentation de l'usure par corrosion pour (a) une cellule d'abrasion différentielle (b) une cellule galvanique de broyage de boulets. (Aldrich 2013)

II.3.3. L'usure par abrasion

L'usure par abrasion est l'élimination de matière sur la surface des supports de broyage due à la rayure par des particules dures (figure II.12)

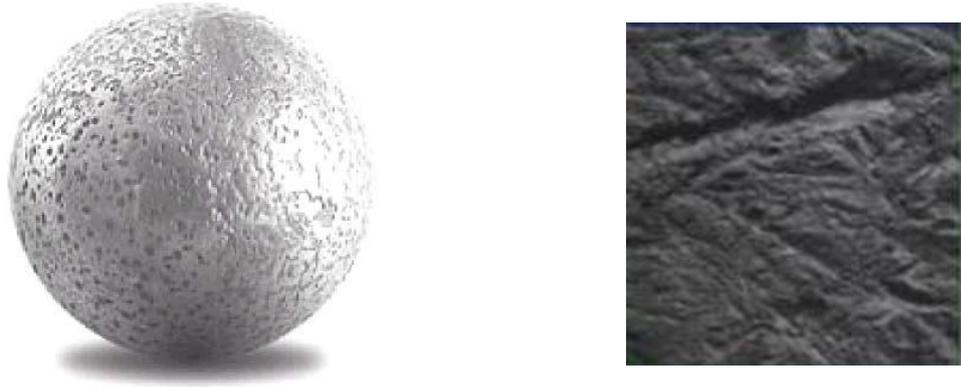


Figure II.4 : Usure abrasive des boulets de broyage

L'usure par abrasion est influencée par plusieurs facteurs, notamment :

- La composition du minerai : les minerais plus abrasifs, comme le quartz, provoquent une usure plus importante.
- La dureté des supports de broyage : les supports de broyage plus durs sont plus résistants à l'usure.
- La microstructure des supports de broyage : la microstructure des supports de broyage, notamment la présence de carbures, peut également affecter leur résistance à l'usure.

L'usure par abrasion peut entraîner plusieurs problèmes, notamment :

- Une diminution de la taille des supports de broyage : les supports de broyage usés sont plus petits et moins efficaces pour broyer le minerai.
- Une augmentation de la consommation de supports de broyage : les supports de broyage usés doivent être remplacés plus fréquemment, ce qui augmente les coûts.

Pour réduire l'usure par abrasion, il est possible de prendre plusieurs mesures, notamment :

- Choisir des supports de broyage adaptés au minerai à broyer
- Utiliser des supports de broyage à haute dureté et à bonne microstructure
- Réduire la concentration de particules dures dans le minerai

II.3.4. L'usure par impact

L'impact est un type d'usure qui se produit lorsque les supports de broyage sont soumis à des chocs répétés et à haute énergie. Il est le mécanisme d'usure le plus important dans les broyeurs à boulets, car il est responsable de la majeure partie de la perte de masse des boulets broyeurs (figure II.13). Ces chocs peuvent provoquer des fissures dans la couche superficielle durcie des supports, des ruptures des boulets (figure II.14), des déformations (figure II.15), ou entraîner la transformation de l'austénite en martensite, qui est une forme de carbone plus dure.

La martensite peut également se fissurer localement, ce qui peut entraîner une desquamation, c'est-à-dire l'écaillage de la surface des supports (figure II.16).



Figure II.5 : Usure par impact



Figure II.6 : Ruptures des boulets après un test d'impact



Figure II.7 : Déformations des boulets après un test d'impact



Figure II.8 : Ecaillage de la surface des boulets

L'impact des boulets de broyage est influencé par plusieurs facteurs, notamment la vitesse du broyeur, la taille des boulets, le diamètre du broyeur, le volume de remplissage du broyeur, le remplissage interstitiel et la taille des particules (Banisi, Langari-Zadeh et al. 2000).

Les auteurs (Van Nierop, Glover et al. 2001; Zambrano 2021) ont conclu que les broyeurs à boulets de petit diamètre (moins de 600 mm) ne subissent pas d'usure par impact. En effet, les vitesses des boulets dans ces broyeurs sont trop faibles pour provoquer des impacts significatifs. L'usure qui se produit dans ces broyeurs est donc principalement de nature abrasive, causée par le frottement des boulets contre les particules de minéral.

II.4. Tests d'usure

Le test d'usure des boulets marqués (MBWT "Marked Bead Wear Test") est un test standardisé largement utilisé pour évaluer les performances des médias. Il offre une approche fiable pour comparer les taux d'usure de différents matériaux dans des conditions identiques. Le boulet à tester est chargé dans le broyeur de l'usine en fonctionnement. Les échantillons sont pesés avant le chargement et marqués pour une récupération ultérieure. Le marquage des boulets pour la récupération peut se faire en perçant plusieurs trous ou fentes de différents nombres, tailles et géométries, ou en perçant un trou pour insérer une étiquette marquée, qui est ensuite scellée par un alliage à bas point de fusion qui fondra dans l'eau chaude, libérant l'étiquette (Jankovic, Wills et al. 2016). Le marquage est effectué avec soin pour éviter toute altération localisée de la microstructure ou des caractéristiques mécaniques résultant de la chaleur, et les boulets sont récupérés lors des arrêts et repesés pour déterminer l'usure.

L'usure des boulets de broyage est un facteur important à prendre en compte dans le traitement des minéraux. Deux types de tests d'usure en laboratoire peuvent être réalisés pour évaluer la résistance à l'usure des boulets : les tests d'impact répétés et les tests d'abrasion.

Les tests d'impact répétés simulent les impacts balle-sur-balle qui se produisent dans les broyeurs à boulets rotatifs. Ces impacts peuvent provoquer l'écaillage et la rupture des boulets. Les tests d'abrasion simulent l'usure abrasive résultant du contact entre le minerai et les boulets dans les broyeurs à boulets.

II.4.1. Test d'impact répété balle-sur-balle

Un test d'impact répété balle-sur-balle est un type de test d'usure qui simule les impacts balle-sur-balle qui se produisent dans les broyeurs à boulets rotatifs. Ces impacts peuvent provoquer l'écaillage et la rupture des boulets.

Le test est généralement effectué dans un tambour rotatif rempli de boulets (figure II.17). Les boulets sont accélérés par la rotation du tambour et entrent en collision les uns avec les autres. Le nombre d'impacts, la vitesse des boulets et la durée du test sont contrôlés pour simuler les conditions de fonctionnement des broyeurs à boulets.



Figure II.9 : Test d'impact réalisé dans un tambour en rotation

Un autre test d'impact de laboratoire est effectué sur les boulets pour évaluer leur résistance à l'usure par impact. L'essai consiste à lâcher une balle d'une hauteur de 3,4 m sur une enclume en acier trempé de 500 mm de diamètre et 150 mm d'épaisseur (figure II.18).

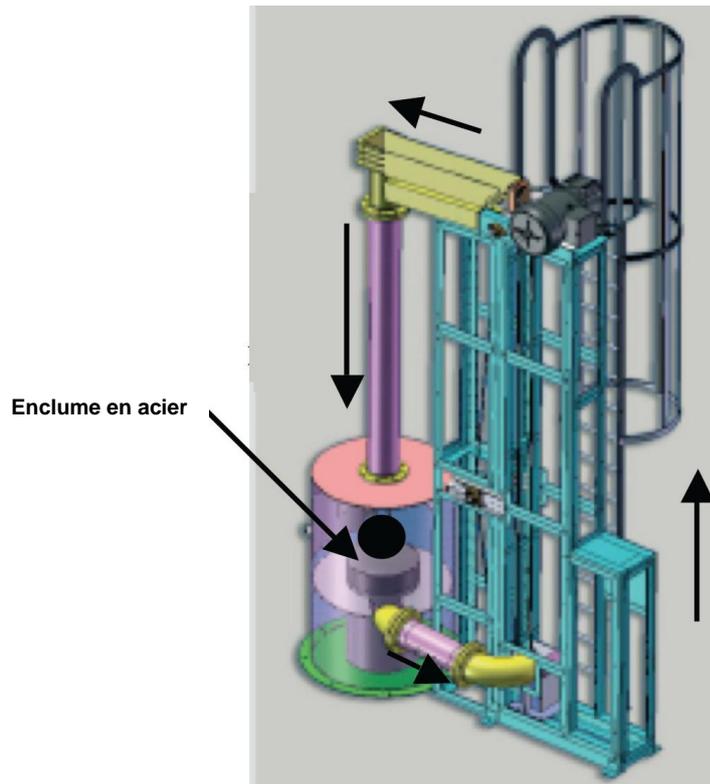


Figure II.10 : Test de chute sur les boulets de broyage

II.4.2. Test d'usure abrasive

Un test d'abrasion est une procédure utilisée pour évaluer la résistance à l'usure d'un matériau soumis à une action abrasive. L'action abrasive peut être causée par une variété de facteurs, tels que la friction, la collision et l'érosion.

Il existe de nombreux types de tests d'abrasion, chacun étant conçu pour simuler un type spécifique d'usure. Les tests d'abrasion les plus courants sont les suivants :

- **Test d'abrasion Taber** : Ce test utilise une roue rotative recouverte d'un matériau abrasif pour frotter la surface d'un échantillon (figure II.19). La perte de poids de l'échantillon est mesurée après le test pour évaluer sa résistance à l'abrasion.



Figure II.11 : Test d'abrasion Taber

- **Test d'abrasion à la roue à jet d'abrasif (ASTM G65)** : Ce test utilise un jet d'abrasif pour éroder la surface d'un échantillon (figure II.20). La perte de poids de l'échantillon est mesurée après le test pour évaluer sa résistance à l'abrasion.

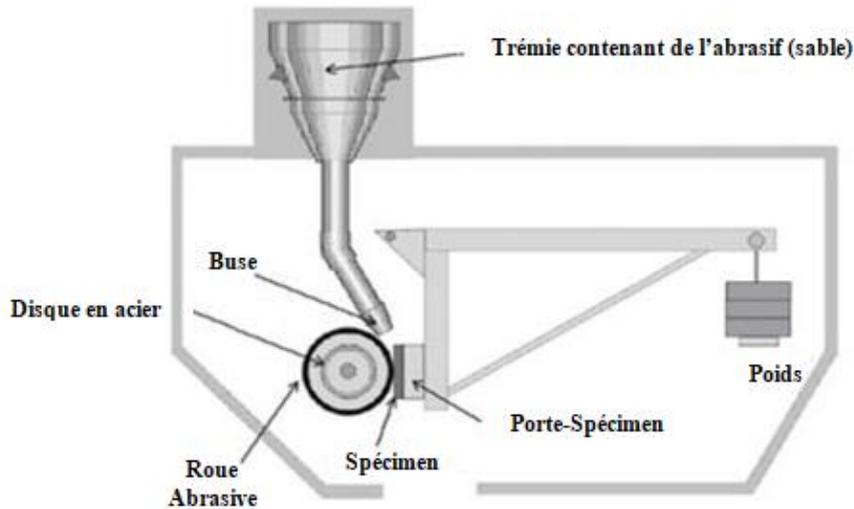


Figure II.12 : Test d'abrasion à la roue à jet d'abrasif

- **Test d'abrasion par glissement** : Ce test utilise un poids pour glisser sur la surface d'un échantillon. La perte de poids de l'échantillon est mesurée après le test pour évaluer sa résistance à l'abrasion.

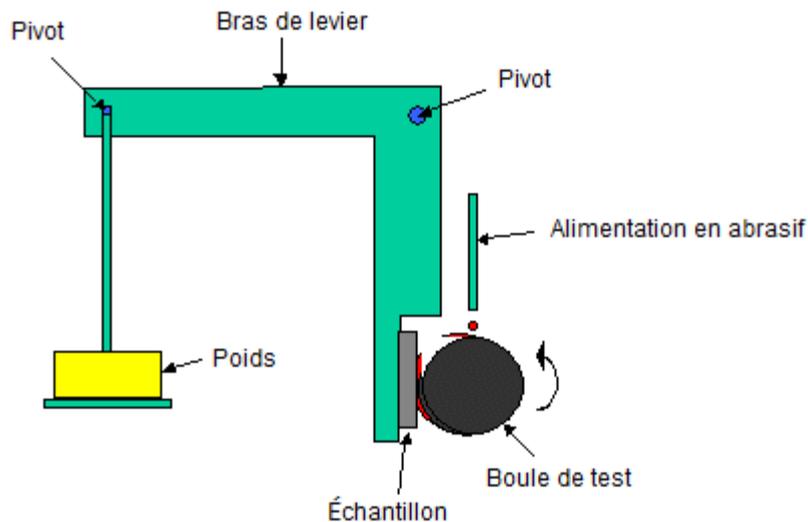


Figure II.13 : Test d'abrasion par glissement

Les résultats des tests d'abrasion sont utilisés pour comparer la résistance à l'usure de différents matériaux. Les résultats sont également utilisés pour sélectionner les matériaux appropriés pour les applications où l'usure est un facteur important.

- **Essais d'usure micro-abrasifs utilisant la méthode du boulet rotative :**

L'essai d'usure abrasive à l'échelle microscopique a connu une large adoption dans les universités et les centres de recherche. Il est désormais largement utilisé dans les études portant sur l'usure abrasive des matériaux (Cozza, Tanaka et al. 2009). La figure II.22 (a) présente un schéma du principe de fonctionnement de l'essai d'usure abrasive, dans lequel une bille rotative est pressée contre l'échantillon testé en présence d'une suspension abrasive. Il existe deux configurations principales d'équipement pouvant être utilisées pour réaliser ce type d'essai : les configurations "boulet libre" et "boulet fixe".

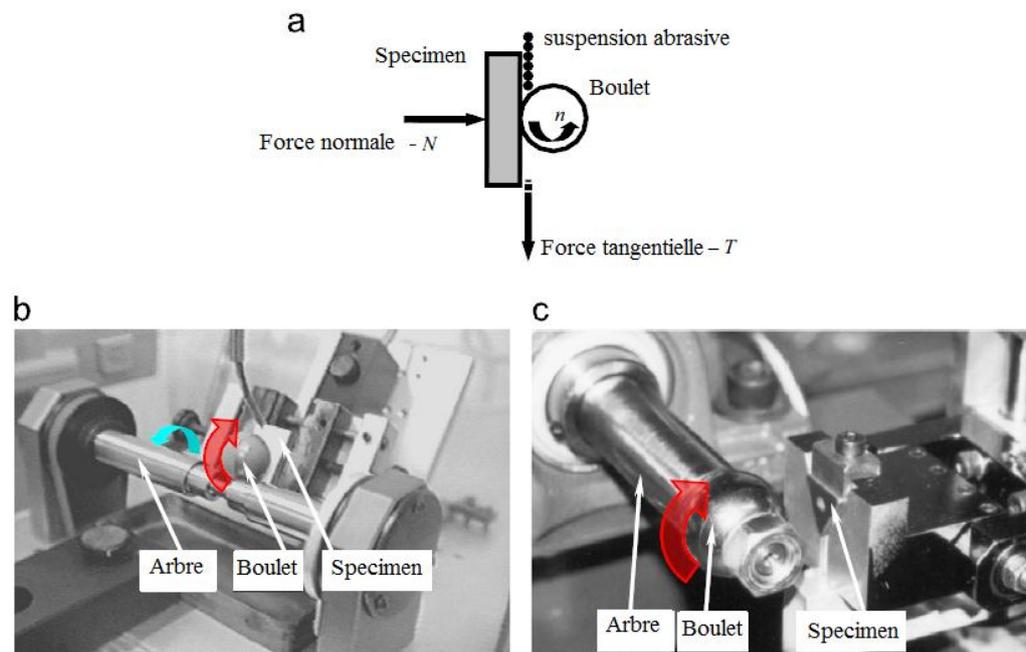


Figure II.14 : Essais d'usure micro-abrasifs utilisant la méthode du boulet rotative (a) diagramme schématique du principe de fonctionnement, (b) configuration (boulet libre) et (c) configuration (boulet fixe) adapté de (Cozza 2014)

II.5. Facteurs influençant l'usure des boulets de broyage

II.5.1. Influence du taux de remplissage et du diamètre du broyeur

Les boulets, dans les broyeurs subissent une usure qui tend à diminuer leur diamètre. Cette diminution du diamètre qu'il y a lieu de prévoir pour garantir un rendement optimal de broyage, dépend à la fois du taux de remplissage et du diamètre du broyeur comme le montre la figure II.23 (gauche). Le taux remplissage usuel assurant un rendement optimum de consommation d'énergie électrique est de 26%, comme le montre le graphique II.23 (droite).

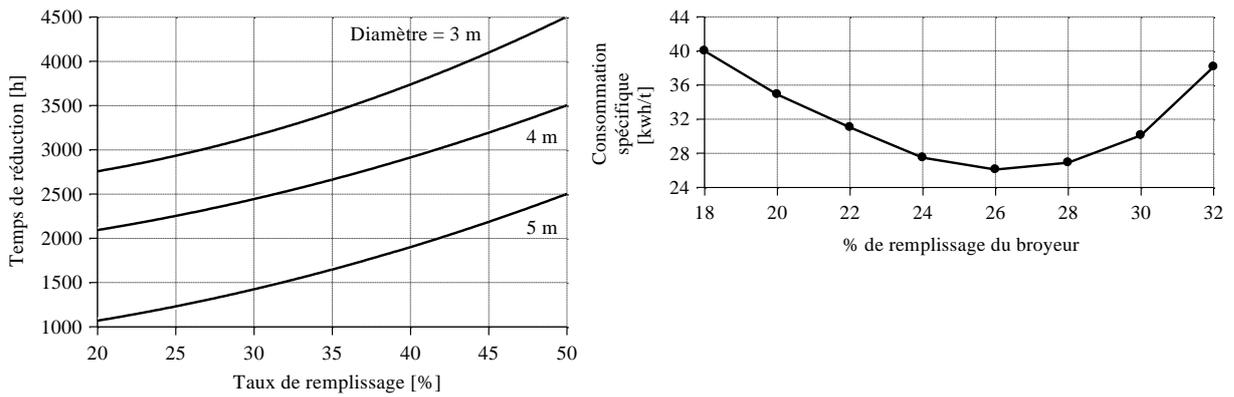


Figure II.15 : Impact du taux de remplissage et du diamètre du broyeur sur la durée de réduction du diamètre des boulets

II.5.2. Influence de la vitesse de rotation du broyeur

Les sollicitations (usure, chocs) auxquelles le boulet de broyage est soumis sont aussi fonction de la vitesse à laquelle le broyeur tourne (figure II.24)

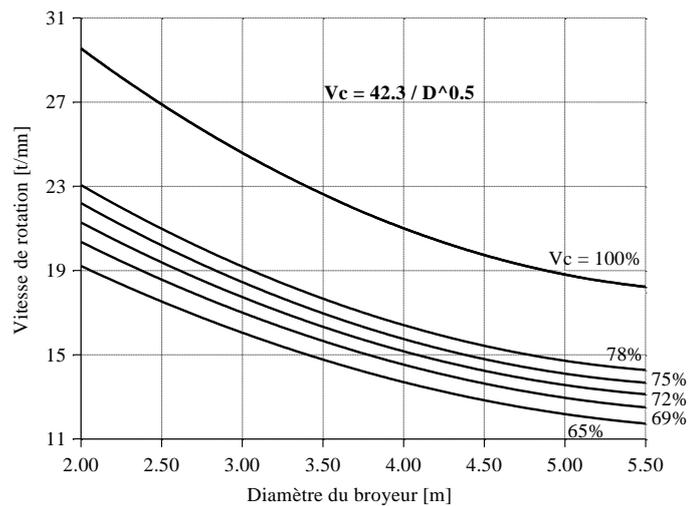


Figure II.16 : Evolution de la vitesse de rotation du broyeur (V_c : vitesse critique)

II.5.3. Influence du diamètre des boulets

La diminution de la grosseur des boulets de broyage est fonction de l'intensité des chocs mécaniques auxquels ces boulets 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.25.

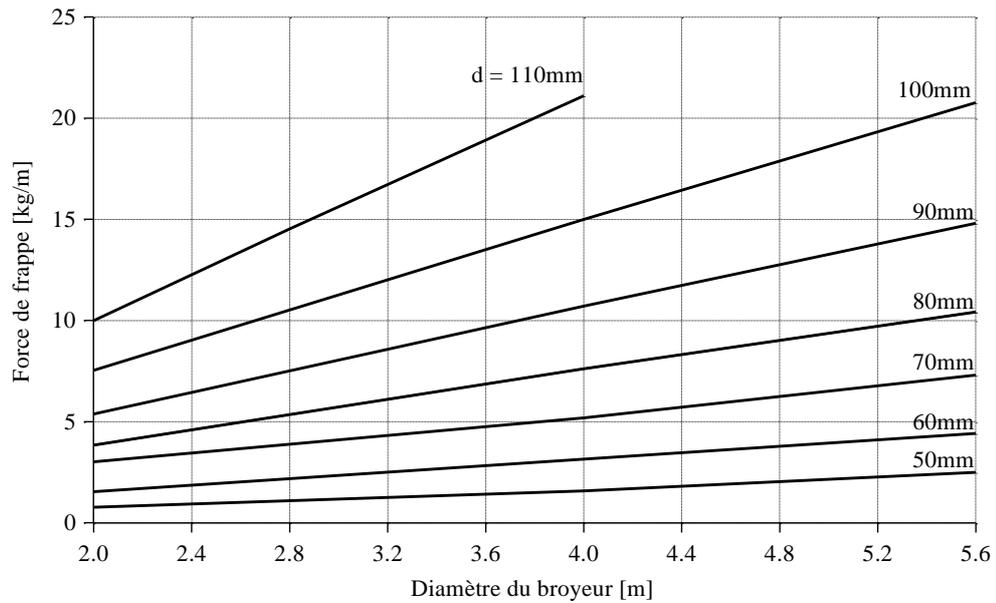


Figure II.17 : Evolution de la force de frappe des boulets

II.6. Conclusion

Ce chapitre a exploré en profondeur les différentes formes de dégradation que peuvent subir les boulets de broyage, tant lors de leur fabrication que pendant leur utilisation.

Nous avons examiné les mécanismes de dégradation liés à la fabrication, tels que les défauts de moulage et les microfissures, ainsi que les trois principaux types d'usure en service : la corrosion, l'usure abrasive et l'usure par impact.

L'importance de comprendre ces mécanismes de dégradation a été soulignée, car elle permet d'améliorer la durée de vie des boulets, d'optimiser les performances de broyage

Les recherches continues dans ce domaine permettront de développer des matériaux et des procédés de fabrication encore plus résistants à la dégradation, contribuant ainsi à une industrie du broyage plus performante et plus sûre.

Chapitre III

Facteurs déterminants influençant la longévité des boulets de broyage

III.1. Introduction

Les boulets de broyage sont un élément essentiel des broyeurs industriels. Ils sont utilisés pour broyer les matériaux en petites particules, et leur durée de vie est un facteur important à prendre en compte dans l'efficacité d'un broyeur.

Les boulets doivent être fabriqués à partir d'un matériau de haute qualité, tel que la fonte ou l'acier trempé. Ces matériaux sont plus résistants à l'usure et aux chocs que les matériaux moins résistants, tels que la fonte non trempée. Les boulets doivent également être correctement usinés pour avoir une surface lisse et uniforme, ce qui réduit les frottements et l'usure.

La conception de l'intérieur du tambour de broyage peut également avoir un impact sur la durée de vie des boulets. Le revêtement doit être conçu de manière à minimiser les frottements entre les boulets et les parois. Cela peut être fait en utilisant des matériaux spéciaux et lisses. Le tambour doit également être suffisamment grand pour permettre aux boulets de se déplacer librement, ce qui réduit les chocs entre les boulets.

Les conditions de broyage peuvent également affecter la durée de vie des boulets. Elles doivent être contrôlées afin d'éviter les chocs entre les boulets et les matériaux à broyer. Cela peut être fait en utilisant la bonne vitesse de rotation du broyeur et en ajustant la taille des matériaux à broyer.

La manière dont les barres de levage sont conçues peut influencer l'efficacité du processus de broyage en régulant l'action en cascade et en cataracte des boulets de broyage, contribuant ainsi à minimiser l'usure prématurée des boulets.

III.2. Choix du matériau des boulets (addition des éléments d'addition)

Le choix du matériau dépend des exigences spécifiques du processus de broyage, de la nature des matériaux à broyer, de la durée de vie prévue des boulets, de la résistance à l'usure requise, et d'autres considérations liées à l'application spécifique. Les fabricants de boulets de broyage adaptent souvent la composition des matériaux en fonction des besoins du client et des conditions de fonctionnement.

L'addition d'éléments d'alliage au métal de base permet de modifier ses propriétés. Les propriétés les plus courantes recherchées sont la résistance mécanique, la trempabilité, la résistance à la corrosion, la stabilité à haute température, la dilatabilité et la résistivité.

L'ajustement de la composition de l'alliage se fait en complétant la charge métallique (métal de base) par l'apport de ferro-alliages. Les ferro-alliages sont des métaux contenant des

concentrations élevées d'éléments d'alliage. Ils sont introduits dans le bain de fusion sous forme de morceaux, de demi-produits ou de briquettes.

Il est important que le métal liquide soit chaud et bien décaissé pour que l'homogénéisation de l'alliage soit optimale. Il est également possible d'utiliser des matériaux de récupération pour ajuster la composition de l'alliage. Ces matériaux contiennent souvent des concentrations intéressantes d'éléments d'alliage. Ils peuvent être utilisés pour éviter ou limiter les additions concentrées de ferro-alliages.

Les matériaux les plus couramment utilisés pour la fabrication des boulets de broyage sont représentés au tableau III.1.

Tableau III.1 : Matériaux utilisés pour la fabrication des boulets de broyage

Alliages	Description
La fonte et en particulier la fonte blanche alliée	Ce matériau est utilisé dans la fabrication des boulets de broyage pour sa résistance à l'usure élevée. Il peut être allié avec d'autres éléments pour améliorer ses propriétés.
Acier à haute teneur en carbone (C) et en manganèse (Mn)	Ces boulets sont spécialement conçus pour les broyeurs à boulets et sont uniformément trempés à 60-65 Rockwell C. Ils représentent la plus haute qualité de tous les boulets métalliques et la plupart des opérateurs insistent pour les utiliser.
Alliage de nickel moulé	Ces boulets sont également très populaires, car ils sont essentiellement des boulets en métal blanc, ce qui les rend moins susceptibles de provoquer des taches métalliques que les autres types de boulets. Cependant, leur surface extérieure rugueuse et leurs bosses saillantes typiques des boulets moulés sont des inconvénients majeurs. Ces boulets nécessitent également de longues périodes de rodage avant d'être utilisés correctement.
Acier inoxydable	Du fait de son coût élevé, l'acier inoxydable n'est utilisé que pour des travaux spéciaux nécessitant une bonne résistance aux acides et non magnétique.
Acier forgé à faible teneur en carbone	La fonte réfrigérée et l'acier à faible teneur en carbone sont les balles métalliques les moins chères disponibles. Elles sont recommandées uniquement pour le broyage grossier, où la contamination métallique n'est pas un problème.

Les effets des éléments d'alliage sur les propriétés mécaniques des fontes alliées, sont indiqués dans le tableau III.2.

Tableau III.2 : Influence des éléments d'alliage sur les propriétés mécaniques des fontes alliées

	Résistance à la traction	Re	Résistance à l'usure	Résistance à la fatigue	Résilience	Dureté à froid	Dureté à chaud	A%
Aluminium					↘			
Carbone	↗		↗		↘	↗		
Cobalt							↗	
Chrome	↗	↗	↗		↘	↗		↘
Manganèse	↗	↗	↗			↗		↘
Molybdène	↗	↗					↗	
Nickel	↗	↗	↗		↘			↘
Silicium	↗	↗	↗			↗		
Titane	↗	↗	↗		↘	↗	↗	
Tungstène	↗	↗	↗			↗	↗	
Vanadium	↗	↗		↗	↘	↗		

III.3. Influence des traitements thermiques

Les propriétés des métaux et des alliages peuvent être modifiées selon les besoins en les chauffant et en les refroidissant dans des conditions précises afin de les rendre adaptés à une application spécifique.

Ce traitement thermique permet de :

- Supprimer les contraintes internes des métaux,
- Réduire la taille des grains pour améliorer la résistance et la ténacité,
- Produire une surface dure pour une meilleure résistance à l'usure.

Le traitement thermique ne se limite pas uniquement à la trempe, il permet également d'augmenter la résistance à la traction et la ténacité de l'acier de construction. Le métal peut ainsi devenir plus résistant à l'usure, à la chaleur et à la corrosion.



Figure III.1 : Le cycle thermique

Les effets des traitements thermiques, pour une pièce, dépendent (figure III.1) :

- De la température maximale (chauffage) ;
- De la durée de maintien de la pièce à cette température (maintien) ;
- Du milieu dans lequel se trouve la pièce à cette température (refroidissement).

III.3.1. Différents types de traitements thermiques appliqués aux boulets de broyage

III.3.1.1. La trempe

La trempe est un traitement thermique appliqué aux matériaux métalliques, dans le but d'obtenir des propriétés mécaniques spécifiques. Ce processus consiste à chauffer le matériau à une température élevée, puis à le refroidir rapidement dans un liquide tel que l'eau ou l'huile. Il favorise la formation d'une structure martensitique, reconnue pour sa grande dureté et sa résistance à l'usure, ce qui en fait une caractéristique très recherchée dans la fabrication de boulets de broyage.

III.3.1.2. Recuit

Est un traitement thermique qui consiste à chauffer un métal à une température élevée, puis à le refroidir lentement. Cela permet de réduire la dureté, d'augmenter la ductilité et de faciliter l'élimination des contraintes internes. Il est utilisé après l'opération de moulage des boulets de broyage.

III.3.1.3. Normalisation

Ce traitement est similaire au recuit, mais il implique un refroidissement plus rapide. Il permet d'obtenir une structure de grains plus fine et plus uniforme, ce qui améliore la résistance et la ténacité du métal.

III.3.1.4. Le revenu :

Le revenu est un traitement thermique qui suit souvent la trempe dans le traitement des matériaux métalliques. Il est utilisé pour ajuster les propriétés mécaniques du matériau en réduisant la dureté excessive et la fragilité induite par la trempe et en améliorant la ténacité et la résilience du matériau. Il est réalisé à une température inférieure à celle de la trempe avec un maintien isotherme à cette température et enfin un refroidissement lent jusqu'à la température ambiante. Pour le traitement thermique des boulets de broyage, on applique souvent, un recuit de

détente après la phase de moulage des boulets de broyage, suivi d'une trempe martensitique et d'un revenu de relaxation (figure III.2).

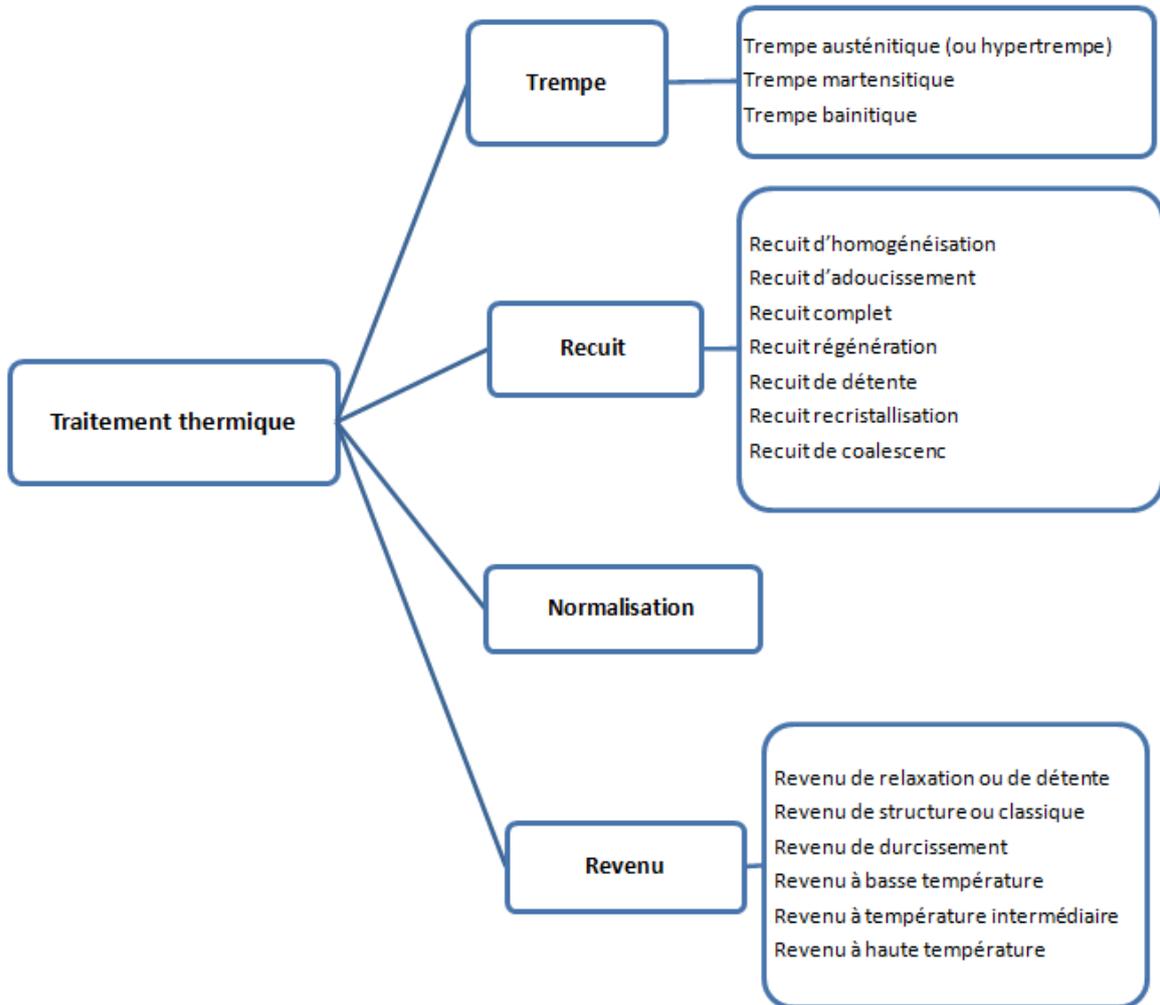


Figure III.2 : Différents types de traitements thermiques

III.3.2. Influence des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques des boulets de broyage

Il existe de nombreuses études dans le domaine de l'influence des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques des boulets de broyage. Les études ont porté sur une variété de matériaux de boulets, notamment l'acier, la fonte et les alliages métalliques. Elles ont également examiné une variété de traitements thermiques, notamment la trempe, le recuit et le revenu.

Chang, Lin et al. 2007 a étudié l'influence du traitement thermique à la température de laminage résiduelle (température qui persiste dans le matériau après le processus de laminage) sur la résistance à la fracture par impact multi-impacts à faible énergie et l'abrasivité des boulets de broyage en fonte blanche alliée à faible alliage laminées croisées. Les résultats de l'étude montrent que le traitement thermique à la température de laminage résiduelle a une influence significative sur les propriétés mécaniques des boulets de broyage. Un traitement thermique

approprié à la température de laminage résiduelle (TLR) permet d'obtenir une résistance élevée à la fracture par impact et une abrasivité élevée.

Sadeddine, Aissat et al. 2014 Ont étudié l'impact de trois facteurs sur les caractéristiques mécaniques des boulets de broyage ou de concassage employés dans l'industrie cimentière : La température d'austénitisation, la sévérité du milieu de trempe et le diamètre des boulets.

Les résultats de l'étude ont montré que la température d'austénitisation et la taille des boulets influent sur la trempabilité. Une température d'austénitisation plus élevée conduit à une augmentation de la trempabilité. Cela signifie que le boulet sera plus dur et plus résistant à l'usure.

Camurri, Carrasco et al. 2015 ont examiné l'amélioration de la qualité des boulets de broyage en acier de 3 pouces de diamètre. L'objectif de cette étude est d'obtenir une dureté de surface élevée tout en maintenant une résistance adéquate dans la zone centrale des boulets. Pour ce faire, les auteurs ont utilisé une combinaison de méthodes de modélisation et d'essais.

Les résultats de l'étude montrent que les nouvelles conditions de traitement thermique proposées permettent d'obtenir une dureté de surface de 60 HRC et une dureté centrale de 53-55 HRC. Ces conditions ont également permis de réduire de 60 % le nombre de défaillances au test de chute par rapport aux boulets traités par le traitement thermique standard.

Aissat, Sadeddine et al. 2017 ont examiné l'effet de la trempe et du revenu sur la dureté Rockwell et les processus d'usure des boulets de broyage de 50 et 70 mm de diamètre en fonte au chrome-molybdène. Les résultats montrent que la dureté Rockwell et la résistance à l'usure des boulets de broyage augmentent avec l'augmentation de la température de trempe et de revenu.

Aissat and Safa 2023 ont examiné l'effet de la température de revenu sur la microstructure, la dureté et l'usure abrasive de la fonte blanche à haute teneur en chrome (HCWCI) utilisée dans la fabrication de boulets de broyage. Les résultats ont montré que le revenu à 250°C et 400°C est optimal pour améliorer la durée de vie des boulets de broyage en HCWCI. Ces températures de revenu permettent de conserver une bonne dureté, d'environ 60 HRC, tout en réduisant la perte de masse de 1,6%. À des températures de revenu plus élevées, la dureté des boulets diminue, ce qui les rend plus susceptibles à l'usure. À 600°C, la dureté des boulets est inférieure à 50 HRC, ce qui est insuffisant pour résister aux conditions abrasives du broyage.

III.4. Conception de broyeurs avec revêtement en caoutchouc et en composite

III.4.1. Blindages en caoutchouc

Le blindage est l'un des composants essentiels du broyeur. Son rôle principal est de protéger le cylindre contre les impacts et l'usure directe par le matériau et le boulet de broyage, le blindage en caoutchouc aide à améliorer l'efficacité du broyeur, à augmenter la production et la durée de vie des boulets. De plus, le blindage en caoutchouc présente l'avantage d'atténuer le bruit généré par le broyage. La figure III.3 illustre le blindage en caoutchouc. Il incarne les propriétés suivantes :

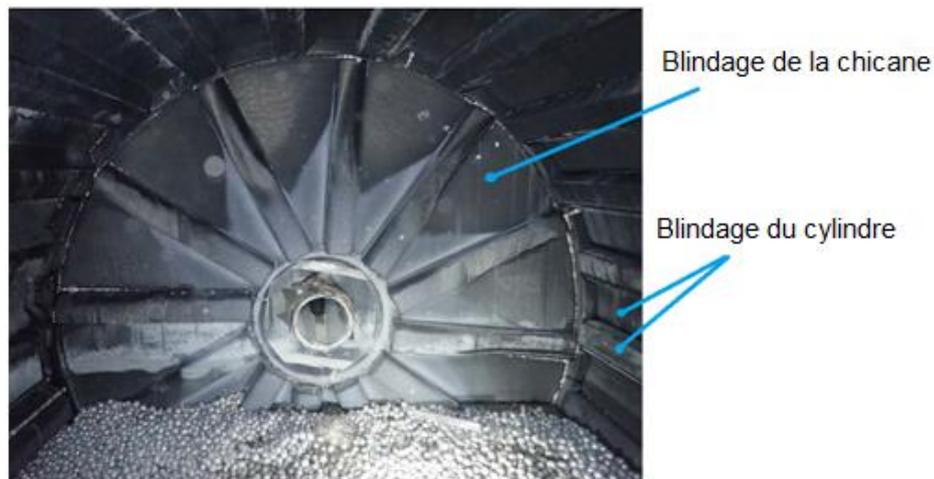


Figure III.3 : Broyeur à boulet avec revêtement en caoutchouc

1. Anti-usure : En raison de la bonne élasticité du caoutchouc, celui-ci peut être déformé lorsqu'il est soumis à l'impact du boulet, de sorte que la force est faible. Pour les matériaux souples, la durée de vie du revêtement en caoutchouc est plus longue que celle du revêtement en acier.

2. Résistant à la corrosion : Les revêtements en acier peuvent être corrodés par les boues acides, mais les revêtements en caoutchouc ne sont pas sensibles aux fluides acides ou alcalins, à l'eau, à la vapeur, etc.

3. Facile à démonter : En raison du poids léger du revêtement en caoutchouc.

4. Maintenance facile : Lors de l'utilisation de chemises en acier, il est souvent nécessaire d'inspecter les vis. La chemise en caoutchouc du broyeur à boulets souffre rarement d'une fuite de vis.

5. La garniture en caoutchouc du broyeur à boulets est plus fine et le volume effectif du cylindre est augmenté. L'épaisseur de la doublure n'est généralement que de 50 mm.

6. Le phénomène de colmatage de la plaque de grille de décharge en caoutchouc est inférieur à celui de la plaque de grille en acier.
7. Les revêtements en caoutchouc fonctionnent avec moins de bruit.

III.4.2. Blindages composites en caoutchouc et métal

Les blindages de broyeurs composites sont composés d'un alliage d'acier résistant à l'usure et d'une structure de caoutchouc moulé sous haute pression. L'alliage d'acier assure une durabilité accrue, tandis que le caoutchouc absorbe les chocs des grosses roches et des corps broyants (figure III.4).



Figure III.4 : Blindages composites en caoutchouc et métal (POLYCORP)

III.5. Conception des barres de levage (lifters)

Toutes les surfaces d'impact à l'intérieur du broyeur sont protégées par des plaques de revêtement spéciales appelées barres de levage ou lifters en anglais, renouvelables, fabriquées à partir d'alliages à haute teneur en chrome qui sont très résistants à l'usure par abrasion. La deuxième fonction principale de ce revêtement est de transférer le mouvement rotatif du broyeur au milieu et favoriser le mouvement le plus favorable de la charge.

Diverses recherches ont été consacrées à l'influence des barres de levage sur le processus de broyage, explorant leur effet sur la consommation électrique des broyeurs et sur le coût total de broyage (Djordjevic 2003; Hlungwani, Rikhotso et al. 2003; Djordjevic, Shi et al. 2004; Dahner and Van Den Bosch 2011; Bian, Wang et al. 2017)

La conception des barres de levage peut affecter l'efficacité du broyage, le mouvement des particules en contrôlant l'action en cascade et cataracte des boulets de broyage. En cas de conception inappropriée des barres de levage, les boulets de broyage seront projetés sur la garniture et non sur le pied de la charge, ce qui entraînera la casse des boulets et l'écaillage.

Dahner et Van Den Bosch (2011) ont étudié l'effet de la conception des barres de levage sur le coût totale de broyage.

La Figure III.5 illustre la différence entre une conception optimisée et une conception non optimisée des barres de levage, ainsi que leur influence sur le coût total de broyage. La figure III.5 - cas non optimisé - montre un coût total de broyage de 100. Le coût de la garniture ne représente que 10 % du coût total. Le coût des boulets de broyage est nettement plus élevé qu'il devrait l'être en raison de la non-optimisation des barres de levage. Dans le cas optimisé – Coût des garnitures plus élevé que dans le cas non optimisé, mais le coût total de broyage est inférieur de 25 %. Cette diminution est principalement due à la baisse substantielle de la consommation de boulets de broyage.

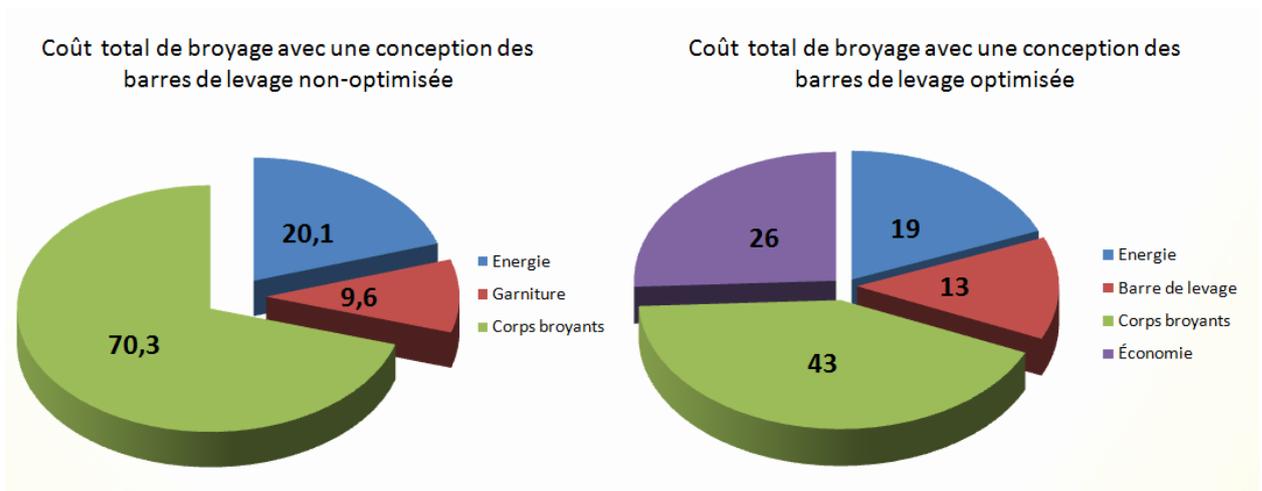


Figure III.5 : Différence de coût total de broyage entre une conception des barres de levage optimisée et non optimisée (cas hypothétique) (Dahner and Van Den Bosch 2011)

Dans l'industrie du broyage, on peut parler de la forme de blindage (liner) situées sur les parois du broyeur. Elles sont conçues pour protéger le broyeur des dommages causés par les boulets de broyage. Les garnitures peuvent être fixées au broyeur par des boulons, des rivets ou par soudage, tandis qu'à l'échelle des broyeurs de laboratoire on utilise le terme forme des barres de levage (lifter) (figure III.6).

Il existe plusieurs configurations de blindage :

- **Blindage droit (lisses) :** Ces garnitures sont les plus simples et les moins coûteuses. Elles sont généralement utilisées pour des applications à faible intensité. souvent utilisées pour réduire l'accumulation de matériaux et faciliter le nettoyage.
- **Blindage ondulés :** Ces garnitures présentent des ondulations régulières offrant une meilleure retenue des boulets de broyage que la forme droite. Ils sont également plus efficaces pour répartir l'usure sur la surface de la barre de levage.

- Blindage à nervures : Garnitures comportant des nervures surélevées, servant à améliorer la retenue des boulets de broyage et à réduire l'usure de la garniture
- Blindage étagé: Garniture présentant des sections horizontales étagées, souvent utilisée dans les opérations de broyage primaire grossier en raison de sa robustesse et de sa capacité à résister à des impacts importants.

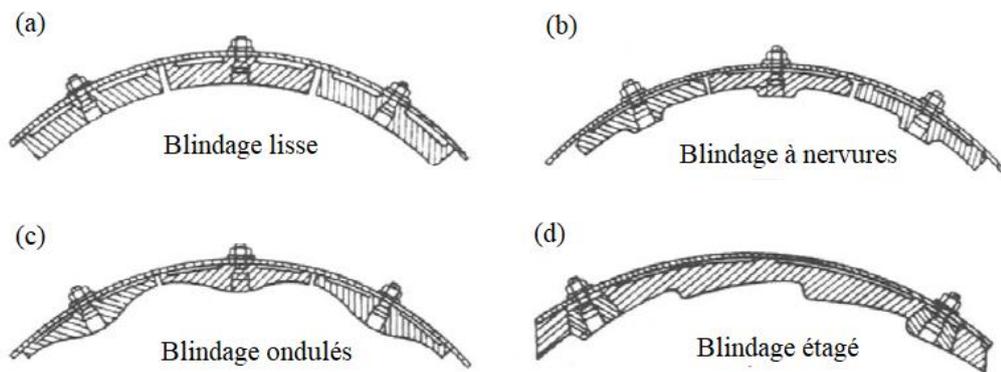


Figure III.6 : Principaux configurations de blindage (a) blindage droite, (b) blindage à nervure (c) blindage ondulé, (d) blindage étagé.

III.5.1. Effet de la hauteur de lifter

Pendant le processus de travail, la hauteur de lifter diminue progressivement en raison de l'effet de l'impact et de l'érosion et devient trop basse pour transporter les particules à un endroit suffisamment élevé. Cette condition affecte les performances des broyeurs à boulets. Dans cet état, les chemises doivent être remplacées pour récupérer la capacité de travail des broyeurs à boulets.

Cleary 2001 a étudié l'influence des changements dans les paramètres de fonctionnement et les propriétés des particules sur un broyeur à boulets de 5 m. Il a utilisé la modélisation par la méthode des éléments discrets (DEM) pour simuler les changements et étudier leurs effets sur la forme de la charge et la consommation d'énergie.

Plus précisément, il a étudié les effets du niveau de remplissage de charge, de la forme du lifter (par conception ou par usure) et du modèle de lifter.

Les résultats obtenus par (Djordjevic 2003) avec le code (PFC3D) montrent que l'état des lifters aura une influence significative sur la consommation électrique et sur le mode de consommation d'énergie dans l'usine. (Djordjevic, Shi et al. 2004) a observé que la répartition de l'énergie d'impact est influencée par le nombre et la hauteur des lifters, (figure III.8), la vitesse du broyeur et le remplissage du broyeur. (Bian, Wang et al. 2017) a étudié la variation du couple et de la puissance avec la hauteur du lifter (figure III.9) et la vitesse du broyeur. De plus des progrès ont

été réalisés par différents auteurs (Kalala 2008; Powell, Weerasekara et al. 2011) pour simuler et prédire l'usure des lifters à l'aide de DEM.

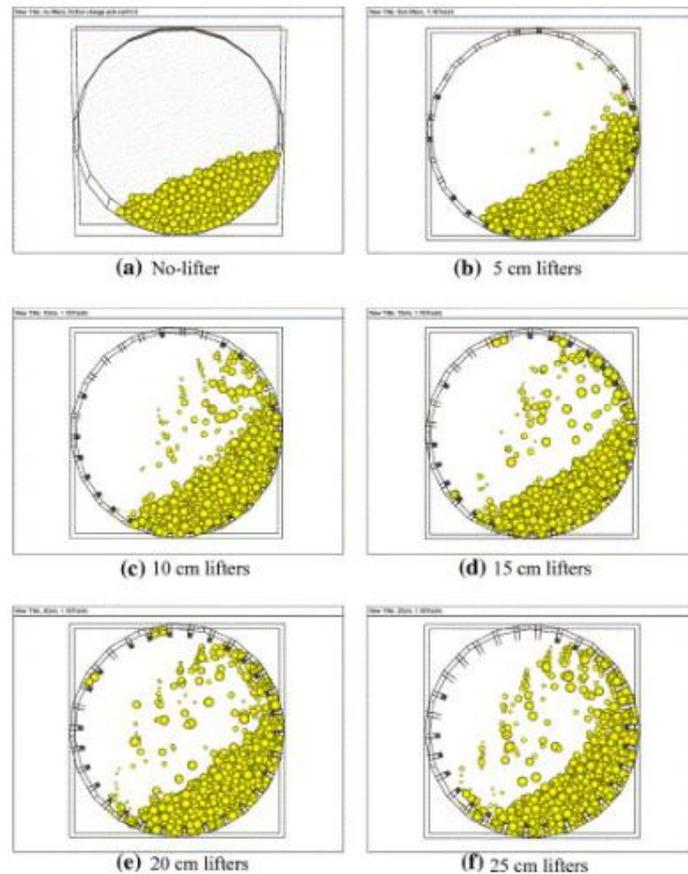


Figure III.7 : Comportement des particules avec des lifters de différentes hauteurs : (a) aucun lifter, (b) lifters de 5 cm, (c) lifters de 10 cm, (d) lifters de 15 cm, (e) lifters de 20 cm, et (f) lifters de 25 cm

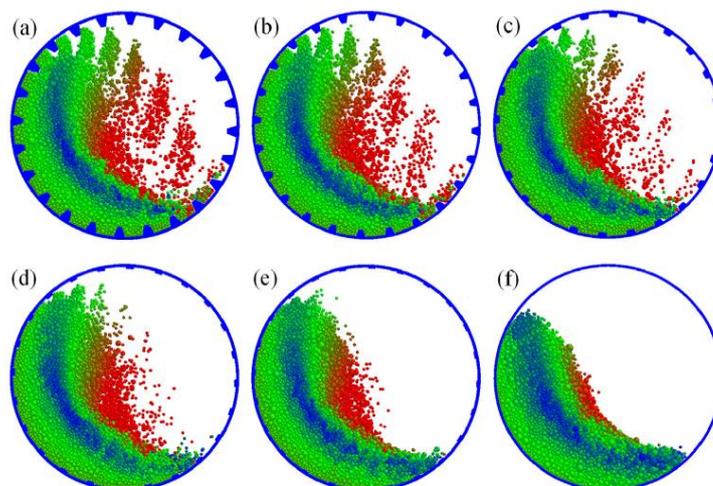


Figure III.8 : Effet de la hauteur du lifter sur le comportement des particules pour le broyeur boulets à 75 % de la critique et un niveau de remplissage de 35% : (a) $H_L=25\text{mm}$, (b) $H_L=17\text{mm}$, (c) $H_L=10\text{mm}$, (d) $H_L=5\text{mm}$, (e) $H_L=3\text{mm}$ et (f) $H_L=0\text{mm}$
Avec H_L : la hauteur du lifter

III.5.2. Effet du nombre de lifters

Le nombre de lifters est un paramètre important qui doit être soigneusement pris en compte lors de la conception d'un broyeur à boulets. Cependant, aucune théorie n'a été développée pour déterminer le nombre de lifters. Ainsi, le nombre de lifters est généralement décidé en fonction des connaissances empiriques et de l'analogie.

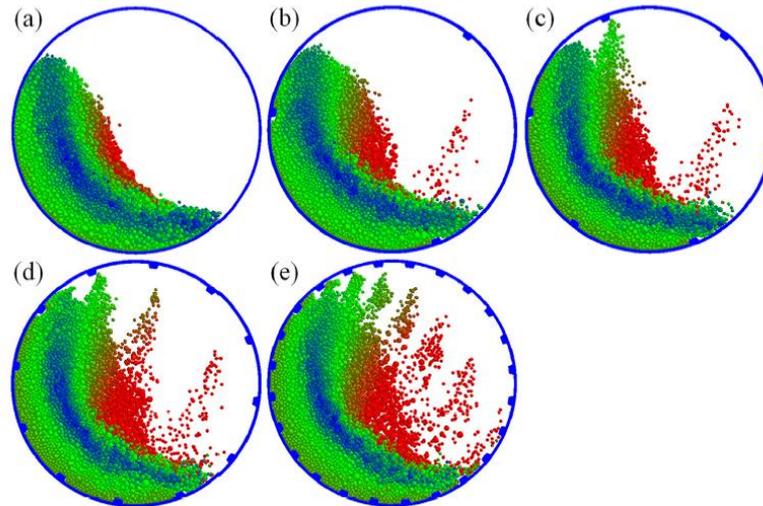


Figure III.9 : Effet du nombre de lifters sur le comportement des particules (a) NL =0, (b) NL =3, (c) NL =6, (d) NL =12, (e)NL=24. (Bian, Wang et al. 2017)

Le nombre de lifters des broyeurs à boulets affecte de manière cruciale le comportement des particules. Le processus cyclique des particules dans lequel les particules montent de la position des orteils à la position des épaules et sont projetées de l'épaule vers la position des orteils est étroitement lié au nombre de lifters. La capacité de levage des lifters diminue avec la réduction du nombre de lifters, provoquant ainsi le déplacement de la majorité des particules à basse vitesse. Ainsi, l'énergie cinétique des particules est extrêmement faible et les collisions à haute énergie ne peuvent effectivement pas se produire (figure III.10). En conséquence, la capacité de broyage des broyeurs à boulets diminue. Par conséquent, le nombre de lifters doit être choisi de manière raisonnable dans la conception et l'utilisation pratique des broyeurs à boulets, et un nombre de lifters relativement croissant est favorable.

III.5.3. Effet de la forme de lifter

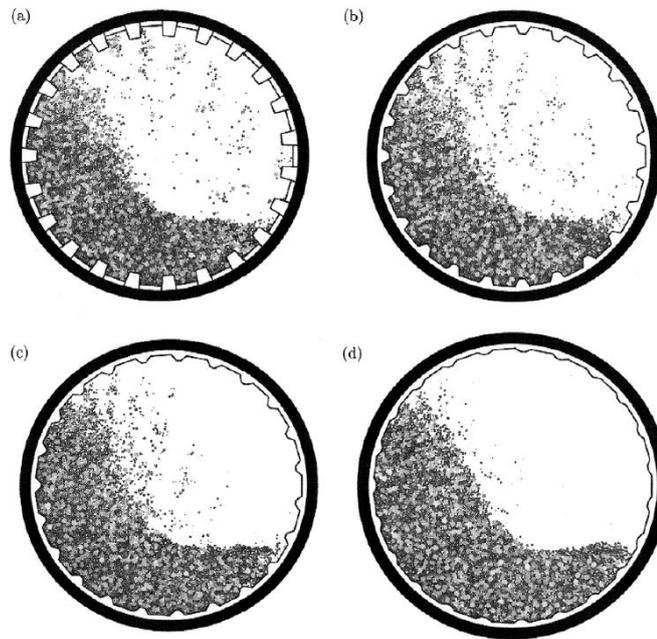


Figure III.10 : Lifters avec un angle de face : (a). 80°, (b). 60°, (c). 45° et (d). 22.5°

Les travaux de (Cleary 2001) Cleary,2001a,Cleary,2001b ont principalement exploré l'effet de la forme et le nombre de lifters (figure III.11) pour prédire la consommation électrique des broyeur semi-autogènes (SAG). Ensuite (Hlungwani, Rikhotso et al. 2003) ont adopté le simulateur DEM Millsoft(2D) pour étudier l'effet de la forme du lifter et la vitesse du broyeur sur la puissance et la charge des lifters.

III.6. Conclusion

Ce chapitre a exploré en profondeur les divers facteurs déterminants qui influencent la longévité des boulets de broyage.

Nous avons examiné l'impact du choix du matériau des boulets, en particulier l'ajout d'éléments d'alliage, sur leur résistance à l'usure et à la corrosion.

L'influence des traitements thermiques a également été détaillée, en analysant les différents types de traitements et leur impact sur les propriétés mécaniques des boulets.

En outre, nous avons étudié la conception des broyeurs, en particulier l'utilisation de revêtements en caoutchouc et en composite, ainsi que la conception des barres de levage (lifters), en analysant l'effet de leur hauteur, de leur nombre et de leur forme sur la longévité des boulets.

En conclusion, il est évident que la longévité des boulets de broyage ne dépend pas d'un seul facteur, mais plutôt d'une combinaison synergique de plusieurs éléments.

Chapitre IV

Approche par éléments discrets

IV.1. Introduction

Les Méthodes par Eléments Finis (FEM) et leurs extensions sont couramment utilisées dans la modélisation numérique pour analyser le comportement statique et dynamique des structures. Elles sont appliquées dans divers domaines tels que le calcul de structures, l'étude des contacts, l'électricité, l'électromagnétisme, l'hydraulique et l'aérodynamique. Cependant, ces méthodes présentent certaines limitations lorsqu'il s'agit de modéliser des milieux discontinus ou présentant de multiples fissurations.

En parallèle, les Méthodes par Eléments Discrets (DEM) (**D**iscrete**E**lement**M**ethod) ont été développées pour résoudre des problèmes spécifiques liés aux milieux discontinus, où la mécanique des milieux continus n'est plus adéquate pour décrire le phénomène (CUNDALL 1979; Cao 2011). La DEM est particulièrement adaptée pour décrire le comportement mécanique d'assemblages de disques et de sphères. Cette méthode repose sur l'utilisation d'un schéma numérique explicite dans lequel l'interaction entre les particules est modélisée de manière individuelle (CUNDALL 1979).

L'inconvénient majeur de la méthode DEM, est lié à ses temps de calculs excessivement longs mais avec l'augmentation de la puissance informatique et des codes source commerciaux et ouverts plus facilement utilisables, la DEM offre aux ingénieurs la possibilité de mieux comprendre la dynamique d'écoulement des solides en vrac dans les équipements de manutention de matériaux en vrac. Cela peut conduire à des améliorations dans la conception des équipements, l'efficacité du processus, le débit, l'exploitation et éventuellement la qualité du produit (Grima, Wypych et al. 2013).

IV.2. Description de la méthode

Historiquement, les principes de la modélisation discrète sont issus de l'article fondateur de P.A. Cundall et O.D.L. Strack (1979), qui appliquent cette méthode à des problématiques géo-mécaniques telles que la fracturation des massifs rocheux (Mollon 2015). Elle consiste en une solution approximative de l'équation du mouvement pour chaque grain du matériau. Le mouvement du matériau a lieu à la suite de la propagation d'une perturbation d'une particule à une particule initiée dans des conditions aux limites. La procédure de calcul est basée sur l'hypothèse que pendant un très court pas de temps Δt l'accélération et la vitesse sont constantes, et la perturbation du mouvement d'un seul grain n'atteint pas plus loin que ses plus proches voisins. C'est l'hypothèse clé de la méthode qui permet de décrire des interactions non linéaires se produisant entre un grand nombre d'éléments.

IV.3. Applications de la Méthode des éléments discrets

La DEM est couramment utilisée pour modéliser des milieux granulaires (poudres, sables, roches ...) ainsi que les milieux condensés comme les gels ou les suspensions. Certaines applications industrielles sont présentées dans la figure IV.2.

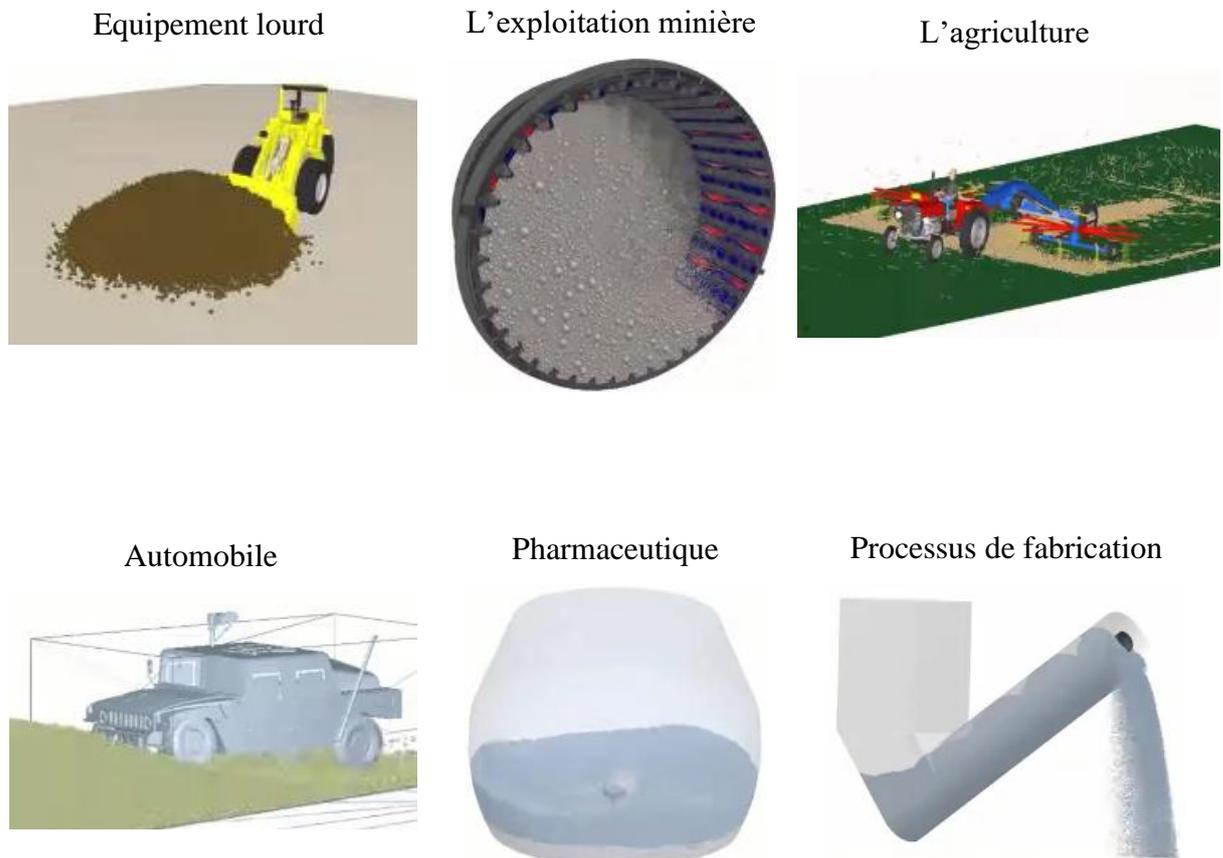


Figure IV.1 : Quelques exemples d'applications industrielles de la méthode des éléments discrets

La méthode DEM est une méthode de simulation granulaire très précise, mais elle présente un inconvénient majeur, lié à ses temps de calculs excessivement longs. Cela limite son application à des échantillons de taille limitée, et la rend généralement inaccessible aux applications industrielles, et son application est souvent restreinte à un cadre académique. Cependant, l'amélioration constante des performances des ordinateurs et le développement d'algorithmes de calcul parallèle permettent de réduire les temps de calcul de la méthode DEM (Mollon 2015). Cela ouvre la voie à son utilisation dans des applications industrielles, où elle peut être utilisée pour étudier le comportement de matériaux granulaires réels.

IV.4. Principe de la méthode des éléments discrets

Les principes sous-jacents de la DEM sont comme suit :

- (a) la force exercée par les particules voisines ou les frontières pour chaque particule est calculée en une seule étape temporelle en utilisant le contact.
- (b) la deuxième loi de Newton est appliquée pour calculer la vitesse de la particule.
- (c) sur la base du même principe, les équilibres des moments de rotation sont résolus pour suivre la vitesse de rotation de la particule.
- (d) la nouvelle position de la particule est calculée pour une longueur de pas de temps.

Cette procédure est appliquée à chaque particule en un seul pas de temps et répétée pour chaque pas de temps. En DEM, différents types de comportement des matériaux peuvent être simulés par une série de modèles bien établis.

Il existe deux méthodes principales de simulations discrètes : l'approche par sphère dure et l'approche par sphère molle.

IV.4.1. Modèle de sphère dure

Dans le modèle de sphères dures, les particules sont considérées comme rigides et le contact entre les particules, déterminé par la règle de contact binaire, est supposé être instantané (figure IV.2a), (Mitarai and Nakanishi 2003). Cette hypothèse suggère que le modèle de sphères dures convient aux conditions fortement agitées ou sans gravité (Wassgren and Curtis 2006). Le modèle de sphères dures a été appliqué à une large gamme d'études pour aborder l'écoulement granulaire dans le processus de fabrication, car il a d'abord été appliqué à l'étude qui décrit l'écoulement de cisaillement des matériaux granulaires dans une simulation bidimensionnelle (Campbell and Brennen 1985; Deen, Annaland et al. 2007).

IV.4.2. Modèle de sphère souple

Le modèle de la sphère molle est peut-être le plus courant et le plus souple en DEM (Wassgren and Curtis 2006). Dans le modèle de la sphère molle, on suppose que le contact des particules est durable, comme le montre la figure IV.2b, et que des contacts multiples entre les particules sont possibles, ainsi que des contacts binaires (Mitarai and Nakanishi 2003). Par conséquent, il est essentiel de définir minutieusement le pas de temps pour garantir une simulation précise. Bien que des pas de temps réduits assurent une intégration précise des équations de particules, mais peuvent augmenter considérablement le temps de calcul de la simulation (Deen, Annaland et al. 2007; Ketterhagen, am Ende et al. 2009).

Divers processus de fabrication ont adopté le modèle de la sphère molle, en particulier dans l'industrie de traitement des minéraux, pour le traitement des matériaux granulaires. Car il convient aux systèmes très denses liés aux concentrations de particules.

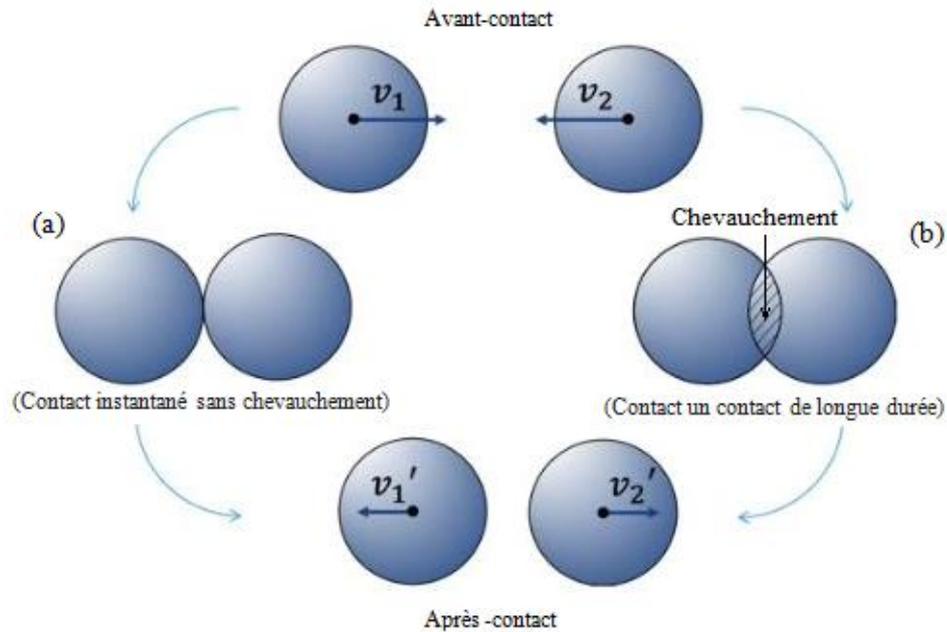


Figure IV.2 : Schéma simple de (a) modèle de sphère dure et (b) modèle de sphère molle (v_1 et v_2 : la vitesse de chaque particule avant contact ; v_1' et v_2' : la vitesse de chaque particule après contact).

IV.4.3. Calculs du mouvement des particules

Chaque particule d'un flux granulaire possède 6 degrés de liberté et, par conséquent, peut avoir deux types de mouvement : translation et rotation. Dans la simulation DEM, la deuxième loi de Newton est utilisée pour calculer les accélérations de translation et de rotation, qui sont ensuite intégrées numériquement sur un pas de temps pour mettre à jour les vitesses et la position des particules.

Le mouvement de rotation est calculé sur la base de l'équation IV.1.

$$I \frac{d\omega}{dt} = T \quad \text{IV.1}$$

Où

I : Le moment d'inertie

ω : La vitesse angulaire

T : Le couple de contact résultant agissant sur la particule

t : Le temps

Le mouvement de translation est calculé sur la base de l'équation IV.2.

$$m \frac{dv}{dt} = F_g + F_c + F_{nc} \tag{IV.2}$$

Où

v : La vitesse de translation de la particule

m : La masse de la particule

F_g : La force gravitationnelle résultante agissant sur la particule

F_c et F_{nc} : sont les forces résultantes de contact et de non-contact entre particule- particule et particule-paroi (figure IV.3)

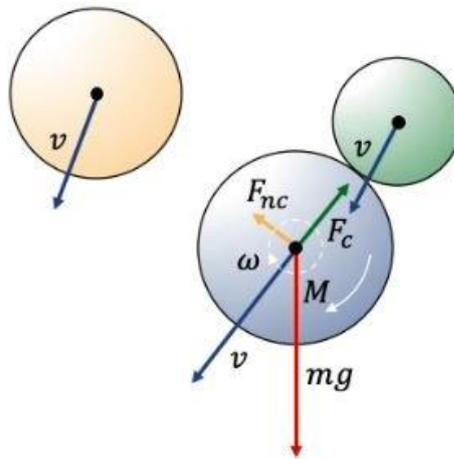


Figure IV.3 : Calcul du mouvement des particules

IV.4.4. Forces de contact (figure IV.4)

Force normale : $F_n = -k_n \delta_n - \eta_n V_n$ IV.3

Force tangentielle : $F_t = -k_t \delta_t - \eta_t V_t$ IV.4

Où

k_n, k_t Raideurs de ressort

η_n, η_t Coefficient d'amortissement

δ_n, δ_t Déplacements (figure IV.5)

V_n, V_t Vitesses relative

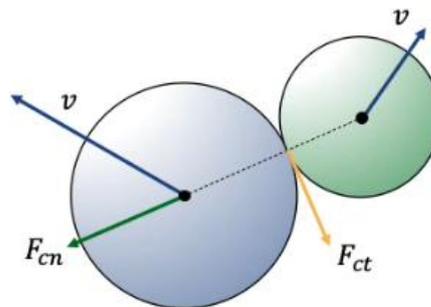


Figure IV.4 : Forces de contact

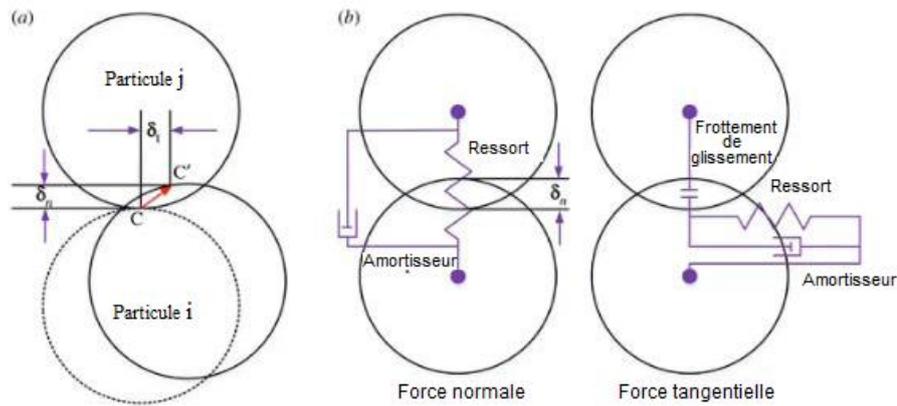


Figure IV.5 : Modélisation des forces de contact (Li et al. 2019)

IV.4.5. Forces de non-contact

$$\text{Force gravitationnelle : } F_g = G \frac{m_1 m_2}{r} \quad \text{IV.5}$$

Où

m_1, m_2 : Masse de la particule

G : Constante de gravitation

r : Distance

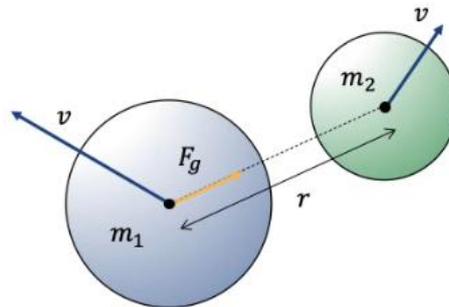


Figure IV.6 : Force de non-contact

IV.4.6. Pas du temps

Le mouvement d'une particule dans un écoulement granulaire est affecté non seulement par les contacts avec ses voisins immédiats, mais aussi par les propagations de perturbations provenant de particules éloignées.

En choisissant un pas de temps suffisamment petit dans le DEM, on empêche les ondes de perturbation de chaque particule de se propager plus loin que ses partenaires voisins.

Le pas de temps approprié (pas de temps de Rayleigh) est approximé à partir de la vitesse de propagation des ondes de surface de Rayleigh. Habituellement, une fraction de ce pas de temps est prise pour assurer des taux de transmission de force réalistes et prévenir l'instabilité numérique.

Généralement, le temps de calcul total pour une simulation donnée est une combinaison de plusieurs facteurs :

- Nombre de particules dans le système : plus de points de données à calculer ;
- Forme des particules : généralement les formes « complexes » sont décrites par des particules jointives qui entraînent une augmentation du nombre de particules au sein du système et donc du temps ;
- Taille des particules : les particules plus petites nécessitent un pas de temps plus petit ;
- Choix des propriétés du matériau : les propriétés du matériau influencent le pas de temps de la simulation ;
- Temps simulé total souhaité.

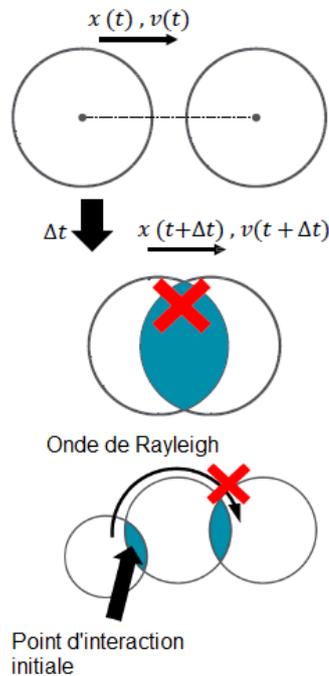


Figure IV.7 : Choix du pas de temps (Δt) (EDEMTM)

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 par l'équation IV.6 (Marigo and Stitt 2015) :

$$T_{\text{step}} < \Delta T_{\text{critical}} = T_{\text{Rayleigh}} = \frac{\pi R \sqrt{\frac{\rho}{G}}}{0,1631\nu + 0,8766} \quad \text{IV.6}$$

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.

IV.4.7. Calcul de la nouvelle position

Les accélérations sont intégrées numériquement sur un pas de temps mettant à jour les vitesses et les positions des particules (équations IV.7 et IV.8) et (figure IV.8).

$$\text{Nouvelle position : } x(t + \Delta t) = x(t) + v(t)\Delta t \quad \text{IV.7}$$

$$\text{Nouvelle vitesse : } v(t + \Delta t) = v(t) + a(t)\Delta t \quad \text{IV.8}$$

Où

$v(t)$: La vitesse

$x(t)$: La position

$a(t)$: L'accélération d'une particule à un moment donné

Δt : Le pas de temps

La vitesse de rotation et les orientations des particules sont mises à jour de manière similaire.

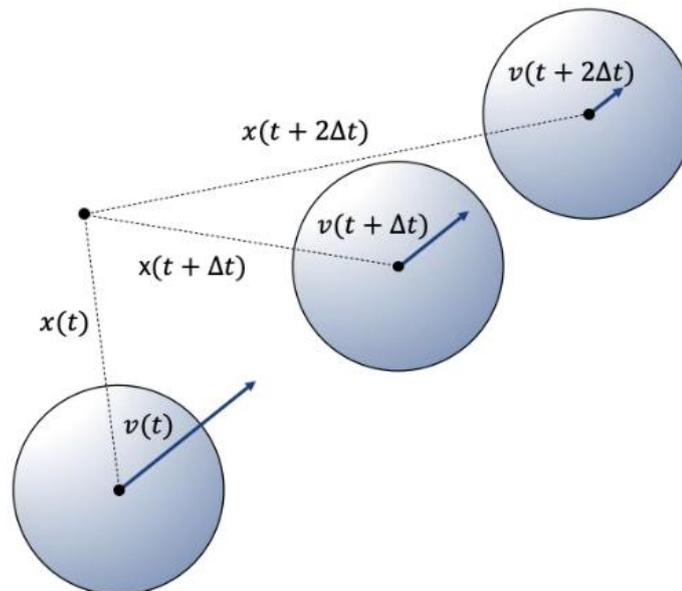


Figure IV.8 : Calcul du mouvement d'un seul élément en termes d'accélération, de vitesse et de la position dans le DEM

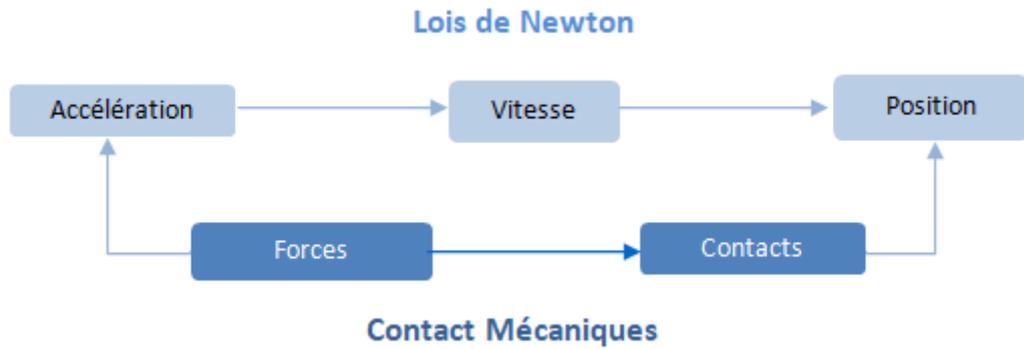


Figure IV.9 : Principe de la DEM

IV.5. La modélisation discrète

La déformation des particules pendant les collisions est modélisée comme un chevauchement virtuel entre les particules. Les modèles de contact relient la quantité de chevauchement moyen (tangentielle et normale) entre deux objets pour déterminer les magnitudes des forces. Les modèles de contact (figure IV.10) sont basés sur les théories de la mécanique du contact et sont principalement développés pour des contacts sphériques basés sur la théorie de Hertz (Martín 2014). Il en existe un certain nombre et ils sont capables de modéliser des collisions élastiques ou plastiques pour des matériaux cohésifs et non cohésifs.

Voici un bref aperçu des modèles de contact les plus couramment utilisés dans DEM

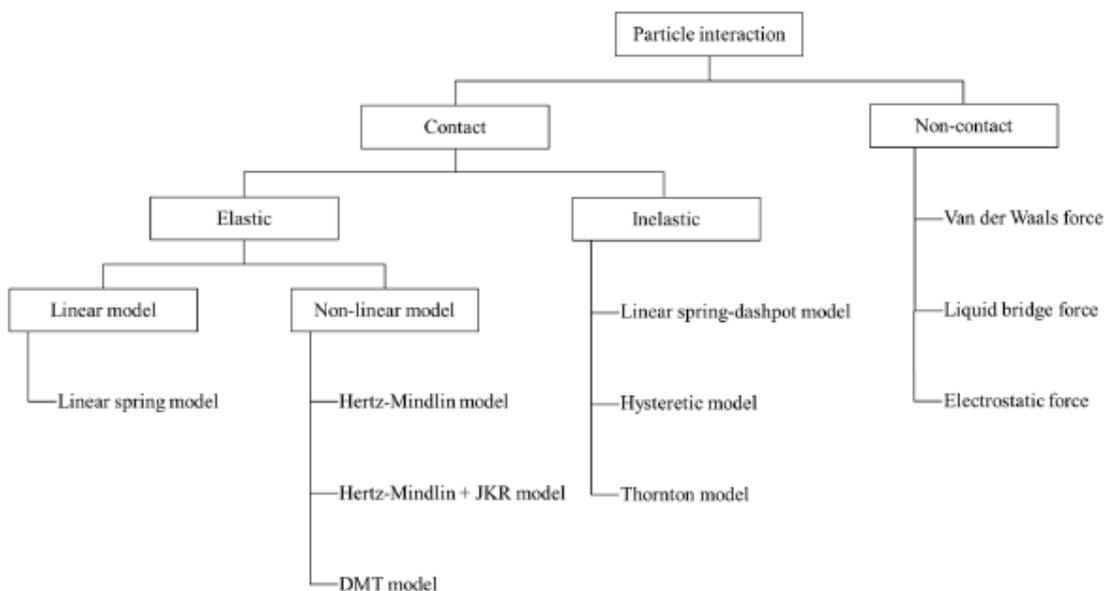


Figure IV.10 : Classification des modèles de force d'interaction des particules par force de contact et force sans contact

IV.5.1. Modèles de contact élastique

En général, les modèles de contact élastique sont classés en modèles élastiques linéaires ou élastiques non linéaires.

IV.5.1.1. Modèle à ressort linéaire

Le modèle élastique linéaire est le modèle de contact de base qui représente la relation linéaire entre la force et le déplacement, comme le montre la figure IV.11a. Le déplacement augmente lorsque la force de contact augmente. Cette relation linéaire est dérivée des équations IV.9 et IV.10.

$$F_n = -K_n \delta_n \quad \text{IV.9}$$

$$F_t = -K_t \delta_t \quad \text{IV.10}$$

Où F_n et F_t désignent les forces de contact dans les directions normale et tangentielle, respectivement, δ_n et δ_t sont les déplacements normal et tangentiel, respectivement. K_n et K_t sont les constantes de ressort des particules impliquées dans le contact dans la direction normale et tangentielle, respectivement. Le modèle de ressort linéaire considère que deux particules en contact sont à la fois normal et tangentiel reliées par un ressort linéaire. Par conséquent, si le contact entre les particules sont modélisées par un modèle de ressort linéaire basé sur les équations (IV.9) et (IV.10), alors l'énergie n'est pas consommée et le contact est considéré comme complètement élastique. Cependant, dans la plupart des cas pratiques, une partie de l'énergie cinétique est dissipée par déformation plastique et/ou une partie de l'énergie cinétique est convertie en une autre énergie. Par conséquent, un modèle de ressort linéaire est limité dans son application à la modélisation du contact des particules (Malone and Xu 2008).

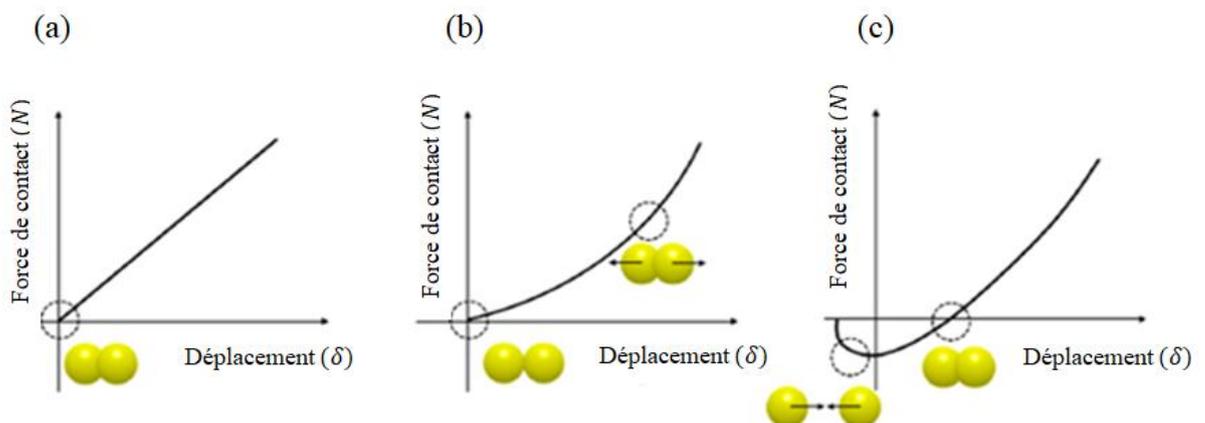


Figure IV.11 : Relation entre la force et le déplacement dans différents modèles de contact :
 (a) modèle à ressort linéaire, (b) modèle d'Hertz-Mindlin, (c) modèle d'Hertz-Mindlin + JKR

IV.5.1.2. Modèle élastique non linéaire

A. Modèle Hertz-Mindlin

Le modèle Hertz-Mindlin (figure IV.12) décrit la corrélation non linéaire entre la force normale et le déplacement des particules. Elle est représentée à la figure IV.11b.

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{\frac{3}{2}} \quad \text{IV.11}$$

Ici, E^* est le module de Young équivalent, et R^* est le rayon équivalent qui sont donnés par les équations (IV.12) et (IV.13), respectivement, et δ_n est le chevauchement normal.

$$E^* = \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \quad \text{IV.12}$$

E_1 , E_2 sont les modules de Young des particules en contact et ν_1 et ν_2 sont les coefficients de Poisson des particules en contact.

$$R^* = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1} \quad \text{IV.13}$$

R_1, R_2 Sont les rayons des particules en contact.

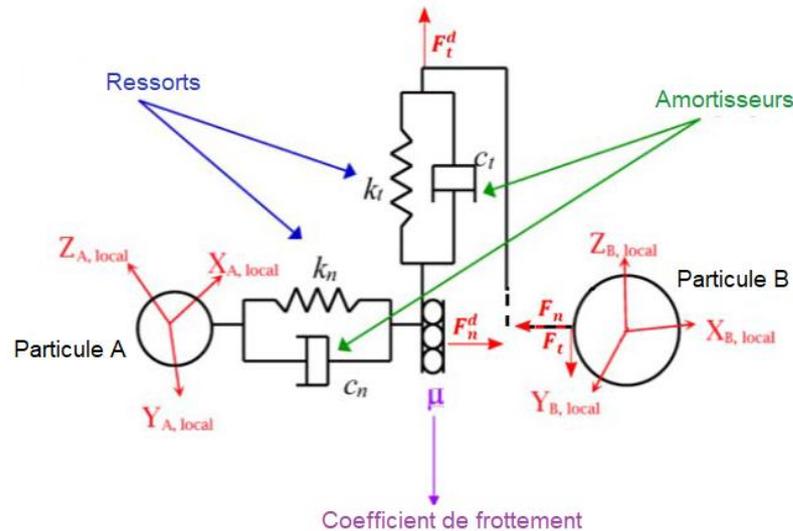


Figure IV.12 : Modèle Hertz-Mindlin

B. Modèle de contact tangential Mindlin et Deresiewicz

Mindlin et Deresiewicz ont développé un modèle tangential pour des contacts parfaitement élastiques. En raison du glissement tangential au contact, la relation force tangentielle-déplacement dépend de l'historique de chargement et du taux de variation de la force normale et tangentielle. Voici une description du modèle pour les cas où le déplacement normal ne change pas (Mitarai and Nakanishi 2003).

La force tangentielle est calculée à l'aide de l'équation générale IV.14.

$$F_t = F_{t0} + k_t(\delta_t - \delta_{t0}) \quad \text{IV.14}$$

Où F_t est la force tangentielle, $\delta_t - \delta_{t0}$ est le changement de déplacement tangentiel et k_t est la rigidité tangentielle. Initialement, lorsque le déplacement tangentiel commence à augmenter, la rigidité tangentielle est calculée par l'équation IV.15.

$$k_t = k_{t0} \left(1 - \frac{F_{t1}}{\mu F_n}\right)^{1/3} \quad \text{IV.15}$$

Où μ est le coefficient de frottement de glissement et k_{t0} et f_{t1} sont donnés par les équations IV.16 et IV.18 respectivement.

$$k_{t0} = 8G^*R^{*1/2}\delta_n^{1/2} \quad \text{IV.16}$$

Où G^* est le module de cisaillement de contact équivalent donné par l'équation IV.17.

$$G^* = \left(\frac{1-\nu_1^2}{G_1} + \frac{1-\nu_2^2}{G_2}\right) \quad \text{IV.17}$$

où G_1 et G_2 sont les modules de cisaillement des particules en contact.

$$F_{t1} = \frac{2}{3}k_{t0}\delta_t \quad \text{IV.18}$$

Le contact commence à glisser (macro-glissement) une fois que la force tangentielle atteint la limite de frottement de Coulomb donnée par : $|F_t| \leq \mu|F_n|$

B.1. Modèle de contact tangentiel sans glissement de Mindlin

Dans ce modèle, la force tangentielle est basée sur les travaux de Mindlin-Deresiewicz (Mindlin 1949) (Mindlin and Deresiewicz 1953). Les forces normales (éq. IV.19) et tangentielles (éq. IV.24) ont des composantes d'amortissement où le coefficient d'amortissement est lié au coefficient de restitution comme décrit dans (Tsuji, Tanaka et al. 1992). La force de frottement tangentielle suit la loi de Coulomb du modèle de frottement comme dans (Cundall et Strack 1979). Le frottement de roulement est implémenté comme modèle de couple constant directionnel indépendant du contact (Sakaguchi, Ozaki et Igarashi 1993).

$$F_n = \frac{4}{3}E^*\sqrt{R^*}\delta_n^{\frac{3}{2}} \quad \text{IV.19}$$

De plus, il y a une force d'amortissement F_n^d , donné par l'équation IV.20.

$$F_n^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{K_n m^*}u_n^{\text{rel}} \quad \text{IV.20}$$

Où m^* est la masse équivalente, donnée par l'équation IV.21.

$$m^* = \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}\right)^{-1} \quad \text{IV.21}$$

u_n^{rel} est la composante normale de la vitesse relative, β et K_n (la rigidité normale) sont données par les équations IV.22 et IV.23.

$$\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}} \quad \text{IV.22}$$

$$K_n = 2E^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad \text{IV.23}$$

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

$$F_t = -K_t \delta_t \quad \text{IV.24}$$

Avec

$$K_t = 8G^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad \text{IV.25}$$

De plus, l'amortissement tangentiel est donné par l'équation IV.26.

$$F_t^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{K_t m^*} v_t^{\text{rel}} \quad \text{IV.26}$$

Où v_t^{rel} est la vitesse tangentielle relative.

La force tangentielle maximale (limitée par le frottement du Coulomb) est calculée par l'équation IV.27.

$$F_{t\text{max}} = \mu_s F_n \quad \text{IV.27}$$

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.

$$\tau_i = -\mu_r F_n R_i \omega_i \quad \text{IV.28}$$

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.

IV.6. Modélisation de la déformation géométrique due à l'usure

L'usure du matériau due aux interactions des particules peut résulter d'un large éventail de phénomènes microscopique tels que la coupe, la rupture, la déformation plastique, la fatigue et bien d'autres, bien que la complexité et la diversité de ces phénomènes sous-jacents soient immenses, l'usure due aux interactions entre particules peut être utilement classée en deux grandes catégories : l'usure abrasive et l'usure érosive.

IV.6.1. Le model d'usure relative

Le modèle d'usure relative est un moyen d'identifier les régions d'usure par impact élevé (normale) et abrasive (tangentielle) sur l'équipement dans une simulation. Elle est calculée en fonction de la vitesse relative et des forces associées entre le matériau en vrac et l'équipement. Ce modèle nous fournit des données pour indiquer les régions dans lesquelles l'usure a lieu. Bien

qu'il fournisse des valeurs quantitatives pour la comparaison entre deux ou plusieurs itérations de conception, il ne détermine pas un taux d'enlèvement de matière explicite.

Les quatre propriétés d'usure relative sont l'énergie de contact cumulée normale, l'énergie de contact cumulée tangentielle, la force cumulée normale et la force cumulée tangentielle. L'énergie normale et l'énergie tangentielle mesurent l'énergie cumulée due respectivement à l'impact et au glissement du matériau, sont données par les équations IV.29 et IV.30.

$$E_n = \sum |F_n V_n \delta t| \quad \text{IV.29}$$

Où, V_n est la vitesse relative normale, elle est négative ($V_n < 0$) dans une situation de chargement.

$$E_t = \sum |F_t V_t \delta t| \quad \text{IV.30}$$

Où, V_t est la vitesse relative tangentielle.

$$F_{nc} = \sum |F_n| \quad \text{IV.31}$$

Quand $V_{n-1} < 0$ et $V_n > 0$

Le F_{nc} , est le cumul des forces maximales des différents contacts se produisant sur un élément géométrique. La force cumulée tangentielle (F_t) dépend du pas de temps sélectionné. Plus le pas de temps est petit, plus la force cumulée est grande.

IV.6.2. Le modèle d'usure abrasive (modèle d'Archard)

L'usure abrasive se produit lorsque des particules glissent contre les surfaces de l'équipement. Ce type d'usure peut être modélisé à l'aide du modèle d'usure Archard classique.

Le modèle Archard Wear étend tout modèle de base pour fournir une estimation de la profondeur d'usure des surfaces géométriques.

Le modèle est basé sur les travaux (Archard 1953) et utilise l'idée que la quantité de matière retirée de la surface sera proportionnelle au travail de friction effectué par les particules se déplaçant sur la surface.

L'équation d'Archard est définie par la relation IV.32.

$$Q = w F_n dt \quad \text{IV.32}$$

Où Q est le volume de matériau enlevé, dt est la distance tangentielle déplacée et w est une constante d'usure définie à l'origine comme par l'équation IV.33.

$$w = \frac{K}{H} \quad \text{IV.33}$$

Où K est une constante sans dimension et H est une mesure de la dureté de la surface la plus douce (basée sur la dureté Vickers en unités de Pa).

Comme l'équation prédit un volume de matériau à enlever, celui-ci est réorganisé pour fournir la profondeur par élément (éq. IV.34).

$$\text{Profondeur d'usure} = \frac{Q}{A_r} \quad \text{IV.34}$$

Où A_r est La surface réelle de contact

IV.6.3. Modèle d'usure d'érosion (modèle d'Oka)

Ce modèle est issu des travaux d'Oka et Yoshida (Oka and Yoshida 2005) (Oka, Okamura et al. 2005). L'usure par érosion se produit lorsque des particules heurtent les surfaces des équipements. Ce type d'usure peut être modélisé à l'aide du modèle d'usure Oka largement adopté, qui prédit le volume de matériau enlevé en raison de l'impact des particules en fonction des la taille des particules, de la vitesse d'impact et de l'angle d'impact. Seuls deux paramètres d'entrée sont requis pour le modèle : la dureté Vickers du matériau usé et une constante d'usure empirique.

La profondeur d'usure est déterminée par l'équation IV.35.

$$d_w = \frac{g(\alpha)E(\alpha)m_p}{A_r} \quad \text{IV.35}$$

Où d_w est la profondeur d'usure, α est l'angle d'impact des particules, $g(\alpha)$ est la dépendance de l'angle d'impact de l'érosion normalisée, $E(\alpha)$ est le volume d'usure par unité de masse, m_p est la masse de la particule et A_r est la zone de l'élément géométrique (figure IV.19).

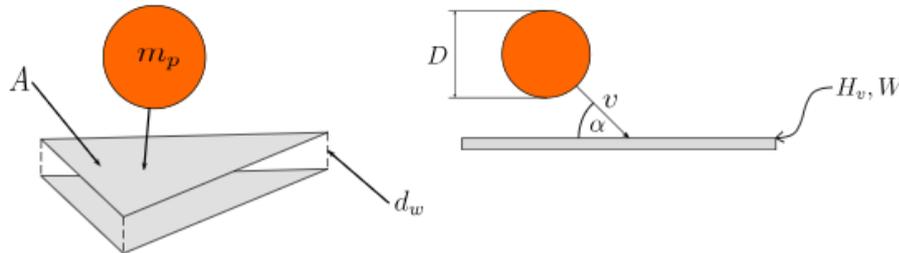


Figure IV.13 : Profondeur d'usure d'après le modèle d'Oka

Le volume d'usure par unité de masse est déduit par l'équation IV.36.

$$E_{(\alpha)} = 65w^{-k_1} \left(\frac{v}{104} \right)^{2.3} H_v^{0.038} \left(\frac{D}{0.326} \right)^{0.19} \quad \text{IV.36}$$

Où, w est la constante d'usure des matériaux, v est la vitesse d'impact des particules, H_v est la dureté Vickers du matériau usé, D est le diamètre des particules et k_1 est un coefficient dérivé expérimentalement.

La dépendance de l'angle d'impact de l'érosion normalisée est définie par l'équation IV.37.

$$g(\alpha) = \sin(\alpha)^{0.71} H_v^{0.14} (1 + H_v(1 - \sin(\alpha)))^{2.4} H_v^{-0.94} \quad \text{IV.37}$$

Où, $\sin(\alpha)^{0.71} H_v^{0.14}$ l'érosion normalisée due à des déformations répétées et $(1 + H_v(1 - \sin\alpha)^{2.4} H_v^{-0.94})$ le comportement de coupe de l'impact.

IV.7. Conclusion

Ce chapitre a présenté en détail l'approche par éléments discrets (DEM), une méthode de simulation numérique puissante pour modéliser le comportement des matériaux granulaires, tels que les boulets de broyage et les matériaux broyés.

Nous avons commencé par décrire les principes fondamentaux de la DEM, en explorant les différents modèles de sphères (dures et souples) et les forces qui gouvernent les interactions entre les particules.

Ensuite, nous avons examiné les calculs impliqués dans la DEM, notamment le calcul du mouvement des particules, des forces de contact et de non-contact, du pas de temps et de la nouvelle position des particules.

La modélisation discrète a été approfondie, en mettant l'accent sur les modèles de contact élastique qui permettent de simuler la déformation des particules.

Enfin, nous avons exploré les modèles de déformation géométrique due à l'usure, en particulier le modèle d'usure relative et le modèle d'usure abrasive d'Archard.

En conclusion, l'approche par éléments discrets s'impose comme un outil précieux pour la simulation de broyage.

Sa capacité à modéliser avec précision les interactions complexes entre les particules et à simuler l'usure des matériaux granulaires en fait un atout inestimable pour optimiser la conception et le fonctionnement des broyeurs.

En combinant la DEM avec des expériences et des connaissances en science des matériaux, les chercheurs et les ingénieurs peuvent développer des broyeurs plus efficaces, plus durables et plus respectueux de l'environnement.

Chapitre V

Simulation par Éléments discrets : Études et Application

V.1. Introduction

Afin de simuler avec précision la dynamique des particules avec DEM, les paramètres d'entrée de contact des particules doivent être bien définis (Barrios, de Carvalho et al. 2013). En général, les paramètres d'entrée sont divisés en deux types : les propriétés des matériaux et les paramètres d'interaction. Les caractéristiques des matériaux englobent des aspects tels que la densité, la forme et la taille des particules, le module de cisaillement et le coefficient de Poisson, les caractéristiques d'interaction comprennent le coefficient de restitution, le frottement statique et le frottement de roulement. De plus, les paramètres d'interaction peuvent inclure des paramètres supplémentaires tels que les coefficients d'amortissement et d'adhérence plastiques ou visqueux, qui dépendent du modèle de contact utilisé (Horabik and Molenda 2016).

V.2. Paramètres d'entrée pour la simulation DEM

V.2.1. Géométries dans les simulations DEM

La forme des particules est l'un des paramètres d'entrée importants à prendre en compte dans une simulation DEM. Par conséquent, la forme des particules doit être bien définie pour prédire avec précision la dynamique des particules (Yeom, Ha et al. 2019). En général, les particules sphériques sont préférées dans les simulations DEM car le contact est facile à voir et l'orientation des particules ne peut pas être déterminée (Coetzee 2017).

Mais les matériaux tels que les particules, les granulés et les comprimés utilisés dans les procédés de fabrication de l'industrie pharmaceutique ne se limitent pas aux sphères. Cependant, la définition de formes non sphériques utilisant de telles formes irrégulières est assez inefficace en termes de calcul en raison d'algorithmes compliqués pour la détection de contact par rapport aux sphères (Kodam, Bharadwaj et al. 2009; Santos, Barrozo et al. 2016). Pour réduire cette inefficacité de calcul et définir une forme non sphérique, une approche de sphères collées (appelée approche de sphère agglomérée) a été proposée qui relie ou superpose plusieurs sphères pour définir différentes formes de particules, comme le montre la figure V.1.

L'approche des sphères collées a également été utilisée pour définir des matériaux granulaires non sphériques (par exemple, des granules et des pellets) (Marigo and Stitt 2015; Zhao, Dai et al. 2015). Théoriquement, toute forme de particule peut être modélisée en augmentant le nombre de sphères qui se chevauchent tant que les calculs se situent dans une plage de complexité raisonnable. Le modèle de matériau final est généralement un équilibre entre une représentation détaillée des particules réelles et l'efficacité des calculs (figure V.2).

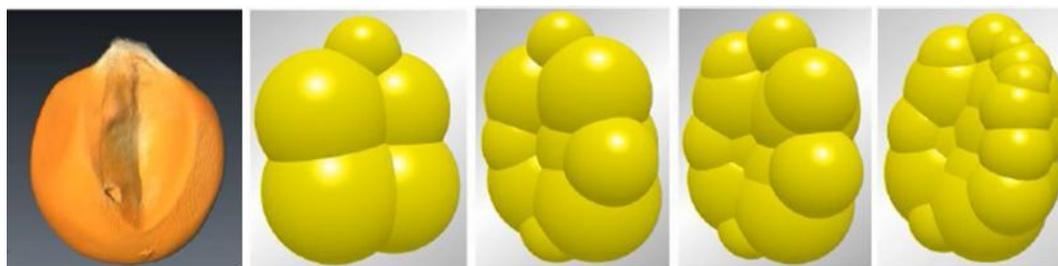


Figure V.1 : Représentation d'une graine à l'aide de 5, 10, 15 et 20 sphères collées.

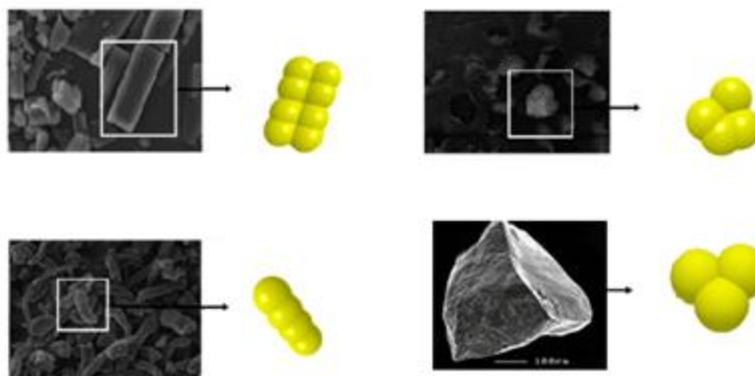


Figure V.2 : Représentation du modèle de matériau final par des sphères collées

V.2.2. Taille des particules

La taille des particules doit également être clairement définie afin de prévoir une dynamique précise des particules.

V.2.3. Propriétés des matériaux (Module d'Young, module de cisaillement et coefficient de Poisson)

Le module d'Young (E) désigne le module d'élasticité pour les contraintes de traction et de compression et le module de cisaillement (G) désigne le module d'élasticité pour les contraintes de cisaillement. Ils sont définis dans les équations V.1 et V.2.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{V.1}$$

$$G = \frac{\tau}{l} \quad \text{V.2}$$

Où σ , ε , τ et l sont la contrainte, la déformation, la contrainte de cisaillement et la déformation de cisaillement. La relation entre le module d'Young et le module de cisaillement est donnée par l'équation V.3.

$$E = 2(1 + \nu)G \quad \text{V.3}$$

Où ν est le coefficient de Poisson, qui est défini comme le rapport entre la déformation axiale et la déformation en cisaillement. Il est déterminé par l'équation V.4.

$$\nu = \frac{\Delta d/d_0}{\Delta l/l_0} \quad \text{V.4}$$

Où $\Delta l/l_0$ et $\Delta d/d_0$ désignent respectivement la déformation axiale et la déformation de cisaillement

V.2.4. Paramètres d'interaction

V.2.4.1. Coefficient de restitution

Le coefficient de restitution, qui est une mesure de l'élasticité d'un impact, peut être prédit à l'aide de la mécanique de contact. Cette méthode repose sur l'hypothèse que la charge d'impact est parfaitement plastique et que le rebond est parfaitement élastique (Johnson 1987; Thornton 1997). En général, le coefficient de restitution (e), est un paramètre utilisé pour déterminer la perte d'énergie lors d'un choc. La valeur de (e) se situe dans l'intervalle $0 \leq e \leq 1$, où ($e = 0$) indique une collision parfaitement plastique (perte totale d'énergie) tandis que ($e = 1$) indique une collision parfaitement élastique (aucune perte d'énergie).

Cependant, en pratique, il est impossible de créer une collision parfaitement élastique car une partie de l'énergie est dissipée sous forme de son, chaleur, énergie de déformation, etc. La valeur du (e) dépend de la vitesse d'impact (mouvement linéaire et angulaire), des propriétés du matériau, de la géométrie, du frottement de glissement et de la durée du contact (Ahmad, Ismail et al. 2016).

Le coefficient de restitution est un paramètre important dans la simulation DEM car il affecte la consommation d'énergie par les broyeurs à tambour et les spectres d'énergie (Matsanga, Nheta et al. 2023).

Le coefficient de restitution (e) est défini comme le rapport de la différence de vitesse avant et après le contact et est calculé à partir de l'équation V.5

$$e = \frac{V'_1 - V'_2}{V_1 - V_2} \quad \text{V.5}$$

Où V_1 et V_2 représentent la vitesse d'impact de la particule 1 et de la particule 2 avant le contact et V'_1 et V'_2 représentent la vitesse de rebond de la particule 1 et de la particule 2 après le contact.

V.2.4.2. Coefficient de frottement

La consommation d'énergie des broyeurs à tambour est sensible à la variation du coefficient de frottement en fonction de la conception du lifter (barre de levage) et du pourcentage de la vitesse critique de broyeur (Moys et al, 2001).

V.2.4.3. Coefficient de frottement statique

(μ_{st}) est déterminé comme le rapport entre la force de frottement statique (F_{st}) et la force normale (F_n) du matériau, comme le montre l'équation V.6.

$$\mu_{st} = \frac{F_{st}}{F_n} \quad \text{V.6}$$

V.2.4.4. Coefficient de frottement de glissement

(μ_{sl}) est défini comme le rapport entre la force de frottement de glissement (F_{sl}) et la force normale (F_n) du matériau (éq. V.7)

$$\mu_{sl} = \frac{F_{sl}}{F_n} \quad \text{V.7}$$

V.2.4.5. Coefficient de frottement de roulement

(μ_r) est défini comme le rapport entre la force de frottement de roulement (F_r) et la force normale du matériau. Il est donné par l'équation V.8.

$$\mu_r = \frac{F_r}{F_n} \quad \text{V.8}$$

Les différents paramètres d'interaction sont illustrés à la figure V.3.

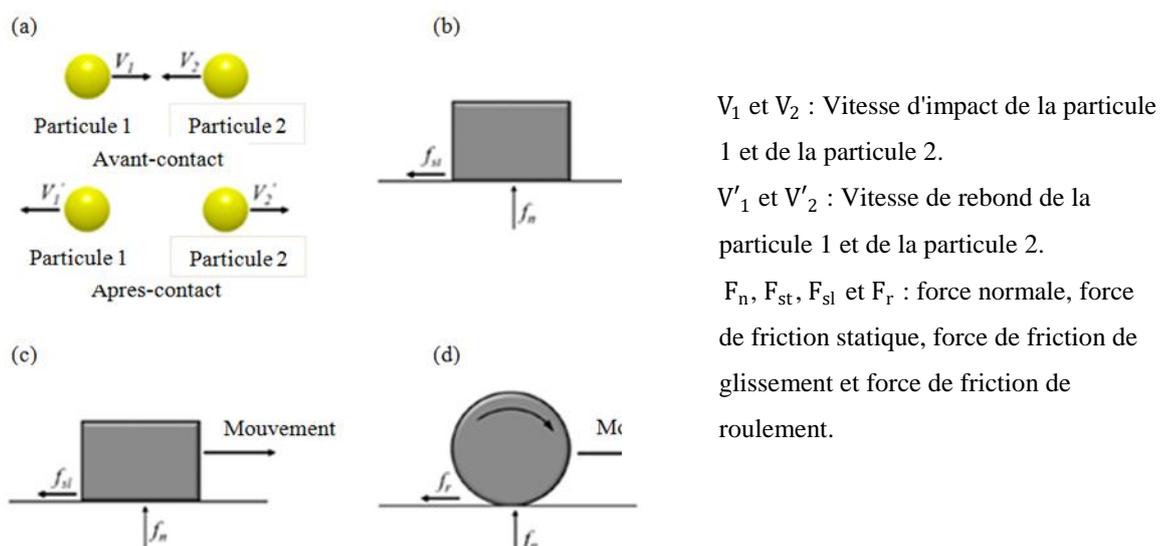


Figure V.3 : Illustration des paramètres d'interaction : (a) coefficient de restitution, (b) coefficient de frottement statique, (c) coefficient de frottement glissant et (d) coefficient de frottement roulant

V.2.4.6. Rigidité du matériau

La rigidité du matériau est déterminée expérimentalement par des études vidéo de balles rebondissant sur d'autres balles ou sur des cibles de matériau de revêtement spécifié. Les résultats expérimentaux sont généralement trop élevés et doivent être ajustés afin de permettre un chevauchement des particules de 0,1 à 1 % de leur dimension et d'avoir un pas de temps critique raisonnable sans perdre la précision et la stabilité des simulations. (Mishra 1991) et (Radziszewski 2002) montrent que la puissance absorbée dans les broyeurs à tambour est plus sensible au coefficient de restitution et au coefficient de friction qu'à la rigidité du matériau.

V.3. EDEM Software

Il existe un certain nombre de packages DEM disponibles à la fois dans le domaine public en tant que codes open source (e.g., LIGGGHTS [48], MercuryDPM, GranOO, MFIK, Yade) et logiciels commerciaux (e.g., EDEM® [49], PFC3DTM [50], STAR-CCM+, Rocky, DEMpack). De plus, de nombreux chercheurs ont développé leurs propres codes internes (Martín 2014).

Dans cette section, version 2.7 du logiciel EDEM® (provided by DEMSolutions, Edinburgh, UK) est utilisée en raison de son interface graphique conviviale de plus il permet l'extraction de tout type d'informations utilisées lors de la phase de simulation. Cependant, plus il génère de données, plus la puissance de calcul augmente, ce qui conduit à plusieurs gigaoctets dans certains cas (Carvalho 2013)

EDEM™ est une plateforme logicielle de simulation DEM (**D**iscrete **E**lement **M**ethod) conçue pour la simulation et l'analyse des opérations de manipulation et de traitement des particules en vrac (Solutions 2011)

Le logiciel EDEM d'Altair® est composé de 3 composants principaux: EDEM™ Creator, Simulator et Analyst.

V.3.1. EDEM Creator

EDEM Creator est le préprocesseur pour la création d'un modèle de simulation EDEM. Dans l'onglet Créateur, qui est chargé par défaut, l'utilisateur peut définir les propriétés physiques et matérielles des particules et des géométries ainsi que les propriétés de contact. Les géométries sont également créées dans cet onglet. L'utilisateur peut également définir la génération de particules dans l'onglet Créateur.

V.3.2. EDEM Simulator

Le simulateur EDEM est le solveur d'éléments discrets utilisé pour réaliser la simulation.

V.3.3. EDEM Analyst

EDEM Analyst est l'environnement de post-traitement dans lequel les simulations sont examinées et analysées.

- Ensemble complet d'outils de visualisation et d'analyse (coloration, représentation graphique, groupes de bacs).
- Créer des images et des vidéos hautes résolutions.

V.4. Applications Pratiques

Dans cette étude, nous utilisons la simulation par la méthode des éléments discrets pour étudier l'influence de la géométrie de nouveaux lifters et de la vitesse de rotation du broyeur à boulets sur quatre paramètres : le couple, la consommation de puissance, le comportement des particules et les forces de contact. Les résultats peuvent ensuite être utilisés pour optimiser les performances du broyeur, améliorer l'efficacité énergétique, réduire les coûts opérationnels et évaluer l'usure des revêtements du broyeur, des supports de broyage et d'autres composants internes, comme les boulets de broyage.

Pour appréhender le processus de broyage d'un broyeur à boulets, des boulets sphériques de dimensions variées ont été générés à l'aide du logiciel EDEM. Par la suite, une représentation simplifiée de la géométrie d'un broyeur conçu par Bian (2017) a été intégrée dans ce même logiciel.

Dans un premier temps, les résultats de simulation par éléments discrets obtenus dans cette étude seront validés à l'aide de résultats expérimentaux obtenus par Bian et al., en faisant varier la hauteur des barres de levage (lifters). Dans un second temps et après validation des résultats de simulation, nous proposons de nouveaux lifters de forme hélicoïdale à différents pas et nous examinons leur influence sur le couple, la consommation de puissance, le comportement des particules et les forces de contact et l'usure des chemises

V.4.1. Configuration de la simulation

V.4.1.1. *Forme des particules*

Étape 1 : Les caractéristiques des matériaux ainsi que les paramètres d'interaction sélectionnés pour les simulations sont présentés dans le tableau V.1. Ces éléments sont définis

dans EDEM Creator, comme illustré dans la figure V.4 (*Étape 1 dans la configuration de la simulation*).

Tableau V.1 : Propriétés des matériaux et paramètres d'interaction

Propriétés du matériau		Paramètres d'interaction	
Densité de l'acier	7800 kg/m ³	Coefficient de restitution	0.5
Coefficient de poisson	0.25	Coefficient de Frottement statique	0.5
Module de cisaillement	7e+10 Pa	Coefficient de Frottement de roulement	0.01

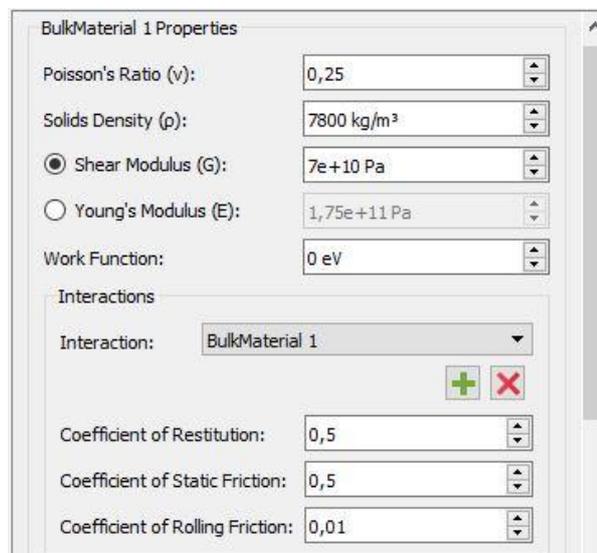


Figure V.4 : Réglage global des propriétés des matériaux et d'interaction dans EDEM

Étape 2 : Pour la deuxième étape de la configuration, les boulets ont été définis dans EDEM Creator comme des particules sphériques (figure V.5). La distribution de leurs diamètres est donnée dans le tableau V.2.

Tableau V.2 : Distribution du diamètre des boulets

Diamètre (mm)	Nombre de boulets	Pourcentage en volume (%)
20	111	5.68
15	795	17.16
13	3051	42.87
8	10474	34.29

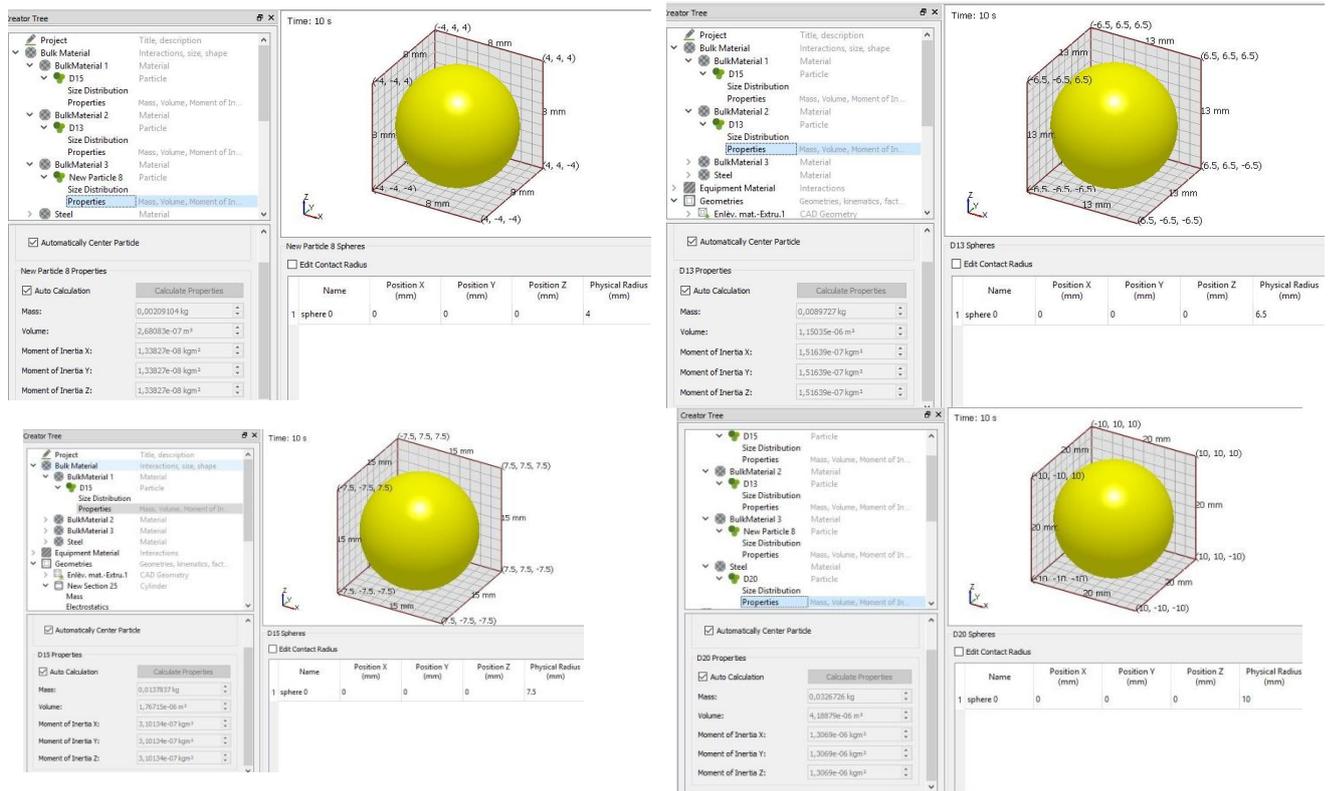


Figure V.5 : Boulets créés par EDEM

V.4.1.2. Géométrie du broyeur

Les dimensions du broyeur, celles des lifters ainsi que la vitesse et le taux de remplissage du broyeur utilisé dans nos simulations sont répertoriés dans le tableau V.3. Ces paramètres ont été choisis en faisant référence au broyeur à boulets développé par Bian et al. (2017). Il s'agit d'un broyeur à boulets cylindrique de 573 mm de diamètre et 160 mm de longueur. Il est équipé de 24 lifters, et sa vitesse de rotation ω varie entre 60% et 100% de la vitesse critique du broyeur

Tableau V.3 : Paramètres de simulation du broyeur

Spécification	Dimension	
Broyeur	Diamètre D (m)	0.573
	Longueur L (m)	0.160
Barres de levage (lifters)	Nombre de barres de levage	24
	Dimensions des lifters	10x18 et 17x12
Vitesse du broyeur	Vitesse critique du broyeur (tr/min)	N = 55,87
	Vitesse de rotation ω (tr/min)	(60%, 70%, 75%, 80%, 90% 100%) x N
Broyage	Taux de remplissage %	35

Étape 3 : La troisième étape implique l'importation des géométries CAO dans EDEM Creator. Les formes du tambour, comprenant les divers profils de lifters, ont été créées à l'aide de Solidworks 2018, puis sauvegardées sous le format d'échange CAO avant d'être intégrées dans EDEM (figure V.6).

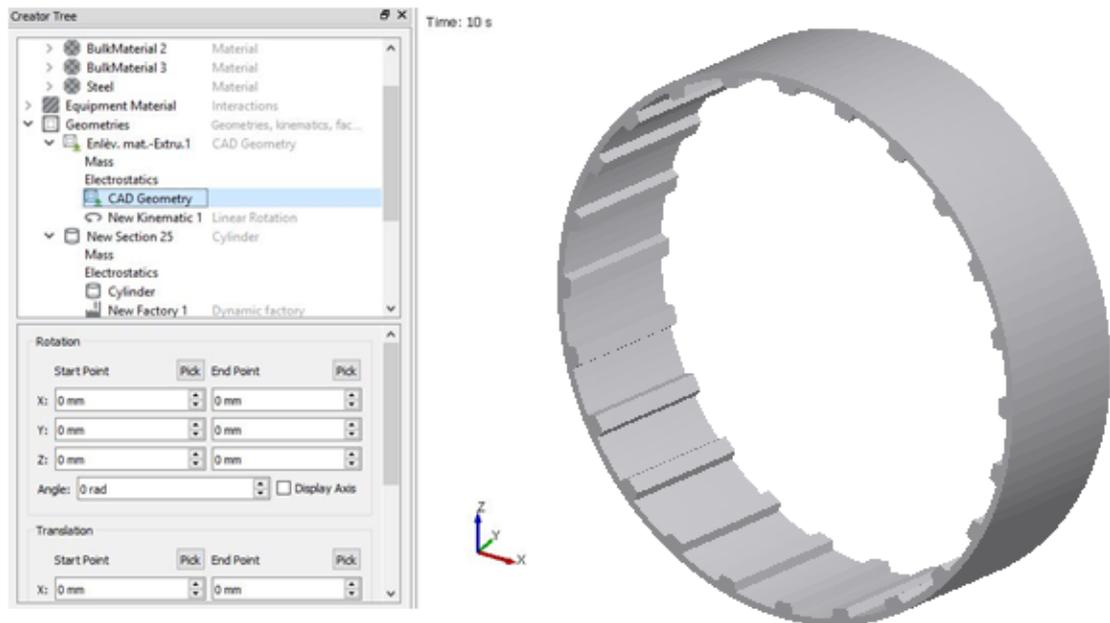


Figure V.6 : Tambour intégré dans EDEM

Étape 4 : En appliquant constamment EDEM Creator et afin de simuler la dynamique du tambour, nous utilisons les vitesses répertoriées dans le tableau V.3, en nous basant sur la théorie de la cinématique de rotation linéaire.

Étape 5 : Pour obtenir le matériau en vrac dans la simulation, il faut créer une usine de particules dans EDEM Creator. Cette fabrique de particules est utilisée pour définir où, quand et comment les particules apparaissent dans la simulation. Les frontières périodiques de la fabrique de particules ont été définies dans les directions x, y et z. La fabrique de particules a été définie, le nombre de particules a été inclus à ce stade. Une usine statique signifie que les particules sont créées au début de la simulation et que la dynamique des particules sera créée au cours de la simulation (figure V.7).

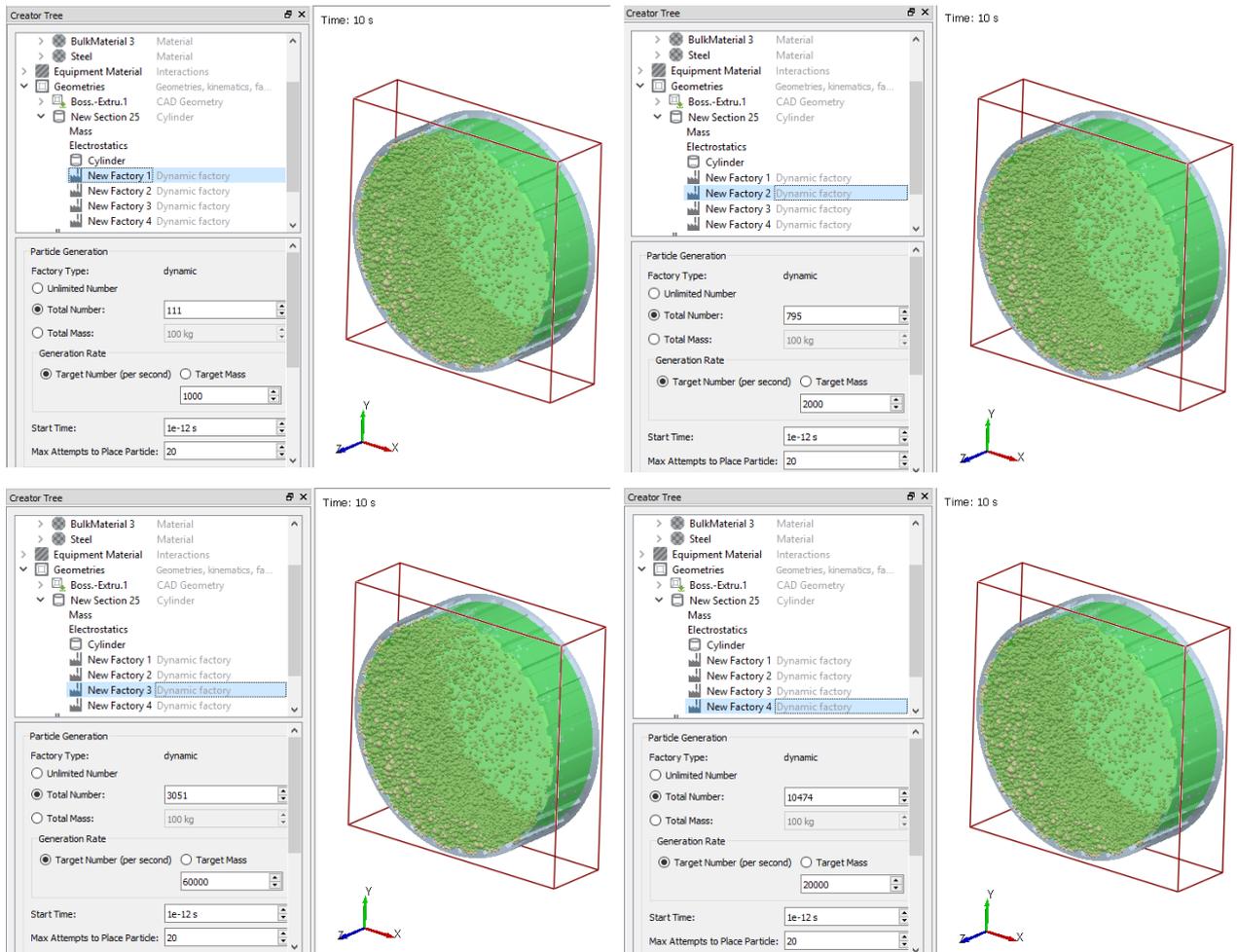


Figure V.7 : Réglage de l'usine de particules statiques utilisée dans EDEM

Étape 6 : Cette phase est caractérisée en tant que étape physique, et elle consiste à répertorier les modèles de contact disponibles dans le logiciel EDEM (figure V.8).

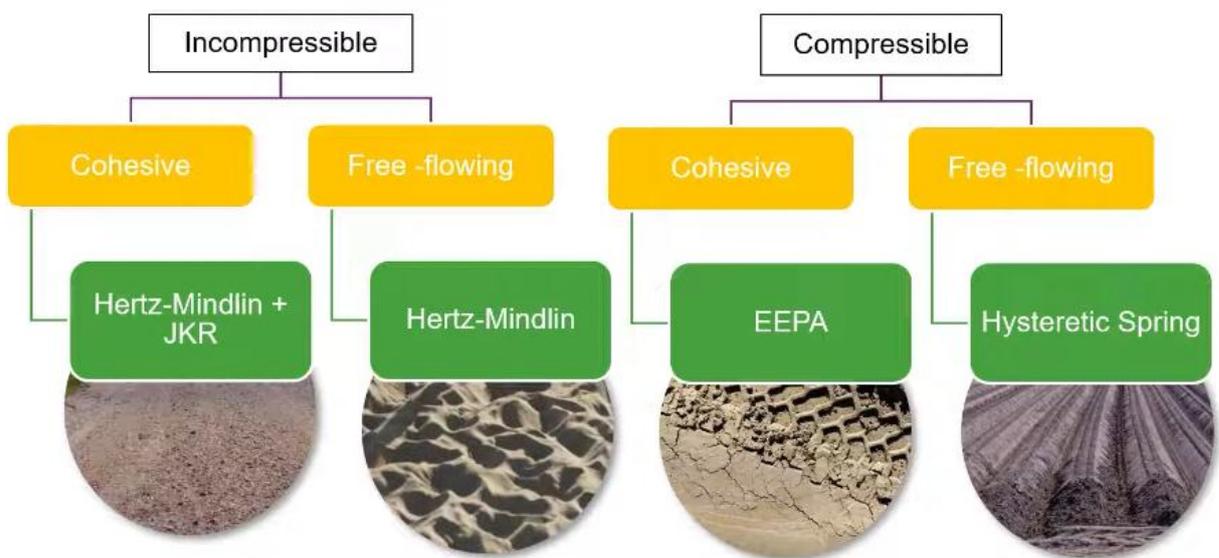


Figure V.8 : Modèles physique (EDEM™)

Un modèle de contact décrit comment les éléments se comportent lorsqu'ils entrent en contact les uns avec les autres. Pour cette simulation, nous ajouterons des calculs d'usure au modèle Hertz-Mindlin, qui nous permettront d'étudier l'énergie cumulée sur l'équipement et le modèle d'usure d'Archard pour estimer la profondeur d'usure des surfaces géométriques (figure V.9).

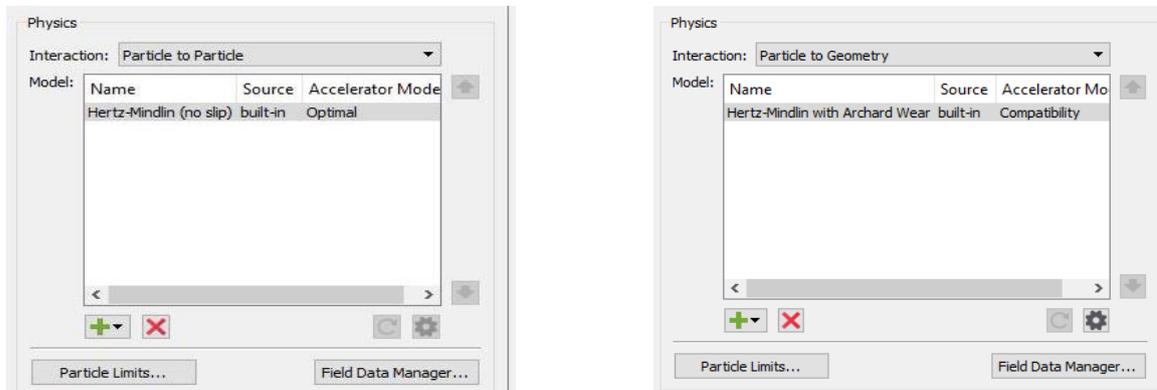


Figure V.9 : Choix des modèles de contact

Étape 7 : Dans EDEM Creator, il est nécessaire de spécifier la zone où la simulation se déroulera, c'est-à-dire l'environnement de simulation. Le domaine, représenté par le cadre rouge dans la figure V.10, délimite la zone d'action de la simulation. Pour nos simulations, nous réduisons la taille de ce domaine afin de diminuer le temps de simulation.

V.4.1.3. Exécution de la simulation

Étape 8 : Une fois la configuration du modèle accomplie dans EDEM Creator, nous procédons à son exécution dans EDEM Simulator. La durée de simulation a été définie à 10 secondes, avec un pas de temps établi à 20% du pas de temps de Rayleigh, soit $3.4294e-06$ s (figure V.10).

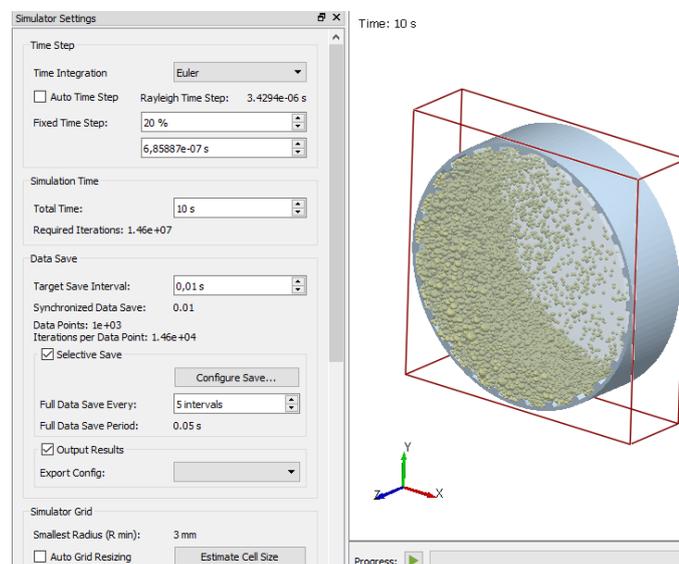


Figure V.10 : Capture d'écran de la configuration de simulation utilisée dans le logiciel EDEM

V.4.1.4. Analyse des paramètres simulés

Étape 9 : L'évaluation des paramètres simulés, tels que le couple, l'énergie cinétique et les forces de contacts, a été effectuée en utilisant le logiciel EDEM Analyst.

V.4.2. Validation des résultats de simulation

Un modèle géométrique a été créé sur la base du modèle réel d'un broyeur à boulets construit par Bian.X (2017). Les hauteurs des poussoirs LH=10 mm et LH=17 mm (figure V.11) ont été choisies, car elles représentent la plage raisonnable de levage dans le broyeur (Bian, Wang et al. 2017). Le taux de remplissage du broyeur a été fixé à 35 % et le nombre de boulets à 24. La durée du broyage a été fixée à 10 secondes.

La validation de la simulation a été réalisée en deux étapes. Premièrement, les résultats expérimentaux du couple et de la puissance du broyeur ont été comparés aux résultats obtenus par la simulation pour chaque forme de levage à différentes vitesses.

Dans une deuxième phase, la validation qualitative du comportement des particules a été réalisée. Bian.Xa validé expérimentalement la simulation en se concentrant sur la hauteur de releveur HL=10mm lorsque le broyeur fonctionne à six taux de rotation en comparant les prédictions du DEM avec leur expérience. Par conséquent, nous avons étudié le comportement des particules grâce à des simulations et les avons comparés aux résultats obtenus par X.Bian (figure V.16)

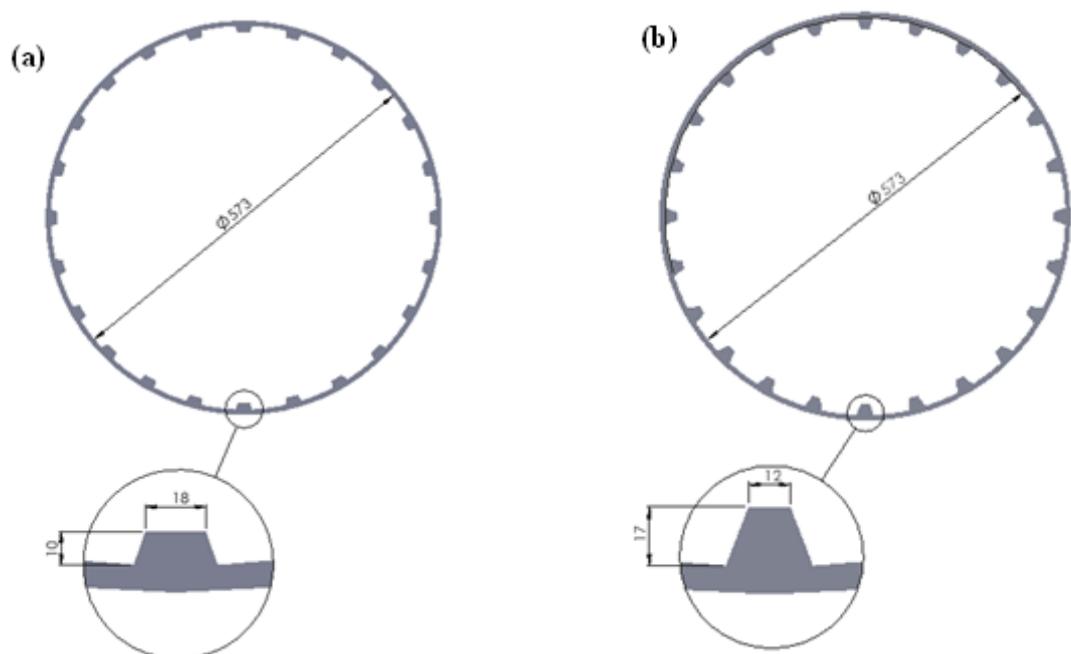


Figure V.11 : Détails géométriques des lifters : (a) LH = 10 mm, (b) LH = 17 mm

V.4.2.1. Coulpe et puissance du broyeur

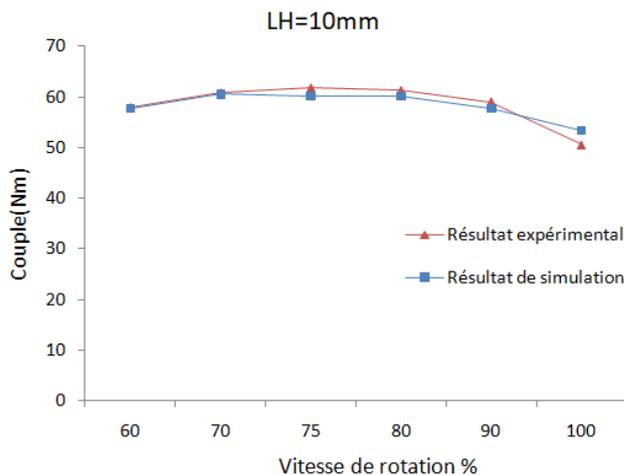


Figure V.12 : Couple moyen en fonction de la vitesse du broyeur liner, HL =10 mm

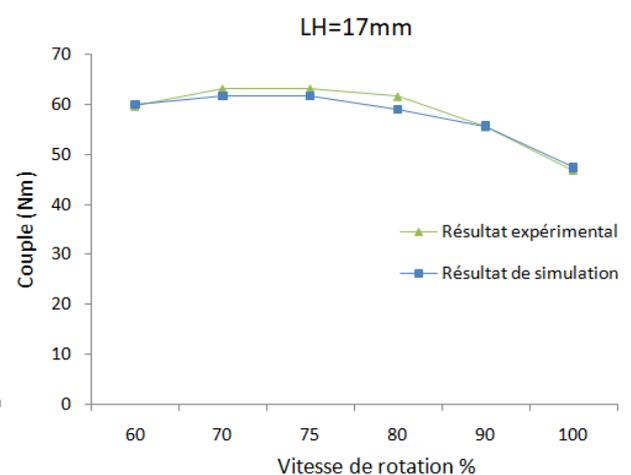


Figure V.13 : Couple moyen en fonction de la vitesse du broyeur liner, LH =17 mm

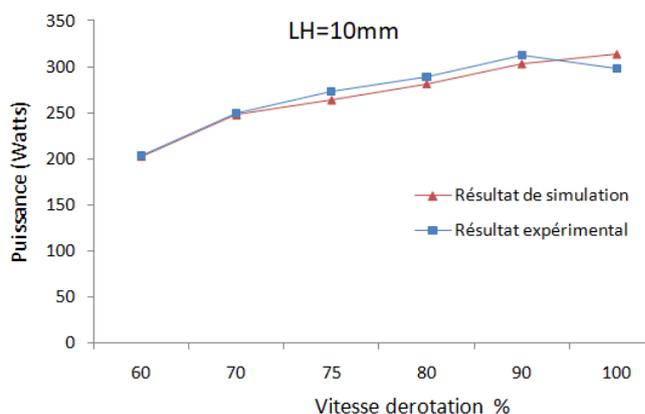


Figure V.14 : La puissance en fonction de la vitesse du broyeur liner, LH =10 mm

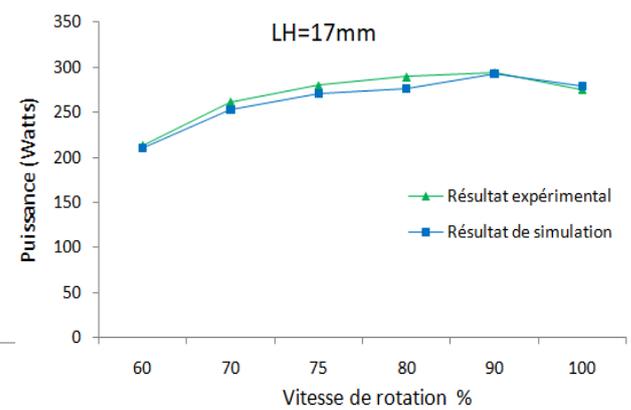


Figure V.15 : La puissance en fonction de la vitesse du broyeur liner, LH =17 mm

Les résultats expérimentaux montrent que le couple augmente avec la vitesse de rotation, mais de manière non linéaire. Le couple atteint un maximum d'environ 61 Nm pour HL=10(Figure V.12) et 63 Nm pour HL=17 (Figure V.13) à la vitesse de rotation $\omega=75\%$ et la puissance atteint un maximum d'environ 313 Watts pour HL=10(Figure V.14) et 294 Nm pour HL=17 (FigureV.15) à la vitesse de rotation $\omega=90\%$

Les résultats de la simulation sont en bon accord avec les résultats expérimentaux. Le couple et la puissance augmente avec la vitesse de rotation, mais de manière non linéaire. Le couple atteint un maximum d'environ 60 Nm pour HL=10 (Figure 4.12) et 61 Nm pour HL=17 (Figure V.13) à la vitesse de rotation $\omega=75\%$ et La puissance atteint un maximum d'environ 304 Watts pour HL=10 (Figure V.14) et 293 Watts pour HL=17(Figure V.15) à la vitesse de rotation $\omega=90\%$

Au-delà de la vitesse $\omega=75\%$, le couple commence à diminuer, Cette diminution du couple est probablement due à l'augmentation de la vitesse des boulets. À des vitesses élevées, les boulets peuvent entrer en collision les uns avec les autres et avec les parois du broyeur. Cette collision provoque une perte d'énergie, ce qui se traduit par une diminution du couple. La hauteur des élévateurs a un effet significatif sur le couple et la puissance du broyeur à boulets. En augmentant la hauteur des élévateurs, on augmente la distance que les boulets doivent parcourir pour atteindre la paroi du broyeur. Cela augmente l'énergie cinétique des boulets, ce qui se traduit par une augmentation du couple et de puissance.

La différence entre les résultats expérimentaux et de simulation est probablement due à l'incertitude expérimentale. L'incertitude expérimentale peut être due à une variété de facteurs, tels que la précision des instruments de mesure, les variations de la composition des matériaux, et les conditions environnementales.

En général, les résultats de la simulation sont en bon accord avec les résultats expérimentaux. Cela suggère que la méthode des éléments discrets est un outil valable pour la simulation des broyeurs à boulets.

Tableau V.4 : Comparaison des résultats simulés et des résultats expérimentaux LH 10mm

Vitesse (%)	Simulation		Expérience		Ecart (%)	
	Couple (N.m)	Puissance (Watts)	Couple (N.m)	Puissance (Watts)	Puissance (Watts)	Couple (N.m)
60	57,786	202,831	57,922	203,887	0,518	0,235
70	60,516	248,115	60,779	249,804	0,676	2,551
75	60,165	264,126	61,740	273,509	3,431	2,551
80	60,187	281,675	61,259	288,534	2,377	1,750
90	57,711	303,559	59,035	312,885	2,981	2,243
100	53,426	314,147	50,590	297,979	5,426	5,606

Ecart moyenne (Couple) = 2,489 (N.m) obtenue à partir de tableau

Ecart moyenne (Puissance) = 2,568 (Watts) obtenue à partir de tableau

Tableau V.5 : Comparaison des résultats simulés et des résultats expérimentaux LH 17mm

Vitesse (%)	Simulation		Expérience		Ecart (%)	
	Couple (N.m)	Puissance (Watts)	Couple (N.m)	Puissance (Watts)	Puissance (Watts)	Couple (N.m)
60	59,921	210,325	59,667	213,011	1,261	-0,426
70	61,650	252,768	63,181	261,571	3,365	2,423
75	61,682	270,787	63,181	279,893	3,253	2,373
80	59,065	276,427	61,588	289,466	4,505	4,097
90	55,672	292,838	55,546	294,394	0,529	0,227
100	47,383	278,616	46,773	275,493	1,134	1,304

Ecart moyenne (Couple) = 1,666 obtenue à partir de tableau

Ecart moyenne (Puissance) = 2,341 obtenue à partir de tableau

V.4.2.2. Comportement des particules

Les figures de V.16a à V.16f illustrent le déplacement des particules à l'intérieur du broyeur pour différentes valeurs de la vitesse de rotation, à savoir $\omega=0\%$, $\omega=60\%$, $\omega=70\%$, $\omega=75\%$, $\omega=80\%$ et $\omega=90\%$.

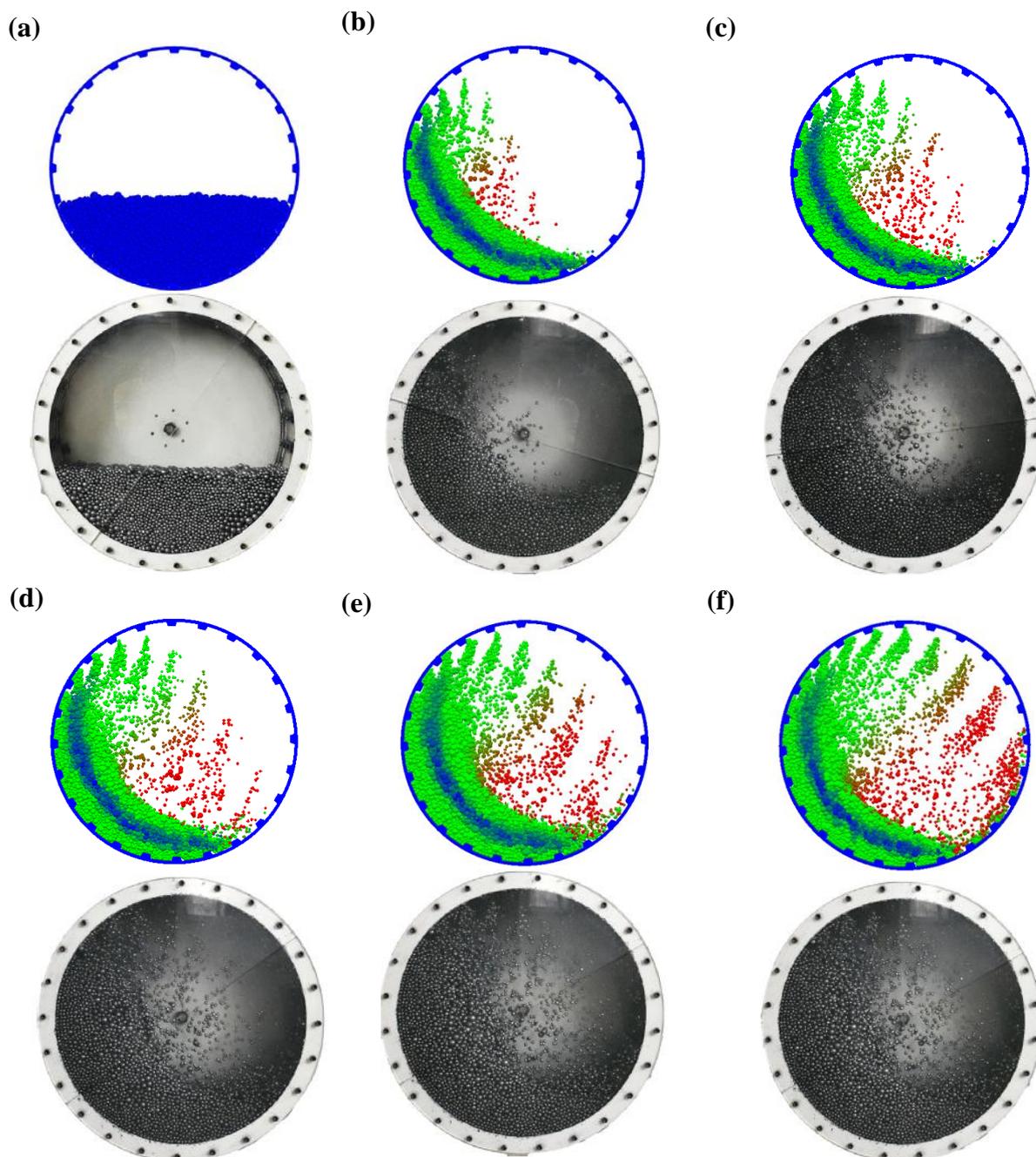


Figure V.16 : Comparaison du comportement des particules 3D DEM avec le broyeur à boulets expérimental pour différents vitesse de rotation : (a) $\omega=0\%$, (b) $\omega=60\%$, (c) $\omega=70\%$, (d) $\omega=75\%$, (e) $\omega=80\%$ et (f) $\omega=90\%$.

Les trajectoires des particules dans la simulation présentent des similitudes avec les schémas expérimentaux décrits dans l'article de Bain et al. (2017). Ainsi, lorsque $\omega = 0\%$ (figure V.16a), les particules demeurent dans un état statique. À une vitesse égale à 60 % de la vitesse critique, les particules se déplacent depuis le bas de la charge jusqu'à la position de l'épaule, où ils

descendent en cascade (figure V.16b). À des vitesses plus élevées, telles que $\omega = 70\%$, $\omega = 75\%$ et $\omega = 80\%$, les particules atteignent des positions d'épaule bien plus élevées et sont éjectées dans l'espace en cataractes. La quantité de particules cataractées augmente proportionnellement à l'augmentation progressive de la vitesse du broyeur, comme illustré dans les figures V.16c, V.16d et V.16e. À une valeur de $\omega = 90\%$, on observe une augmentation significative de la quantité de particules cataractées, recouvrant pratiquement l'intégralité de la section transversale du broyeur (figure V.16f).

V.5. Effets des Barres de Levage Hélicoïdales (investigation nouvelle)

Les barres de levage (lifters) jouent non seulement un rôle important dans la protection du cylindre du broyeur, mais aussi élèvent les particules à une certaine hauteur pour réaliser l'écrasement. L'optimisation des performances des broyeurs à boulets est cruciale dans le domaine de la comminution, où l'efficacité énergétique et la réduction des coûts opérationnels sont des objectifs primordiaux. Dans cette perspective, l'introduction de barres de levage hélicoïdales représente une innovation significative visant à améliorer l'efficacité du broyeur.

Suite à la comparaison et à la confirmation des résultats de simulation avec les données expérimentales de Bian et al., et après avoir vérifié la fiabilité de la Méthode des Éléments Discrets (DEM), nous avons employé cette approche pour examiner l'influence des nouvelles configurations de barres de levage hélicoïdales et de la vitesse du broyeur sur des paramètres tels que le couple, la consommation électrique, le comportement des particules, les forces de contact et l'usure par abrasion au sein du broyeur à boulets.

Comme illustré dans la figure V.17, nous avons modélisé un revêtement présentant un profil de surface trapézoïdal, en utilisant différents pas de profils pour les lifters droit, HP2, HP3 et HP4. L'objectif était d'analyser leur impact sur la consommation d'énergie et l'efficacité de broyage d'un broyeur à boulets à petite échelle. Les dimensions du broyeur et des lifters sont détaillées dans la figure V.11a

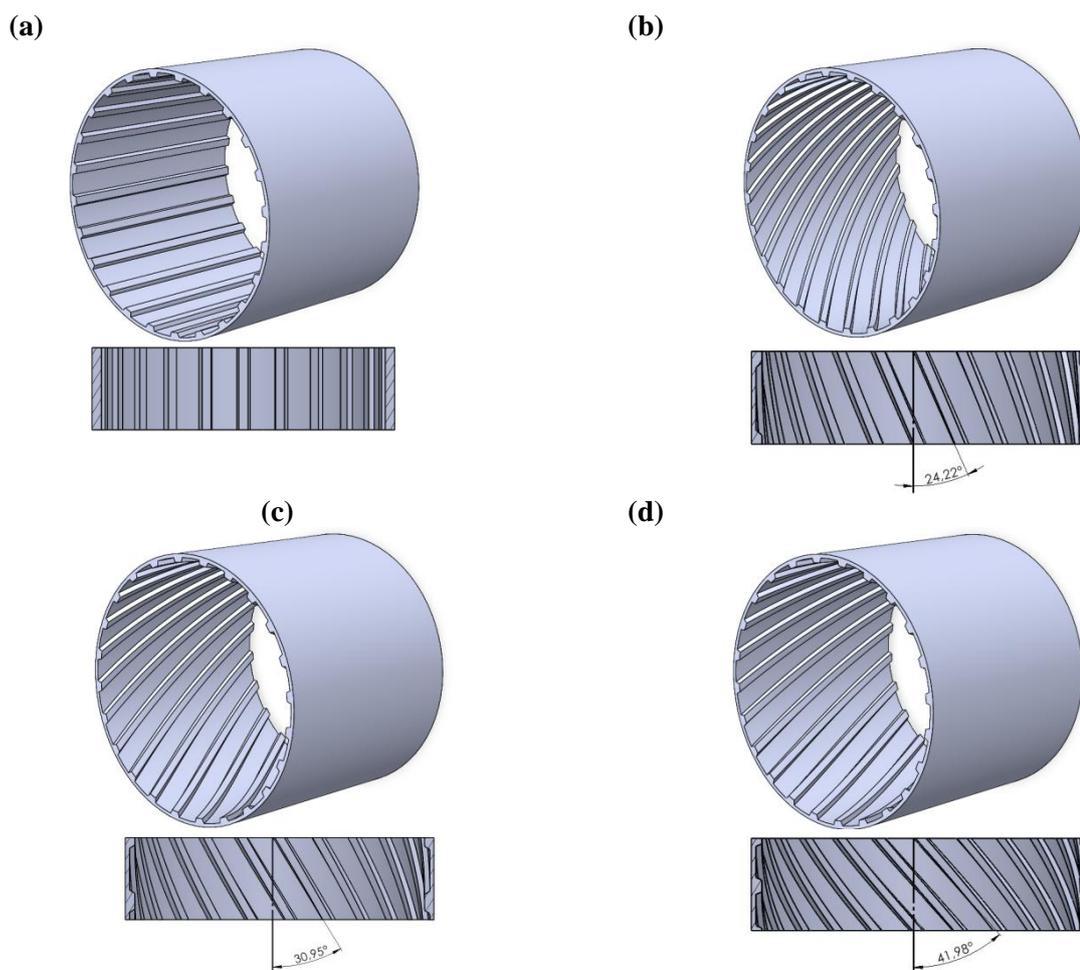


Figure V.17 : Configuration des lifters utilisés dans les simulations : (a) Profilé droit, (b) Profilé hélicoïdal pas 2000 mm (HP2), (c) Profilé hélicoïdal pas 3000 mm (HP3), (d) Profilé hélicoïdal pas 4000 mm (HP4)

V.5.1. Influence de la géométrie des lifters et du taux de rotation sur le couple du broyeur

Chaque collision de particules avec le revêtement du broyeur produit un couple sur le broyeur. Pour chaque pas de temps, ces couples individuels sont additionnés pour donner le couple instantané sur le broyeur. Seules les particules en contact avec le broyeur y contribuent. Si, par exemple, des particules sont en vol libre, alors elles ne contribuent pas au couple jusqu'à ce qu'elles heurtent la chemise en bas de leur vol. Le produit du couple total du broyeur avec la vitesse angulaire du broyeur (en rad/s) donne la consommation d'énergie instantanée requise pour maintenir le broyeur en mouvement à la vitesse spécifiée par rapport à ce couple appliqué. La consommation d'énergie instantanée est très variable en raison de la nature impulsive des interactions. La moyenne de la puissance sur plusieurs secondes donne une mesure relativement invariante de la consommation d'énergie qui peut être comparée de manière significative aux résultats expérimentaux.

La figure V.18 présente l'influence de la forme des lifters sur le couple à différentes vitesses du broyeur.

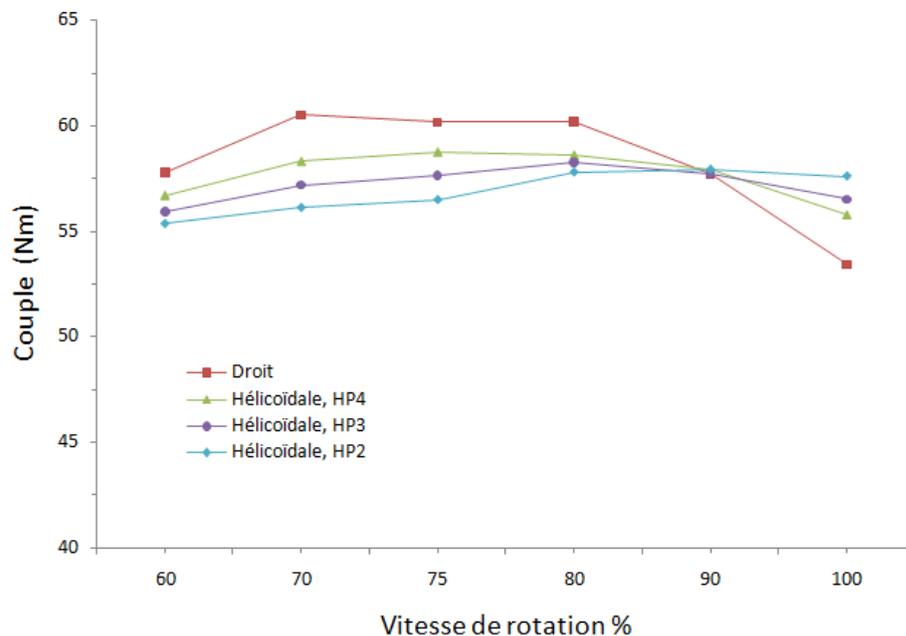


Figure V.18 : Évolution du couple en fonction de la géométrie des lifters et de la vitesse de rotation du broyeur.

Le couple maximal est atteint à une vitesse de rotation comprise entre 70% et 80% pour les lifters droits, HP3 et HP4. Pour le lifter droit, il maintient une valeur d'environ 60Nm pour les vitesses de 70, 75 et 80%. Au-delà de 80%, la quantité de particules cataractées augmente avec la vitesse de rotation du broyeur. Les particules cataractées sont des particules qui sont projetées hors du broyeur par la force centrifuge. L'augmentation de la quantité de particules cataractées permet aux particules restantes de se déplacer plus librement dans le broyeur. Cela entraîne une amélioration de l'équilibre de la charge.

À l'exception du lifter HP2, la quantité de particules cataractées est la plus faible lorsque la vitesse augmente ce qui affecte le couple. Pour ce lifter, le couple atteint son maximum à un taux de rotation de 90 %.

Le couple augmente progressivement avec l'augmentation du pas des profils hélicoïdaux, pour les vitesses comprises entre 60% et 80%. Cependant, pour des valeurs de ω égales ou supérieures à 90%, cette tendance s'inverse, entraînant une diminution du couple.

V.5.2. Influence de la géométrie des lifters et de la vitesse de rotation sur la puissance consommée par broyeur

La figure V.19 présente l'évolution de la puissance en fonction de la géométrie des lifters et de la vitesse de rotation du broyeur.

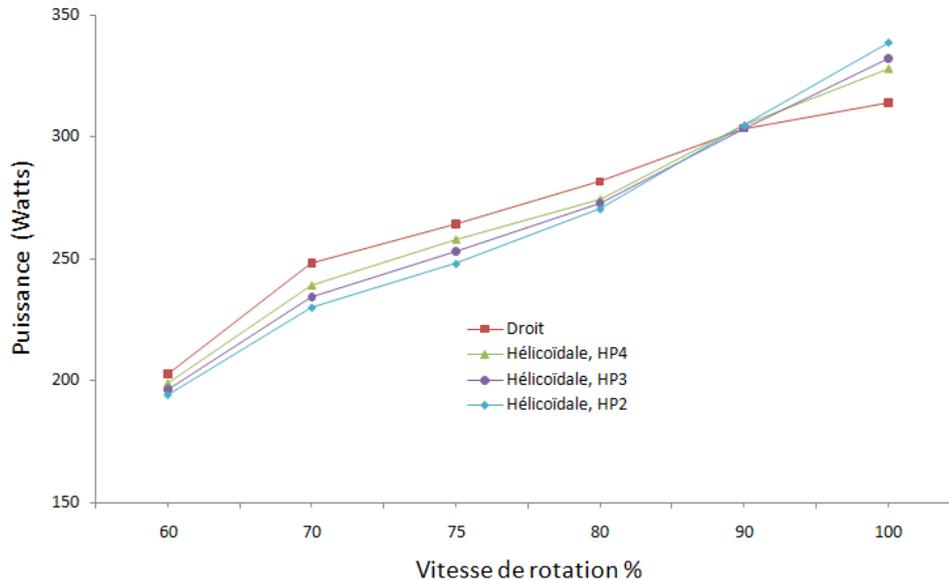


Figure V.19 : Évolution de la puissance en fonction de la géométrie des lifters et de la vitesse de rotation du broyeur

Généralement, le broyeur consomme plus de puissance à mesure que sa vitesse augmente. Quand la vitesse de rotation du broyeur passe de 60% à 90%, la consommation de puissance diminue pour les nouvelles barres de levage hélicoïdales. Cela représente un avantage significatif en termes de réduction du coût total de l'énergie consommée par les cimenteries.

De plus, la puissance absorbée semble être inversement proportionnelle au pas des lifters hélicoïdaux lorsque $\omega \geq 90\%$.

V.5.3. Influence de la géométrie des lifters et de la vitesse de rotation sur le comportement des particules

L'effet de la géométrie des lifters sur le comportement des particules à différentes vitesses de rotation ($\omega = 60$ à 100%) est mis en évidence par les figures V.20, V.21, V.22 et V.23. Les paramètres de simulation suivants ont été utilisés : nombre de lifters = 24, hauteur du poussoir LH = 10 mm (figure V.11a), et taux de remplissage=35%.

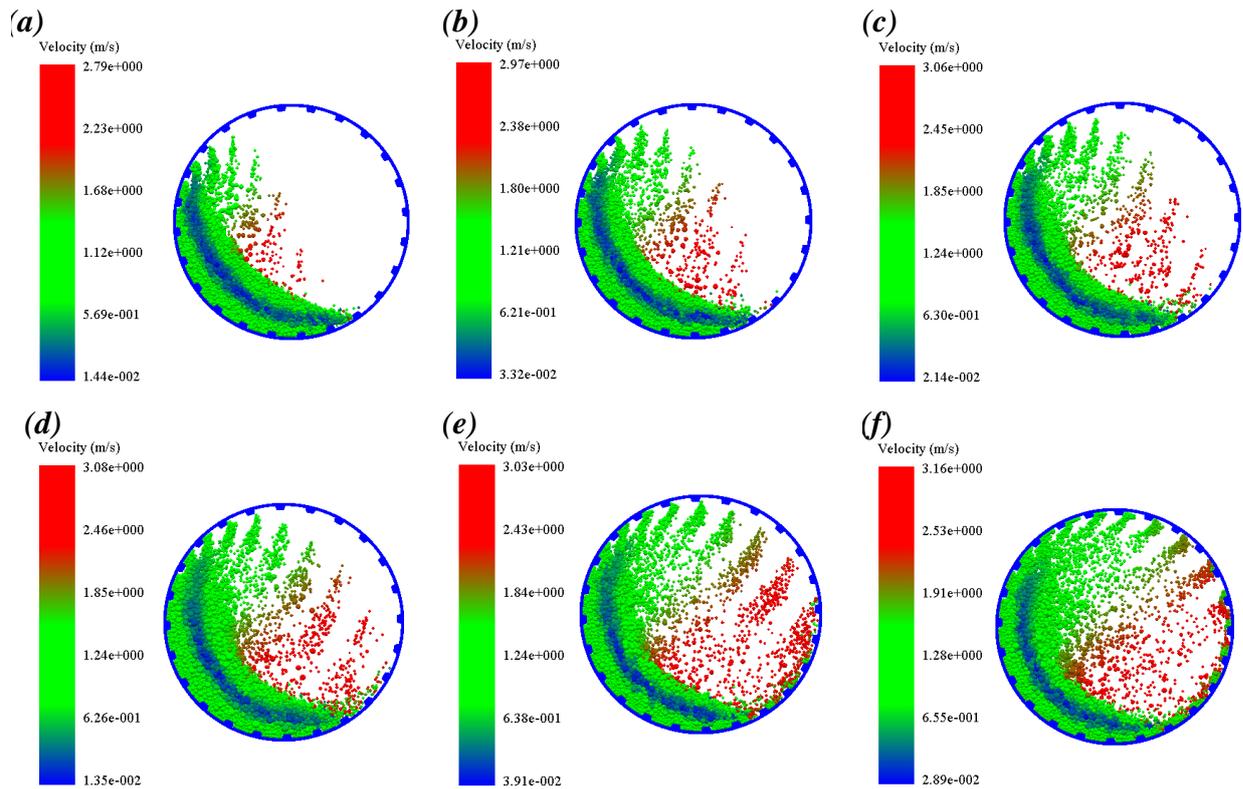


Figure V.20 : Effet de la géométrie des lifters droits sur le comportement des particules du broyeur à boulets pour différentes vitesses de rotation : (a) $\omega=60\%$, (b) $\omega=70\%$, (c) $\omega=75\%$, (d) $\omega=80\%$, (e) $\omega=90\%$, (f) $\omega=100\%$.

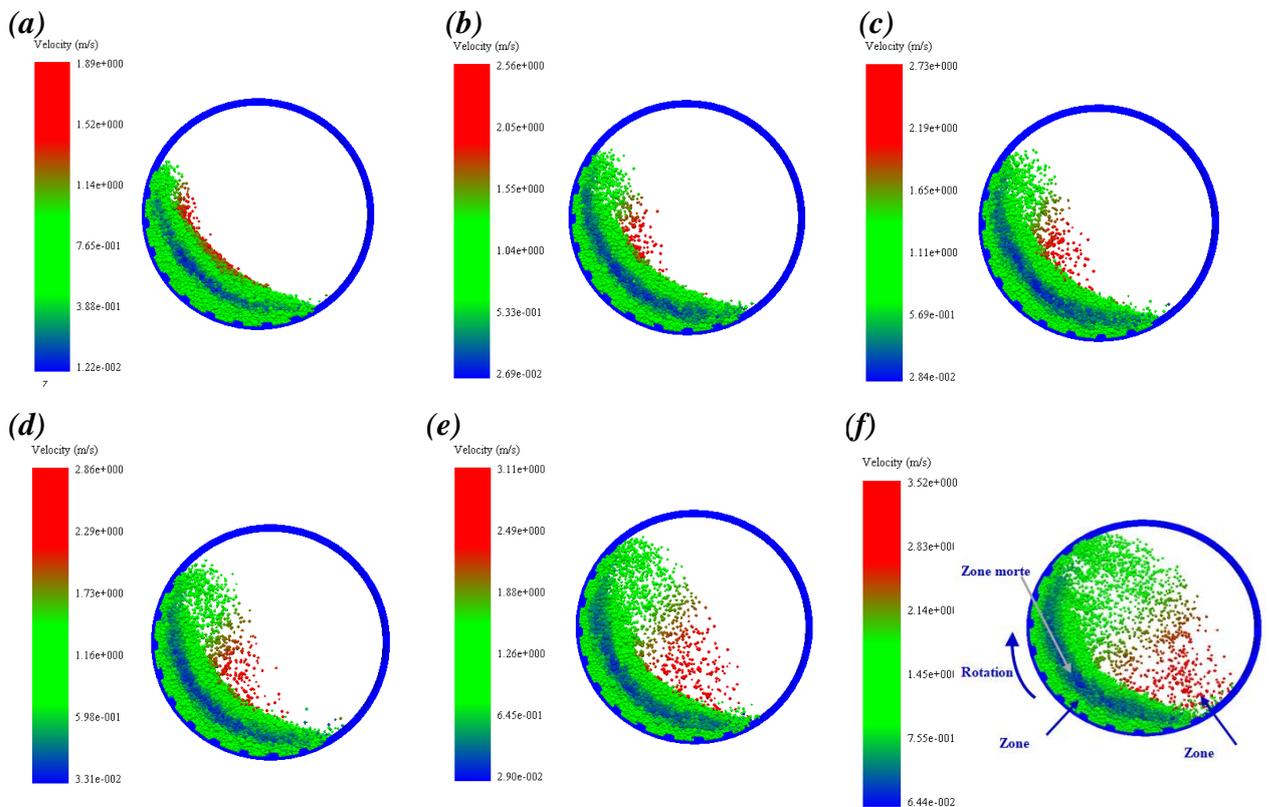


Figure V.21 : Effet de la géométrie des lifters HP2 sur le comportement des particules du broyeur à boulets pour différentes vitesses de rotation : (a) $\omega=60\%$, (b) $\omega=70\%$, (c) $\omega=75\%$, (d) $\omega=80\%$, (e) $\omega=90\%$, (f) $\omega=100\%$.

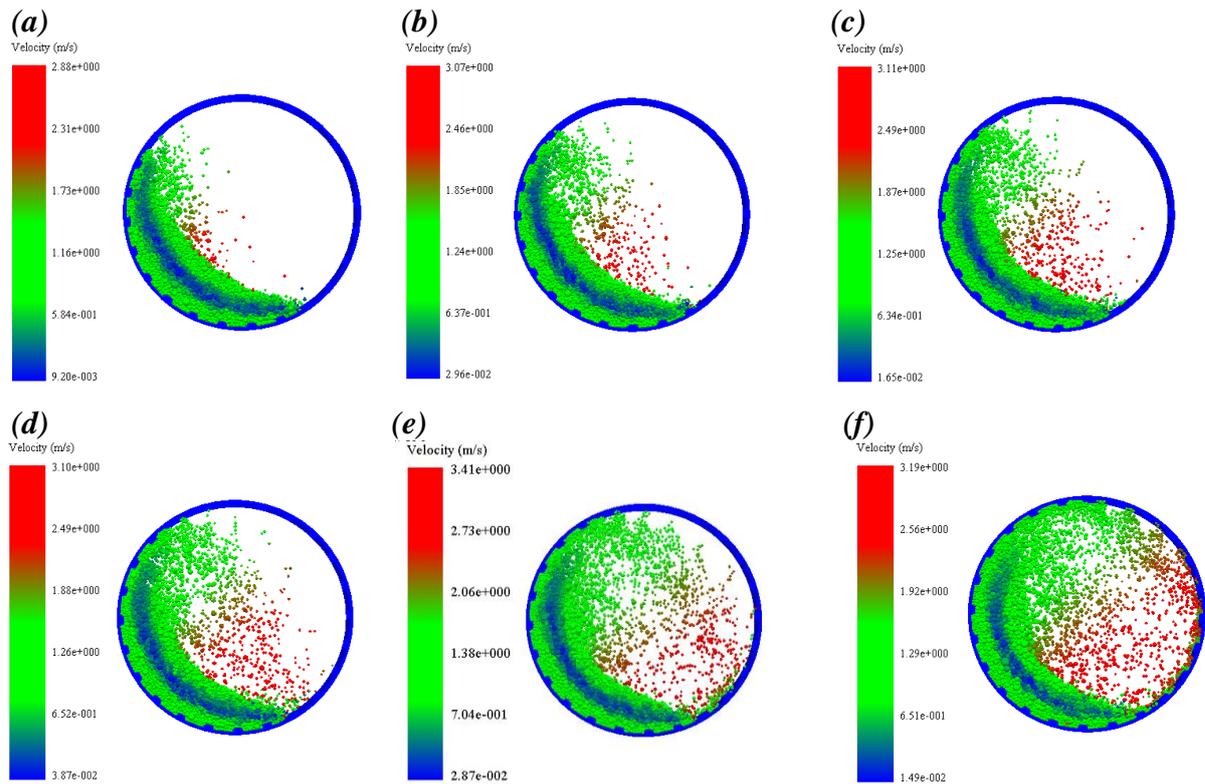


Figure V.22 : Effet de la géométrie des lifters HP3 sur le comportement des particules du broyeur à boulets pour différentes vitesses de rotation : (a) $\omega=60\%$, (b) $\omega=70\%$, (c) $\omega=75\%$, (d) $\omega=80\%$, (e) $\omega=90\%$, (f) $\omega=100\%$

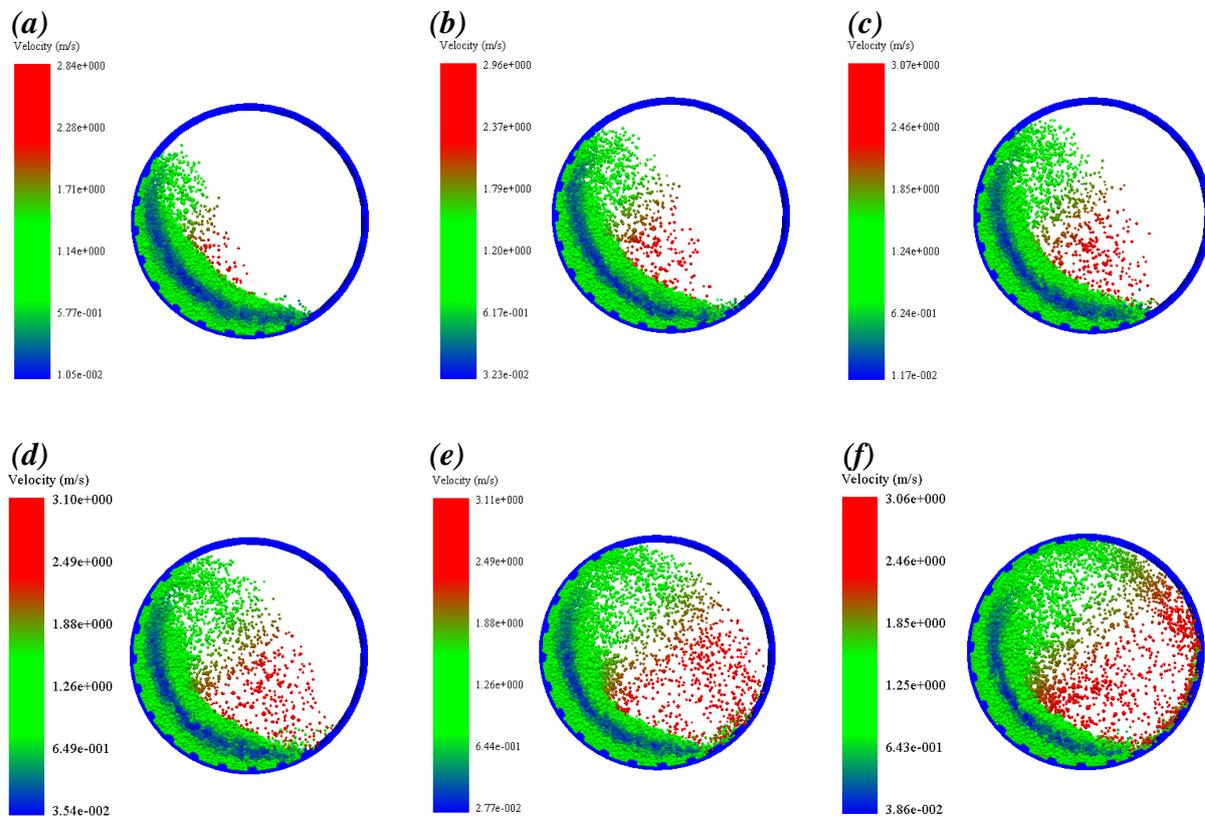


Figure V.23 : Effet de la géométrie des lifters HP4 sur le comportement des particules du broyeur à boulets pour différentes vitesses de rotation : (a) $\omega=60\%$, (b) $\omega=70\%$, (c) $\omega=75\%$, (d) $\omega=80\%$, (e) $\omega=90\%$, (f) $\omega=100\%$.

Les particules ont généralement un mouvement en cascade alors qu'elles se déplacent le long de la surface libre de la charge. Cette région est désignée comme la zone d'abrasion, identifiée en vert, et se distingue par une vitesse relativement basse des particules (figure V.21f). Les particules subissent un mouvement en cataracte ; ils sont propulsés loin de la surface selon une trajectoire parabolique distinctive. Cette région est souvent appelée zone d'impact et se caractérise par une vitesse élevée de particules colorées en rouge. La couleur bleue représente la zone morte où la vitesse des particules est nulle (figure V.21f).

À mesure que la vitesse du broyeur augmente, on observe une augmentation significative tant du nombre de particules à grande vitesse que du nombre de particules cataractées pour tous les lifters hélicoïdaux (figure V.21).

Concernant HP2, les graphiques V.21a, V.21b, V.21c et V.21d illustrent que la majorité des particules s'écoulent en cascade, tandis qu'un nombre limité adopte un écoulement en cataracte (figures V.21e, V.21f). La vitesse maximale des particules présente une variation, passant de 1,89 m/s à une valeur de $\omega=60\%$ à 3,52 m/s à $\omega=100\%$. Cette augmentation est particulièrement prononcée entre les valeurs de $\omega=90\%$ et $\omega=100\%$, comme indiqué dans la figure V.24.

Pour ce qui est des lifters droits, HP3 et HP4, on observe une augmentation significative du nombre de particules cataractées lorsque le broyeur tourne à une vitesse $\omega = 75\%$ (figures V.20c, V.20d, V.20e, V.20f, V.22c, V.22d, V.22e, V.22f et V.23c, V.23d, V.23e et V.23f). Ces particules se propagent efficacement sur toute la surface du broyeur. Au-delà de $\omega=75\%$, la vitesse maximale à laquelle ces particules sont projetées reste constante, en moyenne autour de 3 m/s (figure V.24). Avec une valeur de 3,41 m/s pour le lifter HP3 et pour $\omega=90\%$.

À $\omega = 100\%$, la proportion de particules projetées s'intensifie encore et occupe pratiquement toute la surface du broyeur (figures V.20f, V.22f et V.23f).

L'augmentation du pas des barres de levage a un impact considérable sur le comportement des particules et leur capacité de rupture, comme le montrent les figures V.21, V.22 et V.23.

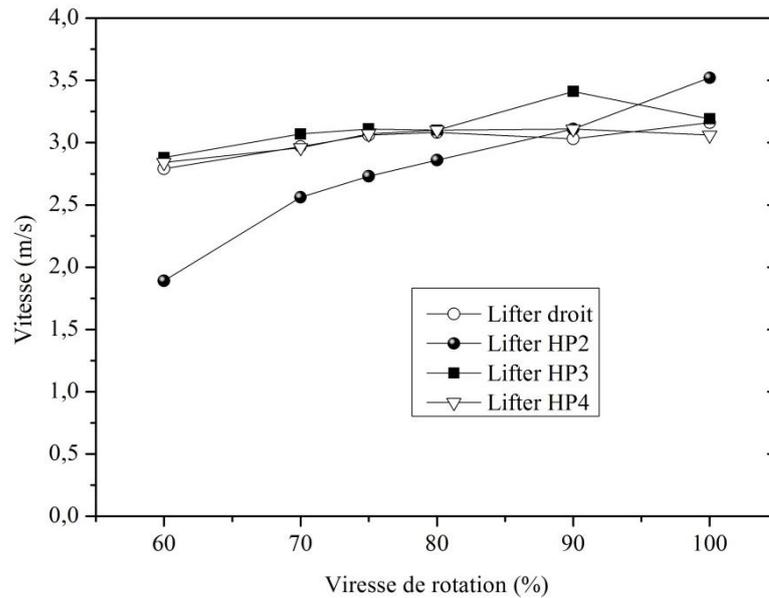


Figure V.24 : Comparaison des vitesses des particules du lifter droit et hélicoïdaux.

V.5.4. Influence de la géométrie des lifters et de la vitesse de rotation sur les forces de contact

Lorsque le broyeur à boulets est en rotation, les particules subissent des mouvements et des interactions complexes. Diverses forces mécaniques interviennent entre ces particules, et pour résoudre le contact entre elles, le modèle Hertz-Mindlin sans glissement est appliqué. À mesure que l'intensité des efforts de contact augmente (figure V.25), l'efficacité de broyage augmente également.

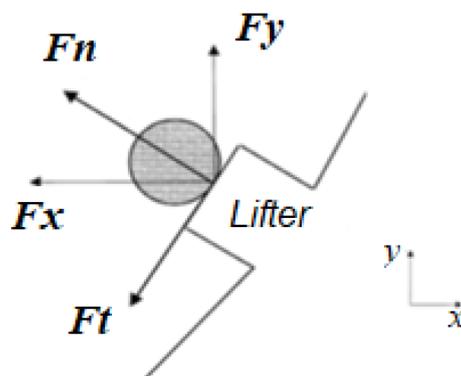


Figure V.25 : Forces de contact (normales et tangentielles)

V.5.4.1. Effort de contact normal F_n

La figure V.26 illustre l'évolution des forces normales (F_n) pour diverses géométries des lifters, à des vitesses de rotation allant de 60 à 100 %.

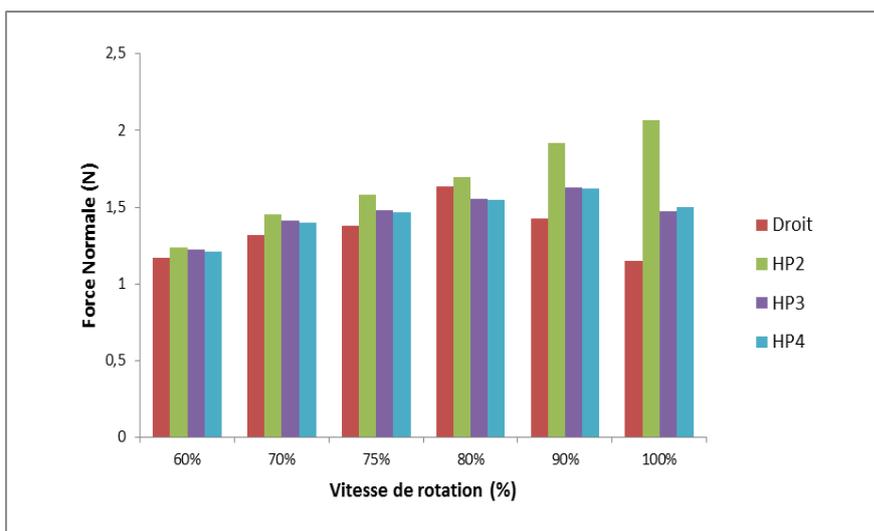


Figure V.26 : Variation de l'effort de contact normal F_n en fonction de la forme des lifters et de la vitesse de rotation

V.5.4.2. Effort de contact tangentiel F_t

La figure V.27 représente la variation de l'effort de contact tangentiel total (F_t) en fonction des diverses configurations des lifters et des vitesses de rotation comprises entre 60 et 100 %.

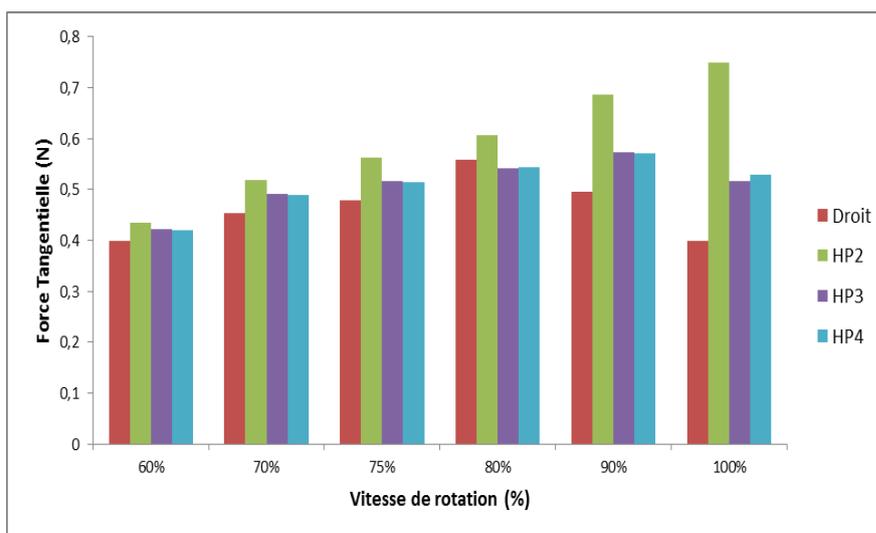


Figure V.27 : Variation de l'effort de contact tangentiel total F_t en fonction de la forme des lifters et de la vitesse de rotation

Les efforts de contact (F_n et F_t) présentent une légère augmentation en fonction de la géométrie des lifters c'est-à-dire en passant du profilé droit au profilé hélicoïdal de pas 4000, 3000 et 2000 mm. Cela est dû à la plus grande surface de contact des lifters hélicoïdaux qui est maintenue à tout moment, répartissant ainsi la charge de manière plus uniforme. Cela leur permet de résister à des charges de contact plus élevées.

Les lifters HP2 présentent des niveaux élevés de ces forces, dont l'intensité augmente d'une manière continue à mesure que la vitesse de rotation augmente, offrant ainsi des avantages pour le processus de broyage.

Pour les autres lifters, ces forces augmentent de manière progressive jusqu'à atteindre une vitesse de 80%, à partir de laquelle les forces de contact commencent à diminuer pour les lifters droits, et cette décroissance débute à une vitesse de 90% pour les lifters hélicoïdaux (HP3 et HP4). Cette diminution est provoquée par le mouvement centrifuge des particules qui adhèrent à la paroi du tambour, entraînant une réduction de l'énergie d'impact.

En examinant la figure V.28 établi pour une vitesse $\omega=75\%$, il est évident que l'effort de contact normal revêt une importance cruciale dans le processus de broyage des matériaux. Cela exerce une influence significative sur l'efficacité globale du processus de broyage par rapport à l'effort tangentiel. Le rapport des forces tangentielles aux forces normales est 0,35 à $\omega = 75 \%$.

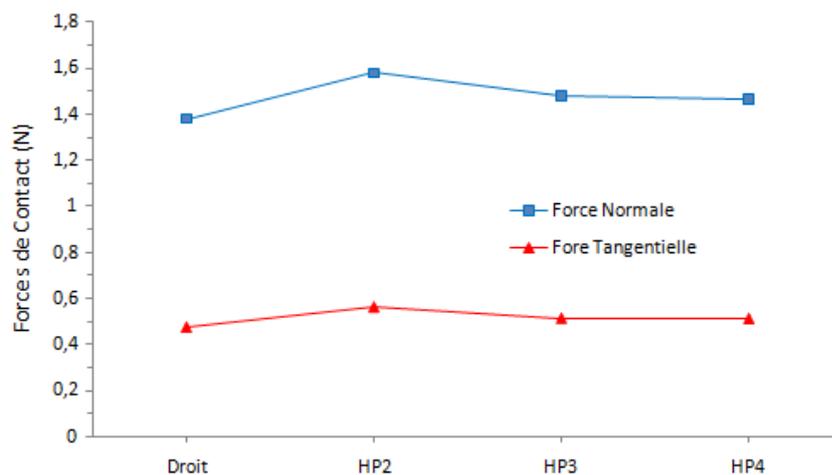


Figure V.28 : Comparaison entre les forces normales et les forces tangentielles à $\omega=75\%$.

V.5.5. Influence de la géométrie des lifters et de la vitesse de rotation sur l'énergie cinétique moyenne E_k

L'énergie cinétique moyenne augmente avec la vitesse du broyeur. Cette énergie est extrêmement faible pour le profil hélicoïdal de pas 2000 Figure V.29. Ce résultat est dû au temps de contact plus long des boulets avec la coque du broyeur ; comme ils glissent plus longtemps sur les profils hélicoïdaux avant de tomber, les collisions à haute énergie ne peuvent pas se produire efficacement, ce qui diminue les performances du broyeur à boulets. Pour HP3 et HP4, l'énergie cinétique moyenne augmente, comme le montre la figure V.29, car un nombre considérable de particules s'écoulent à des vitesses élevées, principalement lorsque les vitesses de broyage sont élevées, et elles sont broyées efficacement à haute énergie.

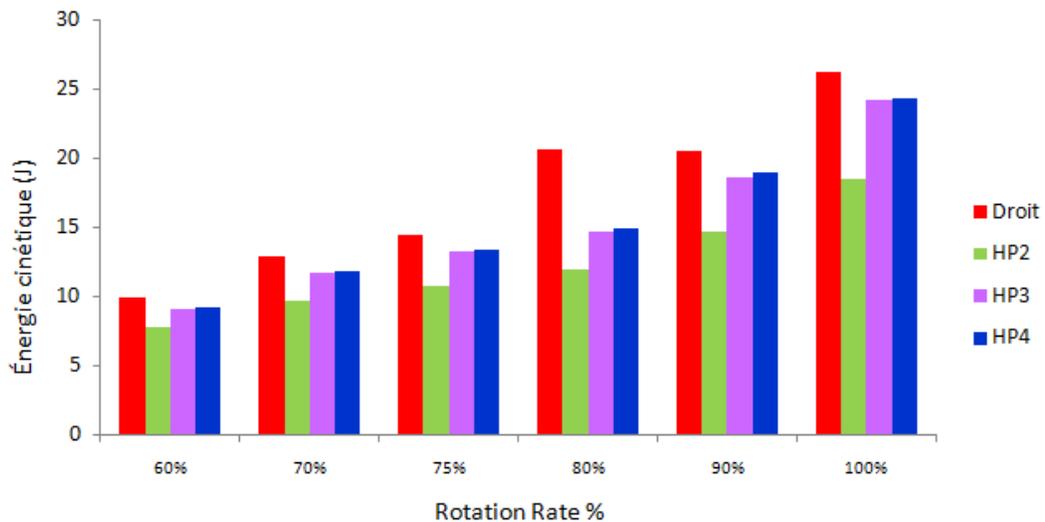


Figure V.29 : Variation de l'énergie cinétique moyenne E_k en fonction de la forme des lifters

V.5.6. Influence de la géométrie des lifters sur l'usure des chemises

Les résultats obtenus indiquent que le lifter hélicoïdal HP2 offre les meilleures performances pour un broyage efficace. C'est la raison pour laquelle nous l'avons sélectionné afin de le confronter à la forme traditionnelle du lifter droit en ce qui concerne l'usure.

Deux modèles d'usure ont été employés pour simuler et anticiper l'usure dans un broyeur : le modèle d'usure relative, utilisé pour identifier les zones où l'usure se produit, et le modèle d'Archard, utilisé pour estimer la profondeur d'usure des surfaces géométriques.

V.5.6.1. Modèle d'usure relative

La figure V.30 montre la force cumulée normale et la force cumulée tangentielle produite sur le broyeur à lifter droit et à lifter hélicoïdal HP2, simulé par le logiciel EDEM après 10 secondes de simulation.

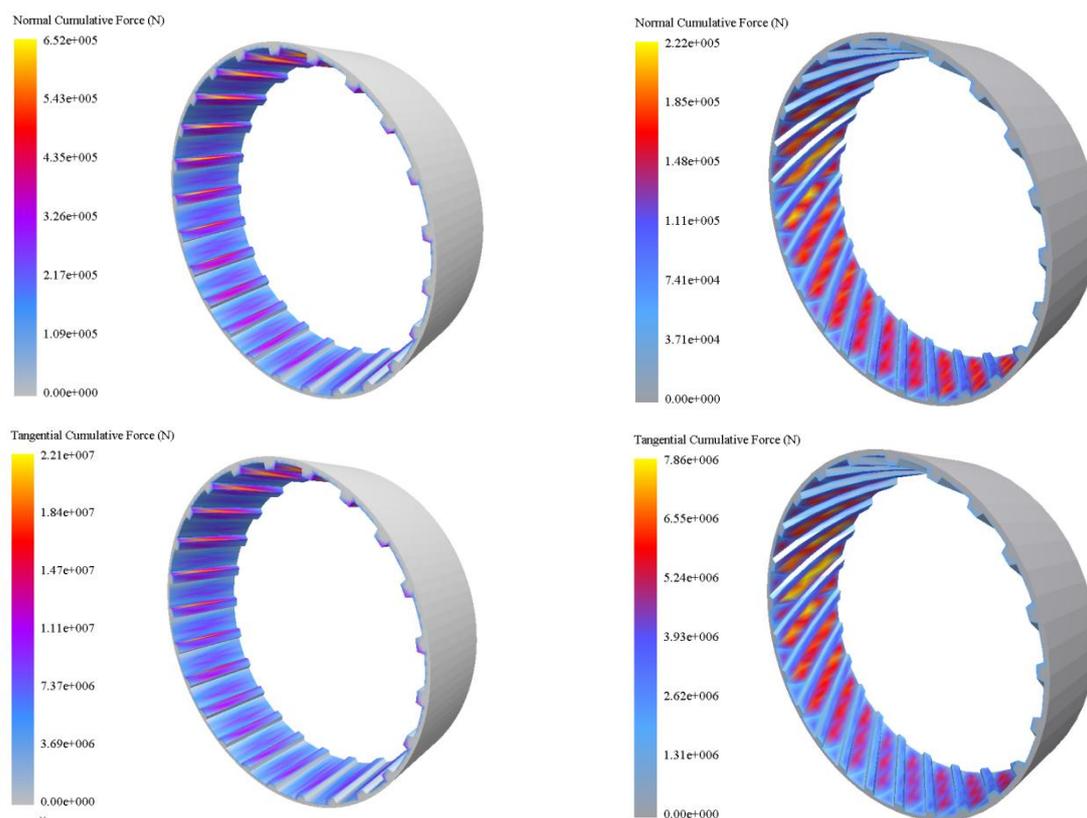


Figure V.30 : Comparaison de la force de contact cumulée normale et tangentielle pour le broyeur à lifter droit et à lifter hélicoïdal HP2, $\omega=75\%$.

Cette figure met en évidence de manière explicite que les zones d'usure résultant de l'impact (normales) se forment sur les surfaces supérieures des lifters, tandis que les zones d'usure abrasives (tangentielles) se développent à gauche et sur les arêtes vives des lifters dans le cas du broyeur à profil droit. Ces zones d'usure se trouvent aussi sur les surfaces du tambour du broyeur à profil hélicoïdal (HP2), bien que leur importance soit moindre.

Les figures V.31 et V.32 présentent une analyse comparative des forces cumulées normales et tangentielles appliquées sur le broyeur à lifter droit et le broyeur à lifter hélicoïdal HP2 en fonction du temps.

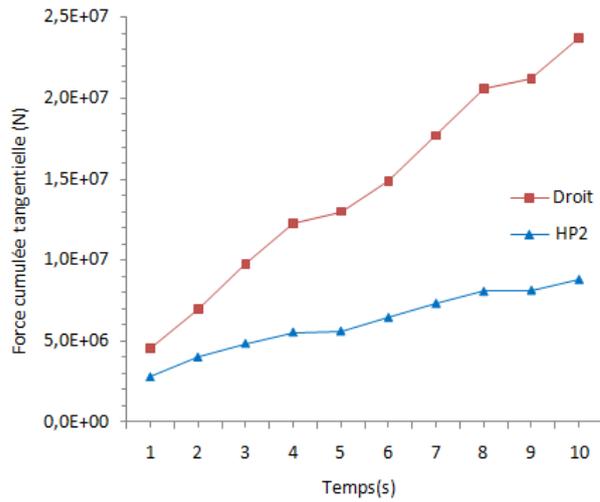


Figure V.31 : Force cumulative tangentielle en fonction du temps

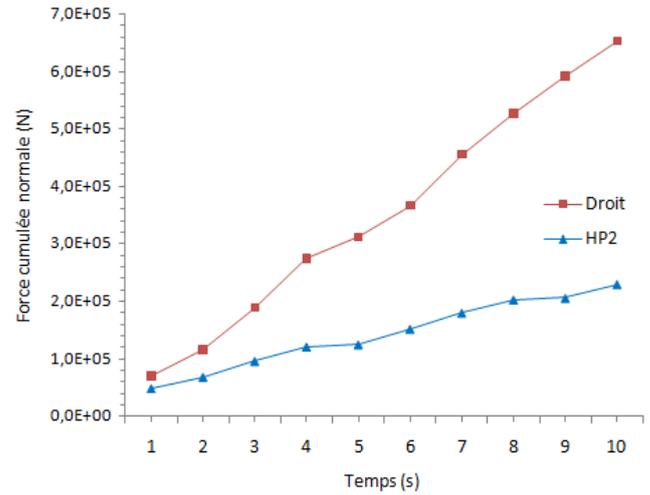


Figure V.32 : Force cumulative normale en fonction du temps

Ces graphiques soulignent l'impact de la configuration du profil sur les zones d'usure observées sur les chemises du broyeur. Cette influence résulte des variations des forces (normales et tangentielles) exercées sur les chemises du broyeur, induites par les changements de charge des boulets de broyage.

V.5.6.2. Modèle d'Archard

Les figures V.33 et V.34 présentent la représentation anticipée de l'usure des chemises, ainsi que des détails locaux, pour les profils droits et HP2. Ces simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel EDEM.

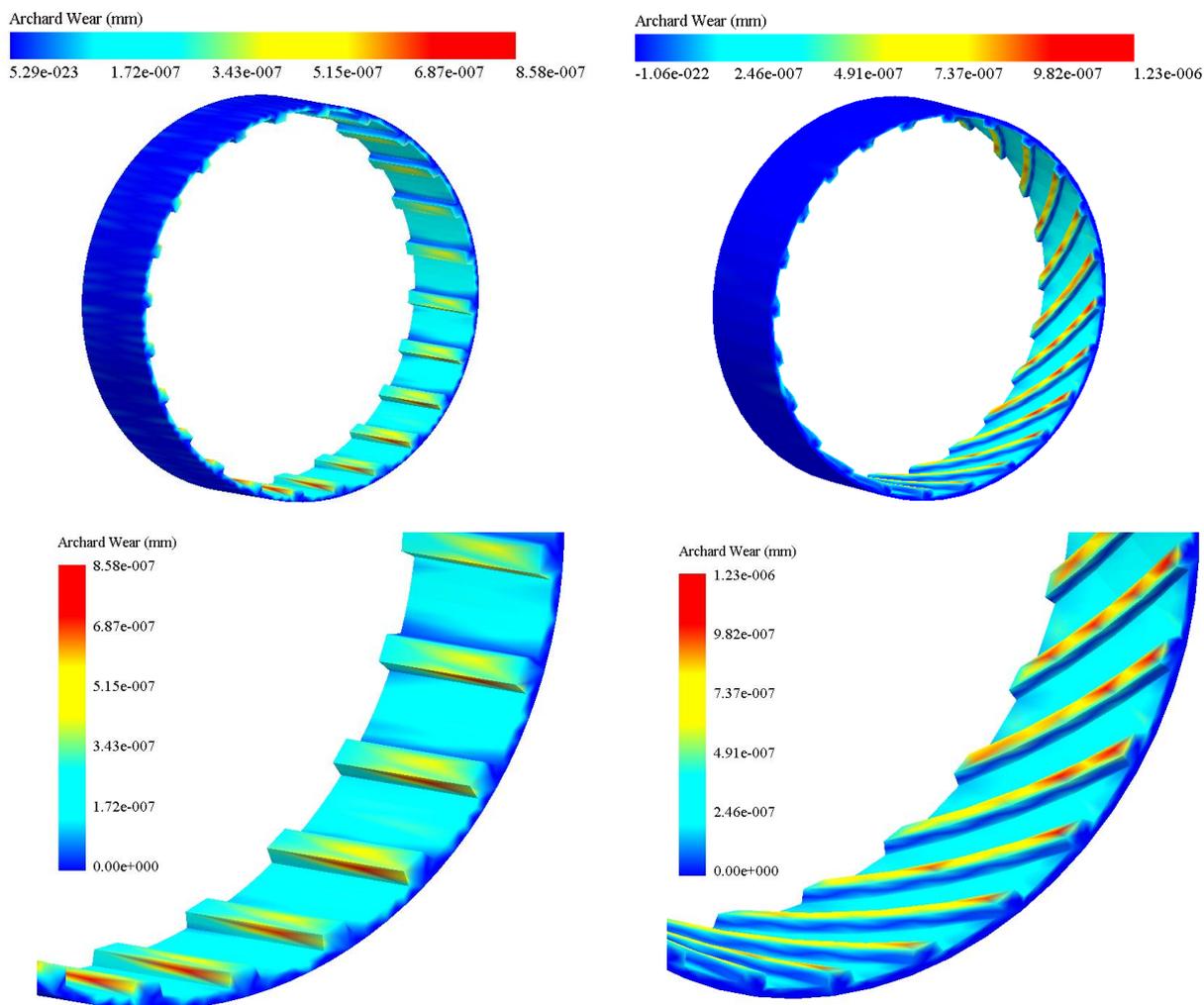


Figure V.33 : Contour d'usure d'Archard du profil droit : (a) l'ensemble du broyeur, (b) les détails locaux

Figure V.34 : Contour d'usure d'Archard du profil HP2 : (a) l'ensemble du broyeur, (b) les détails locaux

Les images montrent que l'usure se produit sur la surface exposée à l'usure, c'est-à-dire la surface exposée à l'impact des boules de broyage. On constate clairement que l'usure maximale d'Archard, représentée en rouge, se produit généralement sur les surfaces supérieures pour le broyeur à profil hélicoïdal (HP2) et sur les surfaces gauches des lifters à profil droit. Après 10 secondes de simulation, l'usure maximale d'Archard était de $1,23 \times 10^{-6}$ mm pour le profil hélicoïdal et de $8,58 \times 10^{-7}$ mm pour le profil droit (figure V.35).

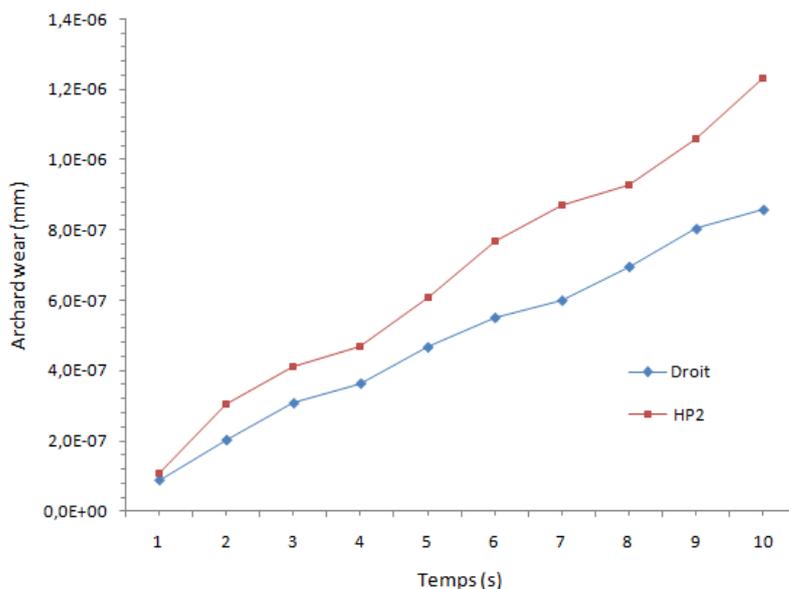


Figure V.35 : Relation entre l'usure d'Archard et le temps de simulation

La figure V.35 présente la comparaison entre l'usure d'Archard des chemises à profils droit et à profil hélicoïdal HP2. Les profils HP2 ont entraîné une augmentation de la profondeur d'usure avec un facteur d'amélioration atteignant 3,2 après 10 secondes de simulation, en raison de la forme hélicoïdale des profils. Cette augmentation se produit en raison du temps de contact plus long des boulets avec la chemise du broyeur, qui glissent plus longtemps sur les profils hélicoïdaux avant leur chute.

V.6. Conclusion

Initialement, les résultats de la simulation dans cette étude, concernant le couple, la puissance et le comportement des particules, ont été validés qualitativement en les comparant aux résultats expérimentaux obtenus par Bian et al. Ces résultats démontrent une cohérence et une concordance.

Ensuite, nous avons proposé une nouvelle géométrie pour les lifters, adoptant une forme hélicoïdale avec trois pas distincts. Les résultats obtenus permettent de tirer les conclusions suivantes :

Le couple du broyeur augmente et atteint son pic entre 70% et 75%, ce qui est cohérent avec les résultats expérimentaux de Bian et al. Il diminue ensuite à partir de cette vitesse. Les résultats simulés pour les lifters hélicoïdaux sont inférieurs aux données expérimentales, avec une erreur absolue moyenne (MAE) de 2 à 4 Nm.

Lorsque la vitesse de rotation augmente, les lifters hélicoïdaux présentent des valeurs de consommation d'énergie plus faibles. L'erreur absolue moyenne (MAE) est de 14 à 20 watts entre les données expérimentales et les valeurs mesurées.

À mesure que le pas du lifter hélicoïdal augmente de HP2 à HP3 et HP4, on constate une augmentation notable de l'abondance de particules à grande vitesse, ce qui crée un milieu de cataracte. Ce mouvement a une influence considérable à la fois sur l'efficacité du processus de broyage et sur la qualité du produit final.

La vitesse des particules dans HP2 double presque lors de la transition de $\omega = 60\%$ à 100% . Cependant, dans le cas de HP3 et HP4, la vitesse augmente progressivement de $\omega = 60\%$ à 75% et reste ensuite constante au-delà de $\omega = 75\%$.

La force normale joue un rôle plus important dans le broyage des matériaux et exerce une influence plus consistante sur l'efficacité globale du processus de broyage par rapport à la force tangentielle.

En adoptant les lifters en forme d'hélice comme préconisé dans cette recherche, nous avons réussi à diminuer la consommation énergétique du broyeur. Parallèlement, nous avons observé une augmentation des forces de contact essentielles au processus de broyage, mieux appréhender le comportement des particules, repérer les zones sujettes à l'usure, et finalement, évaluer la profondeur de cette usure. Cependant, il est nécessaire de valider ces résultats en menant des expériences en laboratoire pour une comparaison plus approfondie.

Conclusion Générale

Dans ce travail, nous avons introduit des lifters présentant une forme hélicoïdale avec des pas variés. Des simulations ont été réalisées en employant la méthode des éléments discrets à l'aide du logiciel EDEM «Event-Driven Execution Model». Les résultats obtenus sont confrontés aux données expérimentales issues des recherches menées par Bian et al.

La DEM peut être très bénéfique pour simuler et comprendre le mouvement des éléments de broyage de différentes formes et tailles dans des broyeurs 3D, où il est difficile d'acquérir des connaissances approfondies en raison de la complexité des phénomènes ou des contraintes de l'investigation expérimentale.

Les résultats de la simulation dans cette étude, concernant le couple, la puissance et le comportement des particules, ont été validés qualitativement en les comparant aux résultats expérimentaux obtenus par Bian et al.. Les mêmes données ainsi que les mêmes dimensions des lifters de forme droite ont été prises en compte pour assurer une comparaison équitable. Ces résultats démontrent une cohérence et une concordance.

Les résultats obtenus par les nouveaux lifters proposés dans cette étude permettent de formuler les conclusions suivantes :

↳ Le couple du broyeur augmente et atteint son pic entre 70% et 75%, ce qui est cohérent avec les résultats expérimentaux de Bian et al. Il diminue ensuite à partir de cette vitesse. Les résultats simulés pour les lifters hélicoïdaux sont inférieurs aux données expérimentales, avec une erreur absolue moyenne (MAE) de 2 à 4 Nm.

↳ Lorsque la vitesse de rotation augmente, les lifters hélicoïdaux présentent des valeurs de consommation d'énergie plus faibles. L'erreur absolue moyenne (MAE) est de 14 à 20 watts entre les données expérimentales et les valeurs mesurées.

↳ À mesure que le pas du lifter hélicoïdal augmente de HP2 à HP3 et HP4, on constate une augmentation notable de l'abondance de particules à grande vitesse, ce qui crée un milieu de cataracte. Ce mouvement a une influence considérable à la fois sur l'efficacité du processus de broyage et sur la qualité du produit final.

↳ La vitesse des particules dans HP2 double presque lors de la transition de $\omega = 60\%$ à 100% . Cependant, dans le cas de HP3 et HP4, la vitesse augmente progressivement de $\omega = 60\%$ à 75% et reste ensuite constante au-delà de $\omega = 75\%$.

↳ La force normale joue un rôle plus important dans le broyage des matériaux et exerce une influence plus consistante sur l'efficacité globale du processus de broyage par rapport à la force tangentielle.

↳ En adoptant les lifters en forme d'hélice comme préconisé dans cette recherche, nous avons réussi à diminuer la consommation énergétique du broyeur. Parallèlement, nous avons observé une augmentation des forces de contact essentielles au processus de broyage, mieux appréhender le comportement des particules, repérer les zones sujettes à l'usure, et finalement, évaluer la profondeur de cette usure. Cette usure est moins importante pour les lifters hélicoïdaux que les lifters droits.

↳ Enfin, il est nécessaire de valider ces résultats en menant des expériences en laboratoire pour une comparaison plus approfondie.

Prescriptions

- **Validation expérimentale approfondie**

Des validations expérimentales en laboratoire sont nécessaires pour confirmer ces résultats.

Ces validations permettraient de quantifier précisément les gains en termes de performance et de durabilité, et de lever d'éventuels obstacles à l'adoption des lifters hélicoïdaux à grande échelle

- **Optimisation de la conception des lifters hélicoïdaux**

Des recherches futures devraient se concentrer sur l'optimisation de la conception des lifters hélicoïdaux, en explorant différentes pas, différentes hauteur et différentes nombre de lifters.

Maximiser les avantages observés dans cette étude et d'adapter les lifters aux besoins spécifiques de chaque application de broyage

- **Développement de modèles de simulation plus précis**

L'amélioration des modèles de simulation DEM (Mécanique des Milieux Discontinus) permettrait d'affiner les prédictions concernant le comportement des particules, l'usure et la consommation d'énergie dans les broyeurs équipés de lifters hélicoïdaux. Ces modèles pourraient être utilisés pour optimiser davantage la conception des lifters et pour explorer de nouvelles applications dans le domaine du broyage

Références bibliographiques

- Ahmad, M., K. A. Ismail, et al. (2016). "Impact models and coefficient of restitution: A review." ARPN J. Eng. Appl. Sci **11**(10): 6549-6555.
- Aissat, S., A. Sadeddine, et al. (2017). "Effect of heat treatment on the hardness and wear of grinding balls." Metal Science and Heat Treatment **59**: 297-301.
- Aissat, S. and A. Safa (2023). "Effect of Subcritical Treatment (Tempering) on Hardness and Wear of High Chromium White Cast Iron." Engineering and Technology Journal **41**(4): 553-561.
- Aldrich, C. (2013). "Consumption of steel grinding media in mills—A review." Minerals Engineering **49**: 77-91.
- Archard, J. (1953). "Contact and rubbing of flat surfaces." Journal of applied physics **24**(8): 981-988.
- Banisi, S., G. Langari-Zadeh, et al. (2000). "Measurement of ball size distribution and wear kinetics in an 8 m by 5 m primary mill of Sarcheshmeh copper mine." CIM bulletin **93**(1041): 145-149.
- Barrios, G. K., R. M. de Carvalho, et al. (2013). "Contact parameter estimation for DEM simulation of iron ore pellet handling." Powder Technology **248**: 84-93.
- Bian, X., G. Wang, et al. (2017). "Effect of lifters and mill speed on particle behaviour, torque, and power consumption of a tumbling ball mill: Experimental study and DEM simulation." Minerals Engineering **105**: 22-35.
- Campbell, C. S. and C. E. Brennen (1985). "Computer simulation of granular shear flows." Journal of Fluid Mechanics **151**: 167-188.
- Camurri, C., C. Carrasco, et al. (2015). "Proposed heat treatment conditions to improve toughness of steel grinding balls." Metallurgia Italiana(9): 23-29.
- Cao, H.-P. (2011). Modélisation par éléments discrets rigides et/ou déformables des milieux granulaires et des troisièmes corps solides: Influence du comportement local sur le comportement global, INSA de Lyon.
- Carvalho, R. (2013). "Mechanistic modelling of semi-autogenous grinding." Rio de Janeiro:(PhD Dissertation) Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Chang, L.-m., L. Lin, et al. (2007). "Properties of cross-rolled low alloy white cast iron grinding ball." Journal of iron and steel research, International **14**(5): 47-51.
- Chenje, T., D. Simbi, et al. (2004). "Relationship between microstructure, hardness, impact toughness and wear performance of selected grinding media for mineral ore milling operations." Materials & design **25**(1): 11-18.

- Cho, H., J. Kwon, et al. (2013). "Optimum choice of the make-up ball sizes for maximum throughput in tumbling ball mills." Powder Technology **246**: 625-634.
- Cleary, P. W. (2001). "Charge behaviour and power consumption in ball mills: sensitivity to mill operating conditions, liner geometry and charge composition." International Journal of Mineral Processing **63**(2): 79-114.
- Coetzee, C. (2017). "Calibration of the discrete element method." Powder Technology **310**: 104-142.
- Cozza, R. C., D. K. Tanaka, et al. (2009). "Friction coefficient and abrasive wear modes in ball-cratering tests conducted at constant normal force and constant pressure—Preliminary results." Wear **267**(1-4): 61-70.
- CUNDALL, P. A. (1979). "A Discrete numerical model for granular assemblies Geotechnique." Geotechnique **29**: 47-65.
- Dahner, J. and A. Van Den Bosch (2011). "Total primary milling cost reduction by improved liner design." Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy **111**(2): 87-91.
- Deen, N., M. V. S. Annaland, et al. (2007). "Review of discrete particle modeling of fluidized beds." Chemical Engineering Science **62**(1-2): 28-44.
- Djordjevic, N. (2003). "Discrete element modelling of the influence of lifters on power draw of tumbling mills." Minerals Engineering **16**(4): 331-336.
- Djordjevic, N., F. Shi, et al. (2004). "Determination of lifter design, speed and filling effects in AG mills by 3D DEM." Minerals Engineering **17**(11-12): 1135-1142.
- Grima, A., P. Wypych, et al. (2013). "Predicting Bulk Flow and Behaviour for Design and Operation of Handling and Processing Plants."
- Hlungwani, O., J. Rikhotso, et al. (2003). "Further validation of DEM modeling of milling: effects of liner profile and mill speed." Minerals Engineering **16**(10): 993-998.
- Horabik, J. and M. Molenda (2016). "Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: A review." Biosystems engineering **147**: 206-225.
- Jankovic, A., T. Wills, et al. (2016). "A comparison of wear rates of ball mill grinding media." Journal of Mining and Metallurgy A: Mining **52**(1): 1-10.
- Jiyang, Z. (2011). "Colour Metallography of Cast Iron-White Cast Iron." China Foundry **8**(3): 337-349.
- Johnson, K. L. (1987). Contact mechanics, Cambridge university press.
- Kabezya, K. and H. Motjotji (2014). "The effect of ball size diameter on milling performance." J. Mater. Sci. Eng **4**(1): 1-3.
- Kalala, J. T. (2008). Discrete element method modelling of forces and wear on mill lifters in dry ball milling, University of the Witwatersrand Johannesburg, South Africa.

- Ketterhagen, W. R., M. T. am Ende, et al. (2009). "Process modeling in the pharmaceutical industry using the discrete element method." Journal of pharmaceutical sciences **98**(2): 442-470.
- Kodam, M., R. Bharadwaj, et al. (2009). "Force model considerations for glued-sphere discrete element method simulations." Chemical Engineering Science **64**(15): 3466-3475.
- Kotake, N., K. Daibo, et al. (2004). "Experimental investigation on a grinding rate constant of solid materials by a ball mill—effect of ball diameter and feed size." Powder Technology **143**: 196-203.
- Lameck, N., K. Kiangi, et al. (2006). "Effects of grinding media shapes on load behaviour and mill power in a dry ball mill." Minerals Engineering **19**(13): 1357-1361.
- Lameck, N. N. S. (2005). Effects of grinding media shapes on ball mill performance, University of the Witwatersrand Johannesburg.
- Malone, K. F. and B. H. Xu (2008). "Determination of contact parameters for discrete element method simulations of granular systems." Particuology **6**(6): 521-528.
- Marigo, M. and E. H. Stitt (2015). "Discrete element method (DEM) for industrial applications: comments on calibration and validation for the modelling of cylindrical pellets." KONA Powder and Particle Journal **32**: 236-252.
- Martín, M. M. (2014). Introduction to software for chemical engineers, CRC Press.
- Matsanga, N., W. Nheta, et al. (2023). "A Review of the Grinding Media in Ball Mills for Mineral Processing." Minerals **13**(11): 1373.
- Mindlin, R. D. and H. Deresiewicz (1953). "Elastic spheres in contact under varying oblique forces."
- Mishra, B. K. (1991). Study of media mechanics in tumbling mills by the discrete element method, The University of Utah.
- Mitarai, N. and H. Nakanishi (2003). "Hard-sphere limit of soft-sphere model for granular materials: Stiffness dependence of steady granular flow." Physical Review E **67**(2): 021301.
- Mollon, G. (2015). "Mécanique des matériaux granulaires." Mechanics of granular materials, INSA de Lyon.
- Napier-Munn, T. (2005). "Preface to 7th Edition." Wills' Mineral Processing Technology.
- Ngqase, M. and X. Pan (2020). An overview on types of white cast irons and high chromium white cast irons. Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing.
- Oka, Y. and T. Yoshida (2005). "Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage." Wear **259**(1-6): 102-109.
- Oka, Y. I., K. Okamura, et al. (2005). "Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation." Wear **259**(1-6): 95-101.

- Powell, M., N. Weerasekara, et al. (2011). "DEM modelling of liner evolution and its influence on grinding rate in ball mills." Minerals Engineering **24**(3-4): 341-351.
- Radziszewski, P. (2002). "Exploring total media wear." Minerals Engineering **15**(12): 1073-1087.
- Rahman, T., A. Sharif, et al. (2010). Development of grinding media balls using locally available materials. The Third International Conference on Structure, Processing and Properties of Materials 2010, SPPM 2010 24-26 February 2010, Dhaka, Bangladesh, SPPM 2010 A11.
- Rajagopal, V. and I. Iwasaki (1992). "The properties and performance of cast iron grinding media." Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review **11**(1-2): 75-106.
- Sadeddine, A., S. Aissat, et al. (2014). "Influence de la vitesse de refroidissement sur la microstructure et la trempabilité des boulets de broyage." Metallurgical Research & Technology **111**(2): 107-117.
- Santos, D. A., M. A. Barrozo, et al. (2016). "Investigation of particle dynamics in a rotary drum by means of experiments and numerical simulations using DEM." Advanced Powder Technology **27**(2): 692-703.
- Solutions, D. (2011). EDEM 2.4 User Guide.
- Thornton, C. (1997). "Coefficient of restitution for collinear collisions of elastic-perfectly plastic spheres." Journal of Applied Mechanics **64**(2): 383-386.
- Tsuji, Y., T. Tanaka, et al. (1992). "Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe." Powder Technology **71**(3): 239-250.
- Usman, H., S. Fonna, et al. (2021). The Effect of Hardening on Mechanical Properties of Low Alloy Steel Grinding Media. Proceedings of the 2nd International Conference on Experimental and Computational Mechanics in Engineering: ICECME 2020, Banda Aceh, October 13–14, Springer.
- Van Nierop, M., G. Glover, et al. (2001). "A discrete element method investigation of the charge motion and power draw of an experimental two-dimensional mill." International Journal of Mineral Processing **61**(2): 77-92.
- Wassgren, C. and J. S. Curtis (2006). "The application of computational modeling to pharmaceutical materials science." MRS bulletin **31**(11): 900-904.
- Yeom, S. B., E.-S. Ha, et al. (2019). "Application of the discrete element method for manufacturing process simulation in the pharmaceutical industry." Pharmaceutics **11**(8): 414.
- Zambrano, O. (2021). "A review on the effect of impact toughness and fracture toughness on impact-abrasion wear." Journal of Materials Engineering and Performance **30**(10): 7101-7116.
- Zhao, T., F. Dai, et al. (2015). "A composite particle model for non-spherical particles in DEM simulations." Granular Matter **17**: 763-774.