

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ÉCOLE NATIONALE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE



DEPARTEMENT DE GENIE MINIER

PROJET DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Minier

Thème

Etude de l'indice de BOND d'un broyeur à boulet. Approche pratique

Proposé et dirigé Par :

Dr. OULD HAMOU Malek

Réalisé Par :

BAHLAT Abdenacer

AZIL Allaeddine

Membres du jury :

Président : Dr AIT YAHIATENE A.

Examineur : Mr GACEM R.

Rapporteur : Dr. OULD HAMOU Malek

Promotion 2013

École Nationale Supérieure Polytechnique 10, Avenue Hassan Badi. El-Harrach. Alger

Dédicaces

Je dédie ce travail :

*A mes chers, merveilleux et honorables parents, source
d'affection et d'encouragement.*

A mes chers frères et sœurs

A toutes ma famille

A tous mes amis

A la mémoire de mes chers grands-parents

BAHLAT

ABDENACER

DEDICACES

*Je dédie ce mémoire à tous ceux qui m'ont aidé, soutenu et
encouragé.*

A tous ceux qui y ont contribué de loin ou de près :

Je citerai d'abord mes chers parents ;

*Ma mère qui n'a jamais cessé de m'encourager et qui s'est
toujours sacrifiée pour mon bien être et ma réussite.*

*Mon père qui s'est toujours montré présent et qui a fait en sorte que je
ne manque de rien durant toute ma vie.*

*A mon frère et mes sœurs, ma source de bonheur, d'équilibre, de
réconfort et d'amour.*

A toute ma famille.

A mes amis.

ALLAEDDINE

REMERCIEMENT

On remercie Dieu, tout puissant de nous avoir donné le courage et la capacité d'arriver à ce stade du savoir et de présenter ce modeste travail.

Nous tenons particulièrement à exprimer, à travers ces quelques lignes, toute notre gratitude et notre profond respect à notre promoteur : Dr. MALEK. OULD HAMOU, pour son suivi permanent et surtout l'immense patience.

Nous remercions l'ensemble des membres du jury qui nous ont fait l'honneur de bien vouloir accepter d'examiner et évaluer notre travail.

Nos meilleurs sentiments vont aussi aux membres de nos familles respectives, dont la présence à nos côtés, et le soutien constant, surtout pendant les moments difficiles, nous a permis d'achever ce travail.

Enfin, nous tenons à remercier Mr OMRACI KAMEL. Qui nous a grandement aidés.

ملخص

المشروع المنجز في إطار دراسة المؤشر العملي (BOND) الخاص بجهاز السحق بالكرات الحديدية ونتيجة لذلك التعريف والتحليل للعناصر المؤثرة في الاستهلاك الطاقوي في عملية الطحن في الجهاز السالف الذكر (سرعة الدوران ونسبة ملئ المواد المعدنية)

الكلمات المفتاحية

مؤشر BOND. مؤشر العمل, جهاز الطحن , جهاز السحق بالكرات , السحق

Résumé

Le projet qui suit s'inscrit dans l'optique globale d'étude de l'indice de BOND d'un broyeur à boulets, et par conséquent l'identification et l'analyse des paramètres qui influents sur la consommation énergétique du procédé de broyage ; (vitesse de rotation, taux de remplissage du minerai).

Les Mots clés : indice de BOND, indice de travail, indice de broyabilité, broyeur à boulets, broyage.

Summary

The project which follows registers in the total optics of study of the work index of a ball mill, and consequently the identification and the analysis of the parameters which influential on the energy consumption of proceeds of crushing; (number of revolutions, rate of filling of the ore).

Key Words: BOND index, work index, index of bribability, ball mill, crushing.

Sommaire

Introduction générale.....	2
----------------------------	---

Partie théorique

Chapitre I Généralité sur le phénomène de broyage

I.1-introduction.....	5
I.2-origine du broyage.....	5
I.3-But du broyage.....	6
I.4-Formulation mathématique d'un processus de broyage.....	7
I.5-Description simplifiée du phénomène de la rupture.....	8
I.5.1-Théorie de la rupture par fissure.....	8
I.5.1.1-Théorie de Inglis et de Griffith.....	8
I.5.1.2-Description simplifiée de la rupture.....	9
I.5.2-Théorie d'Hertz-Huber.....	10
I.5.2.1-Expression énergétique.....	10
I.5.2.2-Application à l'étude de l'impact.....	11
I.6-Types de broyage.....	11
I.6.1-Broyage simple.....	11
I.6.2-Broyage poussé	11
I.6.3-Broyage ménagé.....	11
I.6.4-Broyage différentiel (sélectif).....	12
I.6.5-Broyage formel.....	12
I.6.6-Auto-broyage (broyage autogène, self broyage).....	12

I.6.7-Cryo-broyage	12
I.6.8-Broyage combiné	12
I.7-Appareilles de broyage.....	12
I.7.1-Critères du choix des appareilles de broyage.....	12
I.7.1.1-Paramètres intrinsèques du matériau	12
I.7.1.2-Energie requise pour fracturer le matériau.....	13
I.7.1.3-vitesse de déformation.....	13
I.7.1.4-Réduction des dimensions du matériau.....	14
I.7.2-différentes appareilles de broyage	14
I.7.2.1-Broyeurs à corps broyant libres.....	14
I.7.2.1.1-Broyeurs à boulets	14
I.7.2.1.2-Broyeurs à barres	17
I.7.2.1.3-Broyeurs à galets (ou à pebbles)	17
I.7.2.1.4-Broyeurs autogènes	17
I.7.2.1.4.1-Broyage à sec	18
I.7.2.1.4.2-Broyage humide	18
I.7.2.2-Broyeurs sans corps broyant libres.....	19
I.7.2.2.1-Broyeurs à cylindres	19
I.7.2.2.2-Broyeurs à percussion	19
I.7.2.2.3-Broyeurs à meules (ou à rouleaux).....	19
I.8-Consommation énergétique de broyage.....	20
I.8.1-Lois énergétiques.....	20
I.8.1.1-Loi de Rittinger	20

I.8.1.2-Loi de Kick.....	21
I.8.1.3-Loi de Bond	21
I.8.1.4-Autres relations.....	24
I.8.1.5-Commentaires.....	25
I.9-Caractérisation du solide à broyer.....	26
I.9.1-Propriétés morphologiques.....	26
I.9.2-Propriétés physiques.....	26
I.9.2.1-Porosité.....	26
I.9.2.2-Masse volumique absolue (MVA).....	26
I.9.2.3-Masse volumique réelle (MVR).....	26
I.9.2.4-Coefficient d'absorption d'eau (Ab).....	27
I.9.2.5-Teneur en eau (W).....	27
I.9.3-Propriétés mécanique.....	27
I.9.3.1-Résistance à la fragmentation.....	27
I.9.3.2-Résistance au gel	

Chapitre II LES TESTS DE BROYAGE

II.1-Introduction.....	30
II.2-Classification des tests de broyage.....	31
II.3-Tests de broyage par impact.....	31
II.3.1-Etude de l'impact d'une particule unique.....	33
II.3.2-Etude de l'impact d'un jet diphasique.....	33

II.4-Test de broyage en lit de particules.....	33
II.5-Tests standardisés et indices de broyabilité.....	35
II.5.1-Indice de Hardgrove.....	35
II.5.2-Indice de Bond.....	35
II.5.2.1-Test en broyeur à boulets	35
II.5.2.2-Test en broyeur à barres.....	36
II.5.3-Discussion.....	36
II.6 -Conclusion.....	37
Chapitre III cinétique du broyage et paramètres influant sur la broyabilité dans un broyeur à boulets	
III.1-Les différentes zones de broyage	40
III.1.1-zone de concassage	40
III.1.2-zone de broyage	40
III.1.3-zone de cascade	40
III.2-les différentes forces causales du broyage.....	42
III.3-Paramètres influençant sur l'efficacité du broyage	43
III.3.1-La vitesse de rotation.....	43
III.3.2-Temps de broyage.....	44
III.3.3-La charge de boulets.....	44
III.3.3.1-Le remplissage fractionnaire des boulets J.....	44
III.3.4-La charge de boulets est la matière à broyer.....	45

III.3.4.1-Le remplissage fractionnaire des minerais f_c	45
III.3.5-La forme des releveurs	46
III.3.6-La granulométrie d'alimentation	46
III.3.7-La dimension et forme du broyeur	47
III.3.8-L'usure des blindages et des corps broyant.....	47
III.3.9-La viscosité de la pulpe	48
III.3.10-La forme des boulets.....	48
III.3.11-La dimension des boulets	48
III.3.12-Le phénomène d'agglomération	50
III.4-Evaluation des interactions (Taux de remplissage de minerai – vitesse de rotation de broyeur sur l'efficacité du broyage).....	50
III.4.1-Décomposition opérationnelle du système : approche microphénoméIogique..	50
III.4.1.1-L'évolution de la charge sous une petite vitesse de rotation	52
III.4.1.2-L'évolution de la charge sous une moyenne vitesse de rotation	53
III.4.1.3-L'évolution de la charge avec une grande vitesse de rotation	53

Partie expérimentale

Chapitre I procédure expérimentale et résultats.

I.1- procédure expérimentale	56
------------------------------------	----

I.1.1-Équipement et minerai.....	56
I.1.1.1-Équipement utilisé.....	56
I.1.1.1.1-Pour le broyage.....	56
I.1.1.1.2-Pour le tamisage.....	58
I.1.1.2-Minerai utilisé.....	59
I.1.1.2.1-Caractéristique du minerai	59
I.1.1.2.1.1-Composition chimique.....	59
I.1.1.2.1.2-Caractéristiques physico-mécaniques.....	60
I.1.2-Conduite des expériences	60
I.2-résultats des essais.....	62
Essai N⁰01:(v=50% v_c; avec différents taux de remplissages du minerai).....	62
Essai N⁰02:(v=60% v_c; avec différents taux de remplissages du minerai).....	63
Essai N⁰03 :(v=70% v_c; avec différents taux de remplissages du minerai).....	64
I.2.1-interprétations	65
Essai N⁰04 : :(v=70% v_c; avec un taux de remplissages du minerai 7.34%).....	65
I.2.2-Interprétation.....	65

Chapitre II analyses des résultats obtenus

II.1-Etude d'influence de la vitesse de rotation et le taux de remplissage du minerai sur l'indice énergétique de BOND.....	67
II.1.1-Calcul de capacité de broyage et l'énergie consommée	67

II.1.1.1-interprétation	69
II.1.2-Calcul de l'indice énergétique de BOND (W_i) pour les essais 1 ,2 ,3.....	69
II.1.3-Calcul de l'indice de BOND corrigé (W_{ib})pour les essais 1 ,2 ,3.....	69
II.1.4-interprétation.....	72
II.2-Etude de l'évolution de l'indice en fonction de d_{80}.....	72
II.3-Conclusion et recommandation.....	74
II.3.1-conclusion.....	74
II.3.2-recommandation.....	74

Liste des figures

Partie théorique

Figure.1. Compression uni axiale d'une sphère entre deux plateaux parallèles.....	10
Figure I.2. Broyeur à boulets à marche discontinue.....	15
Figure.3. Broyeur à boulets de type Harding.....	15
Figure.4. Systèmes de décharge des broyeurs à boulets (D'après SME Minéral Procéssing.....	15
Figure I.5. Mécanismes d'entraînement des broyeurs à boulets et à barres (D'après F. Desrumaux).....	16
Figure.6. Blindages des viroles des broyeurs à boulets et à barres. (Minéral Procéssing Handbook).....	16
Figure.7. Broyeur à boulets à deux compartiments.....	17
Figure II.1. Classification des tests sur particules.....	31
Figure III.1. les principales zones du broyage.....	41
Figure III.2. Contraintes dans les principales zones de broyage.....	42
Figure III.3. Régimes de broyage dans un broyeur à boulets (axe horizontal) ; vitesse de rotation du broyeur croissante de gauche à droite.....	44
Figure III.4. variation du taux de broyage en fonction de remplissage de minerai.....	46
Figure III.5- influence du taux de remplissage.....	51

Figure III.6. Configuration géométrique de la charge à la vitesse de $0.2W_C$	52
Figure III.7. Configuration géométrique de la charge à la vitesse de $0.6W_C$	53
Figure III.8. Configuration géométrique de la charge à la vitesse de $0.9W_C$	53

Partie expérimentale

Figure.1- broyeur à boulet et boulets utilisée.....	57
Figure I.2- tamiseuse utilisée.....	58
Figure I.3- pesantes utilisées.....	59
Figure I.4- Pourcentage du produit passant au tamis $100\mu\text{m}$, avec une vitesse de rotation de $50\% v_c$, avec différents taux de remplissage du minerai en fonction du temps.....	62
Figure I.5- quantité du produit passant la maille $100\mu\text{m}$, avec une vitesse de rotation de $50\% v_c$, avec différents taux de remplissage du minerai en fonction du temps.....	62
Figure I.6- pourcentage du produit passant au tamis $100\mu\text{m}$, avec une vitesse de rotation de $60\% v_c$, avec différents taux de remplissage du minerai en fonction du temps.....	63
Figure I.7- quantité du produit passant au tamis $100\mu\text{m}$, avec une vitesse de rotation de $60\% v_c$, avec différents taux de remplissage du minerai en fonction du temps.....	63
Figure I.8- pourcentage du produit passant au tamis $100\mu\text{m}$ avec une vitesse de rotation de $70\% v_c$, avec différents taux de remplissage du minerai en fonction du temps.....	64
Figure I.9- quantité du produit passant au tamis $100\mu\text{m}$, avec une vitesse de rotation de $70\% v_c$, avec différents taux de remplissage du minerai en fonction du temps.....	64

Figure I.10 -passant cumulé du produit broyé en fonction du temps, avec un taux de remplissage de minerai 7.34% et une vitesse 70% V_c	65
Figure II.1 -capacité de broyage des (essais $N^01, 2,3$).....	69
Figure II.2 -indice de BOND des essais ($N^01, 2,3$).....	72
Figure II.3 -indice de BOND corrigé des essais ($N^01, 2,3$).....	72
Figure II.4 -variation de l'indice de BOND et l'énergie consommée en fonction de d_{80} (<i>essai N^04</i>).....	74

Liste de tableaux

Partie théorique

Tableau I .1.Valeur du facteur correctif f_2 pour différentes maille en tamis.....**22**

Tableau II.1.Travaux recensés par Prasher (1987) sur les tests d'impact.....**32**

Tableau II.2.Travaux recensés par Prasher (1987) sur les tests de broyage sur lit de particule.....

34

Partie expérimentale

Tableau I.1.Caractéristiques de design et d'opération du broyeur.....**56**

Tableau I.2.Composition du mélange de boulets.....**57**

Tableau I.3. Composition minéralogique des granulats utilisés.....**59**

Tableau I.4. Caractéristiques physico-mécaniques.....**60**

Tableau I.5. Granulométrie de l'alimentation (% cumulatif passant).....**60**

Tableau II.1.Capacité du broyage et l'énergie consommée des essais N⁰1, 2,3..... **69**

Tableau II.2.l'indice de BOND des différents essais N⁰1, 2,3.....**71**

Tableau II.3.énergie consommée et l'indice de BOND pour différentes classes granulométriques (essai N⁰4).....**74**

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

Introduction Générale

Les procédés de réduction des particules occupent une place très importante dans les opérations unitaires du génie minier .en effet, la comminution intervient partout où des solides se présentent avec des dimensions trop importantes pour être utilisés directement. Dans l'industrie minière et chimique, et dans le secteur agro-alimentaire ou dans le secteur pharmaceutique l'utilisation des techniques de broyage prend de plus en plus d'importance.les besoins énergétiques sont alors très importants, d'autant plus que les procédés industriels nécessitent de plus en plus l'emploi de particules très fines (microniques voire submicroniques). Ainsi, toute amélioration du processus de broyage, si minime soit-elle, a un effet significatif sur l'efficacité et la productivité du procédé de broyage compte tenu des tonnages importants qui sont en jeu.

La tâche de l'ingénieur en valorisation des minerais est souvent définie par un objectif de maximisation des revenus de production et de minimisation des coûts de production. Son travail porte par conséquent sur l'évaluation de stratégies pour augmenter la capacité des circuits, ou de conditions opératoires qui permettent de maintenir un niveau de production constant en réduisant la consommation énergétique.

CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS
SUR LE PHÉNOMÈNE DE
BROYAGE

Généralités sur le phénomène de broyage

I-Généralité sur le phénomène de broyage

I.1-introduction

Après l'étape de concassage, les produits sont acheminés à la dernière étape de comminution, le broyage. Cette étape consiste à fragmenter la roche, généralement en milieu humide, jusqu'à la libération d'une grande quantité de substances minérales. Elle est souvent accomplie en deux étapes : broyage primaire et broyage secondaire.

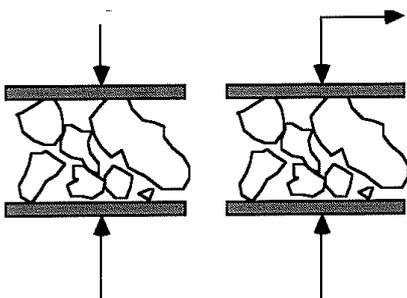
Le premier objectif du broyage est la diminution de la taille des particules rocheuses à une petite dimension (en général de l'ordre de $100\mu\text{m}$). Cette dimension représente la taille des grains compatible avec les opérations de séparation. Cet objectif doit s'accomplir sans génération de particules fines qui ne peuvent être récupérées par les opérations de concentration. Le deuxième objectif du broyage est d'assurer une alimentation continue et constante des opérations de traitement. Ceci implique un broyage d'un grand tonnage de minerai au même rythme (débit horaire) que l'usine.

En broyage, la fragmentation de la roche est accomplie par la combinaison de deux mécanismes (l'impact et l'abrasion). Les particules entre 5mm et 250mm sont réduites à une dimension entre $10\mu\text{m}$ et $300\mu\text{m}$ dans des tambours cylindriques d'acier, appelés broyeurs, tournant autour de leur axe longitudinal. Ces broyeurs contiennent les particules de roche à broyer et la charge broyante qui sert à fragmenter la roche.

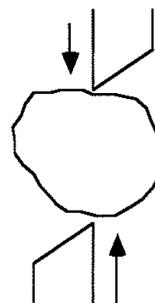
I.1-origine de broyage

Rumpf (1965) décrit quatre modes principaux de sollicitations mécaniques pouvant être à l'origine de la comminution de particules solides.

a) Par compression ou compression-cisaillement

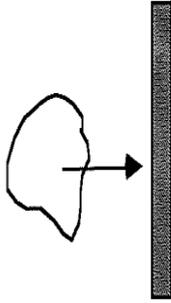


b) Par cisaillement

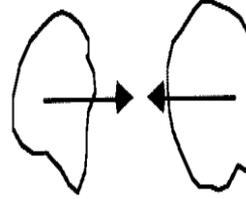


Généralités sur le phénomène de broyage

c) Par choc contre une paroi



d) Par choc mutuel entre deux particules



La compression ou l'écrasement sont généralement utilisés pour la fragmentation de solides durs en gros morceaux, alors que l'attrition par frottement sur une surface rugueuse donne plutôt des produits fins.

Quant à la réduction par impact, elle fournit selon le cas, des tailles très différentes allant des tailles relativement grossières aux poudres fines (μm).

Il faut noter aussi que d'autres modes d'action peuvent être utilisés pour la fragmentation : par apport d'énergie électromagnétique, sonore, chimique ou encore par interaction avec le fluide environnant : par brusque changement de pression et/ou de température (par exemple le phénomène de décrépitation) [1].

I.3-But du broyage

Le broyage peut avoir des finalités diverses :

- Réduire les dimensions soit pour faciliter la manutention, le conditionnement ou l'utilisation, soit pour libérer les constituants avant une opération séparative ;
- Éliminer, avant une mise en œuvre, des zones de rupture potentielle (libération d'unités quasi monocristallines) ;
- Augmenter la réactivité vis-à-vis de processus dont la cinétique dépend de la finesse ou du degré de désordre ;
- Homogénéiser (mélanges, dilutions solides, dosages) ;

Généralités sur le phénomène de broyage

- Conférer des spécifications de forme, de texture, de distribution granulométrique;
- Modifier la fonctionnalité soit sous l'effet de l'activation mécano-chimique, soit en profitant de la création de nouvelles surfaces pour y implanter les groupes fonctionnels désirés.

Le broyage cherche toujours à satisfaire des exigences relatives à des utilisations ultérieures et vise, généralement, au moins un des buts prioritaires parmi ceux mentionnés précédemment. Les autres effets, généralement inévitables, seront pénalisants s'ils engendrent des comportements indésirables, mais valorisants si on peut les mettre à profit pour améliorer les propriétés d'usage des substances [2].

I.4-Formulation mathématique d'un processus de broyage

Des modèles mathématiques ont été élaborés à partir du concept d'Epstein (1948). Cet auteur considère qu'une opération de fragmentation se décompose en une suite d'étapes unitaires, constituées chacune de deux opérations principales qui sont la sélection d'une fraction du matériau et la fragmentation de cette fraction de matériau.

L'étude du processus de fragmentation repose sur deux grandeurs fondamentales, la fonction de sélection et la fonction de fragmentation, qui doivent être considérées comme des fonctions continues dans le temps et discrètes par rapport aux dimensions des différentes tranches granulométriques.

La **fonction de sélection** caractérise la proportion de particules d'une tranche granulométrique donnée, qui est fragmentée par unité de temps. Elle exprime donc la vitesse d'évolution de la masse de cette tranche au cours de la fragmentation. Si l'on désigne par m_i la masse des particules de l' i ème tranche à l'instant t , la variation de masse par unité de temps de cette tranche s'écrit :

$$d m_i(t) / dt = - s_i m_i(t) \quad \text{avec } 0 \leq s_i \leq 1$$

s : fonction de sélection.

La **fonction de fragmentation** caractérise la distribution granulométrique obtenue à partir d'une tranche fragmentée au cours d'une étape élémentaire du processus de fragmentation. Cette fonction B_{ij} décrit donc le pourcentage cumulé des particules de la tranche j fragmentées et passant au travers du tamis i dont la maille d'ouverture est inférieure à celle du tamis j (donc $i > j$)

Généralités sur le phénomène de broyage

L'apparition de grains fragmentés provenant des différentes tranches j de dimensions plus grossières, soit : $\sum_{j=1}^n b_{i,j} s_j m_j(t)$

b : fonction de fragmentation.

Cette variation s'écrit alors : $dm_i(t)/dt = \sum_{j=1}^n b_{i,j} s_j m_j(t) - s_i m_i(t)$

Ou, sous forme matricielle : $dM(t)/dt = (B-I) S M(t)$

Avec ; B : matrice triangulaire de fragmentation,

I : matrice identité,

$M(t)$: vecteur colonne exprimant les masses par tranche granulométrique,

S : matrice diagonale de sélection. [3]

I.5-Description simplifiée du phénomène de la rupture

I.5.1-Théorie de la rupture par fissure

I.5.1.1-Théorie de Inglis et de Griffith

Au cours d'un procédé de réduction de taille, les forces de liaison doivent être rompues au niveau des surfaces de fracture. C'est à Inglis (1913) et à Griffith (1920) que l'on doit la théorie de rupture basée sur la création puis de la propagation de fissures à partir de défauts. Elle provient de la constatation que la résistance d'un matériau est toujours beaucoup plus faible que celle attendue en considérant uniquement les forces moléculaires. Cette grande différence s'explique alors par l'existence de fissures microscopiques ou de défauts affaiblissant le solide et produisant de fortes concentrations de contraintes [4], [5].

Hermann (1990) parle de désordre par rapport à la structure idéale du parfait cristal. Au niveau microscopique on peut citer les défauts suivants : lacune, inclusion, dislocation, joints de grains...A une échelle où l'on peut approximer le solide par un milieu continu, le défaut apparaît comme une hétérogénéité, un pore (sphérique ou ellipsoïdal) ou une microcavité (l'allongement de la microfissure peut atteindre 10^{-2} à 10^{-4}). Dans les roches, les cavités proviennent des espaces entre les sédiments ou des inclusions de fluide. Les microfissures apparaissent à la suite de clivage, au niveau des joints de grain par exemple.

En fait, un corps sous tension stocke de l'énergie sous forme d'énergie de déformation. Cette énergie n'est pas uniformément répartie dans le solide mais est concentrée au niveau de

Généralités sur le phénomène de broyage

crevasses ou fissures. Inglis définit un facteur de concentration de contrainte K au niveau d'une fissure :

$$K = \frac{\text{Contrainte locale}}{\text{Contrainte globale appliquée au solide}} \quad (1)$$

C'est un facteur d'échelle qui précise les valeurs exactes des contraintes locales [6].

I.5.1.2-Description simplifiée de la rupture

Les calculs de Griffith sont fondés sur un bilan énergétique. D'un côté, pour faire progresser une fissure d'une longueur donnée, il faut dépenser une certaine quantité d'énergie, en particulier pour créer deux nouvelles surfaces, de l'autre on dispose de l'énergie élastique (produit d'une force par un déplacement) qui varie pendant que la fissure progresse. Si pour une longueur donnée d'avancement de fissure, l'énergie élastique restituée est supérieure à l'énergie consommée, alors la rupture survient. Dans le cas contraire, la fissure est stable et il n'y a pas de rupture. Plus la force appliquée est élevée, plus l'énergie élastique est grande et au-delà d'un certain seuil, la rupture se produit.

La contrainte limite C_c est fonction de cette énergie critique de rupture G_c intrinsèque au matériau. Dans le cas simple d'une plaque plane (mince) de grande dimension comportant un défaut de longueur $2a$ (contrainte plane), les relations s'expriment :

$$C_c = (Y G_c / \pi a)^{1/2} \quad K_c = (Y G_c)^{1/2}$$

Avec G_c la contrainte limite à la rupture [Pa], Y le module d'Young [Pa] et G_c l'énergie de rupture [J]. En effet, les deux descriptions par l'énergie de rupture ou par le facteur de contrainte K_c sont reliées.

Dans le cas de déformation plane, par exemple pour une plaque épaisse fissurée où il n'y a pas de changement d'épaisseur de l'échantillon, on a les deux relations suivantes :

$$C_c = (Y G_c / (\pi a (1-\nu^2)))^{1/2} \quad K_c = (Y G_c / 1-\nu^2)^{1/2}$$

Généralités sur le phénomène de broyage

Mais dans le cas où le coefficient de Poisson est de l'ordre de 0,3, on peut assimiler les relations en contrainte plane et en déformation plane [5], car alors : $(1/1-\nu^2)=1$

I.5.2-Théorie d'Hertz-Huber

I.5.2.1-Expression énergétique

La théorie de Hertz (1881) est établie à la base dans le cadre de la compression uniaxiale de sphères idéales (homogènes sans fissures et élastiques) entre 2 plateaux parallèles indéformables (figure I.1).

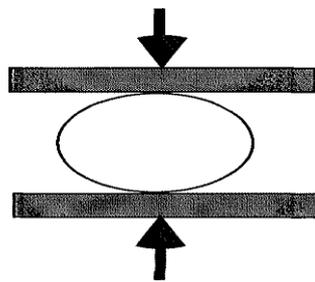


Figure I.1. Compression uniaxiale d'une sphère entre deux plateaux parallèles.

Un bilan de force permet de relier la déformation Δ de la sphère à la force de compression F avec ν coefficient de Poisson et Y module d'Young (Pa) :

$$\Delta = 2[(3/4) d] / [(1-\nu^2) / Y] F^2]^{1/3}$$

L'intégration donne l'énergie de déformation de la particule avec d le diamètre de la particule (m):

$$E = 0.83 [(1-\nu^2) / Y]^{2/3} (1/d)^{1/3} (F)^{5/3}$$

Si cette relation est appliquée à la condition limite de la fracture, c'est-à-dire sous la force F_c , avec ρ la masse volumique (kg/m^3) :

$$E/M = (5/\pi \rho) [(1-\nu^2)/Y]^{2/3} [F_c / d^2]^{5/3}$$

Généralités sur le phénomène de broyage

E/M représente l'énergie par unité de masse, nécessaire pour déformer une particule de taille d jusqu'à sa rupture par l'action de la force F_c .

Deux remarques peuvent être faites à propos de cette expression. Tout d'abord, elle est valable a priori pour les matériaux qui se brisent juste après leur domaine élastique, c'est la propriété des matériaux fragiles ("brittle"). Ensuite, on observe bien un accroissement de cette énergie avec la diminution de taille de particule [7].

I.5.2.2-Application à l'étude de l'impact

Dans l'hypothèse où toute l'énergie cinétique fournie à une particule est transformée au cours de l'impact en énergie de déformation élastique jusqu'à la rupture, on obtient une expression reliant la force d'impact et la vitesse d'impact V_s .

$$F = d^2 (\pi \rho / 5)^{3/5} [Y / 1 - \nu^2]^{2/5} V_s^{6/5}$$

Dans ce cas, on fait abstraction de toute déformation plastique et de toute autre dégradation énergétique. On comprend ici la restriction de ce modèle pour l'étude de l'impact. On verra dans la suite les validations, les améliorations et les limites de ces relations.

I.6-Types de broyage

I.6.1-Broyage simple

L'objectif de ce broyage est de ramener la totalité de l'échantillon jusqu'en dessous d'un certain calibre fixé au départ. Il ne tient pas compte de la granulométrie interne du produit.

I.6.2-Broyage poussé

Le produit obtenu doit contenir le maximum possible d'éléments nettement plus fins que la limite supérieure imposée. L'échantillon doit présenter une surface spécifique aussi élevée que possible (exemple des liants hydrauliques, pigments, peinture...).

I.6.3-Broyage ménagé

Contrairement au broyage poussé, on peut chercher le moins de sur-broyage possible ; soit parce qu'il est inutile (économie d'énergie), soit parce qu'il est nuisible (difficultés de récupération ou encore perte de la qualité).

Généralités sur le phénomène de broyage

I.6.4-Broyage différentiel (sélectif)

Ce type de broyage s'applique à des produits structurellement hétérogènes et permet la réduction un peu plus poussée des constituants friables par rapport aux constituants les plus durs.

I.6.5-Broyage formel

On désigne par ce terme les opérations de fragmentation au cours desquelles l'ensemble des fragments obtenus a une influence sur la valeur du produit. On recherche soit :

- La forme de petits grains cubiques (cas des matières thermoplastiques).
- La forme de fragments se rapprochant le plus possible de la forme cuboïde (matériaux routiers, agrégats pour la fabrication du béton) pour lesquels le coefficient de forme est un des éléments du cahier des charges.
- On recherche au contraire la forme d'élément plat, paillettes, écailles, tels que dans le cas de Talc, graphite ou pigments de peinture.

I.6.6-Auto-broyage (broyage autogène, self broyage)

Ce sont des opérations de fragmentation volumétriques dans lesquelles les éléments du produit à broyer se fragmentent par percussion.

I.6.7-Cryo-broyage

Fragmentation de produit préalablement refroidi à des très basses températures (en général par l'azote liquide).

I.6.8-Broyage combiné

Le plus souvent les opérations de fragmentation sont combinées dans un même appareil à d'autres opérations plus ou moins complémentaires, on peut avoir : broyeur-cribleur, broyeur-tamiseur, broyeur-séparateur, broyeur-sécheur, broyeur-mélangeur.

I.7-Appareilles de broyage

I.7.1-Critères du choix des appareils de broyage

La technologie des appareils de fragmentation tient compte des observations et des déductions suivantes :

I.7.1.1-Paramètres intrinsèques du matériau

Ils déterminent son comportement lors de la déformation. Le champ de contraintes auquel on soumet le solide joue sur les discontinuités pour l'amorce et la propagation des fissures dont la distribution détermine la dimension, la forme des fragments et les nouvelles surfaces créées.

Généralités sur le phénomène de broyage

I.7.1.2-Energie requise pour fracturer le matériau

Elle est dégagée par le champ de contraintes. Pour les matériaux rocheux, presque toujours non homogènes, l'action des forces extérieures jointe à la présence de discontinuités intergranulaires, créatrices de tensions internes et susceptibles de fournir une énergie de relaxation, permet la propagation de la fissure. L'énergie nécessaire à la rupture est une énergie supplémentaire car la propagation d'une fissure est consommatrice d'énergie. Elle est proportionnelle à la section du grain alors que l'énergie emmagasinée est proportionnelle au volume. Or le rapport volume/section est d'autant plus faible que le grain est petit. Si l'on ne peut dégager suffisamment d'énergie supplémentaire, la fissure s'arrête de progresser sans fragmenter le grain. On relève donc un effet d'insuffisance d'énergie dans le domaine de la fragmentation fine et on est amené à dépenser de l'énergie en pure perte, dont la part (97,3 %) dans le bilan énergétique d'un broyeur à boulets pour broyage fin est la suivante :

- Perte par friction..... 4,3 %
- Perte dans les engrenages..... 8,0 %
- Perte par transformation en chaleur due à l'échauffement du tambour 6,4 %
- Perte par transformation en chaleur due à l'échauffement des fluides31,0 %
- Perte par transformation en chaleur due à l'échauffement du produit47,6 %

Pour un solide cristallin constitué par une phase minérale unique, on entre dans un domaine où ne jouent plus la cohésion et la microfissuration inter-granulaire préalable, mais les discontinuités du solide, principalement les zones de moindre cohésion représentées par les clivages, les défauts cristallins, les inclusions.

I.7.1.3-vitesse de déformation

Elle conditionne le comportement du matériau. Celui-ci est élastique lorsque la courbe contrainte/déformation du déchargement suit celle du chargement.

Dans le cas contraire, le comportement est inélastique. Les vitesses de mise en contrainte développées dans un appareil donné doivent être adaptées au but recherché : fragmentation grossière, fine ou ultrafine. Elles varient largement selon le type de force externe mise en œuvre :

- Compression 0,1 à 1 m/s
- Cisaillement.....4 à 8 m/s
- Attrition4 à 8 m/s
- Impact par percussion sur blindage15 à 200 m/s
- Impact dû à des corps broyant.....10 à 300 m/s

Généralités sur le phénomène de broyage

I.7.1.4-Réduction des dimensions du matériau

Elle n'est pas illimitée ; de l'ordre de 4/1 pour la fragmentation grossière, elle dépasse 100/1 pour la pulvérisation.

I.7.2-différentes appareilles de broyage

I.7.2.1-Broyeurs à corps broyant libres

Ce sont des appareils cylindriques ou cylindro-coniques tournant autour de leur axe horizontal et contenant des corps broyant qui peuvent être des boulets, des barres ou des galets (Peebles). Le volume occupé par les corps broyant et la matière à broyer peut atteindre la moitié du volume interblindage du broyeur. Les corps broyant sont en fonte, en acier, en silex ou en céramique. Ils doivent être plus lourds et plus gros que les particules à broyer. Le blindage des broyeurs doit être suffisamment épais pour supporter l'usure et rugueux pour éviter les glissements excessifs de la charge constituée par les corps broyant et la matière à broyer. Il est fabriqué à partir de matériaux métalliques (fontes et aciers alliés), en caoutchouc ou en céramique. Ce dernier type de blindage est employé lorsqu'une pollution de la matière à broyer par le fer est indésirable.

I.7.2.1.1-Broyeurs à boulets

Les corps broyant sont donc des boulets dont le diamètre peut varier de 12,7 à 2,2 cm. Les broyeurs à boulets ont un rapport L/D 1,5. Lorsque ce rapport est supérieur à 1,5, on les appelle tubes broyeurs. Il existe aussi des broyeurs courts type Marcy pour lesquels $L/D < 1$ afin d'éviter le surbroyage. Ils peuvent être utilisés en continu ou en discontinu, en voie humide ou en voie sèche. La figure I.2 montre une coupe du broyeur Alsing à marche discontinue, utilisé surtout dans les industries céramiques. La capacité de ce type de broyeur peut aller de quelques litres à 2 ou 3 m³.

Les broyeurs les plus utilisés, particulièrement dans le domaine de la préparation des minerais, sont ceux de l'exemple de la figure I.3. Ils fonctionnent en continu, le plus souvent en circuit fermé avec un appareil de classement. Leur alimentation peut être réalisée par cuillère, par tambour ou par un dispositif dit tubulaire direct. L'alimentation par tambour est utilisée pour les broyeurs de faible capacité travaillant en circuit ouvert. La décharge des

Généralités sur le phénomène de broyage

produits broyés est effectuée soit par débordement, soit par grille à niveau bas ou intermédiaire. La figure I.4 schématise ces trois types d'évacuation.

Les différents mécanismes d'entraînement des broyeurs à boulets sont représentés sur la figure I.5, les attaques latérales étant pratiquement la règle pour les gros broyeurs.

Il existe une bonne corrélation entre la taille des boulets et la forme de blindage du broyeur. Pour les gros boulets (broyage grossier), le revêtement est épais avec d'importantes et nombreuses ondulations ou cannelures pour assurer leur relevage. Cependant lorsque les boulets sont de petite taille (broyage fin), le blindage est moins épais et comporte de faibles ondulations moins nombreuses ou moins de plaques relevées. La figure I.6 représente les formes de blindage les plus utilisées pour la virole du broyeur.

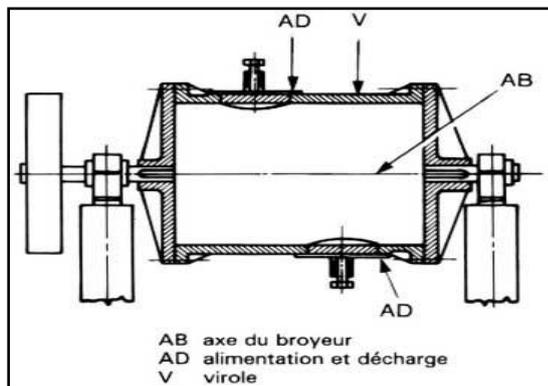


Figure I.2. Broyeur à boulets à marche discontinue

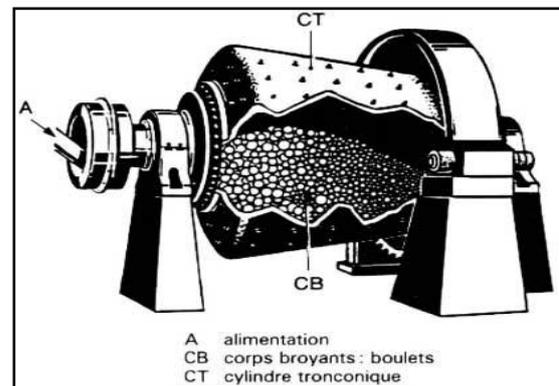


Figure I.3. Broyeur à boulets de type Harding



Figure I.4. Systèmes de décharge des broyeurs à boulets (D'après SME Minéral Procéssing)

Généralités sur le phénomène de broyage

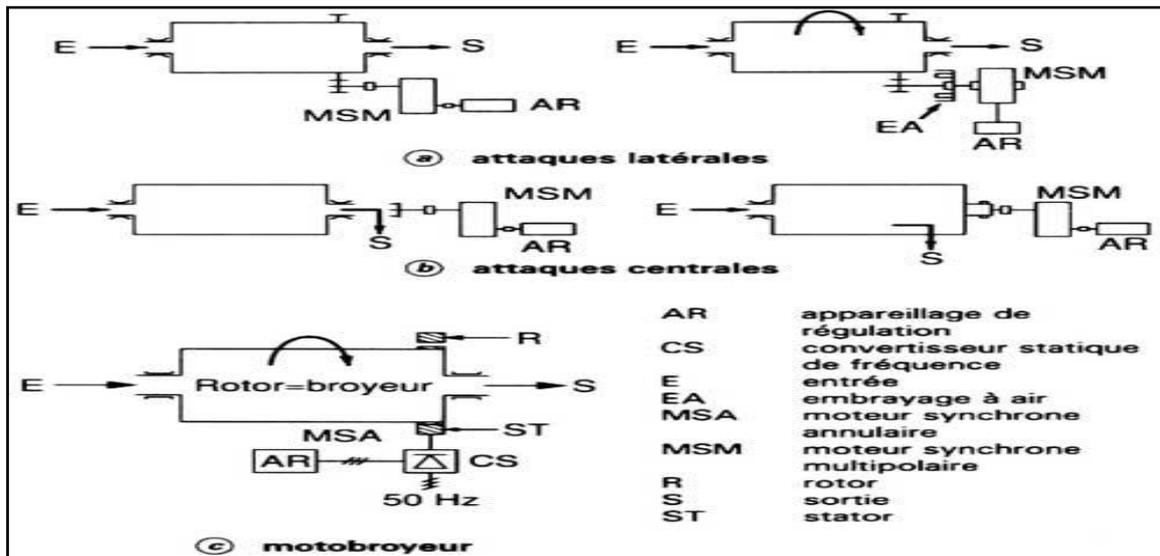


Figure I.5. Mécanismes d'entraînement des broyeurs à boulets et à barres (D'après F. Desrumaux)

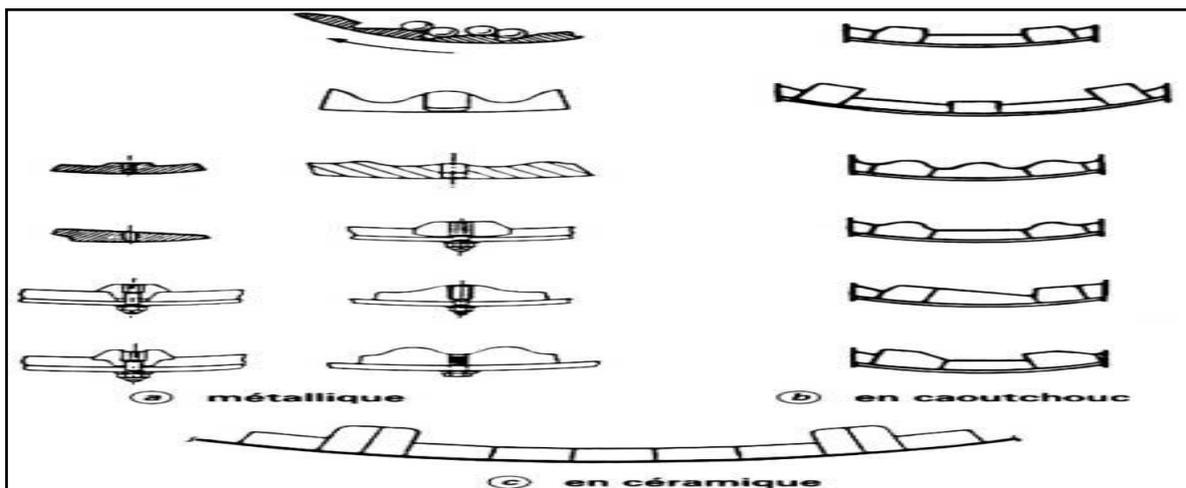


Figure I.6. Blindages des viroles des broyeurs à boulets et à barres. (Minéral Procéssing Handbook)

Les broyeurs à boulets peuvent comporter plusieurs compartiments figure I.7, généralement au nombre de deux ou trois, contenant des corps broyant de tailles différentes. Les gros boulets se trouvent côté alimentation et les petits boulets côté décharge. La matière à broyer s'écoule d'un compartiment à l'autre par débordement à travers des parois munies de plaques

Généralités sur le phénomène de broyage

releveuses. Dans certains appareils, le premier compartiment joue le rôle de chambre de séchage.

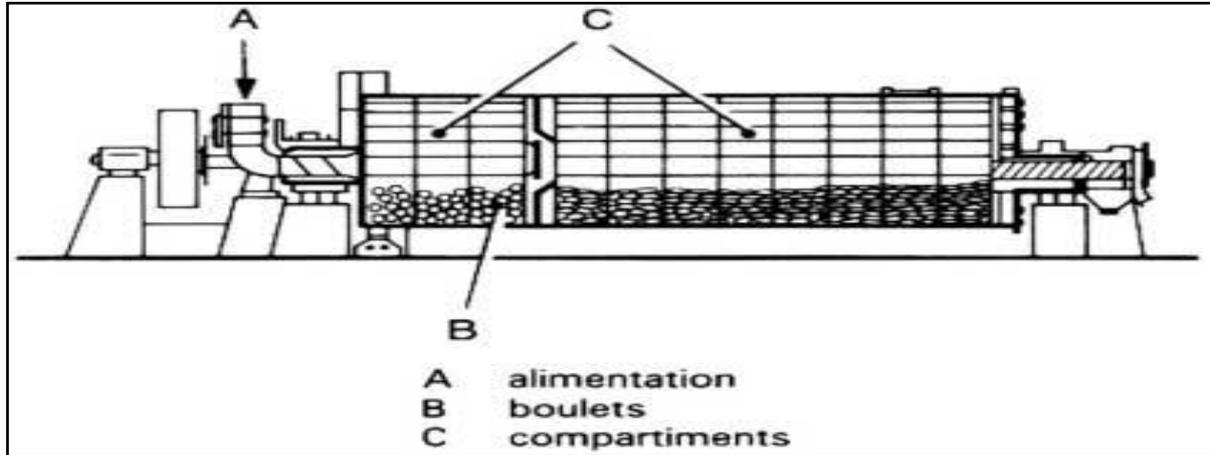


Figure I.7. Broyeur à boulets à deux compartiments

I.7.2.1.2-Broyeurs à barres

Ils ont un rapport $L/D > 1,5$. Les barres ont une longueur inférieure d'environ 15 cm à la longueur de la chambre de broyage et, généralement, égale à 1,4 fois le diamètre interblindage du broyeur. Leur diamètre peut varier de 12,7 à 5 cm. L'alimentation de ces broyeurs et les mécanismes de commande sont les mêmes que pour les broyeurs à boulets.

I.7.2.1.3-Broyeurs à galets (ou à pebbles)

Ce sont des tambours qui utilisent pour corps broyant des galets (ou pebbles) de roche, de silex, de gravier ou de céramique, triés par un classement dans une fourchette granulométrique bien déterminée. Lorsque les galets sont issus du minerai lui-même, on retrouve les broyeurs semi-autogènes secondaires. Les broyeurs à galets s'apparentent donc à la fois à des broyeurs à boulets et à des broyeurs semi-autogènes.

I.7.2.1.4-Broyeurs autogènes

Le broyage autogène consiste à utiliser comme corps broyant le minerai lui-même. Lorsque le milieu broyant est constitué par des morceaux de minerai auxquels on ajoute des boulets d'acier, le broyage est dit semi-autogène. Le broyage autogène a deux avantages évidents :

Généralités sur le phénomène de broyage

-Il est moins consommateur d'acier que les procédés classiques ;

-Il réduit le nombre d'étages de concassage et de broyage. Le minerai entrant dans le broyeur autogène doit contenir au moins 25 % en masse de morceaux de taille supérieure à 150-200 mm. Le produit sortant est caractérisé par l'importance des particules correspondant à des éléments constitutifs de la roche non affectés par la fissuration (celle-ci s'exprimant surtout au niveau des joints intercrystallins).

I.7.2.1.4.1-Broyage à sec

Le broyage à sec est en général réalisé après un concassage primaire, de façon autogène ou semi-autogène. Le broyeur Aerofall traite une grande variété de minerais métalliques et non métalliques (asbeste, calcaire, néphéline, quartzite, ajouts pour cimenterie, etc.). Le tambour rotatif est une roue verticale dont le rapport diamètre/longueur est compris entre 1/5 et 1/2,5. Le blindage en acier au manganèse ou au chrome-molybdène comporte des déflecteurs latéraux dont le rôle est de produire une action de serrage sur la masse du produit à broyer. Des barres d'impact situées périphériquement ont pour rôle de relever la charge qui en retombant passe devant le tourillon creux, de sorte que les fines particules soient extraites par un système de ventilation. Une modification importante existe pour les forts tonnages à traiter : La décharge axiale est transformée en décharge périphérique à travers des grilles, situées entre les barres de relevage, présentant des ouvertures de 0,6 à 1,3 mm, voire 10 mm dans le cas de broyeurs semi-autogènes. L'air ventilé est réchauffé de telle sorte que l'humidité résiduelle du minerai soit réduite à 2 %. La vitesse optimale est de 84,5 % de la vitesse critique.

Le broyeur à cascade Harding est un broyeur autogène sensu stricto. En effet, il utilise comme corps broyant une charge de minerai homogénéisée et de granulométrie donnée. Sa géométrie est différente puisque le rapport L/D est égal à 1/3. Il n'est pas pourvu de déflecteurs latéraux.

I.7.2.1.4.2-Broyage humide

Les broyeurs opèrent sur des pulpes minérales et remplacent les concasseurs secondaires et les broyeurs à barres dans des installations de minerais non ferreux en effectuant une réduction de taille avec une production d'un minimum de fines afin de faciliter les traitements ultérieurs. Dans les broyeurs Hydrofall, on ajoute généralement, pour les minerais non

Généralités sur le phénomène de broyage

ferreux, quelques boulets d'acier de 100 et 125 mm de diamètre, soit 2 à 10 % de la charge broyante.

I.7.2.2-Broyeurs sans corps broyant libres

Certains de ces appareils ne sont que des concasseurs adaptés à une fragmentation poussée (broyeurs à cylindres, à percussion), d'autres sont de conception originale. Ils sont tous conçus pour fonctionner à sec.

I.7.2.2.1-Broyeurs à cylindres

Les cylindres peuvent être lisses ou striés de fines cannelures et tournent presque l'un au contact de l'autre à des vitesses différentielles ou synchrones. Dans certains appareils où les surfaces doivent être soigneusement polies, une rectifieuse automatique montée sur le broyeur permet de maintenir l'état de surface des cylindres. De même, pour le traitement des produits collants, des raclours réglables sont prévus sur les appareils. Le réglage de l'écartement des cylindres se fait par un système de coins ou par vis micrométrique. La pression de broyage est généralement obtenue par voie hydraulique.

I.7.2.2.2-Broyeurs à percussion

Ces appareils sont issus des concasseurs à percussion décrits précédemment. L'évacuation des produits broyés se fait soit par une grille située à la partie inférieure de la chambre de broyage, soit par un sélecteur à air. Dans ce dernier cas, ainsi que dans le cas d'une alimentation forcée, il est possible d'atteindre, respectivement, des finesses de 5 à 50 μm (broyage ultrafin) et de 100 à 150 μm .

I.7.2.2.3-Broyeurs à meules (ou à rouleaux)

Ils opèrent par écrasement de la matière entre un ou plusieurs rouleaux et une piste circulaire. La pression de broyage est obtenue soit par gravité, ce qui nécessite l'emploi de meules très lourdes, soit par la force centrifuge de rouleaux tournant dans une piste fixe à parois verticales ou fortement inclinées, soit encore par des systèmes de ressorts ou de vérins.

Parmi les broyeurs opérant par gravité, on peut citer le broyeur à meules à cuve fixe. Deux meules cylindriques très lourdes (150 à 6 000 kg) roulent sur une piste circulaire pleine ou constituée par des grilles. L'ensemble meules-piste peut être soit en métal, soit en granite. Un

Généralités sur le phénomène de broyage

autre exemple de ces broyeurs est le broyeur dit chilien qui met en œuvre trois meules cylindriques à bandage étroit roulant sur une piste annulaire plate.

I.8-Consommation énergétique de broyage

Les tentatives de quantification ont fait l'objet de multiples travaux théoriques recouvrant aussi bien les aspects énergétiques et granulométriques que ceux des transformations ayant lieu dans les appareils de fragmentation.

I.8.1-Lois énergétiques

Les trois théories principales ont été émises pour décrire la relation qui existe entre l'énergie consommée E par le matériau et la réduction de la dimension D de ce matériau lors de la fragmentation. Jusqu'à présent, les hypothèses avancées pour élaborer cette relation ne sont pas rigoureusement prouvées puisque l'on ne sait toujours pas mesurer la quantité d'énergie réellement absorbée par les particules au cours de leur fragmentation. On ne peut mesurer que l'énergie totale consommée par l'appareil de fragmentation.

I.8.1.1-Loi de Rittinger

Von Rittinger (1867) postule que l'énergie consommée E est directement proportionnelle à la quantité de surface nouvellement créée. Il écrit alors la relation :

$$E = K_r (S_2 - S_1)$$

Avec K_r constante qui dépend à la fois du matériau et de l'appareil de fragmentation, S_1 et S_2 surfaces des particules, respectivement, avant et après fragmentation.

Si l'on considère l'énergie spécifique E' , par unité de volume, on peut écrire :

$$E' = E / V = K_r (S_2 / V - S_1 / V)$$

$$E' = K_r (1/D_2 - 1/D_1)$$

Avec D_1 et D_2 ; dimensions initiale et finale des particules, V ; volume du matériau. Le point faible de cette loi réside dans le fait que Rittinger n'a pas tenu compte de la déformation du matériau avant sa fragmentation. La quantité de surface produite ne peut être proportionnelle au travail nécessaire fourni que si elle est proportionnelle au produit de la contrainte appliquée par la longueur de déformation.

I.8.1.2-Loi de Kick

Généralités sur le phénomène de broyage

Pour Kick (1885), l'énergie nécessaire pour fragmenter un matériau homogène est proportionnelle à la variation du volume, donc au rapport de réduction $R = D_1/D_2$. Cette deuxième

loi de la fragmentation s'écrit alors :

$$dE = -K_k dV$$

$$\text{Soit } dE' = -K_k dV/V = -K'_k dD/D$$

Et l'on obtient alors après intégration :

$$E' = K'_k \ln D_1/D_2 = K'_k \ln R$$

Le travail nécessaire pour réduire une tonne de matériau est donc le même pour un rapport de réduction donné, quelle que soit la dimension initiale du matériau. Cela n'est évidemment pas compatible avec la pratique. De plus, le matériau à fragmenter n'est pas homogène et la fragmentation dépend alors de ses imperfections (fissures, dislocations, etc.).

I.8.1.3-Loi de Bond

Comme aucune des deux précédentes lois ne s'accordait bien avec l'ensemble des résultats observés lors des opérations de fragmentation industrielle, Bond (1951) a proposé, en analysant une multitude de résultats expérimentaux, une troisième loi qui postule que l'énergie spécifique requise est inversement proportionnelle à la racine carrée de la nouvelle surface produite. Cette loi se veut un compromis entre celles de Rittinger et de Kick. La forme générale de la loi de Bond s'écrit :

$$W = W_i [(100/D_2)^{0.5} - (100/D_1)^{0.5}] \quad (01)$$

D_1 et D_2 sont les dimensions, en micromètres, des grains respectivement avant et après fragmentation, choisies comme correspondant à la dimension D_{80} de la maille carrée laissant passer 80 % en masse du matériau, et W_i une constante appelée indice énergétique (work index) donnée pour D_2 égale à 100 micromètres. W_i est déterminé expérimentalement par des essais de fragmentation réalisés au laboratoire.

Compte tenu des conditions de détermination de l'indice énergétique et des résultats expérimentaux observés industriellement, il ressort que l'énergie calculée par la formule de Bond n'est valable que dans les conditions spécifiques suivantes :

Généralités sur le phénomène de broyage

- broyeur à barres, 2,44 m de diamètre interblindage, voie humide, circuit ouvert ;
- broyeur à boulets, 2,44 m de diamètre interblindage, voie humide, circuit fermé.

Pour généraliser la formule de bond (01), avec W en kWh/t, des facteurs correctifs sont nécessaires. Ils sont au nombre de huit (f_1 à f_8) et l'énergie, consommée par tonne de minerai, corrigée W_c en kWh/t est :

$$W_c = 1,102 W f_1 f_2 f_3 f_4 f_5 f_6 f_7 f_8 \quad (02)$$

Le facteur f_1 intervient pour le broyage à sec qui nécessite 1,3 fois plus d'énergie que le broyage humide, il est donc égal à 1,3.

Le facteur f_2 intervient pour le broyeur à boulets travaillant en circuit ouvert ; il est fonction du degré de contrôle requis sur le produit obtenu. Le tableau I .1 donne les valeurs de f_2 en fonction du passant à la maille de référence.

Pourcentage massique de passant à la maille de référence.....%	50	60	70	80	90	92	95	98
f_2	1.035	1.05	1.10	1.20	1.40	1.46	1.57	1.70

Tableau I.1 Valeur du facteur correctif f_2 pour différentes maille en tamis

Le facteur f_3 d'efficacité est lié au diamètre du broyeur ; il est obtenu par la relation :

$$f_3 = (2,44/\varnothing)^{0,2} \quad (03)$$

Avec \varnothing (m) diamètre inter blindage.

Le facteur f_4 intervient pour une alimentation de granulométrie supérieure à la granulométrie optimale utilisée pour la détermination du work index (13 200 μm pour le broyeur à barres et 3 350 μm pour le broyeur à boulets). Il est donné par la relation, avec W_i en kWh/t :

$$f_4 = [R + (W_i - 7) (D - D_0)/D_0]/R \quad (04)$$

Avec D dimension de l'alimentation (D_0 dimension optimale),

Généralités sur le phénomène de broyage

R rapport de réduction (égal à D_{80}/d_{80}).

D_0 est déterminé par les relations, avec W_i en kWh/t :

$$D_0 = 16\,000 (13/W_i)^{1/2} \text{ pour le broyeur à barres.} \quad (05)$$

$$D_0 = 4\,000 (13/W_i)^{1/2} \text{ pour le broyeur à boulets.} \quad (06)$$

Pour la valeur de W_i , il faut utiliser :

- Dans la relation (04), celle des tests de broyabilité réalisés dans un broyeur à boulets à la dimension désirée ;
- Dans la relation (05), celle obtenue par les tests réalisés soit dans un broyeur à impact, soit dans un broyeur à barres ;
- Dans la relation (06), celle donnée par les tests en broyeur à barres ou, à défaut, en broyeur à boulets.

Le facteur f_5 de finesse est valable pour le broyage fin lorsque la dimension d_{80} est inférieure à $75\mu\text{m}$. Il est donné par la relation :

$$f_5 = (d_{80} + 10,3)/1,145 d_{80} \quad (07)$$

Le facteur f_6 est relatif au rapport de réduction R pour le broyeur à barres, si R ne vérifie par l'inégalité avec :

$$R_0 = 8 + (5L/\varnothing) \quad (08)$$

Où L désigne la longueur des barres.

Le facteur f_6 est alors donné par la relation :

$$f_6 = 1 + [(R - R_0)/150] \quad (09)$$

Il s'applique toujours lorsque les rapports de réduction sont petits, mais son utilisation pour des valeurs élevées de R n'est pas forcément nécessaire ; néanmoins, il doit être appliqué chaque fois que W_i est supérieur à 7 kWh/t.

Le facteur f_7 intervient pour des rapports de réduction inférieurs à 6 dans le cas des broyeurs à boulets, comme cela est le cas du rebroyage des concentrés ou des mixtes minéralogiques ; il est déterminé à partir de la relation : $f_7 = [2(R - 1,35) + 0,26]/2(R - 1,35)$ (10) **Le**

Généralités sur le phénomène de broyage

facteur f_8 intervient pour les broyeurs à barres dont la performance est affectée par la nature de la préparation de l'alimentation, notamment en ce qui concerne l'uniformité de la granulométrie, et par le maintien de la charge en barres pour compenser l'usure. Il est pris égal à 1,4 si l'alimentation est issue d'un concassage en circuit ouvert et à 1,2 si le concassage est effectué en circuit fermé ou si le circuit de broyage comprend un broyeur à barres suivi d'un broyeur à boulets, avec une alimentation du premier broyeur à barres non uniforme ou ne provenant pas d'un concassage en circuit fermé. Les facteurs f_3 , f_4 et f_6 doivent également être appliqués avec le facteur f_8 .

- La catégorie des matériaux friables qui ont un indice de Bond W_i entre 7 kWh/t et 9 kWh/t. Parmi ces minerais friables, on trouve : l'argile, le verre, le gypse et la pyrite.

- La catégorie des matériaux à résistance moyenne qui ont un indice de Bond W_i entre 9 kWh/t et 14 kWh/t. Parmi ces minerais, on trouve : les minerais de cuivre, l'hématite, les minerais de plomb et des minéraux comme le quartz et le feldspath.

- La catégorie des matériaux durs qui ont un indice de Bond W_i entre 14 kWh/t et 20 kWh/t. Parmi ces minéraux, il y a : les minerais aurifères, le granite, la diorite, le gabbro et les minerais d'argent.

- La catégorie des matériaux très résistants ceux qui ont un indice de Bond W_i supérieur à 20 kWh/t. Parmi ces matériaux, on trouve : le basalte, le gneiss, le graphite et les micas.

I.8.1.4-Autres relations

L'insuffisance des lois de Rittinger, Kick et Bond et leur nature contradictoire ont conduit à rechercher d'autres relations entre la réduction dimensionnelle et l'énergie consommée. Ainsi, Svensson et Murkes (1957) considèrent que dans l'expression de Bond l'exposant de $100/D$ n'est pas une constante et contestent le choix du D_{80} . Ils proposent alors une relation plus générale de la forme :

$$E' = K_{sm} [(100/D_2)^n - (100/D_1)^n] \quad (11)$$

Avec D (m) dimension moyenne des particules qui peut être obtenue en première approximation par la moyenne géométrique des dimensions D_{10} , D_{30} , D_{50} , D_{70} et D_{90} ,

K_{sm} ; constante,

n ; paramètre à déterminer pour chaque matériau et pour un mode de fragmentation donné.

Généralités sur le phénomène de broyage

Charles(1957) propose une loi générale de la forme :

$$dE = - K_c (dD/D^n) \quad (12)$$

avec K_c ; constante.

Après intégration de la relation (10), on retrouve pour $n = 1$ la loi de Kick, pour $n = 1,5$ la loi de Bond et pour $n = 2$ la loi de Rittinger. Pour Hukki(1961), la relation qui lie l'énergie à la réduction des dimensions des particules est une relation composite de celles établies par Rittinger, Kick et Bond, qui s'écrit :

$$dE = - K_h dD/D^{f(D)}(13)$$

Avec K_h ; constante.

En plus des hypothèses posées par les auteurs des trois premières lois énergétiques, il prend en compte la probabilité de fragmentation $f(D)$ des grains en fonction de leurs dimensions initiales. Cette probabilité est égale à l'unité pour les grosses particules et tend vers zéro pour les particules ultrafines.

I.8.1.5-Commentaires

Tous les travaux menés pour déterminer l'énergie nécessaire à la réduction des dimensions des matériaux n'ont pu à ce jour aboutir à une formulation mathématique satisfaisante établissant une relation fidèle entre l'énergie consommée et la dimension des particules dans tous les domaines de la fragmentation, du concassage au broyage ultrafin. Toutefois, les nombreux essais de fragmentation effectués sur différents matériaux montrent que la loi de Rittinger est compatible avec une fragmentation fine à ultrafine, que la loi de Kick s'applique bien dans le cas d'une fragmentation grossière et que la loi de Bond couvre les domaines du broyage grossier à fin. Cette dernière loi est d'ailleurs utilisée pour la dimensionnement des broyeurs.

Les autres lois sont généralement d'un maniement difficile et se heurtent particulièrement à la complexité des calculs et/ou des essais pour la détermination de certains paramètres (constante de proportionnalité, valeur de l'exposant n , etc.).

Quelle que soit la loi adoptée, il apparaît que, pour le broyage fin à ultrafin, la consommation énergétique augmente de façon non toujours linéaire avec la finesse des particules [9].

Généralités sur le phénomène de broyage

I.9-Caractérisation du solide à broyer

I.9.1-Propriétés morphologiques

Avant d'étudier la comminution d'un solide donné, il convient de définir ses principales caractéristiques géométriques pour observer leurs évolutions. Mais, s'il est relativement simple de caractériser une particule unique, en revanche la caractérisation d'une population de grains se révèle plus ardue [10].

I.9.2-Propriétés physiques

I.9.2.1-Porosité

En général la porosité est le rapport du volume des vides au volume total de la roche. On peut aussi définir la porosité comme le volume de vide par unité de volume apparent.

$$\rho = \frac{\text{volumedesvides}}{\text{volumetotale}}$$

I.9.2.2-Masse volumique absolue (MVA)

C'est le quotient de la masse sèche de l'échantillon au volume de la matière solide de celui-ci (hors pores).

$$MVA = M_s / (v_t - v_v) \quad (\text{tonnes/m}^3)$$

I.9.2.3-Masse volumique réelle (MVR)

C'est le quotient de la masse sèche de l'échantillon au volume de la matière solide de celui-ci, y compris les pores.

$$MVR = M_s / V_t \quad (\text{tonnes/m}^3)$$

I.9.2.4-Coefficient d'absorption d'eau (Ab)

C'est le rapport de la différence entre la masse de l'échantillon immergé dans l'eau pendant 24 heures à 20°C et sa masse sèche, à sa masse sèche, multiplié par cent.

$$Ab = 100 (M_a - M_s) / M_s$$

Généralités sur le phénomène de broyage

Tel que

M_a : la masse d'un échantillon immergé dans l'eau pendant 24 heures.

M_s : la masse d'échantillon sec.

v_t : volume totale.

v_v : volume des vides.

I.9.2.5-Teneur en eau (W)

C'est le rapport de la différence entre la masse de l'échantillon en l'état et sa masse sèche, à la masse sèche de l'échantillon.

$$W = 100 (M - M_s) / M_s$$

Tel que:

– M : la masse du matériau humide

– M_s : la masse du matériau sec

I.9.3-Propriétés mécanique

Il est intéressant également de préciser quel est le comportement du solide face à une déformation mécanique.

I.9.3.1-Résistance à la fragmentation

La mesure de la résistance à la fragmentation s'obtient par l'essai que l'on appelle Los Angeles (LA)

Ce coefficient est le rapport de la quantité des fines inférieures à 1,60 mm (maille carrée) produites dans la machine Los Angeles, et la masse de la prise d'essai.

Le coefficient Los Angeles est, par définition le rapport

$$LAg = 100 * m / 5000$$

Où : m = masse des fines produites au cours de l'essai et dont le diamètre est inférieur à 1,60 mm (maille carrée)

Généralités sur le phénomène de broyage

I.9.3.2-Résistance au gel

Cette caractéristique est exigée pour prévoir le comportement des bétons dans des conditions climatiques sévères.

Un granulat est considéré comme non gélif s'il absorbe peu d'eau ($Ab < 1\%$) ou si sa résistance à la fragmentation est bonne ($LA < 25$)

$$G = \frac{(LA_g - LA)}{LA} * 100$$

Avec LA_g est le coefficient Los Angles de l'échantillon

CHAPITRE II LES TESTS DE BROYAGE

II-LES TESTS DE BROYAGE

II.1-Introduction

L'analyse d'un procédé de réduction de taille révèle trois facteurs essentiels à la compréhension du phénomène :

- Le mouvement des particules dans le volume de broyage (interaction entre les particules) ;
- Les caractéristiques de l'application des contraintes (mode d'application, typologie d'impact...);
- Le comportement du matériau (déformations élastique, plastique, résistance...).

Ces trois facteurs sont liés d'une manière très complexe, c'est pourquoi on ne peut jamais a priori, transposer les résultats d'un type de broyeur à un autre (Schonert 1995) [11].

Un des points essentiels à élucider est le comportement du matériau face au broyage. Rigoureusement, il faut évaluer non seulement le comportement sous contrainte d'une particule isolée, mais aussi d'un lit de particules. Il faut déterminer la résistance, l'énergie de broyage, la probabilité de broyage, la création de nouvelles surfaces... qui dépendent du matériau, de sa taille, sans oublier le mode et la rapidité d'application des contraintes (Yashima et al. 1987a) [12]. En outre, cette information complexe ne peut pas être obtenue facilement à partir d'expériences sur installation expérimentale, car on obtient souvent le reflet combiné du matériau et des performances du broyeur.

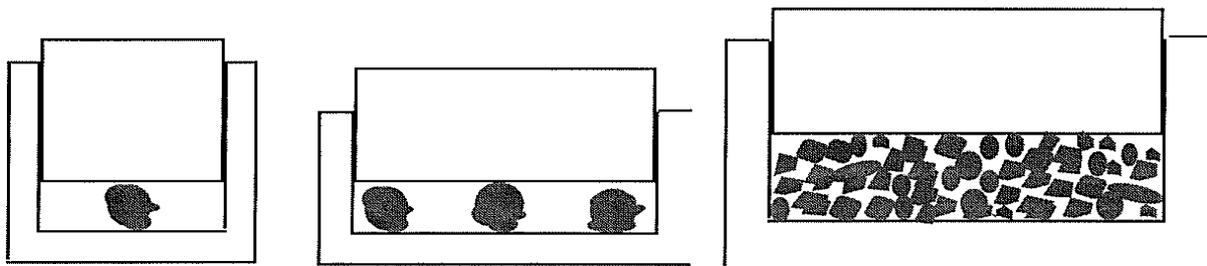
On voit donc ici la nécessité d'élaborer un test de broyage qui reproduise des situations d'application de contraintes bien contrôlées.

Le rappel bibliographique qui suit s'attache à donner un bref aperçu des différents tests qui ont été développés dans le passé. D'abord, une brève présentation globale des tests de compression, y est donnée. Ensuite, une étude plus ciblée sur l'impact permet de mieux situer le contexte des broyeurs à jet d'air et notre travail. On y trouve finalement la justification de la mise au point d'un test élémentaire d'impact sur cible, capable d'étudier et de caractériser le comportement de tout solide dans une gamme étendue de taille et d'énergie.

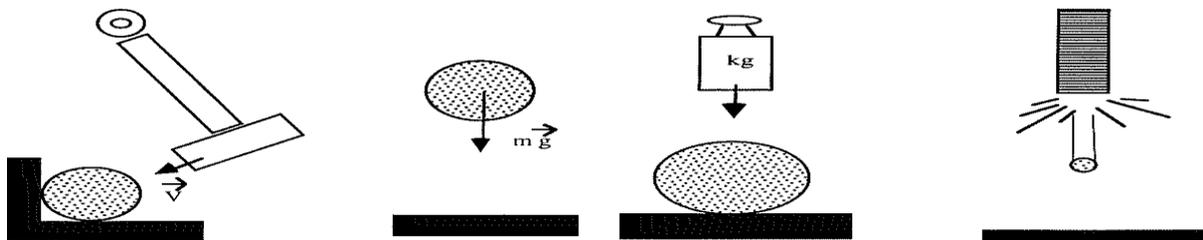
Les Tests du broyage

II.2-Classification des tests de broyage

Prasher (1987) propose une classification complète des tests sur particules "isolées". Les machines de compression se rattachent à la première catégorie. Les installations d'impact "pendulaire", de chute de particule, de tir de particule ou de chute de poids sur particule se classent dans la seconde. En outre, il faut préciser le nombre de points de contact ou encore si le test s'applique à une seule ou à plusieurs particules isolées ou non (voir figure II.1), [13].



Compression sur particule unique, sur monocouche de particules isolées, sur lit de particules



Impact pendulaire, par chute de particule, par chute de poids, par tir de particule

Figure II.1. Classification des tests sur particules

II.3-Tests de broyage par impact

Ce paragraphe a pour but de présenter brièvement les connaissances actuelles du broyage par impact de particules solides. Tout d'abord, le tableau II.1, donne un aperçu global des équipes ayant travaillé sur l'impact jusqu'en 1987. Ensuite, d'autres travaux sont abordés. Ils sont scindés en deux approches.

Le premier groupe d'auteurs s'attache à l'étude de l'impact de particules uniques d'un niveau fondamental du mécanisme de la fracture : théorie de la compression uniaxiale d'Hertz [7], modèle pour les matériaux fragiles, modèle cinétique, influence de la forme et du procédé de fabrication du matériau, probabilité de broyage. Une approche plus empirique d'étude de jets

Les Tests du broyage

diphases est envisagée par le deuxième groupe: influence des paramètres opératoires sur les caractéristiques du solide avant et après impact, typologie de l'impact, influence de la taille des particules, impacts répétés. Il est à noter que dans le premier cas, les particules généralement utilisées sont de l'ordre du millimètre voire du centimètre, alors que dans le second, les particules sont toujours plus petites.

Auteurs	Matériaux étudiés	Test	Finesse
Rumpf (1965)	Sphères et grains de verre, quartz, calcaire, clinker de ciment	Chute d'un poids sur particule unique (1)	Surface **
Behrens (1965)	Sphères et grains de verre, quartz, calcaire, pyrite	Chute d'un poids sur particule unique (2)	Surface **
Hildinger (1969)	Sphères et grains de verre, quartz, calcaire, clinker de ciment	Chute d'un poids sur particule unique (1)	Surface **
Tschorbadjski (1969)	Grains de charbon brun	Tir de particule sur cible (1)	Surface
Lenkewitz (1970)	Grains de charbon	Tir de particule sur cible (1)	Surface
Schönert (1972)	Sphères et grains de verre, quartz, calcaire	Air comprimé (2), Chute d'un poids sur particule unique (1)	Surface **
Baumgardt et al. (1973) - (1976)	Sphères de verre et clinker de ciment	Air comprimé (2), Chute d'un poids sur particule unique (1), Chute libre (1)	Surface ***
Rumpf (1973)	Sphères et grains de verre, quartz, calcaire, clinker de ciment	Chute d'un poids sur particule unique (1), Chute libre (1)	Surface **
Rose (1974)	Sphères de clinker de ciment	Chute d'un poids sur particule unique (1)	Surface
Smith (1979)	Grains de charbon et de clinker de ciment	Chute libre (1)	Surface ***
Kerlin (1979)	Grains de charbon	Tir de particule sur cible (1)	Intégration****
Barnard (1983)	Grains de charbon brun et bitumeux	Chute libre, monocouche (1)	Surface ***

Tableau II.1. Travaux recensés par Prasher (1987) sur les tests d'impact : surface déterminée par la distribution granulométrique quand $taille > 40 \mu m$ et par photosédimentation quand $< 40 \mu m$

*** : surface déterminée par la distribution granulométrique

**** : intégration de la distribution de taille Entre parenthèses : nombre de points de contact

Les Tests du broyage

II.3.1-Etude de l'impact d'une particule unique

Yashima et al. (1987b) ont étudié de façon analytique la compression uniaxiale de sphères en utilisant l'équation de Hertz [14]. Ils utilisent une expression de l'énergie de réduction de taille E qui fait intervenir un nouveau paramètre par rapport à l'équation initiale d'Hertz : le coefficient m_w d'uniformité de Weibull apparaît dans la relation qui lie G_c , la résistance à la limite de l'élasticité au volume V de la particule. Avec f =constante.

$$G_c = f v^{-1/m_w} = (G_{c0} V_0^{1/m_w}) V^{-1/m_w}$$

D'autre part avec l'hypothèse que toute l'énergie cinétique est convertie en énergie de fragmentation, l'équipe de Yashima détermine la vitesse minimale de fracture U_c :

$$E/M = E_c/M = (1/2)U_c^2$$

II.3.2-Etude de l'impact d'un jet diphasique

Okuda et Choi (1980) étudient l'influence des actionneurs sur le broyage à jet d'air par impact sur cible [15]. Les matériaux utilisés sont des billes de verre (taille variant de 710 à 840 μm) et du polystyrène (taille de 295 à 1410 μm).

Ils utilisent comme critère de finesse la quantité de surface créée ΔS_w , rapportée à la masse, et étudient son évolution en fonction de :

- L'angle d'incidence ;
- La distance buse-cible ;
- Le taux de charge en solide p défini par le rapport des débits de solide et d'air ;
- Le diamètre des particules ;
- La vitesse ;
- Le nombre d'impacts répétés.

II.4-Test de broyage en lit de particules

Dans le tableau II.2, sont rassemblés les tests les plus significatifs d'après Prasher (1987). Bien que de nombreuses situations industrielles fassent intervenir le broyage de lit de particules, ce type de test a été beaucoup moins étudié que les précédents. Ceci s'explique par la grande complexité des phénomènes qui surviennent dans le lit principalement en termes de transmission des contraintes particule-particule et particule-parois [13].

Les Tests du broyage

En outre, il existe de nombreuses configurations qui interdisent les comparaisons. Signalons ainsi qu'il faut distinguer les lits parfaitement confinés de ceux qui ne le sont que partiellement. Ainsi Buss et al. (1982, d'après Prasher 1987) montrent une relation linéaire entre la surface spécifique et l'énergie appliquée à un lit de particule complètement confiné. Dans le cas où le confinement n'est pas total, il y a un net infléchissement de la création de surface par unité d'énergie fournie [13].

En fait, ces tests sont peu facilement utilisables tant l'interprétation des résultats est délicate. En plus, ils sont très sensibles à la géométrie des systèmes. Finalement, ils ne traduisent pas la résistance des particules, mais le comportement global des particules en interaction avec le milieu environnant.

Auteurs	Matériaux étudiés	Test	Finesse
Gross et al. (1930)	Quartz	Impact	Surface
Johnson et al. (1949)	Quartz	Impact et compression	Surface par adsorption de gaz et perméabilité
Axelsson et al. (1951)	Quartz, calcite, fluorite, topaze, sel, verre	Impact	Surface par adsorption de gaz et perméabilité
Batra et al (1971)	Quartz	Impact	Module *
Rose (1974)	Sphères de clinker de ciment	Impact	Surface
Buss et al. (1982)	Quartz	Compression	Calcul à partir de la distribution de taille

Tableau II.2. Travaux recensés par Prasher (1987) sur les tests de broyage sur lit de particules

* : module de la distribution de Gaudin-Schuhmann

Les Tests du broyage

II.5-Tests standardisés et indices de broyabilité

II.5.1-Indice de Hardgrove

Ce test de broyabilité est un des tests les plus connus et utilisés dans le milieu industriel du charbon. Il a été proposé par Hardgrove (1932) et fait l'objet de la norme internationale ISO5074-1980(F) qui permet de déterminer pour un solide son indice de broyabilité : le HGI, acronyme des mots anglais *Hardgrove Grindability Index*. Il représente pour la poudre donnée, de taille initiale imposée, une mesure de la masse inférieure à 75 μm créée dans un broyeur standardisé [16].

Ce dernier se présente sous la forme d'une cuve fixe de broyage en acier trempé. Elle est munie d'une gouttière horizontale dans laquelle se déplacent huit billes d'acier de 25,4 mm chacune. Une partie supérieure, applique une force de 284 N sur les billes et leur imprime un mouvement de rotation pendant 60 révolutions.

Un échantillon de 50 grammes de produit tamisé entre 0,6 et 1,18 mm est testé. Après le test, on détermine la fraction de taille inférieure à 75 μm . L'indice de Hardgrove est obtenu à partir d'une courbe étalon. Plus cet indice est grand, plus le matériau est fragile.

II.5.2-Indice de Bond

Le test de Bond (1961) repose initialement sur une opération en boucle fermée de broyage et de tamisage jusqu'à un état stationnaire [17].

Deux protocoles de tests ont été développés par Bond.

II.5.2.1-Test de bond en broyeur à boulets

Dans un broyeur standard de 30,5 cm de diamètre interne et de 30,5 cm de longueur interne, rempli de 285 boulets de diamètre compris entre 15 et 38 mm (120 boulets ont un diamètre de 25,4 mm) et de masse totale 20 125 g, on introduit un volume de 700 cm^3 de matière sèche à fragmenter dont la granulométrie est inférieure à 3 330 μm . Après 100 révolutions du broyeur, à raison de 70 tr/min, on effectue un tamisage à la maille de broyage désirée et l'on remplace la fraction granulométrique inférieure à cette maille par de la matière fraîche de façon à ce que l'on ait toujours un volume de 700 cm^3 dans le broyeur. Ensuite, on fait tourner le broyeur le nombre de tours nécessaires, calculé pour que le refus à la maille de broyage, constituant la charge circulante, soit de 250 % en masse de l'alimentation. On refait la même opération en déterminant le nombre de tours pour avoir en fin du cycle un passant de 28,6 % en masse à la maille de broyage. Puis, on continue les opérations jusqu'à ce que la masse du

Les Tests du broyage

passant à la maille choisie, par révolution du broyeur, devienne constante. Si l'on appelle M (en g/ tr) la moyenne des masses des passants obtenues aux trois derniers cycles, l'indice énergétique ou work index W_i (en kWh/t) est donné par la relation :

$$W_i = (44.5/d_{80}^{0.23})M^{0.82}[(10/d_{80}^{1/2}) - (10/D_{80}^{1/2})] \quad (01)$$

D_{80} et d_{80} étant, respectivement, les dimensions des mailles (en μm) correspondant à 80 % de passant en masse de la matière avant et après fragmentation.

II.5.2.2-Test de bond en broyeur à barres

Le broyeur a un diamètre interne de 30,5 cm et une longueur interne de 61 cm. Il est chargé de huit barres de 53 mm de long, dont six ont un diamètre de 32 mm et les deux autres un diamètre de 45 mm ; la masse totale des barres est de 33 380 g. Le test porte sur un volume d'échantillon de 1 250 cm³, composé de particules de dimensions inférieures à 12,7 mm. Le broyeur tourne à une vitesse de 46 tr/min et les conditions opératoires sont ensuite les mêmes que pour le test en broyeur à boulets, sauf que la charge circulante doit être de 100 %. Le work index est alors donné par la relation [avec les mêmes unités que celles de la relation (01)] :

$$W_i = (62/d_{80}^{0.23})M^{0.625}[(10/d_{80}^{1/2}) - (10/D_{80}^{1/2})] \quad (02)$$

II.5.3-Discussion

Ces deux indices ont été comparés pour un certain nombre de minerais par divers auteurs.

Les données accessibles ont permis de trouver des relations du type $(W_i)^a$ (HGI) = c, avec ; a, b et c des constantes qui dépendent des matériaux utilisés . Ainsi, tout arbitraire qu'ils soient et bien qu'ils ne procurent pas une information fondamentale sur les mécanismes de fragmentation, ils ont surtout une utilité pratique. Ils donnent une classification de comportement des matériaux, mais dans des conditions particulières assez restreintes.

Pomeroy (1957, d'après Bemrose et al. 1987) a défini un indice de résistance à la fragmentation correspondant à une fraction non broyée d'un échantillon (en lit confiné) soumis à un écrasement lent. Il définit également un indice de résistance à l'impact en lâchant un poids sur un lit de poudre confiné dans un cylindre.

Kerkin et al. (1977, d'après Bemrose et al. 1987) définissent un indice d'éclatement, caractérisant la probabilité de survie d'un échantillon lâché dans des conditions données [18].

Les Tests du broyage

Lawn et al. (1979) définissent un indice de fragilité à partir du facteur d'intensité critique des contraintes K_{Ic} et de la dureté du matériau H :

$$\text{Fragilité} = H/K_{Ic}$$

Plus cet indice est petit, plus le matériau a un comportement ductile. Tous ces indices sont des définitions arbitraires. Ils dépendent de l'appareil, de la procédure et ne sont pas caractéristiques que du matériau. On s'étonne alors à peine qu'ils soient rarement transposables d'un test à l'autre [19].

II.6-Conclusion

Au vu de cette introduction bibliographique, on se rend compte de la multiplicité des approches qui existent dans le domaine des tests de broyage : théorique, semi-empirique, empirique, ou fort souvent d'ailleurs pratique. Ainsi, le but final des tests standardisés n'est pas d'obtenir des informations d'ordre fondamental (création et propagation des fissures, mécanismes...) mais de classer des solides dans une certaine échelle comportementale. Pour les tests plus fondamentaux, on ne peut que regretter le fait que la taille des particules soit toujours de l'ordre du millimètre. Mais, il devient difficile d'analyser les fragments de particules en dessous de 100 μm , ou d'analyser en compression ou en indentation des particules aussi petites.

En plus, il est souvent difficile d'extrapoler, voire même de comparer les résultats d'un test à l'autre, tant sont nombreux les approches, les matériaux, la typologie d'impact, les paramètres contrôlés, les mesures de la finesse de broyage...En outre, on obtient souvent le comportement du couple (solide-broyeur), car les conditions opératoires sont limitatives. On voit qu'imaginer un test universel est une gageure. En effet, il suffit de penser aux différents modes d'application des contraintes pour se rendre compte de la nécessité d'au moins deux installations : une en compression et une en impact (Schönert 1995), [11]. Le test en compression caractérise la fragmentation lorsque la transmission énergétique est très lente, et celui en impact lorsqu'elle est très rapide.

L'avantage d'un test d'impact sur cible en jet d'air, c'est qu'il reproduit un événement d'impact élémentaire et qu'il permet de travailler dans une gamme étendue de taille avec l'avantage de l'approche statistique sur un très grand nombre de particules. En outre, la grande gamme de

Les Tests du broyage

vitesse permet d'étudier particulièrement l'attrition dans le domaine des faibles énergies (quelques mètres par seconde) et le broyage dans le domaine des grandes énergies (jusqu'à 500-600 m/s). Il est par ailleurs possible de limiter au minimum l'influence des conditions opératoires sur les résultats, comme on le verra dans la suite.

Une meilleure connaissance de ces phénomènes de comminution permettrait de mieux comprendre comment réduire le coût d'exploitation, non seulement en termes énergétiques mais aussi en termes d'amélioration du produit par l'optimisation du procédé : réduction des fines, distributions resserrées...

CHAPITRE III
CINÉTIQUE DU BROYAGE
ET PARAMÈTRES
INFLUANT SUR LA
BROYABILITÉ DANS UN
BROYEUR À BOULETS

Cinétique du broyage et paramètres influant sur la broyabilité dans un broyeur à boulets

III.1-Les différentes zones de broyage

III.1.1-zone de concassage

C'est la zone d'impact des boulets avec les particules au pied de la charge Figure III.1, Le concassage des particules résulte de l'impact des boulets en fin de course après projection de la paroi. Le phénomène accélère ainsi la fragmentation des particules qui seront ensuite broyées dans la zone(2).

De cette pratique, il découle qu'une partie de l'énergie cinétique acquise par les boulets est ainsi restituée en énergie de concassage, l'autre partie s'est purement transformée en chaleur et en énergie (choc) qui provoque l'usure du releveur ou la déformation des boulets. L'énergie transférée aux particules dépend fortement de la vitesse de broyage.

III.1.2-zone de broyage

C'est la zone par excellence où s'effectue la réduction au plus infiniment petit des tailles des particules Figure III.1, Cette réduction s'effectue de différentes manières : attrition, abrasion, broyage par compression, Quand bien même chacune de ces notions prises individuellement ont des explications physiques défendables, il résulte cependant, de leur combinaison même seulement par une simple juxtaposition ou superposition des effets que, seuls les mécanismes de frottement ou de rupture ne peuvent être quantifiés. Ce qui est certain, la maximisation du phénomène de réduction à moindre dépense énergétique est recherchée le plus.

III.1.3-zone de cascade :

Elle concerne la coulée des particules sur le versant de la charge inclinée et qui s'usent lentement Figure III.1, La similarité que nous pouvons tirer de ce phénomène et des phénomènes naturels, est celle du transport de la matière sur des couches sédentaires (formation des dunes. le transport des flocons de neige, l'érosion due à l'écoulement éolien ou fluide, etc.).

Les boulets de petite taille et les particules sont projetées plus haut que les boulets de grosse taille. Comme les grosses particules sont limitées dans leur mouvement vers le haut, elles roulent sur le revêtement en suivant l'orbite de la paroi.

Les boulets de grosse taille sortent de la charge et roulent dans la zone d'interface. La dépense énergétique consacrée pour tourner le broyeur n'est pas suffisamment récupérée en énergie Cinétique par les gros boulets pour le concassage et le broyage de la matière. Le choix des

Cinétique du broyage et paramètres influant sur la broyabilité dans un broyeur à boulets

boulets identiques n'est pas forcément la bonne solution car, mieux vaut utiliser les gros boulets pour le concassage et les petites pour le rebroyage.

Dans le cas actuel, non seulement toute la couche est en perpétuel mouvement sous l'action de la rotation du broyeur.

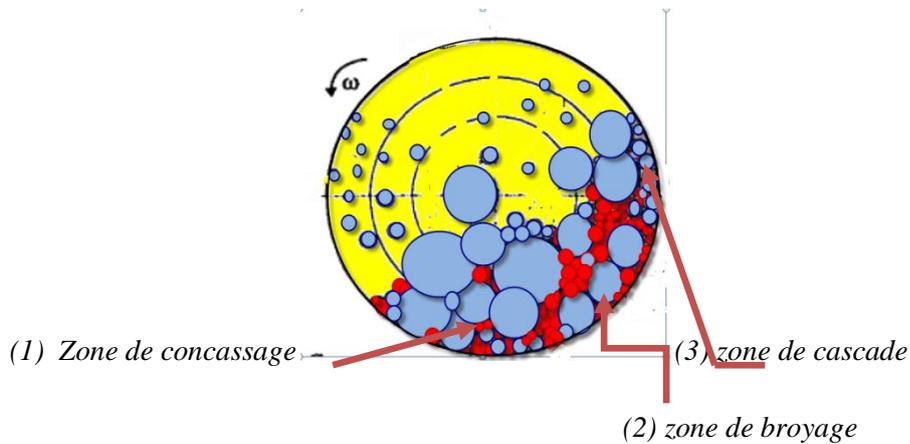


Figure III.1. les principales zones du broyage

La décomposition opérationnelle du broyeur montre qu'il existe deux phases dans le mouvement de la charge :

- La phase ascendante ; c'est celle au cours de laquelle les boulets s'adhèrent à la paroi interne du broyeur et suivant sa rotation. Elles se déplacent dans l'orbite circulaire en montant et résistant aux forces de gravités.
- La phase d'envol; elle correspond à celle où commence la chute libre des boulets à l'intérieur du broyeur jusqu'à leur choc sur le revêtement ou dans la charge. L'interface des deux étapes correspond au moment où la force radiale pressant les boulets contre la paroi du broyeur est négligeable par rapport à la force de gravité.

Cinétique du broyage et paramètres influant sur la broyabilité dans un broyeur à boulets

III.2-les différentes forces causales du broyage

Dans les trois principales zones où nous pouvons noter l'existence d'un phénomène de broyage, les différentes forces causales sont identifiées Figure III.2:

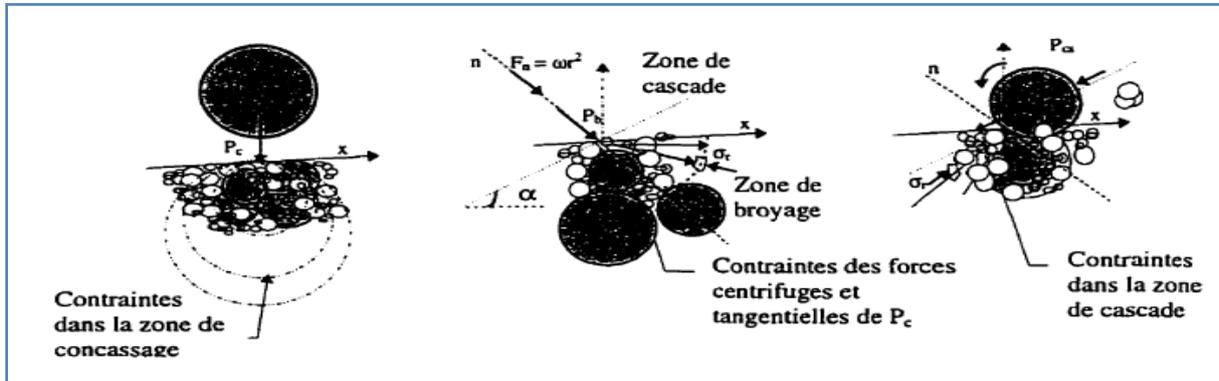


Figure III.2. Contraintes dans les principales zones de broyage

La détermination de la résultante des forces P_c et P_b et de sa distribution sur la charge en Mouvement :

En considérant la charge au repos. Les différentes forces peuvent s'écrire :

$$P_c = P_b = Mg.$$

$$Rw^2 = 0.$$

$$P_{cs} = 0.$$

Dès que le broyeur se met en marche et comme nous l'avions expliquée au chapitre II, il y a déviation de la charge de sa position initiale d'un angle (α), la création de la force centrifuge, $F_c = Rw^2$ et la décomposition de la force massique, $F = Mg$, en deux composantes P_{cs} et P_b en ce moment les données changent et nous obtenons :

$$P_b = Mg \cos\alpha.$$

$$P_{cs} = Mg \sin\alpha.$$

P_b et P_{cs} sont respectivement les forces causales de l'abrasion, et l'impact des particules. Alors plus l'angle de l'inclinaison de la charge est grand, plus l'impact est favorisée et l'inverse pour l'abrasion.

Cinétique du broyage et paramètres influant sur la broyabilité dans un broyeur à boulets

III.3-Paramètres influençant sur l'efficacité du broyage

Le broyage à l'intérieur d'un broyeur à boulets est influencé par différentes variables dont la vitesse de rotation, la charge de boulets, la charge de matière à broyer, la forme des releveurs, la granulométrie d'alimentation, le diamètre du broyeur, la longueur du broyeur, la présence d'une grille de décharge, la viscosité de la pulpe, la forme des boulets, le diamètre des boulets et la concentration en solides de la pulpe d'alimentation.

III.3.1-La vitesse de rotation

La vitesse de rotation du broyeur est exprimée comme un pourcentage de la vitesse critique (V_c), définie comme la vitesse de rotation à laquelle la charge se retrouve collée à la surface du blindage. Les broyeurs à boulets sont opérés à une vitesse aussi élevée que possible mais en évitant la centrifugation des corps broyant.

La vitesse critique peut-être exprimée par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} V_c \text{ (rpm)} &= 76,6 / (D-d)^{1/2} && (D, d \text{ en pi}) \\ &= 42,3 / (D-d)^{1/2} && (D, d \text{ en m}) \end{aligned}$$

Où, « D » est le diamètre interne du broyeur et « d » le diamètre maximal des boulets (Austin et al. 1984). Lorsque la vitesse de rotation est relativement faible, l'action de culbutage des boulets est relativement douce ; le mouvement des corps broyant est en cascade et il conduit à un broyage fin qui augmente la production de schlammes et l'usure du blindage. Lorsque la vitesse de rotation est élevée, le mouvement des corps broyant est en cataracte et il conduit à la comminution par impact qui donne un produit final plus grossier, avec une usure réduite du blindage (Wills, 2006). La vitesse à laquelle un broyeur tourne est importante parce qu'elle gouverne la granulométrie du produit et la quantité d'usure du blindage de la coquille.

Cinétique du broyage et paramètres influant sur la broyabilité dans un broyeur à boulets

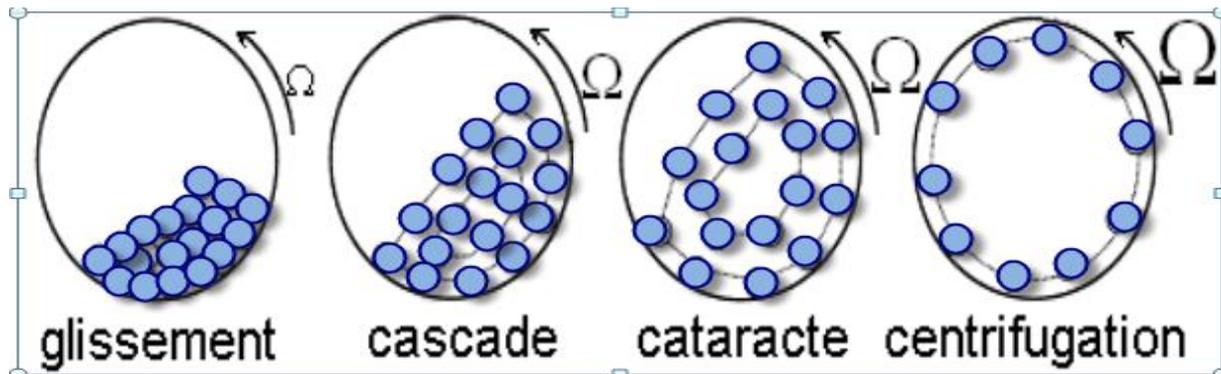


Figure III.3. Régimes de broyage dans un broyeur à boulets (axe horizontal) ; vitesse de rotation du broyeur croissante de gauche à droite

III.3.2-Temps de broyage

Il est possible de fixer les durées maximales de broyage d'après les observations de l'état d'agglomération du produit broyé sur le milieu de broyage. En effet, lorsque le temps de broyage est élevé, la fine poudre produite a tendance à adhérer sur le milieu de broyage.

Cela se produit à cause du tassement imposé à la poudre par le milieu de broyage. De plus pour des conditions de broyage très énergétiques avec beaucoup de corps broyant par rapport à la poudre par exemple, le phénomène appelé colmatage se produit.

III.3.3-La charge de boulets

La charge de boulets est l'ensemble de boulets contenu dans le broyeur. Le volume de la charge (boulets et pulpe) représente environ 40 à 50% du volume interne du broyeur (Wills, 2006). La puissance exigée par le moteur du broyeur est habituellement utilisée pour mesurer la charge de boulets. On charge régulièrement les broyeurs avec de nouveaux corps broyant à une puissance cible selon une certaine cédule. Cette puissance cible devrait être augmentée quand l'usure du blindage de la coquille (en quelques semaines) et des extrémités du broyeur (de six à douze mois) augmente (Austin et al. 1984).

III.3.3.1-Le remplissage fractionnaire des boulets J

Le remplissage fractionnaire des boulets J est conventionnellement exprimé comme la fraction du volume du broyeur occupé par les boulets lorsque le broyeur est au repos. Pour convertir le lit volumique en lit massique de boulets, il est nécessaire de connaître la densité

Cinétique du broyage et paramètres influant sur la broyabilité dans un broyeur à boulets

apparente du lit de boulets. La porosité du lit varie faiblement avec la dimension des boulets, le remplissage de minerai, etc. Pour les calculs, on considère un lit de porosité formelle constante de 0,4 (Austin et al, 1984). Dans ce cas :

$$J = \left(\frac{\text{masse boulets} / \text{densité boulets}}{\text{volume broyeur}} \right) \frac{1}{1-0.4}$$

III.3.4-La charge de boulets est la matière à broyer

La charge de minerai est la matière à broyer. Le volume formel (effectif) apparent de minerai U , permet de relier la charge de minerai f_c à la charge de boulets J , par la porosité formelle du lit de boulets :

$$U = f_c / 0.4 J$$

III.3.4.1-Le remplissage fractionnaire des minerais f_c :

Par analogie, le remplissage du broyeur par le minerai s'exprime comme une fraction du volume du broyeur rempli par le lit de minerai, f_c . En utilisant donc une porosité formelle de 0,4 :

$$f_c = \left(\frac{\text{masse minerai} / \text{densité minerai}}{\text{volume broyeur}} \right) \frac{1}{1-0.4}$$

Selon Austin et al. (1984), le broyage est efficace pour des valeurs de U se situant entre 0,6 et 1,1.

Un faible remplissage par le minerai donne manifestement un faible taux de broyage. Quand la quantité de minerai augmente, les espaces situés entre les boulets se remplissent de pulpe et des taux élevés de collisions sont obtenus. Quand les espaces effectifs (dans lesquels les collisions entre les boulets en culbute ont lieu) sont remplis de minerai, les taux de broyage atteignent un maximum. Une addition supplémentaire de minerai augmente.

Cinétique du broyage et paramètres influant sur la broyabilité dans un broyeur à boulets

La variation de la distribution granulométrique des boulets formant la charge affecte très peu la valeur de la porosité formelle de 40%. Des essais ont montré que la porosité de la charge de boulets variait entre 35 et 42% pour une grande variété de diamètres de boulets (Langlais, 2003).

La formation de bouchons mais ne procure pas d'augmentation de broyage parce que les zones de collision sont déjà saturées et parce que le minerai supplémentaire va s'y accumuler. Un plateau de la courbe des taux de broyage est presque toujours obtenu Figure III.4. Le lit de boulets - minerai s'agrandit pour favoriser de petites collisions lors des captures boulet - minerai - boulet, et les taux de broyage diminuent.

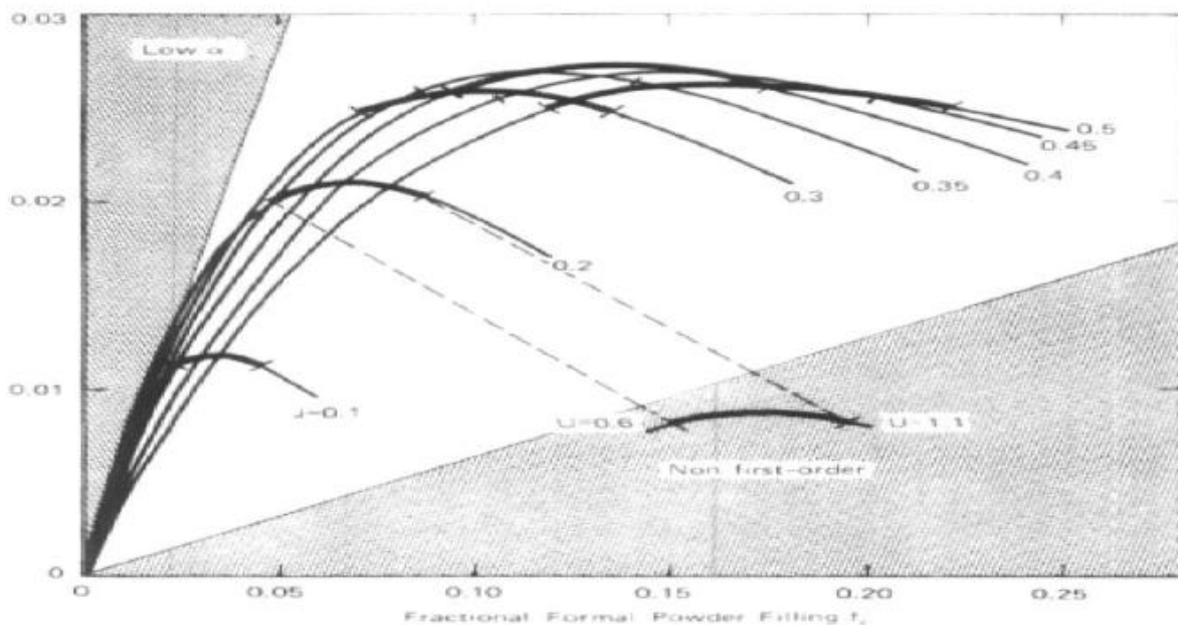


Figure III.4. variation du taux de broyage en fonction de remplissage de minerai.

III.3.5-La forme des releveurs

La forme des releveurs influence la vitesse critique de rotation du broyeur. En présence de blindage lisse, l'action de culbutage s'approche de la cascade des boulets (Wills, 2006).

III.3.6-La granulométrie d'alimentation

La granulométrie d'alimentation est habituellement décrite par le F_{80} qui est la dimension des ouvertures de tamis laissant passer 80% du matériel. Pour les broyeurs primaires à boulets (traitant les produits du concasseur), la charge en particules grossières constitue une limite de

Cinétique du broyage et paramètres influant sur la broyabilité dans un broyeur à boulets

performance importante. Le développement du broyage à Bougainville Copper a montré qu'une réduction de la dimension maximale des particules alimentées produisait une augmentation importante du débit de l'alimentation (Narayanan et al. 1987). En abaissant la dimension maximale de l'alimentation, la dimension maximale des boulets peut être réduite et les deux variables agissent ensemble plutôt que de s'opposer (Napier-Munn et al. 1996).

III.3.7-La dimension et forme du broyeur

À volume constant de broyeur, une augmentation du diamètre augmente le nombre de couches de boulets et limite l'efficacité de transmission des barres relevées vers l'intérieur du noyau de la charge (Napier-Munn et al, 1996). L'augmentation du diamètre aggrave l'usure et les dommages du blindage causés par l'impact des boulets. Le diamètre du broyeur détermine l'énergie des impacts par les corps broyant sur les particules de minerai. En général, plus grande est la dimension des particules d'alimentation, plus grand doit être le diamètre du broyeur (Wills, 2006).

III.3.8-L'usure des blindages et des corps broyant

L'extrapolation à l'échelle industrielle des résultats des tests d'abrasion déterminés au laboratoire est difficile. La meilleure estimation de la consommation des corps broyant et des blindages découle de l'expérience à partir d'installations industrielles similaires. Toutefois, la combinaison des données industrielles et des résultats obtenus par les tests de détermination de l'indice d'abrasion A_i permet d'estimer l'usure U (en kg/kWh) dans le cas d'un broyage en humide :

$$U = k (A_i - p)^n$$

Avec p : constante égale à 0,020 pour les barres et à 0,015 pour les boulets et les blindages ;

K facteur égal à 0,175 pour les barres, le blindage des broyeurs à barres et les boulets et à 0,013 pour le blindage des broyeurs à boulets ;

n constante égale à 0,2 pour les barres, à 1/3 pour les boulets et à 0,3 pour les blindages ;

Certains modèles de broyeur sont équipés d'une grille de décharge. Les ouvertures de la grille permettent à la pulpe de s'écouler du broyeur vers les unités subséquentes du procédé. La grille retient les boulets et les particules grossières dans la charge. Elle résiste aussi au

Cinétique du broyage et paramètres influant sur la broyabilité dans un broyeur à boulets

passage de la pulpe à travers le broyeur et influence le volume de matière qu'il contient (Napier-Munn et al, 1996).

III.3.9-La viscosité de la pulpe

La viscosité de la pulpe est une fonction complexe de la taille de particules, de leur charge électrostatique de surface et de la concentration en solides de la pulpe. Elle se définit comme la résistance à l'écoulement, sous la forme du rapport de la contrainte de cisaillement sur le taux de cisaillement. Klimpel et Richard (1982) ont étudié les effets du type rhéologique de la pulpe sur la performance des broyeurs à boulets et ont proposé l'utilisation d'agents chimiques pour modifier ce comportement rhéologique et augmenter la capacité de broyage. Shi(1994) a aussi présenté de nombreux travaux sur la viscosité des pulpes mais des conclusions claires ne sont toujours pas formulées (Bazin et Boudrias-Chapleau, 2005).

III.3.10-La forme des boulets

La forme des boulets influence la cinétique de broyage. Les boulets peuvent être en forme de cube, d'octaèdre, de cylindre, de disque, d'ellipsoïde, de sphère, ou de sphère concave. Une étude détaillée de Mintek (1991) rapporte des performances similaires de broyage pour les boulets de même dimension nominale mais de forme différente. Bien que les conclusions des études sur le sujet soient variables et dépendent des sources de financement pour ces études, il semble que les boulets sphériques soient ceux qui conduisent aux meilleurs rendements de broyage (Cooper et al, 1994). Il faut cependant mentionner que les boulets en forme de sphère s'usent irrégulièrement et deviennent concaves (Lowrison, 1974).

III.3.11-La dimension des boulets

Le choix de la dimension des boulets dépend fortement de la distribution granulométrique du minerai alimenté, de la dimension désirée du produit, et des coûts de l'énergie et de l'acier. La règle développée par Allis Chalmers pour la sélection des boulets les plus gros d'une charge initiale est donnée par (Rowland et Kjos, 1978) :

$$b = (\sqrt{(F_{80}/K)} \sqrt[3]{((WI \cdot Sg) / FC_S \sqrt{(3.281 D))})} 24.5$$

Où :

b : Diamètre des boulets (mm)

Cinétique du broyage et paramètres influant sur la broyabilité dans un broyeur à boulets

F_{80} : Dimension pour laquelle 80% de l'alimentation passent les ouvertures d'un tamis (μm).

WI : Work Index de l'alimentation du broyeur à boulets (kWh/t).

S_g : Densité du minerai alimenté (t/m^3).

FC_s : Fraction de la vitesse critique.

D : Diamètre intérieur du blindage du broyeur (m).

La variable K de l'équation (1.6) varie de 335 à 380 (Rowland et Kjos, 1978 ; Napier-Munn et al, 1996) selon que le broyage soit à sec ou humide. L'équation (1.6) est utilisée pour la conception. Une autre corrélation a été proposée par Dunn (1989) :

$$b = 6.3 F_{80}^{0.29} WI^{0.4} / (ND)^{0.25}$$

Où

N : Vitesse du broyeur en (rpm), les autres termes et unités correspondent à ceux de l'équation d'Allis Chalmers.

Les dimensions appropriées des boulets sont souvent déterminées par des essais-erreurs. Le broyage primaire utilise habituellement une charge de boulets dimensionnés de 5 à 10 cm de diamètre, tandis que le broyage secondaire / tertiaire requiert des boulets de 2 à 5 cm. De cette manière, à chaque étape du procédé, la dimension des boulets est associée à la dimension des particules (Wills, 2006). En règle générale, plus l'alimentation est fine, plus petite devrait être la taille des boulets. L'ajustement de la taille des corps broyant a fourni des améliorations significatives dans l'opération du circuit de réduction (McIvor, 1997). Certains opérateurs utilisent un mélange de boulets de tailles variées pour répondre aux objectifs de réduction simultanée de particules grossières et fines dans un seul broyeur (Concha et al, 1992 ; McIvor, 1997 ; Austin et Klimpel, 1985) mais cette pratique ne semble pas être répandue dans l'industrie.

En pratique on trouve souvent des charges broyante constituées de billes de diamètres trop élevés et donc peu efficaces. Si on met des billes de 30 mm il y a 45 billes par litre. Si on se trompe et l'on met du 40 mm cela donnera 19 billes par litre. Le nombre de points de contact est donc largement diminué.

Cinétique du broyage et paramètres influant sur la broyabilité dans un broyeur à boulets

III.3.12-Le phénomène d'agglomération

Lors du co-broyage, des phénomènes d'agglomération apparaissent et sont responsables de la formation des particules de composite. Lorsque les forces de surface interparticulaires deviennent importantes, il y a attraction des particules. Le contact devient permanent et deux particules n'en constituent alors plus qu'une seule. Ce processus conduit à une évolution des distributions granulométriques puisque les classes de petites tailles se dépeuplent au profit des classes de tailles plus importantes.

III.4-Evaluation des interactions (Taux de remplissage de minerai – vitesse de rotation de broyeur sur l'efficacité du broyage)

III.4.1-Décomposition opérationnelle du système : approche microphénoménologique

L'intérêt d'une exacte description de la cinématique du processus de la fragmentation des particules nous a conduit à procéder à la décomposition des phénomènes internes du broyeur. Un découpage sectoriel de l'espace interne du broyeur pourrait mieux aider à appréhender les échanges d'information, d'énergies et de la matière entre différents mécanismes. Nous voyons tout de suite que le mouvement de la charge joue un rôle prépondérant dans le processus de la fragmentation des particules. L'observation du broyeur en action, figure III.6, III.7 ou III.8, montre que l'espace du mouvement de la charge circulante est inégalement réparti en plusieurs zones. Ces phénomènes sont aussi présents dans nos machines domestiques à sécher. Nous en déduisons que plusieurs types de phénomènes à dominance mécanique interviennent dans le procédé de broyage:

Le mouvement de frottement entre particules et entre boulets et particules cause une complète déformation (effritement) des particules par le mécanisme de fracture.

La chute des boulets sur le revêtement peut briser les encoignures du revêtement.

Les frottements des boulets des minerais aux parois du broyeur entraînent l'usure de la surface du revêtement, c'est le mécanisme d'abrasion. Cette décomposition nous aidera à comprendre, entre autres, comment s'effectuent les échanges d'énergie entre corps broyant et particules, à quelle vitesse elles sont broyées et quel est leur mouvement à travers le broyeur.

Les analyses vers une connaissance phénoménologique du procédé :

Cinétique du broyage et paramètres influant sur la broyabilité dans un broyeur à boulets

Il est fort utile du moins nécessaire que, pour préparer la forme des relations à retenir du volume de contrôle, l'analyse du mouvement de la charge figure III.5, suivant la variation de la vitesse de rotation. Si nous essayons de nous raccorder au diverses théories mathématiques relatives aux mouvements de la charge, il est évident de constater qu'à basse vitesse de rotation le lit de la charge reste en position horizontale et les boulets sont soumises aux effets de glissement et ne sortent pas du lit. Le broyage se fait par frottement, les particules rentrent dans les interstices des boulets où elles sont pincées.

Avec l'accroissement de la vitesse, ce phénomène s'accroît et le lit de la charge prend une forme inclinée d'un angle θ par rapport à l'horizontal. La charge devient de plus en plus hétérogène au point de vue de la granulométrie de ses éléments et l'inclinaison de sa surface dépend de la vitesse de rotation du broyeur, figure III.5. L'analyse de l'évolution progressive de la charge en action sous l'effet de la vitesse de rotation nous permet de mieux cerner son comportement sous l'influence des facteurs cités plus et dont entre autres:

- Le glissement (facteur non négligeable) qui caractérise le transport radial,
- La dimension et le nombre des boulets,
- Le type du revêtement de la paroi interne, et le taux de remplissage de la matière,

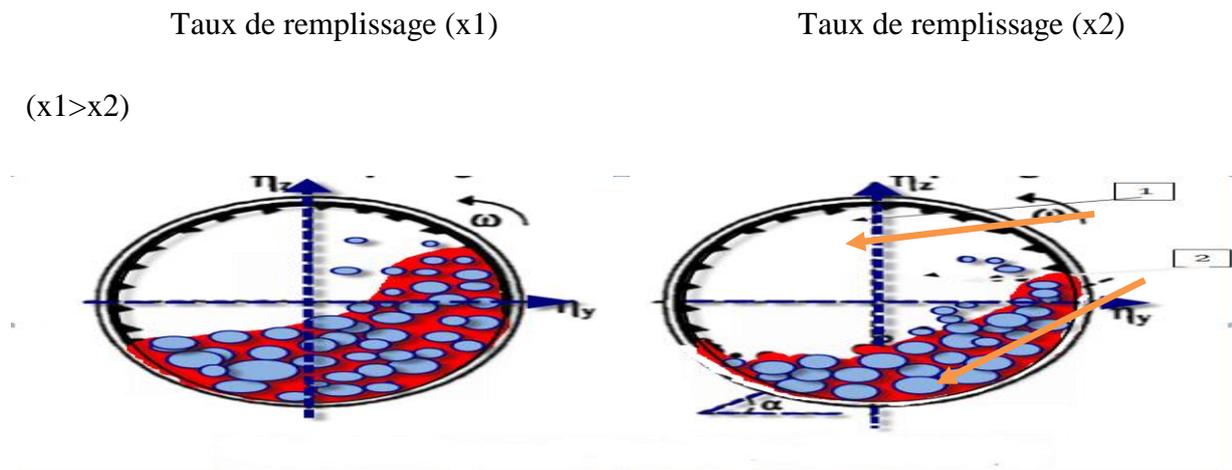


Figure III.5.-influence du taux de remplissage.

La partie inférieure (la région 2) figure III.5, est le domaine par excellence de broyage des particules. Mais aussi c'est un milieu où chaque composant (boulets, particules, etc.) a certaines caractéristiques intrinsèques dont les propriétés n'ont une signification qu'au sens probabiliste. Par ce découpage zonal, très tôt on se rend compte de la difficulté inhérente à la

Cinétique du broyage et paramètres influant sur la broyabilité dans un broyeur à boulets

description quantitative de ce milieu. Et si on ajoute encore à cela les actions et les interactions entre particules elles-mêmes et avec leur entourage (les boulets et le revêtement de la paroi), on peut dire que le micro-comportement d'une particule dans ce milieu, défie l'imagination au sens pratique. Il n'est pas pour autant erroné, qu'un tel milieu soit traité comme un milieu poreux où l'écoulement pourrait ne pas obéir à la loi de Darcy, L'interface de ces deux zones (la région 1 et 2), figure III.5, est régi selon les cas que nous allons analyser un peu plus bas par:

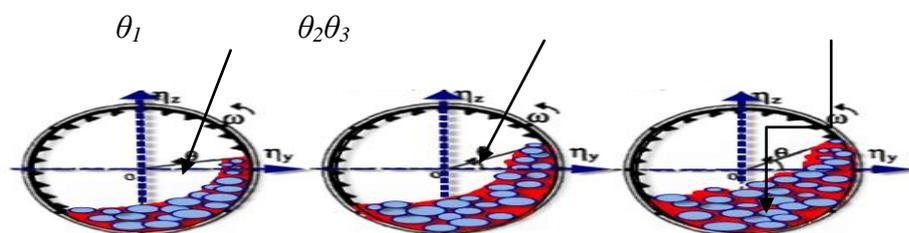
- Le mouvement de transition (glissement et roulement des particules).
- Le mouvement de cascade des boulets et des particules rejetées par le mouvement de rotation du broyeur et la zone d'impact (zone de choc des boulets et des particules). l'analyse de l'évolution du mouvement de la charge sous trois différentes vitesses de rotation ; $x\%$, $y\%$ et $z\%$ de la vitesse critique, représentée sur les Figure III.6, III.7 et III.8, nous ouvrira l'avenue de la connaissance de sa cinématique.

III.4.1.1-L'évolution de la charge sous une petite vitesse de rotation ; ($W1=0.2W_C$)

A une basse vitesse de rotation, l'observation du broyeur montre que la charge garde une position presque horizontale avec une surface ondulée. Son mouvement se limite à des agitations de la couche poreuse figure III.6. Ce qui permet de mieux remplir les interstices des boulets et de faire apparaître des fines particules à la surface de la couche mouvante.

Comportement de différente charge avec une petite vitesse de rotation ($W1=0.2W_C$) :

($x1 < x2 < x3$)



Taux de remplissage $x1$

$x2$ $x3$

Figure III.6. Configuration géométrique de la charge à la vitesse de $0.2W_C$

Le mécanisme de fragmentation des particules se solde, et ceci selon la dureté des particules, par le phénomène de pincement et d'abrasion.

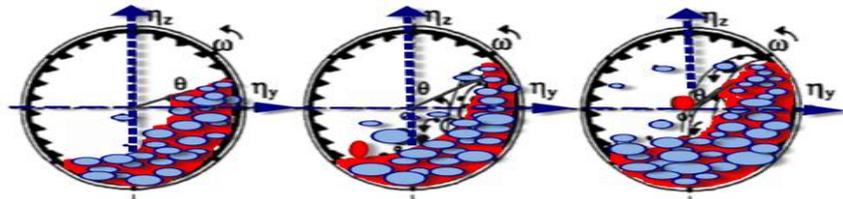
Cinétique du broyage et paramètres influant sur la broyabilité dans un broyeur à boulets

$$\theta_3 > \theta_2 > \theta_1.$$

III.4.1.2-L'évolution de la charge sous une moyenne vitesse de rotation ;($W_2=0.6W_C$)

Comportement de différente charge avec une vitesse de rotation de $W_2 > W_1$

$$(x_1 < x_2 < x_3)$$



Taux de remplissage x_1

x_2

x_3

Figure III.7. Configuration géométrique de la charge à la vitesse de $(0.6W_C)$

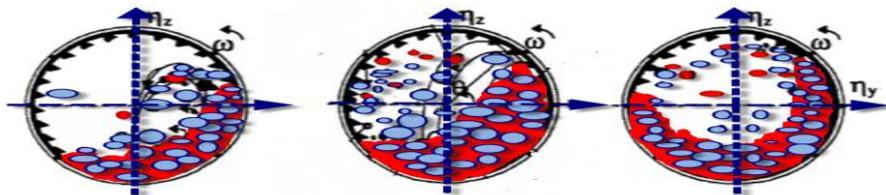
A la vitesse de rotation approchant de $(0.6 W_C)$. La charge s'incline à un angle θ_0 par rapport à l'horizontal. Le centre de gravité de la charge est soulevé à une hauteur Δh .

Les phénomènes observés précédemment dans chaque subdivision spatiale du broyeur se compliquent du fait que la vitesse de rotation, la dimension et le nombre des boulets vont largement d'une part, influencer les phénomènes du transport des particules, et d'autre part accélérer le processus de broyage.

III.4.1.3-L'évolution de la charge avec une grande vitesse de rotation ;($W_3=0.9W_C$)

Comportement de différente charge avec une vitesse de rotation de $(W_3 > W_2 > W_1)$

$$(x_1 < x_2 < x_3)$$



Taux de remplissage x_1 x_2 x_3

Figure III.8. Configuration géométrique de la charge à la vitesse de $(0.9W_C)$

Cinétique du broyage et paramètres influant sur la broyabilité dans un broyeur à boulets

A des vitesses qui s'approchent de 90% V_c , les charges aient un taux de remplissage plus grand, s'orientent vers le mouvement de centrifugation.

L'angle d'inclinaison de la charge est fortement influencé par la vitesse de rotation.

PARTIE
EXPÉRIMENTALE

CHAPITRE I PROCÉDURE
EXPÉRIMENTALE ET
RÉSULTATS

Procédure expérimentale

I.1- Procédure expérimentale

I.1.1-Équipement et minerais

I.1.1.1-Équipement utilisé

I.1.1.1.1-Pour le broyage :

Le broyeur de laboratoire utilisé pour les essais mesure 42 cm de diamètre, et par 38 cm de diamètre inter blindage, et 17 cm de longueur, un réducteur de vitesse de ratio (1/28), un moteur asynchrone entraîne le broyeur en rotation. Les vitesses de rotation utilisée pour les essais sont de 50, 40, 30 tours par minute, ce qui correspond respectivement à 70%, 60%, 50% de la vitesse critique de rotation de ce broyeur. La charge de boulets pour tous les essais a été maintenue à 8.48 kg. Les de boulets allant de 4.7 à 1.9 cm de diamètre ont été utilisées pour les essais. La puissance tirée par le moteur d'entraînement du rouleau produisant la rotation du broyeur est d'environ 0.07 kW, et un variateur de vitesse. Des tentatives de mesurer la puissance consommée pendant les essais n'ont pas donné de résultats satisfaisants, la variation de la puissance avec les conditions opératoires n'étant pas assez grande pour être statistiquement différentiable. Les caractéristiques du broyeur et des boulets utilisés pour les essais sont résumées aux tableaux I.1 et I.2. Les boulets et le broyeur utilisés sont montrés à la figure I.1.

Tableau I.1. Caractéristiques de design et d'opération du broyeur

Diamètre	42 (cm)
Diamètre intérieur	38 (cm)
Longueur	17 (cm)
puissance	0.07 (kw)
Vitesse critique	71.43 (tr/min)
Masse des boulets	8.48 (kg)

Procédure expérimentale

Tableau I.2. Composition du mélange de boulets

Dimension (cm)	nombre	Masse (kg)	% massique de la charge
1.9	1	0.029	0.34
2.3	1	0.052	0.61
2.8	1	0.093	0.01
3	31	3.6	0.45
4	6	1.62	1.62
4.7	7	3.08	3.08



Figure I.1. broyeur à boulet et boulets utilisée

Une charge de 8.48 kg de boulets, de densité 8.19 correspond à environ 13.16% de remplissage du volume du broyeur, ce qui constitue une condition normale d'opération d'un broyeur. Le calcul est résumé dans les lignes suivantes :

$$V_{\text{boulets}} = M_{\text{boulets}} / \rho_{\text{boulets}}$$

$$= 8.48 / 8.19$$

$$= 1.035 \text{ (L)}$$

$$V_{\text{broyeur}} = 13.1 \text{ (L)}$$

Procédure expérimentale

Tel que :

V_{boulets} : volume des boulets ; M_{boulets} : masse des boulets ; ρ_{boulets} : densité des boulets ; V_{broyeur} : volume interne du broyeur.

Le volume du broyeur est calculé par le remplissage d'eau.

La proportion des interstices (porosité formelle) entre les boulets étant de 40% (Austin et al. 1984), alors:

$$V_{\text{remplissage-bou}} = 1.035 * 100 / (100 - 40) = 1.72 \text{ (L)}$$

$$T_b = 1.72 * 100 / 13.1 = 13.17 \text{ (\%)}$$

Tel que :

$V_{\text{remplissage-bou}}$: volume de remplissage des boulets ; T_b : taux de remplissage des boulets.

I.1.1.1.2-Pour le tamisage :

➤ Tamiseuse

Tamiseuse et Une série de tamis emboîtés les uns sur les autres dont les ouvertures des mailles de tamis sont décroissantes du haut vers le bas, un matériau en plusieurs classes granulaires de dimensions décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis, en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision requise.



Figure I.2. tamiseuse utilisée

Procédure expérimentale

➤ Pesante :



Figure I.3. Pesantes utilisées

I.1.1.2-Mineral utilisé

Le matériau utilisé dans le cadre de ce travail est un granulat calcaireux de classe 3/8, provenant de l'unité de Keddara, filiale ALGRAN du Groupe ENOF.

I.1.1.2.1- Caractéristique du minerai

I.1.1.2.1.1-Composition chimique

Tableau I.3. Composition minéralogique des granulats utilisés

CaO	HgO	SiO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	PAF	NaCl	CaCO ₃
37,88%	0,78%	2,49%	2,01%	0,61%	42,22%	0,12%	88,34%

Le gypse (CaSO₄(H₂O)₂) est sous forme de trace.

Procédure expérimentale

I.1.1.2.1.2-Caractéristiques physico-mécaniques

Les caractéristiques physico-mécaniques de la roche sont représentées dans le tableau I.4.

Tableau I.4. Caractéristiques physico-mécaniques.

Caractéristiques	Résultats obtenus
Poids spécifique	2,69 t/m ³
Poids volumique	2,66 t/m ³
Densité apparente	1,44
Densité absolue	2,6
Porosité	2,00 %
Absorption d'eau	0,44 %
Résistance à la compression	1250 kg/cm ³
Résistance à l'usure (Micro-Deval humide)	21,4 %
Résistance à l'usure (Micro-Deval sec)	8 %
Résistance à la fragmentation (Los Angeles)	23 %

Les distributions granulométriques des échantillons d'alimentation pour les essais de broyage sont présentées au tableau I.5.

Tableau I.5. Granulométrie de l'alimentation (% cumulatif passant)

Ouverture tamis (µm)	% cumulatif passant
8000	100
6300	80
5000	45
4000	10
3150	0

I.1.2-Conduite des expériences

Les expériences pour chaque condition de la figure I.4, sont conduites de la façon suivante :

- 1- Peser et introduire les boulets, le minerai dans le broyeur ;
- 2- Fermer et positionner le broyeur en mode opératoire ;

Procédure expérimentale

- 3- Actionner le broyeur durant 5 minutes, le temps du test étant contrôlé par le chronomètre ;
- 4- Arrêter le broyeur après 5 minutes ;
- 5- Retirer la charge en débarrassant le mieux possible les boulets de la charge broyée ;
- 6- Sécher toute le minerai dans l'étuve ;
- 7- Prélever un échantillon pour le tamisage ;
- 8- Faire le tamisage dans une série de tamis Tyler à l'aide du Ro-Tap, pendant 30 minutes ;
- 9- peser les refus obtenu par chaque tamis, pour pouvoir calculer la masse des passant a travers chaque tamis ;
- 9- Remettre l'échantillon tamisé avec la charge broyée initialement ;
- 10- Charger le broyeur avec le minerai, et les boulets;
- 11- Broyer pendant 5 minutes ;
- 12- Répéter les étapes 5 à 8.

Durant les essais, quelques difficultés ont été rencontrées :

-durant le retrait de la charge du broyeur, quelques particules très fines ont été perdues (dans l'air) ce qui à influencé sur les fractions passantes, afin de diminuer cette perte due à la manipulation et au phénomène de suspension, on à donc remplacé l'échantillon après chaque deux séries du broyage.

Résultats des essais

I.2-résultats des essais

Essai N°01:($v=50\% v_c$; avec différents taux de remplissages du minerai)

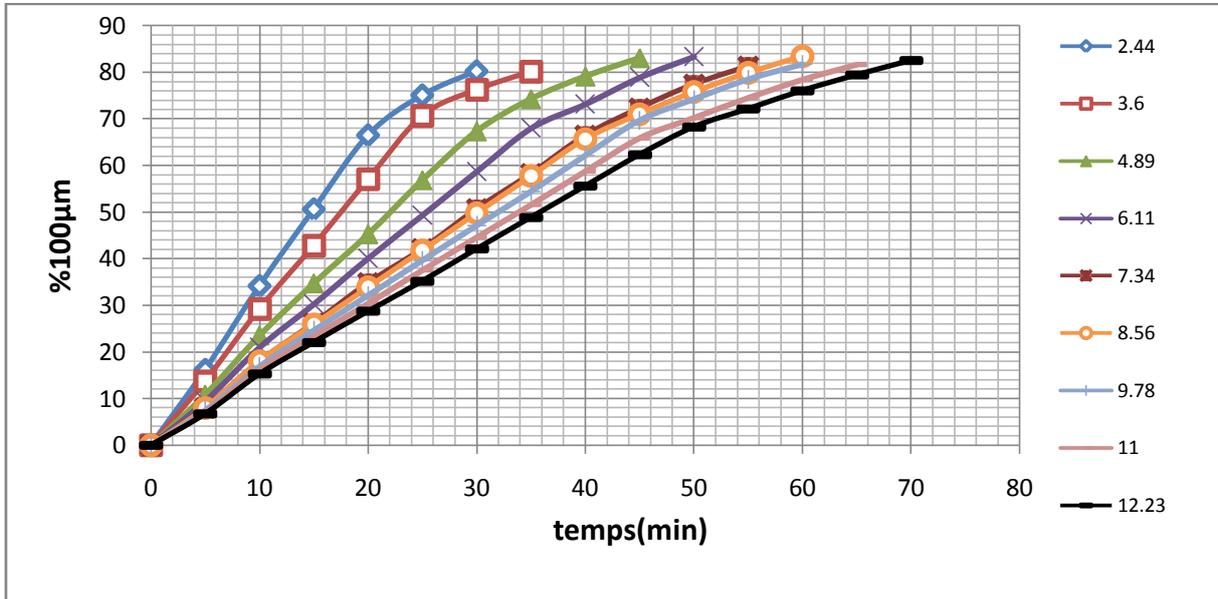


Figure I.5. Pourcentage du produit passant au tamis $100\mu\text{m}$, avec une vitesse de rotation de $50\% v_c$, avec différents taux de remplissage du minerai en fonction du temps.

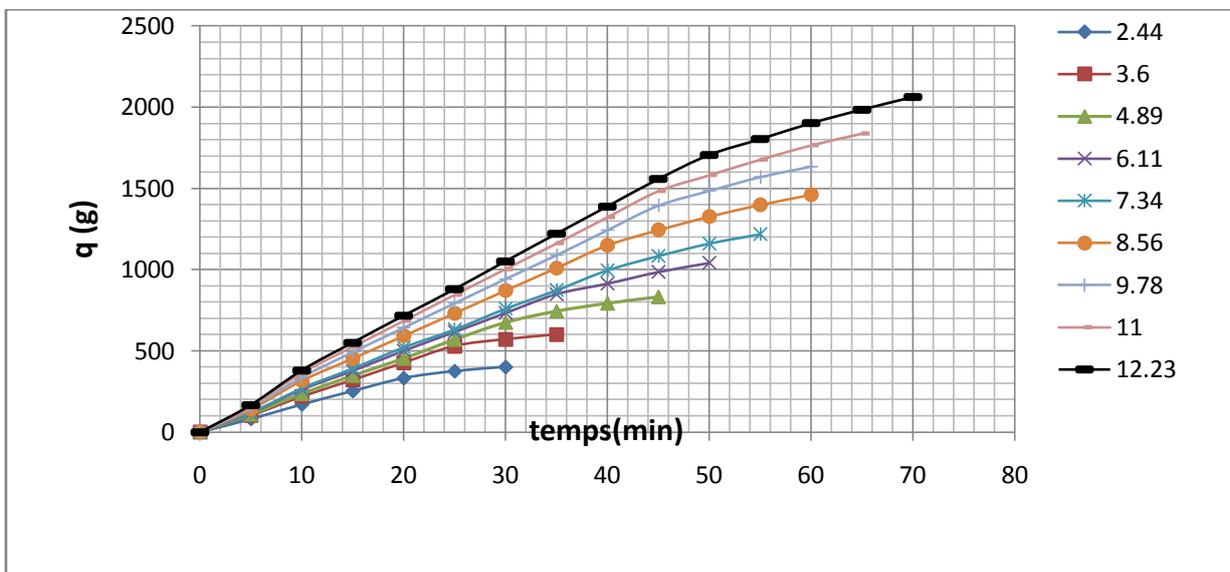


Figure I.6. Quantité du produit passant la maille $100\mu\text{m}$, avec une vitesse de rotation de $50\% v_c$, avec différents taux de remplissage du minerai en fonction du temps.

Résultats des essais

Essai N°02: ($v=60\% v_c$; avec différents taux de remplissages du minerai)

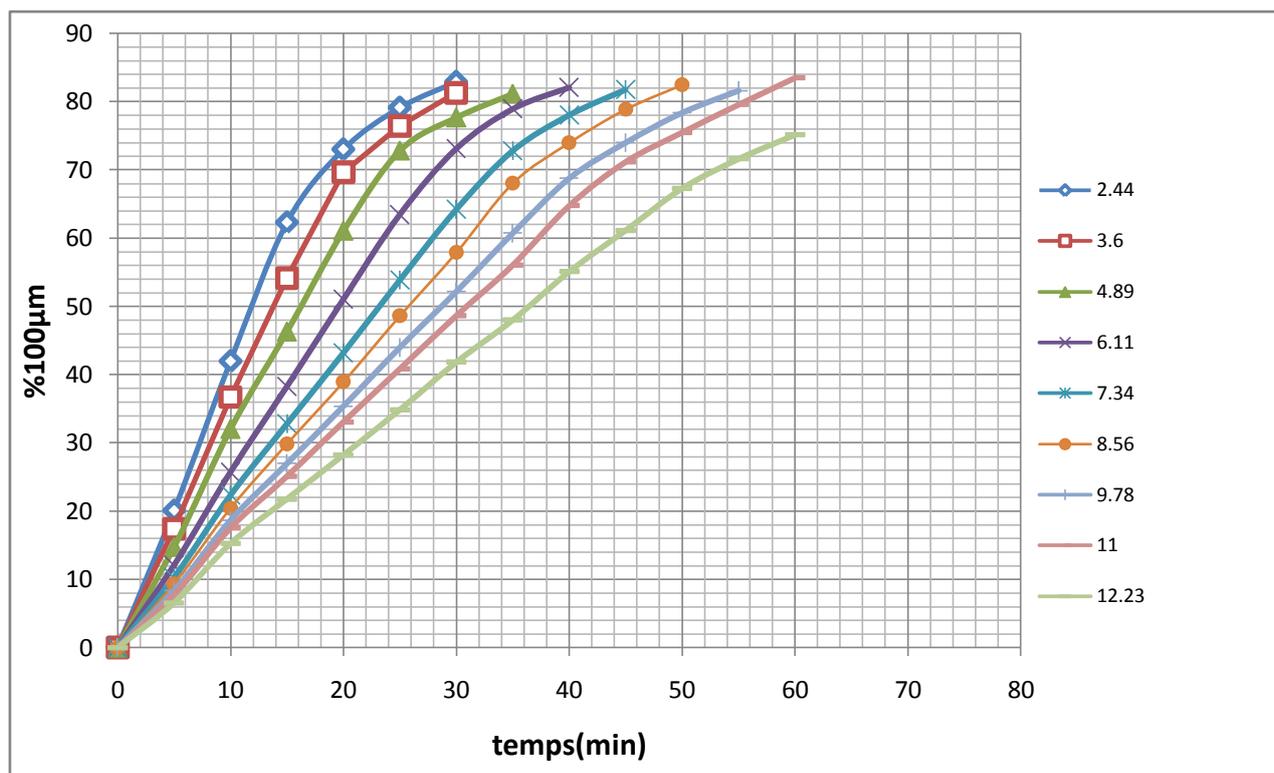


Figure I.7. Pourcentage du produit passant au tamis $100\mu\text{m}$, avec une vitesse de rotation de $60\% v_c$, avec différents taux de remplissage du minerai en fonction du temps.

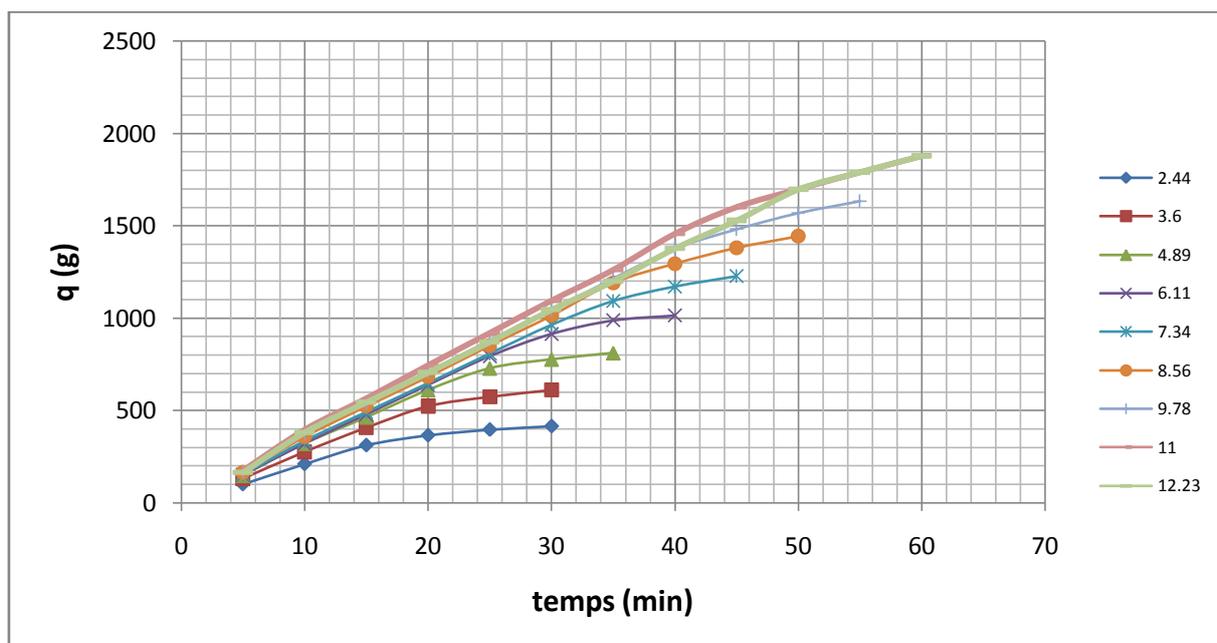


Figure I.8. Quantité du produit passant au tamis $100\mu\text{m}$, avec une vitesse de rotation de $60\% v_c$, avec différents taux de remplissage du minerai en fonction du temps.

Résultats des essais

Essai N°03 : ($v=70\% v_c$; avec différents taux de remplissages du minerai)

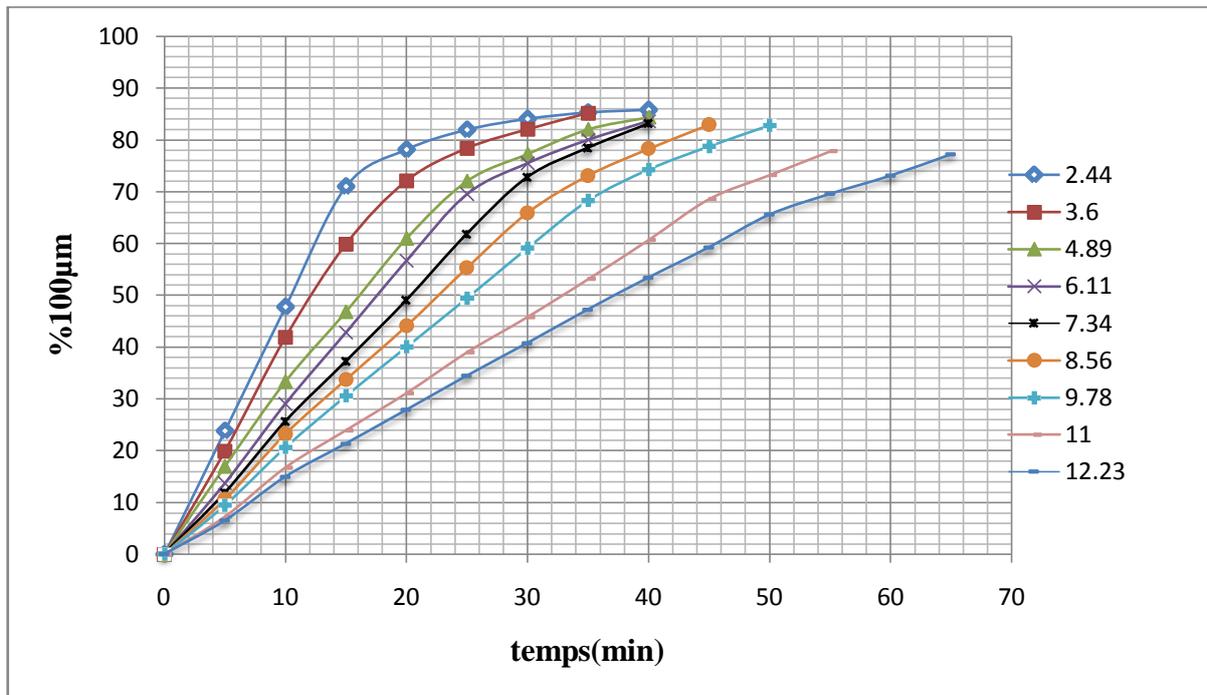


Figure 1.9. Pourcentage du produit passant au tamis 100µm avec une vitesse de rotation de 70% v_c avec différents taux de remplissage du minerai en fonction du temps.

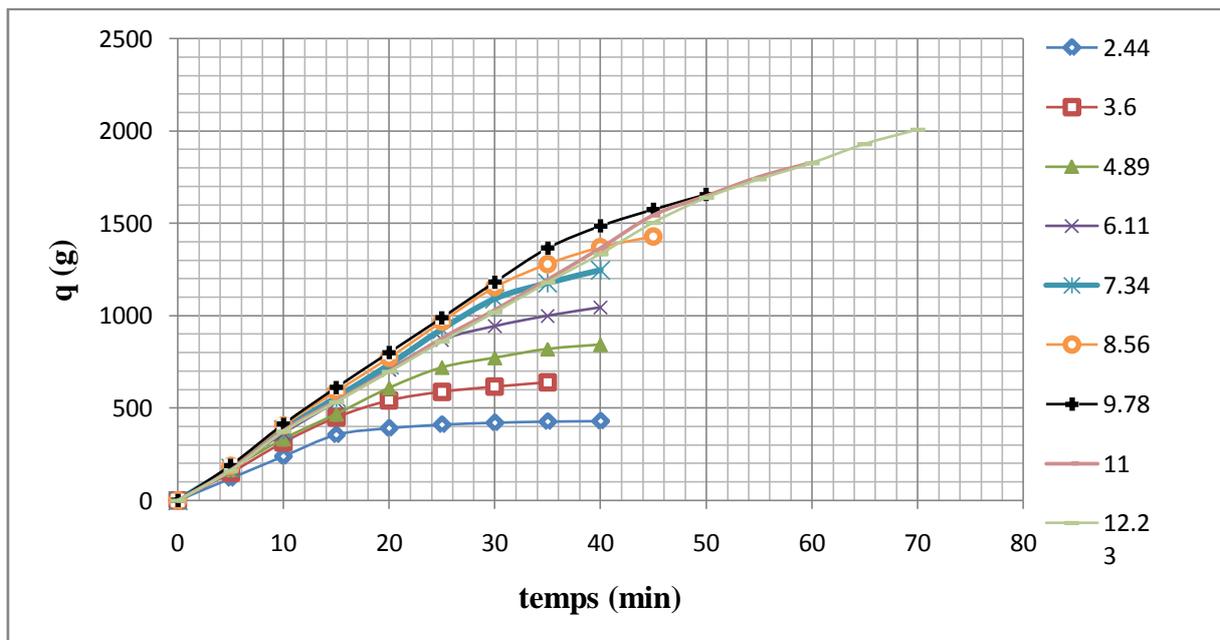


Figure 1.10. Quantité du produit passant au tamis 100µm, avec une vitesse de rotation de 70% v_c avec différents taux de remplissage du minerai en fonction du temps.

Résultats des essais

I.2.1-interprétation

A partir des figures I.6,I.8,I.10, on remarque que la quantité qui passe à travers la maille (100 μ m) est linéaire jusqu'à 70% des passants ; Ensuite l'augmentation régresse progressivement jusqu'à se quelle devienne nulle.

-Les tableaux des résultats des essais sont dans l'annexe.

Pour mieux comprendre et interpréter les figures précédentes, on va calculer la capacité du broyage qui est définie comme étant la quantité de produit passant par unité de temps.

Essai N⁰⁴ ::($v=70\%$ v_c ; avec un taux de remplissages du minerai 7.34%)

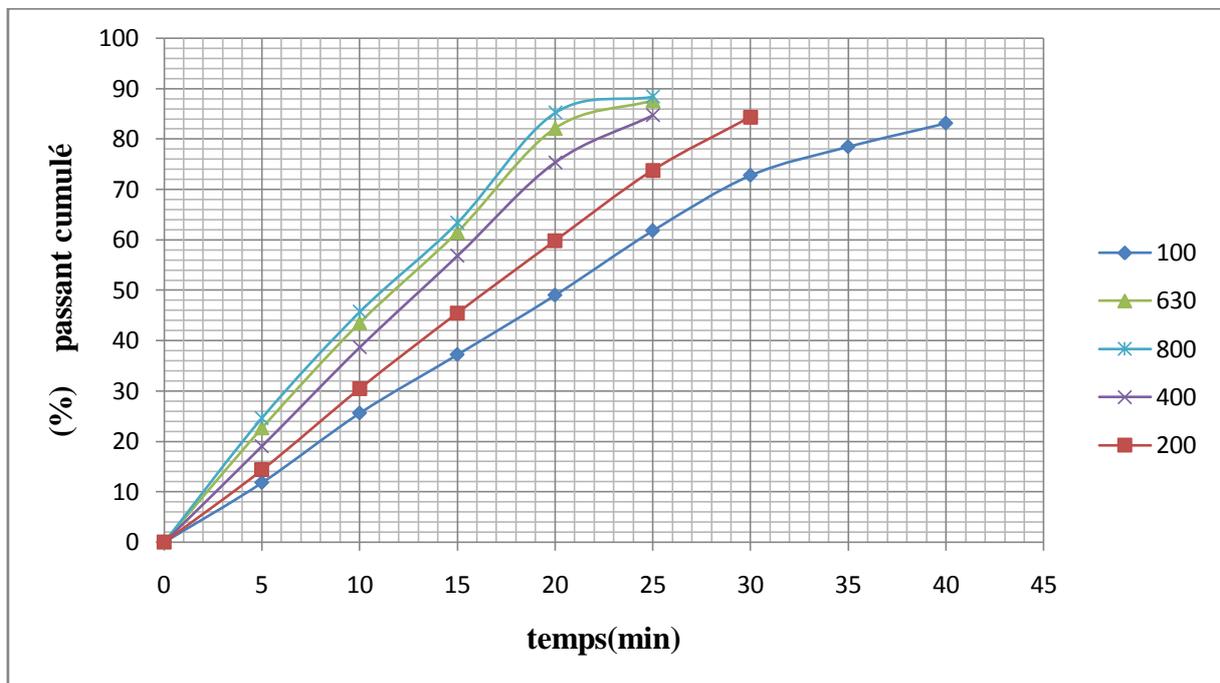


Figure I.11. passant cumulé du produit broyé en fonction du temps:($v=70\%$ v_c ; avec un taux de remplissages du minerai 7.34%)

I.2.2-Interprétation

De la figure I.11.les courbes du passant cumulé de chaque classe ont des courbes de tendance de forme polynomiale :

$$Y = -ax^2 + bx - c$$

Résultats des essais

Tel que :

x = temps (min) ; Y = pourcentage cumulé (%).

On remarque que le pourcentage des passants est proportionnelle à la dimension de la maille de référence du tamis et du temps de broyage

CHAPITRE II ANALYSES
DES RÉSULTATS
OBTENUS

Analyses des résultats obtenus

II-analyses des résultats obtenus

II.1-Etude d'influence de la vitesse de rotation et le taux de remplissage du minerai sur l'indice énergétique de BOND

II.1.1-Calcul de capacité de broyage et l'énergie consommée

A partir des figures I.5 ,I.7, I.9, on détermine (t_{80}) qui est le temps correspondant à 80% du produit broyé, passant a travers la maille (100 μ m), pour la capacité du broyage, on devise la quantité du produit qui correspond à (80%) des passant sur son (t_{80}) pour chaque taux de remplissage, et pour les trois vitesses, le calcul se résume par :

$$C_B = Q * 0.8 / t_{80}$$

Tel que :

Q : la masse de l'alimentation en (gramme) ;

C_B : la capacité du broyage en (gramme/minute) ;

L'énergie électrique consommée « W » est égale à la puissance active du moteur « P » en (kw), qui entraine le broyeur, multiplier par le temps de broyage « t_B » en (heure) :

$$W = P * t_B$$

- P égale à 0.07 kw.
- Les valeurs de capacité de broyage et de l'énergie consommée sont présentées dans le tableau II.1.

Analyses des résultats obtenus

Tableau II.1. Capacité du broyage et l'énergie consommée essais N°1, 2,3

Masse d'alimentation (g)	Taux de remplissage (%)	Masse du produit passant 80% au (100µm)	t ₈₀ (min)			capacité du broyage (g/min)			Energie consommée (kwh/T)		
			30 tr/min	40 tr/min	50 tr/min	30 tr/min	40 tr/min	50 tr/min	30 tr/min	40 tr/min	50 tr/min
500	2.44	400	29.8	26.1	22.4	13.4	15.3	17.8	86.9	76.3	65.4
750	3.60	600	34.8	28.6	27.2	17.2	20.9	22.0	67.8	55.7	52.8
1000	4.89	800	41.1	33.3	32.9	19.4	24.0	24.3	60.0	48.7	47.9
1250	6.11	1000	46.3	36.6	34.9	21.6	27.3	28.6	54.1	42.8	40.8
1500	7.34	1200	53.4	42.6	36.6	22.5	28.2	32.7	51.9	41.4	35.6
1750	8.56	1400	55.2	46.2	41.8	25.4	30.3	33.5	45.9	38.5	34.8
2000	9.78	1600	57.4	52.5	46.6	27.9	30.5	34.4	41.9	38.2	33.9
2250	11.00	1800	62.5	55.5	58.1	28.8	32.4	30.9	40.5	36.0	37.7
2500	12.23	2000	66.0	67.2	69.6	30.3	29.7	28.7	38.6	39.3	40.5

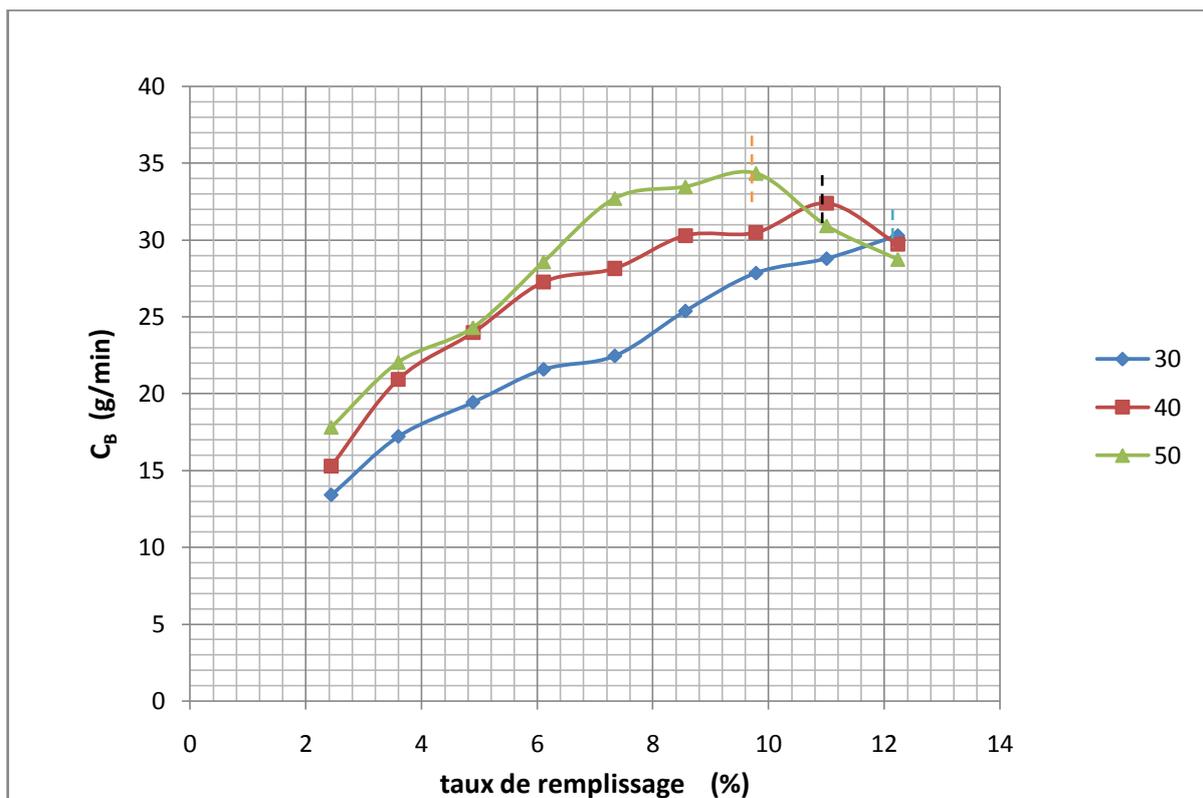


Figure II.1. Capacité du broyage des essais N°1, 2,3

Analyses des résultats obtenus

II.1.1.1-interprétation

D'après la figure II.1, on remarque que pour trois vitesses considérées, une augmentation du taux de remplissage du minerai a un effet positif sur l'efficacité de broyage. En dépassant certain taux, on distingue une régression de capacité de broyage. Pour des taux de remplissage du minerai (2.44 ; 3.6 ; 4.89 ; 6.11 ; 7.34 ; 8.56 ; 9.48)%, la capacité de broyage augmente progressivement avec l'augmentation de la vitesse de rotation du broyeur de 50 à 70% de la vitesse critique (V_c) jusqu'à atteindre 34.4 (g/min) qui est pour un taux de remplissage de 9.78%.

Avec le taux de remplissage 11%, la capacité de broyage augmente jusqu'à 32.4 (g/min), suite à une augmentation de la vitesse de 50 à 60% V_c , puis il diminue en augmentant la vitesse à 70% V_c . Avec un taux de remplissage de 12.23%, la capacité de broyage progresse en diminuant la vitesse de 50 à 70%, jusqu'à 30.3 (g/min).

II.1.2-Calcule de l'indice énergétique de BOND (W_i) pour les essais 1 ,2 ,3

$$W = W_i * [(100/D_2)^{0.5} - (100/D_1)^{0.5}]$$

$$\rightarrow W_i = W / [(100/D_2)^{0.5} - (100/D_1)^{0.5}]$$

W ; énergie consommée par le moteur en (kwh/T).

W_i ; indice de BOND ou Work index (WI) ou indice de travail en (kwh/T).

D_2 ; diamètre de produit passant 80% à la maille de référence (100 μ m).

D_1 ; diamètre de l'alimentation passant 80%. dans notre cas ($D_1=6300 \mu$ m).

II.1.3-Calcule de l'indice de BOND corrigé (W_{ib}) pour les essais 1 ,2 ,3

$$W_c = W / (f_2 * f_3 * f_4) = W_{ib} * ((100/D_2)^{0.5} - (100/D_1)^{0.5}) \quad (1)$$

$$\rightarrow W_{ib} = W / (f_2 * f_3 * f_4) * ((100/D_2)^{0.5} - (100/D_1)^{0.5}). \quad (2)$$

W_c ; énergie consommée corrigée en (kwh/T).

W_{ib} ; indice de BOND Corrigé (kwh/T).

Analyses des résultats obtenus

Pour cela, on a besoin de calculer les facteurs correctifs (f_i), nécessaires liés à l'énergie consommée, cette correction est due aux conditions utilisées par « BOND ».

$$f_2=1.2 ; \quad f_3=1.47 ; \quad f_4= (0.9+0.014 W_{ib}).$$

Pour la détermination de W_{ib} , on doit résoudre une équation de second ordre, en le remplaçant dans l'équation (2).

- Les valeurs de W_i et W_{ib} , W_c , sont présentées dans le tableau II.2.

- T_x est le taux de remplissage du minerai en (%).

Tableau II.2. l'indice de BOND des essais N°1, 2,3

T_x (%)	W_i (kwh/T)			W_c (kwh/T)			W_{ib} (kwh/T)		
	30 (tr/min)	40 (tr/min)	50 (tr/min)	30 (tr/min)	40 (tr/min)	50 (tr/min)	30 (tr/min)	40 (tr/min)	50 (tr/min)
2.44	99.52	87.30	74.89	30.75	27.91	24.85	35.19	31.94	28.43
3.66	77.55	63.81	60.47	25.54	21.95	21.04	29.22	25.11	24.08
4.89	68.68	55.66	54.86	23.25	19.75	19.49	26.60	22.60	22.30
6.11	61.83	48.94	46.69	21.46	17.81	17.14	24.55	20.38	19.61
7.34	59.41	47.39	40.78	20.76	17.35	15.34	23.76	19.85	17.55
8.56	52.57	44.05	39.87	18.84	16.35	15.05	21.56	18.71	17.22
9.78	47.91	43.76	38.84	17.51	16.25	14.73	20.04	18.59	16.85
11.00	46.36	41.20	43.11	17.03	15.48	16.07	19.49	17.71	18.39
12.23	44.05	44.90	46.42	16.39	16.62	17.03	18.75	19.02	19.49

Analyses des résultats obtenus

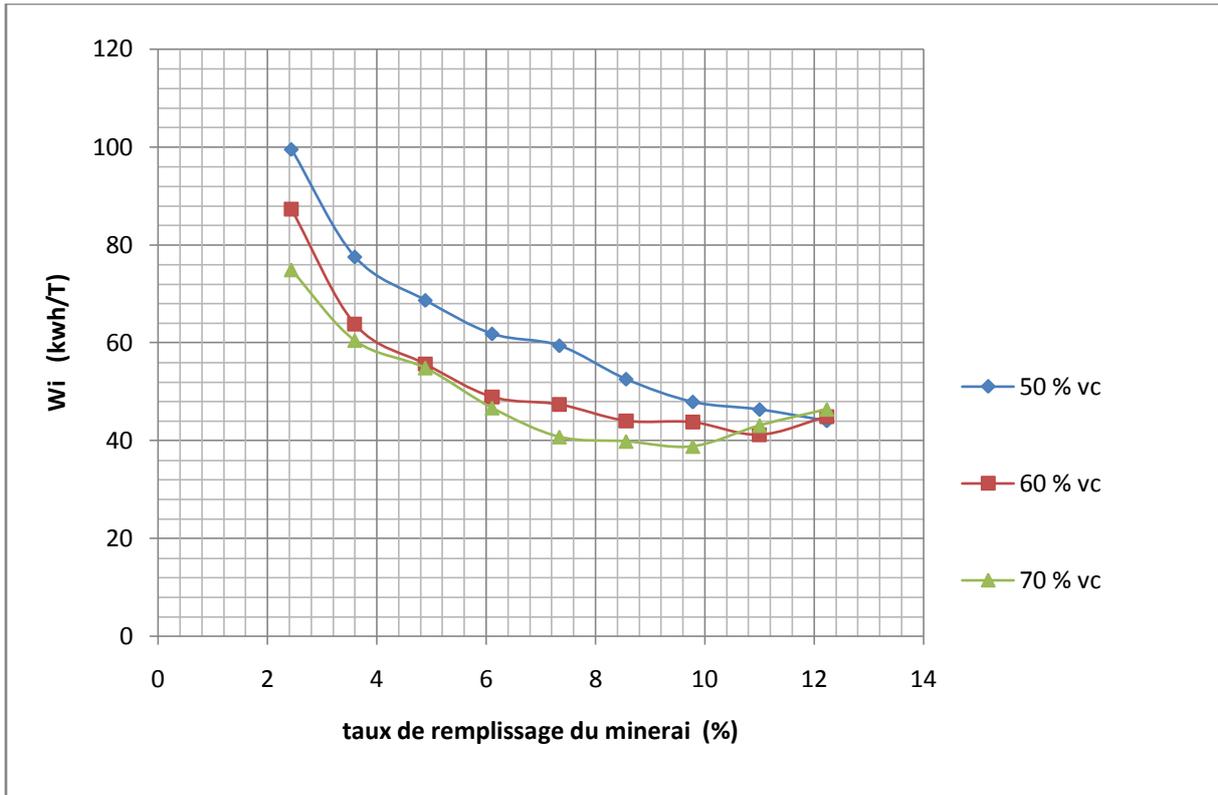


Figure II.2. Indice de BOND des essais N°1, 2,3

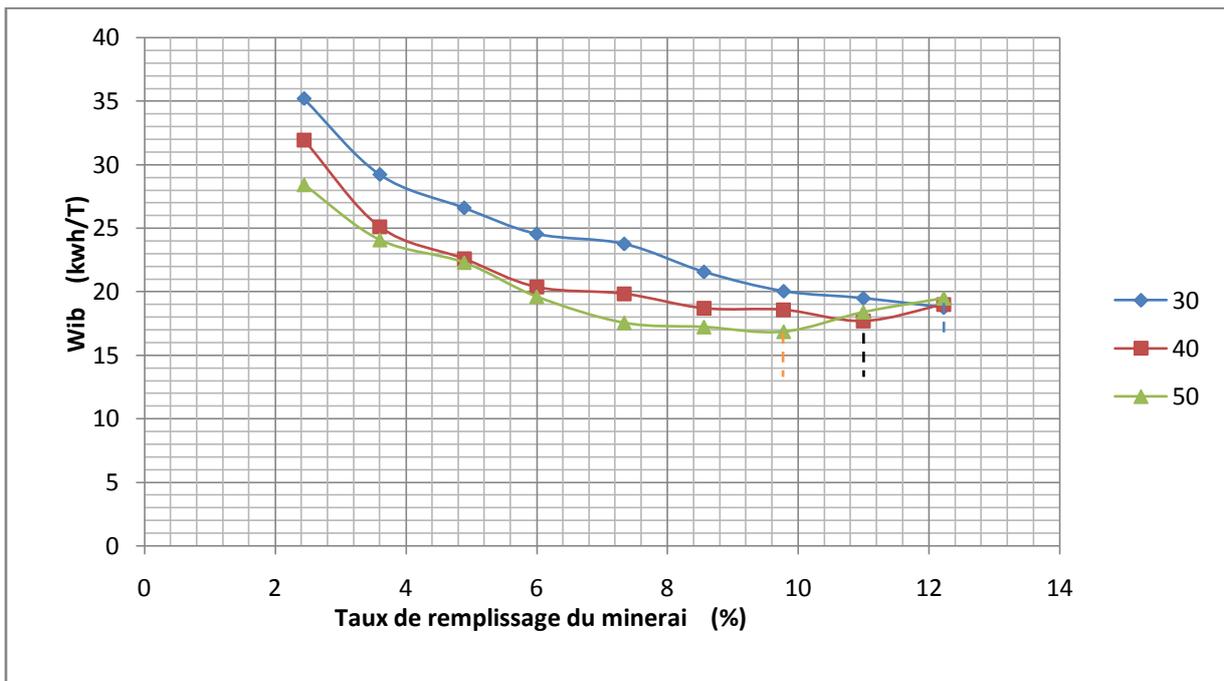


Figure II.3. Indice de BOND corrigé des essais N°1, 2,3

Analyses des résultats obtenus

II.1.4-interprétation

Les courbes de la figure II.2, II.3, ont des courbes de tendance polynomiale d'une forme générale : $Y = ax^2 - bx + c$.

On comparant les courbes obtenues dans la figure II.2, on remarque que l'indice de BOND diminue avec l'augmentation de la vitesse de rotation du broyeur jusqu'à atteindre des taux de remplissage précis ; En les dépassants l'indice de BOND augmente.

La diminution de l'indice de bond est une fonction de l'efficacité du broyage. D'un coté, en augmentant le taux de remplissage de minerai à l'intérieur du broyeur, les pores entre les boulets vont être remplis ce qui favorise l'augmentation du produit broyé passant au tamis de référence. En dépassant un certain taux de remplissage, les pores vont se saturer, ce qui explique l'augmentation progressive de l'indice de BOND en dépassant le taux 9.78%.

D'un autre coté, l'augmentation de la vitesse de rotation décline de plus en plus la charge (boulets + minerai), ce qui varie le mouvement ; de glissement qui est caractérisés par le phénomène d'abrasion ,vers le mouvement de cascade et cataracte où le phénomène d'impacte apparait, ce qui explique la diminution de l'indice de BOND pour les taux de remplissage de (2.44 ; 3.6 ; 4.89 ; 6.11 ; 7.34 ; 8.56 ; 9.78) avec des vitesses allant de 50 à 70% de la vitesse critique et même pour le taux de 11% pour les vitesses de 50 à 60% .

Une augmentation excessive de la vitesse pour des taux de remplissage précis va créer une forte inclinaison d'angle de la charge qui et les boulets s'approche plus du point de vol, ce qui oriente le mouvement vers le phénomène de centrifugation ou les boulets se collent aux parois du broyeur et par conséquent l'impact et l'abrasion vont être éliminés. Ce qui explique l'augmentation progressive d'indice de BOND pour les vitesses de rotation de 50 à 70% de la vitesse critique et un taux de remplissage de 12.23% et de 60 à 70% pour le taux 11%.

II.2-Etude de l'évolution de l'indice en fonction de d_{80}

A partir de la figure.11, on détermine le t_{80} pour chaque classe granulométrique, après on calcule l'énergie consommée et l'indice énergétique de BOND. Les valeurs de l'énergie consommée et l'indice de BOND sont présenté dans le tableau II.2suivant.

- d_{80} est le diamètre de la maille de référence ou le pourcentage de produit broyé passant atteint les 80%.

Analyses des résultats obtenus

Tableau II.3. énergie consommée et l'indice de BOND pour différentes classes granulométriques (essai N°4)

Masse d'alimentation (T*10 ⁻³)	d ₈₀ (µm)	Masse du produit passant (T*10 ⁻³)	t ₈₀ (h)	W (Kwh/T)	W _i (Kwh/T)
1.5	800	1.2	0.31	18.27	80.48
	630		0.32	18.94	69.63
	400		0.37	21.84	58.39
	200		0.46	27.16	46.83
	100		0.61	35.64	40.77

d₈₀ est le diamètre de la maille de référence ou le pourcentage de produit broyé passant atteint les 80%.

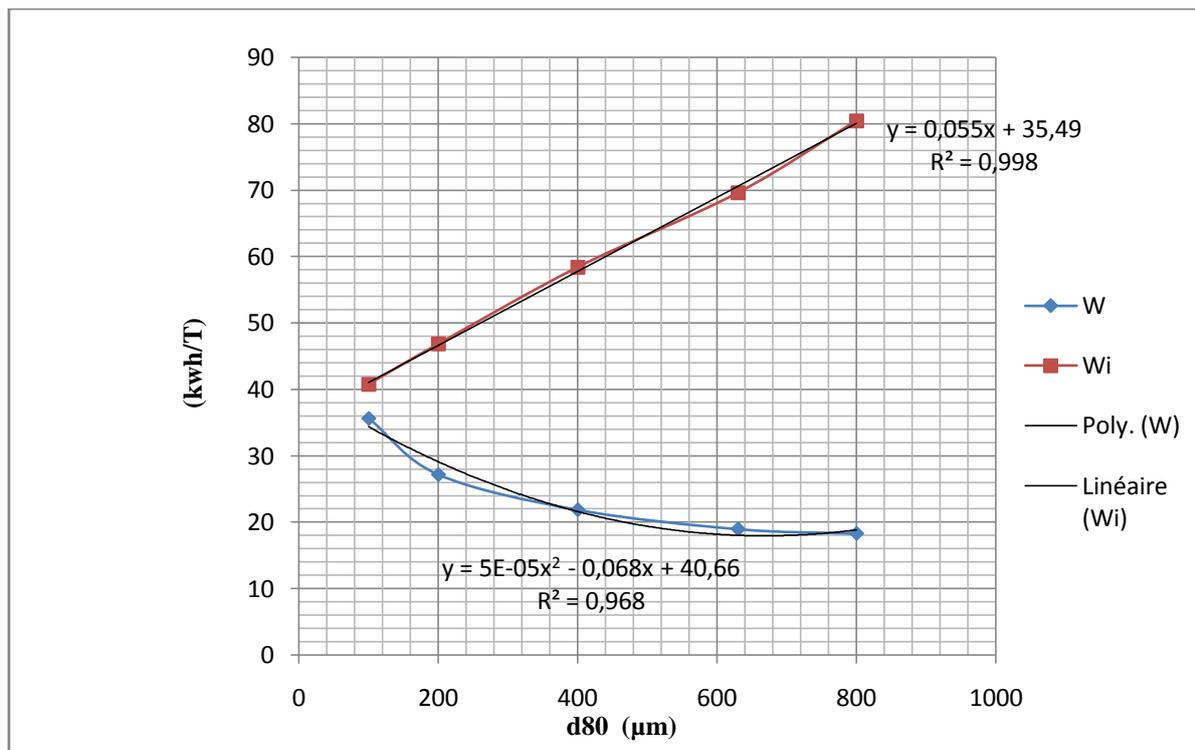


Figure II.4. variation de l'indice de BOND en fonction du temps (essai N°4)

Analyses des résultats obtenus

A partir de la figure II.4, la courbe d'énergie consommée a une courbe de tendance polynomiale de forme :

$$Y = ax^2 - bx + c.$$

La courbe de l'indice de BOND a une courbe de tendance linéaire de forme :

$$Y = ax + b.$$

L'indice énergétique augmente régulièrement avec l'augmentation de (d_{80}) .contrairement à l'énergie consommée qui diminue avec l'augmentation de (d_{80}) .on déduit que l'énergie consommée pour le broyage augmente plus en plus avec l'augmentation de la finesse que nous voulons obtenir.

II.3-Conclusion et Recommandation

II.3.1-Conclusion

D'après les résultats obtenus on conclut que l'indice énergétique de bond pour un broyeur à boulets est fortement lié aux conditions opératoires (vitesse de rotation, taux de remplissage de minerai, d_{80}). L'optimisation de cet indice n'a lieu, que par un compromis entre ces facteurs, ce qui exige une meilleure connaissance des phénomènes physicomécaniques et chimiques existants dans le broyeur à boulets.

II.3.2-Recommandation

Nous avons voulu étudier l'indice de BOND pour les vitesses allant de 30 à 100 tours par minutes pour déterminer une vitesse optimale.

Néanmoins le moteur existant ne peut atteindre que 53 tours /minute. Le département de Génie Minier n'ayant pas pu réceptionner le moteur commandé, il est souhaitable que des essais, au-delà de cette vitesse soit investiguée.

BIBLIOGRAPHIE

References Bibliographiques

- [1] **H.RUMPF** Die Einzelkornzerkleinerung als Grundlage einer technischen Zerkleinerungswissenschaft. Chemie Ing. Tech. 37 (1965).
- [2] **P.BLAZY, J.YVONe et E.JDID.** Fragmentation Généralités. Théorie (2006) .
- [3] **EPSTEIN, B.** Logarithmico-normal distribution in breakage of solids. Ind. Eng. Chem., 40, p. 2289-2291 (1948).
- [4] **INGLIS CE.** Stress in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. Proc. Inst. Naval Arch. (1913).
- [5] **A.A.GRIFFITH.** The phenomena of rupture and flow in solids. Phil Trans Roy Soc (London), Ser A, Vol 221 (1921) 163-198.
- [6] **H.J.HERRMANN, S. ROUX.** (Editors). Statistical models for the fracture of disordered media. North Holland 1990. ISBN 0-444-88356-8.
- [7] **H.HERTZ.** J. Math. (Crelle's J.), vol. 92, 1881.
- [8] **H. RUMPF.** Physical aspects of comminution and new formulation of a law of comminution. Powder Technology, 7 (1973) 145-159.
- [9] **P. BLAZY, E. JDID.** fragmentation. technologie (2006).
- [10] **O. LECOQ.** 19/12/1997. étude de la broyabilité de différents matériaux pulvérulents à l'aide d'un test d'impact à jet d'air.
- [11] **K. SCHÔNERT** Test devices for comminution. IFPRI final report FRR-05-09. May 1995.
- [12] **S.YASHIMA, Y. KANDA, S. SANO.** Relationships between particle size and fracture energy or impact velocity required to fracture as estimated from single particle crushing. Powder Technology, 51 (1987a) 227-282.
- [13] **C.L.PRASHER.** Crushing and grinding process handbook. John Wiley & Sons Ltd. 1987. ISBN 0-471-10535-X.
- [14] **S.OKUDA, W. CHOI.** Grinding characteristics of target type fluid energy mill. Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol 13, 13 (1980) 219-225.

- [15]**R.M.HARDGROVE**.Grindability of coal, Trans. ASME (Fuels and steam power), 54 (1932) 37-46.
- [16]**F.C. BOND** Crushing and grindibility calculations. Brit. Chem. Eng. Part I, 6(6) (1961) 378-385, Part II, 6(8) (1961) 543-548.
- [17]**C.R.BEMROSE,J.BRIDGWATER**. Areview of attrition and attrition test methods. Powder Technology, 49 (1987) 97-126.
- [18]**B.R.LAWN,D.B MARSHALL**. Hardness, toughness and brittleness :an indentation analysis. Journal of the American Ceramic Society.Vol.62, n°7-8, July-August 1979, pp347-350.
- [19]**L.G.AUSTIN, R.R.KLIMPEL**and LUCKIE P. T., Process Engineering of Size Réduction : Bail milling, AIME, pp. 8-19, New York ; 1984.
- [20]**B.A .WILLS**. Minerai Processing Technology, 1^x Ed., Pergamon Press, England; 2006.
- [21]**A.LANGLAIS**Rapport interne. Département de génie des mines, de la métallurgie et des matériaux, Université Laval, Québec ; 2003.
- [22]**S. S. NARAYANAN,F. W. HESS etR. S. BURNS**.Optimisation of comminution stages at Bougainville Copper Limited, Copper'87, Ed: Mular, Gonzalez, 43-47 Barcelona, Chile; 1987.
- [23]**T.J.NAPIER-MUNN, S.MORELL, R.D.MORRISON et T.KOJOVIC**.Minerai Comminution Circuits: Their opération and optimisation, JKMRC, Queensland; 1996.
- [24]**R. R. KLIMPEL et R. RICHARD** Slurry rheology influence on the performance of minerai / coal grinding circuits. Part I, Mining Engineering, Vol. 34, n 12, pp. 1665-1668; 1982.
- [25]**F.SHI**. Slurry rheology and ils effects on grinding, PhD Thesis, University of Queensland; 1994.
- [26] **C. BAZIN, C. BOUDRIAS-CHAPLEAU**. The difficulty associated with measuring slurry rheological properties and linking them to grinding mill performance, Int. J. Miner. Process. 76, 93-99 ; 2005.
- [27]**MINTEK**.The selection of grinding halls for spécifie ores and the development of a suitable theory of hall wear, Application Report N°10, Johannesburg; 1991.

- [28]**M.COOPER, C. BAZIN et R.GRANT.** Evaluation of grinding média at Brunswick Mining, CIM Bull. 87 (985), 73-76 ; 1994.
- [29]**G. C. LOWRISON.**Crushing and Grinding, 10 pp. 235-239, England; 1974.
- [30]**Jr C. A. ROWLAND et D. M.KJOS.**Minerai Processing Plant Design, Rod and bail mills Ch 12, Eds : Mular, Bhappu, SME, pp 275-277 ; 1978.
- [31] **R. E. IVOR.**The effect of média sizing on ball mill efficiency. In : Kawatra, S. K. (Ed.), Comminution practices, SME, Littleton, CO, pp. 279-292 ; 1997.
- [32]**F. CONCHA, L. MAGNE et L. G.AUSTIN.**Optimization of the make-up ball charge in a grinding mill, Int. J. Miner. Process, Vol. 34, pp. 231-241 ; 1992.
- [33]**L. G. AUSTIN et R. R. KLIMPEL.**Ball wear and ball size distributions in tumbling mills, Powder Technology, Vol. 41, pp. 279-286 ; 1985.
- [34]**Ch. A.Séraphin .**Contribution a la modélisation du broyeur a boulet, 1998.

ANNEXE

Essai N°01:($v=50\%$ v_c ; avec différents taux de remplissages du minéral)

Tableau quantité du produit passant la maille 100 μ m, avec différents taux de remplissage du minéral en fonction du temps.

Temps (min)	q(g)								
	2.44 (%)	3.6 (%)	4.89 (%)	6.11 (%)	7.34 (%)	8.56 (%)	9.78 (%)	11.00 (%)	12.23 (%)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	100,45	130,54	147,77	151,25	154,38	163,81	167,02	173,25	164,25
10	209,85	275,40	320,50	322,00	335,25	357,70	373,40	394,65	381,25
15	311,55	406,42	463,10	478,75	492,00	522,72	539,60	564,75	544,50
20	365,15	522,45	610,90	638,50	648,00	681,62	708,00	744,07	705,50
25	395,70	573,37	728,30	793,75	808,05	851,02	880,20	919,12	871,25
30	414,60	609,90	776,80	914,25	963,30	1013,42	1044,00	1094,62	1045,50
35	-	-	811,40	987,00	1092,30	1191,22	1215,00	1261,12	1199,75
40	-	-	-	1013,75	1170,75	1295,00	1376,00	1456,87	1377,00
45	-	-	-	-	1226,85	1380,75	1480,60	1601,55	1528,25
50	-	-	-	-	-	1443,57	1568,20	1698,52	1696,75
55	-	-	-	-	-	-	1632,80	1790,32	1790,00
60	-	-	-	-	-	-	-	1878,75	1878,25
65	-	-	-	-	-	-	-	-	1963,75
70	-	-	-	-	-	-	-	-	2045,00

Avec ; q: est la quantité en gramme des passant de la charge d'alimentation a travers la maille 100.

$q = \% \text{ *charge de l'alimentation } \dots\dots\dots (g).$

Tableau (t_{80}) pour différents taux de remplissage.

Taux de remplissage (%)	2,44	3,60	4,89	6,11	7,34	8,56	9,78	11,00	12,23
t_{80} (min)	29,80	34,83	41,14	46,31	53,41	55,15	57,44	62,50	66,00
Quantité de passant 100 μ m (g)	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000

Tableau capacité du broyage

Taux de remplissage (%)	2.44	3.60	4.89	6.11	7.34	8.56	9.78	11.00	12.23
capacité du broyage (g/min)	13.42	17.23	19.45	21.59	22.47	25.39	27.86	28.8	30.30

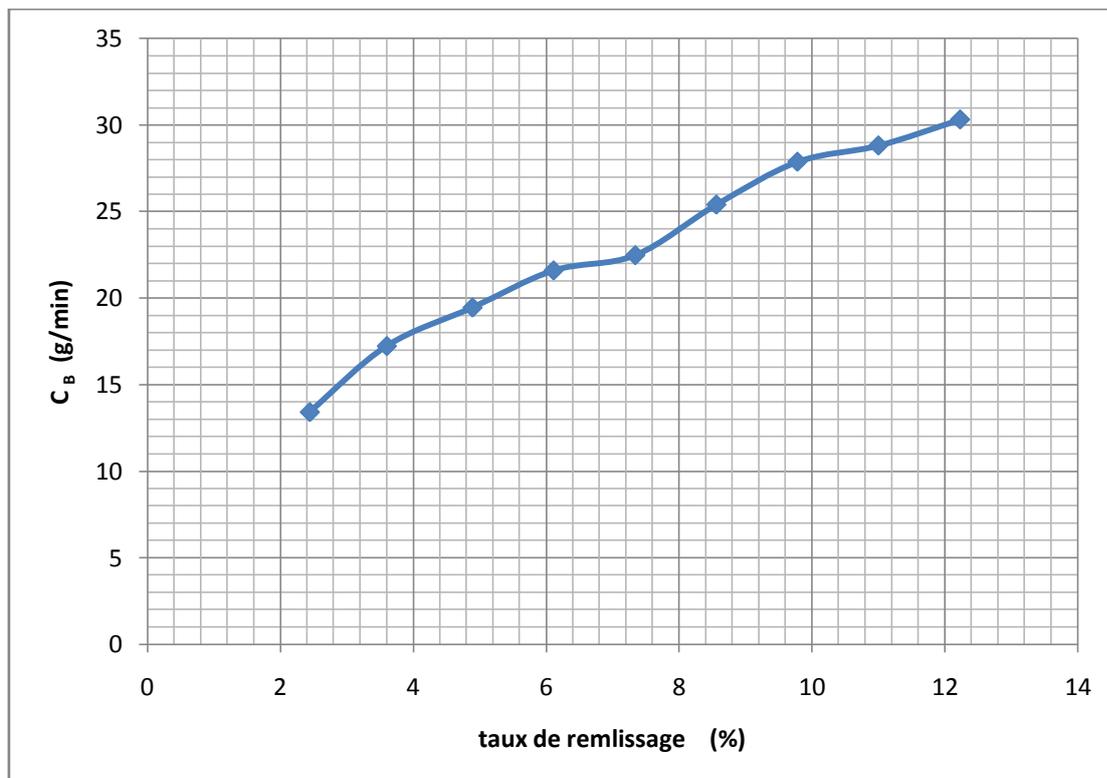


Figure variation du taux de broyage en fonction du taux de remplissage.

Essai N°02:($v=60\%$ v_c ; avec différents taux de remplissages du minerai)

Tableau quantité du produit passant la maille 100 μ m, avec différents taux de remplissage du minerai en fonction du temps.

Temps (min)	q(g)								
	2.44 (%)	3.6 (%)	4.89 (%)	6.11 (%)	7.34 (%)	8.56 (%)	9.78 (%)	11.00 (%)	12.23 (%)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	100,45	130,54	147,77	151,25	154,38	163,81	167,02	173,25	164,25
10	209,85	275,40	320,50	322,00	335,25	357,70	373,40	394,65	381,25
15	311,55	406,42	463,10	478,75	492,00	522,72	539,60	564,75	544,50
20	365,15	522,45	610,90	638,50	648,00	681,62	708,00	744,07	705,50
25	395,70	573,37	728,30	793,75	808,05	851,02	880,20	919,12	871,25
30	414,60	609,90	776,80	914,25	963,30	1013,42	1044,00	1094,62	1045,50
35	-	-	811,40	987,00	1092,30	1191,22	1215,00	1261,12	1199,75
40	-	-	-	1013,75	1170,75	1295,00	1376,00	1456,87	1377,00
45	-	-	-	-	1226,85	1380,75	1480,60	1601,55	1528,25
50	-	-	-	-	-	1443,57	1568,20	1698,52	1696,75
55	-	-	-	-	-	-	1632,80	1790,32	1790,00
60	-	-	-	-	-	-	-	1878,75	1878,25
65	-	-	-	-	-	-	-	-	1963,75
70	-	-	-	-	-	-	-	-	2045,00

Tableau (t80) pour différents taux de remplissage.

Taux de remplissage (%)	2,44	3,60	4,89	6,11	7,34	8,56	9,78	11,00	12,23
t80 (min)	26,13	28,64	33,35	36,65	42,6	46,2	52,46	55,54	67,23
Quantité de passant 100 μ m (g)	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000

Tableau capacité du broyage.

Taux de remplissage (%)	2.44	3.60	4.89	6.11	7.34	8.56	9.78	11.00	12.23
capacité de broyage (g/min)	15.31	20.95	23.99	27.29	28.17	30.30	30.50	32.41	29.75

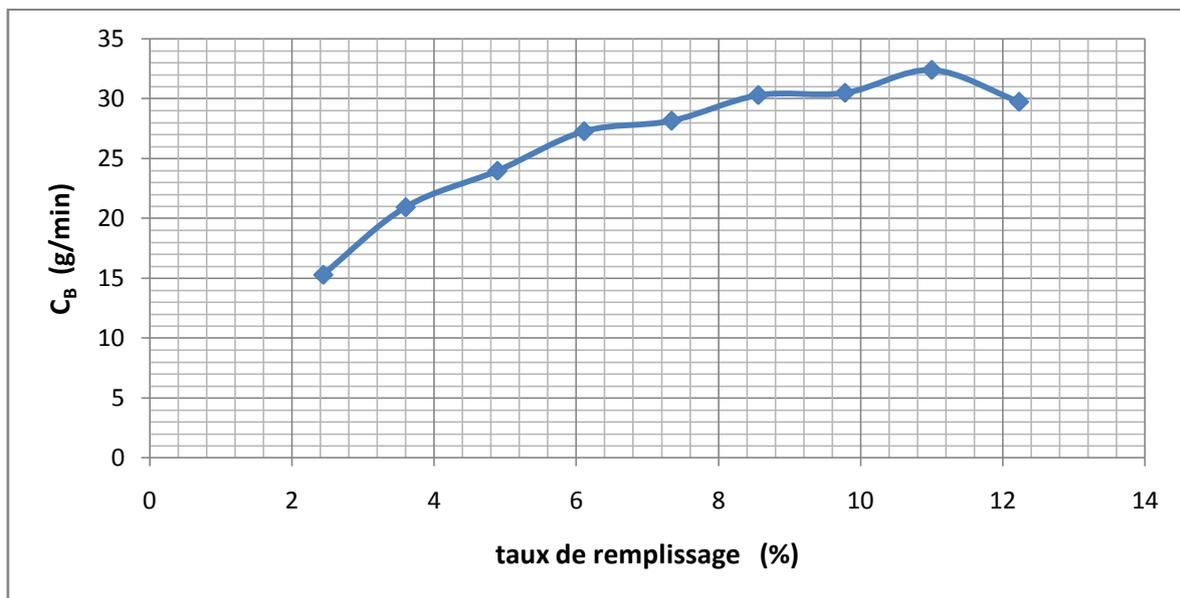


Figure variation de capacité de broyage en fonction du taux de remplissage.

Tableau calcul de l'indice de BOND.

T_x (%)	2.44	3.6	4.89	6.11	7.34	8.56	9.78	11.00	12.23
W (kwh/T)	76.3	55.77	48.65	42.77	41.42	38.5	38.25	36.01	39.24
Wi(kwh/T)	87.30	63.81	55.66	48.94	47.39	44.05	43.76	41.20	44.90

Tableau calcule de l'indice de BOND corrigé.

T _x (%)	2.44	3.6	4.89	6.11	7.34	8.56	9.78	11.00	12.23
W _c (kwh/T)	21.06	16.61	14.59	13.33	12.97	12.19	12.12	11.40	12.40
W _{ib} (kwh/T)	24.1	19	16.68	15.25	14.84	13.95	13.87	13.87	14.19

Essai N°03 :(v=70% v_c; avec différents taux de remplissages du minerai)

Tableau quantité du produit passant la maille 100µm, avec différents taux de remplissage du minerai en fonction du temps.

Temps (min)	q(g)								
	2.44 (%)	3.6 (%)	4.89 (%)	6.11 (%)	7.34 (%)	8.56 (%)	9.78 (%)	11.00 (%)	12.23 (%)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	119,10	149,77	170,00	171,87	177,00	186,02	189,60	164,02	161,50
10	238,80	314,32	333,80	363,75	384,00	407,05	412,80	377,55	373,00
15	355,05	449,17	468,50	535,75	558,00	590,97	611,40	539,32	533,25
20	390,70	540,75	610,00	708,75	735,00	772,10	800,40	700,65	696,00
25	409,75	587,92	720,70	869,12	927,30	968,62	988,80	877,72	860,75
30	420,25	615,30	773,00	943,87	1091,55	1154,65	1182,00	1031,40	1018,75
35	426,40	638,77	820,50	1000,25	1176,75	1280,12	1365,20	1195,42	1180,50
40	428,95	-	844,00	1045,50	1246,65	1370,42	1485,00	1365,97	1334,50
45	-	-	-	-	-	1429,40	1574,40	1543,72	1504,00
50	-	-	-	-	-	-	1655,80	1647,67	1638,25
55	-	-	-	-	-	-	-	1750,95	1738,50
60	-	-	-	-	-	-	-	1828,35	1826,75
65	-	-	-	-	-	-	-	-	1929,50
70	-	-	-	-	-	-	-	-	2007,25

Avec ; q: est la quantité en gramme des passant de la charge d'alimentation a travers la maille 100.

q =% *charge de l'alimentation (g).

Tableau (t_{80}) pour différents taux de remplissage.

Taux de remplissage (%)	2,44	3,60	4,89	6,11	7,34	8,56	9,78	11,00	12,23
t_{80} (min)	22,44	27,2	32,89	34,97	36,66	41,8	46,57	58,16	69,53
Quantité de passant $100\mu\text{m}$ (g)	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000

Tableau taux du broyage

Taux de remplissage (%)	2.44	3.60	4.89	6.11	7.34	8.56	9.78	11.00	12.23
capacité du broyage (g/min)	17.83	22.06	24.32	28.60	32.73	33.49	34.36	30.95	28.76

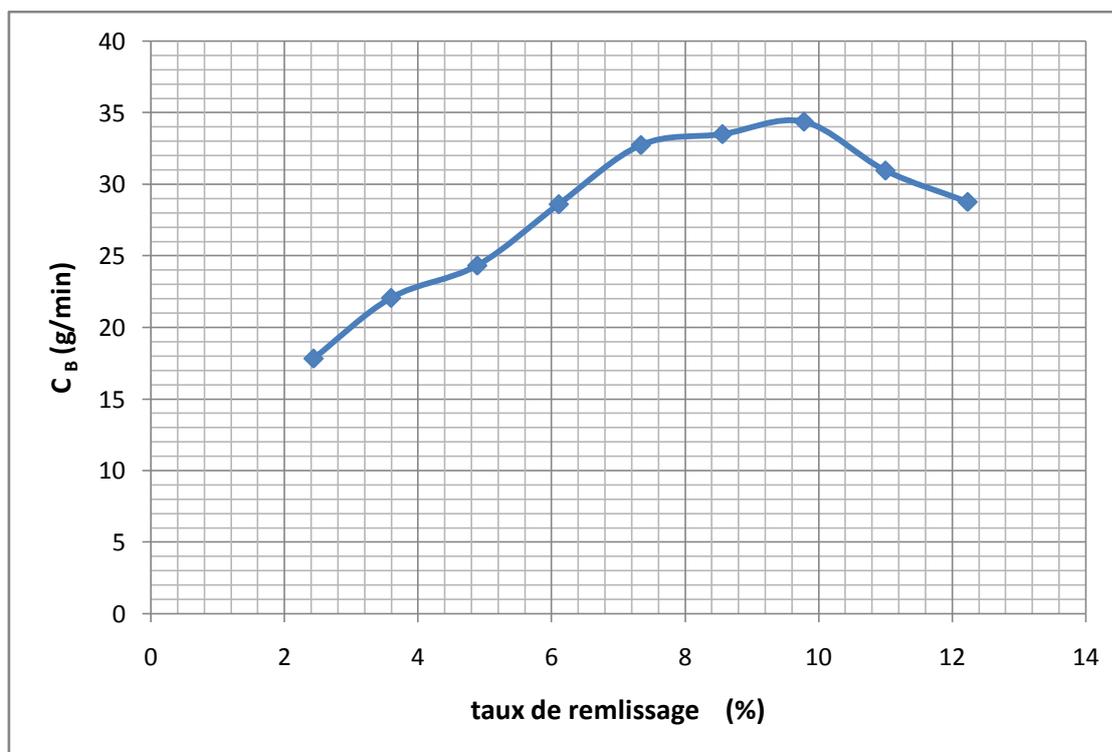


Figure variation de capacité de broyage en fonction du taux de remplissage.