

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE
Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Génie Métallurgie

Par :
GHERBAL Anfal
LALMI Toubia

Thème

Conception et Réalisation d'un Broyeur à Boulets

Soutenu le

Devant le jury composé de :

Année universitaire : 2024 / 2025

Remerciements

Remerciements

Nous remercions ALLAH le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

Nous tenons à remercier nos encadreur Mr Abdelhakim BEGAR, pour son soutien, ses conseils

précieux et sa disponibilité, qui m'ont permis d'apprendre énormément et de m'enrichir tout

au long de ce travail.

Nos remerciements s'adressent à tous les enseignants qui nous ont enseignés et qui par leurs compétences nous ont soutenus dans la poursuite de nos études.

*Nos sincères remerciements vont également au responsable du HALL
TECHNOLOGIE*

Dédicaces

Résumé

Ce mémoire porte sur la conception et le dimensionnement d'un broyeur à boulets pour le traitement de l'hématite, un minerai de fer à forte valeur industrielle. L'étude débute par une présentation des principes de broyage, des types de broyeurs et des propriétés physico-chimiques de l'hématite, mettant en lumière les contraintes spécifiques à son broyage, telles que sa densité élevée et son abrasivité. Un modèle de broyeur à boulets a été conçu à l'échelle de laboratoire. Les calculs portent sur la vitesse critique, la charge de broyage, la puissance nécessaire, ainsi que les éléments mécaniques comme le moteur, la transmission et les roulements. Une particularité innovante de ce projet est l'intégration d'un système d'automatisation basé sur Arduino, permettant un contrôle en temps réel de la vitesse, de la charge, de la température et de l'humidité. Ce travail vise à proposer une solution technique adaptée aux besoins industriels en combinant performance mécanique et pilotage automatisé, tout en optimisant la consommation énergétique et la durée de vie des équipements.

Abstract

This thesis focuses on the design and sizing of a ball mill for the processing of hematite, a high-value industrial iron ore. The study begins with an overview of grinding principles, different types of mills, and the physico-chemical properties of hematite, highlighting specific challenges such as its high density and abrasiveness. A laboratory-scale ball mill model was designed. The calculations cover the critical speed, grinding charge, required power, and mechanical components such as the motor, transmission system, and bearings. A key innovation in this project is the integration of an Arduino-based automation system, allowing real-time control of speed, load, temperature, and humidity. This work aims to offer a technical solution tailored to industrial needs by combining mechanical performance with automated control, while optimizing energy consumption and extending equipment lifespan.

المخلص

يركّز هذا البحث على تصميم وتحديد أبعاد طاحونة كرات لمعالجة الهيماتيت، وهو خام حديد ذو قيمة صناعية عالية. تبدأ الدراسة بعرض لمبادئ الطحن، وأنواع الطواحين المختلفة، والخصائص الفيزيائية والكيميائية للهيماتيت، مع إبراز التحديات المرتبطة بطحنه مثل كثافته العالية وطبيعته الكاشطة. تم تصميم نموذج لطاحونة كرات على مستوى مخبري، وشملت الحسابات السرعة الحرجة، وحجم الشحنة الطحنية، والطاقة اللازمة، بالإضافة إلى المكونات الميكانيكية مثل المحرك، ونظام النقل، والمحامل. ومن أبرز الابتكارات في هذا المشروع إدماج نظام أتمتة قائم على متحكم أردوينو، مما يسمح بالتحكم في السرعة، والحمولة، ودرجة الحرارة، والرطوبة في الزمن الحقيقي. يهدف هذا العمل إلى تقديم حل تقني ملائم لاحتياجات الصناعة، من خلال الدمج بين الأداء الميكانيكي والتحكم الآلي، مع تحسين استهلاك الطاقة وإطالة عمر المعدات التشغيلية.

Table des matières

<i>Remerciements</i>	i
<i>Dédicaces</i>	ii
<i>Dédicaces</i>	iii
Résumé	iv
Abstract	iv
الملخص	iv
Liste des symboles	x
Liste des tableaux	xi
Liste des figures	xii
INTRODUCTION GENERALE	13
Introduction générale	1
Introduction	2
I-1. La définition du broyage	2
I .3 La définition d'un broyeur	3
I .4 Les familles des broyeurs	4
I .5 Les différents types de broyeurs	5
I.5.1 Broyeurs à barreaux	5
I.5.2 Broyeurs à Cylindres Verticaux (VRM)	5
I.5.3 Broyeurs à marteaux.....	6
I.5.4 Broyeurs à attrition	6
I.5.5 Broyeurs à jet.....	7
I.5.6 Broyeurs à billes planétaires	7
I.5.7 Broyeurs à boulets	8
I.6.L'Hématite	9
I.6.1 Propriétés chimiques et physiques de l'hématite.....	9
Composition :	9
Contenu en fer :	9
Structure cristalline :	9
Stabilité :	9
Propriétés rédox :	9
Propriétés magnétiques :	9

Chapitre I : Aperçu général sur le broyage et présentation de l'hématite

Comportement acido-basique :	10
Réactivité :	10
I.6.2 Utilisations industrielles de l'hématite.....	10
Minerai de fer :	10
Production d'acier :	10
Industrie des pigments et des peintures :	10
I.6. 3 L'exploitation de la mine de fer de Gara Djebilet.....	10
I.6.3.1 Exploration et extraction.....	11
I.6.3.2 Présentation du concassage	11
I.6.4 Contraintes technologiques liées au broyage de l'hématite.....	11
Conclusion	11
Introduction	14
II .1 Historique des broyeurs à boulets	14
II.1.1 Origines anciennes	14
II.1.2 Révolution industrielle (18e-19e siècle).....	14
II.1.3 20^e siècle : Améliorations et modernisation	15
II.1.4 21^e siècle : Innovations et durabilité.....	15
II .2 Principes de fonctionnement	15
II.2.1 Mécanismes de broyage.....	15
II.2.2 types de broyeurs à boulets (continu, discontinu).....	16
II .3 Technologies et matériaux utilisés	16
II.3.1 Matériaux des boulets.....	16
II .3.1.1 Acier au carbone :	16
II.3.1.2 Acier allié:.....	17
II.3.1.3 Fonte à haute teneur en chrome :	17
II .3.1.4 Céramique :	17
II.3.1.5 Zirconium :	18
II .4 Les composants du broyeur	18
II.4.1 Coquille cylindrique	18
II.4.2 Supports de broyage	19
II.4.3 Système d'entraînement	19
II.4.4 Système de décharge	19
II.4.5 Chemises	19
II.4.6 Châssis métallique.....	20
II.4.7 Matériau à broyer	20

II .5 Variables d'opération	21
II.5.1 La Vitesse de Rotation	21
II.5.2 La charge de boulets	21
II.5.3 La charge de minerai	22
II.5.4 Le blindage des broyeurs	22
II.5.6 L'énergie de fragmentation du broyeur	23
II.5.7 Effet de la dimension des boulets sur le broyage	24
II .6 – Schéma fonctionnel et coupes du broyeur	24
Conclusion	25
Introduction	27
III.1 Paramètres de broyage du broyeur à boulets	27
III.1 1. Rapport longueur/diamètre du broyeur	27
III.1 2. Calcul de la vitesse critique du broyeur	27
III.1 3. Calcul du volume du broyeur	28
III.1 4. Calcul du volume de la charge de broyage	28
III.1 5. Poids des constituants	29
III.1 6. Calcul du nombre de boulets	29
III.1 7. Intégration de l'automatisation avec Arduino	29
III.2 Puissance absorbée par le broyeur et contrôle par variateur de vitesse	30
III.3 Choix du moteur électrique	31
III.4 Automatisation avec Arduino	32
III.5 Détermination des rapports de transmission	32
III.6 Calcul de la transmission par courroies trapézoïdales	33
III.6.1 Choix du type de courroie	33
III.6.2 Diamètres des poulies	34
III.6.3 Longueur de la courroie et entraxe	34
III.6.4 Vitesse linéaire de la courroie	35
III.6.5 Nombre de courroies	35
III.6.6 Tension des brins et forces	35
III.7 Réducteur	35
III.7.1 Transmission par engrenage	36
III.7.2 Matériaux et contraintes	36
III.7.3 Dimensionnement	36
III.8 Accouplement	36
III.9 Calcul de la force sur la clavette	37

III.9.1 Calcul du couple transmis	37
III.10 Résistance des matériaux (RDM)	38
III.10.1 Dimensionnement de l'arbre	38
III.11 Calcul de roulement	39
III.12 Automatisation du système de broyage avec Arduino	40
III.12.1 Capteurs intégrés.....	41
III.12.2 Actionneurs utilisés	41
III.12.3 Logique de fonctionnement	41
III.13. Représentation du broyeur conçu et intégration de l'automatisation	41
III.14. Programmation du système de contrôle avec Arduino	44
Conclusion	44
Introduction	46
IV.1 Fabrication du prototype	46
IV.1.1 Composants et matériaux utilisés	46
IV.1.2 Étapes d'assemblage.....	46
IV.2 Prototype assemblé	46
IV.3 Système de commande et automatisation	47
IV.3.1 Variateur de vitesse	47
IV.3.2 Automatisation prévue	47
Conclusion	48
Conclusion Générale	49
Références Bibliographiques	50
Annexe A : Code Arduino du système de contrôle	51

Liste des symboles

a	: Profondeur entre le centre du broyeur et le dessus de la charge (m) A
A	: L'entraxe entre les deux poulies
B	: Diamètre des boulets (mm)
C_1	: Le couple reçu par l'arbre 1
D	: le diamètre interne du broyeur
D_{in}	: Diamètre intérieur du blindage du broyeur
F	: des facteurs correctifs
f	: fraction de la vitesse critique
h	: Hauteur au-dessus de la charge (m)
j	: taux de remplissage du broyeur
L_p	: La longueur de la courroie à l'état libre
M	: Le module
m_b	: Masse des boulets
V_c	: vitesse de rotation critique (tr/min)
N_M	: vitesse de rotation de moteur
P_b	: Poids des boulets
P_M	: La puissance de moteur
P_h	: Poids de Hematite
r_b	: Le rayon du boulet
r_f	: Rayon interne de la fiole (broyeur)
S	: Longueur de la corde (m)
V_h	: Volume apparent d'hematite

Liste des tableaux

TAB. II. 1 Comparaison des principaux matériaux utilisés pour les boulets de broyage

18

Liste des figures

FIGURE I. 1 LES ACTIONS DE SOLLICITATION [1]	3
FIGURE I. 2 REGIMES DE BROYAGE DANS UN BROEUR A BOULETS (AXE HORIZONTAL), VITESSE DE ROTATION DU BROEUR CROISSANTE DE GAUCHE A DROITE [2]	3
FIGURE I. 3 LES DIFFERENTS ELEMENTS D'UN BROEUR [3]	4
FIGURE I. 4 LES DIFFERENTS ELEMENTS D'UN BROEUR [3]	5
FIGURE I. 5 BROEURS A CYLINDRES VERTICAUX (VRM) [5]	6
FIGURE I. 6 BROEURS A MARTEAUX [6]	6
FIGURE I. 7 BROEURS A ATTRITION [7]	7
FIGURE I. 8 BROEURS A JET [8]	7
FIGURE I. 9 BROEURS A BILLES PLANETAIRES [9]	8
FIGURE I. 10 PRINCIPE DE BROEUR A BOULETS [10]	8
FIGURE II 1 BOULETS EN ACIER AU CARBON [12]	17
FIGURE II 2: BOULETS EN FONTE [13]	17
FIGURE II 3 BOULETS EN CERAMIQUE [14]	18
FIGURE II 4 REGIMES DE BROYAGE DANS UN BROEUR A BOULETS (AXE HORIZONTAL), VITESSE DE ROTATION DU BROEUR CROISSANTE DE GAUCHE A DROITE [15]	20
FIGURE II 5 ILLUSTRE LES FORMES DE BLINDAGE LES PLUS COURAMMENT ADOPTES POUR LA VIROLE DU BROEUR [17]	23
FIGURE II 6 COUPES DU BROEUR	25
FIGURE III. 1 NOMOGRAMME POUR LE CHOIX DES COURROIES TRAPEZOÏDALES ETROITES.	34
FIGURE III. 2 FORCES DANS LES COURROIES TRAPEZOÏDALES ETROITES	35
FIGURE III. 3 ACCOUPLEMENT ELASTIQUE COMPACT	37
FIGURE III. 4 REPRESENTATION DES EFFORTS APPLIQUES SUR L'ARBRE	39
FIGURE III. 5 VUE GLOBALE DU BROEUR CONÇU AVEC SYSTEME D'AUTOMATISATION	43
FIGURE III. 6 SCHEMA COTE DU BROEUR AVEC INTEGRATION DES COMPOSANTS D'AUTOMATISATION	43
FIGURE IV 1 PROTOTYPE DU BROEUR A BOULETS – TRANSMISSION PAR CHAINE	47

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'hématite (Fe_2O_3), minéral de fer d'importance stratégique, est une ressource minière essentielle dans le secteur métallurgique. Sa transformation en produits finis, notamment pour la production d'acier, exige des procédés de broyage intensifs, particulièrement coûteux en énergie.

Dans un contexte industriel marqué par la nécessité d'améliorer la compétitivité et de réduire les coûts, la conception d'équipements performants devient une priorité. Le broyeur à boulets, reconnu pour sa robustesse et sa capacité à traiter des matériaux durs, s'impose comme un outil incontournable pour le traitement de l'hématite.

Ce mémoire présente l'étude complète d'un broyeur à boulets, depuis les principes fondamentaux du broyage jusqu'au dimensionnement mécanique et énergétique d'un prototype de laboratoire. Une dimension d'automatisation, utilisant la carte Arduino, a été intégrée afin d'optimiser le fonctionnement du système en temps réel.

Le travail est structuré en quatre chapitres principaux :

Chapitre I : Aperçu général sur le broyage et présentation de l'hématite. Ce chapitre traite des bases du broyage, des types de broyeurs et des propriétés du minéral étudié.

Chapitre II : Aperçu sur le broyeur à boulets. Sont présentés ici les principes de fonctionnement, l'évolution historique, les composants et les paramètres de fonctionnement du broyeur à boulets.

Chapitre III : Dimensionnement du broyeur à boulets pour l'hématite. Ce chapitre détaille les calculs nécessaires à la conception, le choix des composants mécaniques et électriques, ainsi que l'intégration d'un système de régulation automatisé.

Chapitre IV : Description du broyeur à boulets. Présentation détaillée du broyeur conçu, de ses éléments constitutifs, ainsi que des avantages liés à l'utilisation de certains matériaux (ex. : revêtement en caoutchouc).

Ce travail vise à répondre aux besoins d'un broyage efficace de l'hématite dans un contexte industriel, en proposant une solution technologique adaptable, efficace et durable.

CHAPITRE I :
APERÇU GENERAL SUR LE BROUAGE
ET PRESENTATION DE L'HEMATITE

Introduction

Le broyage est une opération unitaire essentielle dans les procédés de valorisation des minerais. Il permet de réduire les matériaux en particules fines, favorisant ainsi leur transformation, leur séparation ou leur traitement chimique. Dans le cadre de notre projet de conception d'un broyeur à boulets dédié au traitement de l'hématite, il est impératif de comprendre les principes fondamentaux du broyage ainsi que les types de broyeurs disponibles dans l'industrie.

Ce chapitre vise d'abord à présenter les mécanismes de broyage et les technologies associées, en mettant en évidence les différentes familles et configurations de broyeurs. Dans un second temps, l'attention sera portée sur l'hématite, minerai ferreux d'intérêt stratégique, en explorant ses propriétés physico-chimiques, ses utilisations industrielles, ainsi que ses contraintes spécifiques en matière de broyage.

Cette analyse théorique constitue une base essentielle pour le dimensionnement, la sélection des matériaux, et la configuration du broyeur étudié dans ce mémoire.

I-1. La définition du broyage

Le broyage consiste à fragmenter ou pulvériser une matière en petits morceaux ou en poudre. Pour cela, il faut l'exposer à des forces qui dépassent sa capacité de résistance, et on parle alors dans le cadre de la RDM de dépassement du domaine d'élasticité et seuil critique de la matière, pour être ramenée à son domaine de rupture [1].

Dans la nature, il existe cinq types d'interactions principales pouvant être appliquées à un matériau : compression, traction, cisaillement, flexion et torsion. Il est également possible de combiner ces actions.

Le broyage à sec est une méthode dans laquelle les matériaux sont broyés ou pulvérisés sans ajout d'eau ou de tout autre liquide. Ce processus est généralement utilisé dans les situations où il est nécessaire de minimiser la teneur en humidité. Il s'agit d'une méthode plus rapide et plus rentable que le broyage humide puisqu'il n'est pas nécessaire de sécher le produit obtenu après le traitement. Le broyage à sec est principalement utilisé dans l'industrie minière pour extraire des minéraux précieux des minerais.

D'autre part, le broyage humide est une méthode dans laquelle les matériaux sont broyés ou pulvérisés à l'aide d'un liquide, généralement de l'eau. Ce procédé est utilisé dans de nombreuses industries, telles que l'agroalimentaire, les produits pharmaceutiques et cosmétiques, pour fabriquer divers produits. Le broyage humide est avantageux car il permet un meilleur contrôle du processus de broyage, ce qui donne un produit plus fin et plus uniforme. Cela réduit également la poussière et la chaleur générées pendant le processus.

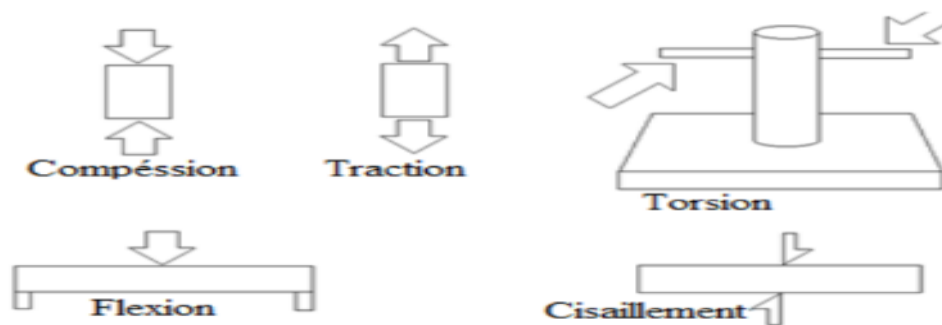


Figure I. 1 Les actions de sollicitation [1]

I-2. Les Régimes de Fonctionnement

La vitesse de rotation du broyeur constitue un élément déterminant dans le processus de broyage. Ce paramètre est celui qui détermine le régime de fonctionnement du broyeur.

À vitesse réduite, ce régime est qualifié de « cascade ». En effet, dans cette configuration, la charge broyante tend à se déplacer en roulant jusqu'au point le plus bas du cylindre.

À des vitesses plus élevées, le régime est désigné comme étant « cataracte ». Dans ce cas, la charge broyante est projetée sur les granulats à broyer selon une série de trajectoires paraboliques, se soldant par un écrasement de ces derniers.

Lorsque la vitesse continue d'augmenter, la charge broyante ainsi que les granulats sont pressés contre les parois du broyeur, ce qui empêche toute réduction supplémentaire de taille. Ce phénomène correspond à la vitesse critique du système.

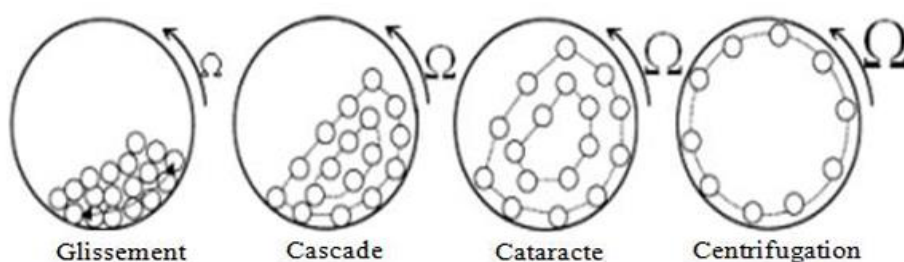


Figure I. 2 Régimes de broyage dans un broyeur à boulets (axe horizontal), vitesse de rotation du broyeur croissante de gauche à droite [2]

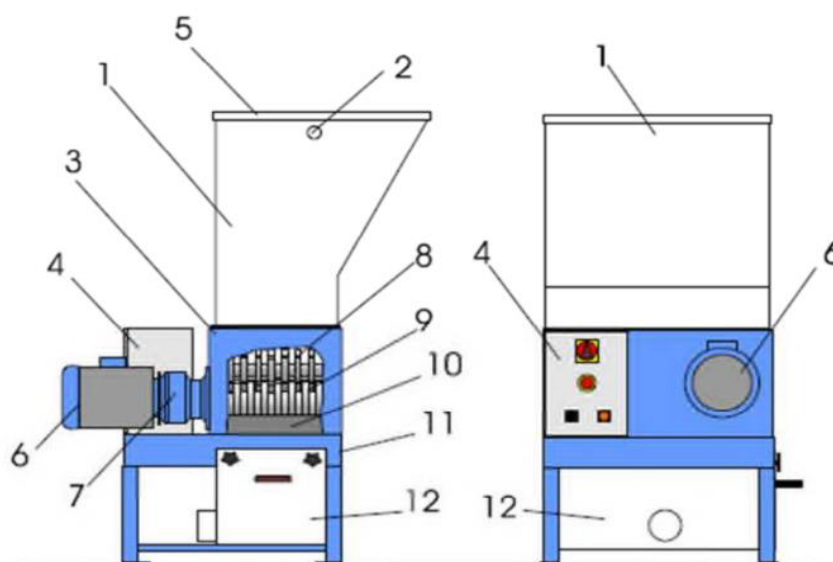
I.3 La définition d'un broyeur

Un broyeur est une machine de broyage des matériaux qui est réalisée par un mariage de deux parties suivantes :

Partie électrique qui contient un circuit de commande (tableau de commande) et un circuit de puissance (moteur électrique ou thermique).

Partie mécanique qui comporte une trémie, des axes, des outils de broyage (Couteaux, lames, marteaux... etc.), un réducteur de vitesse, et une carcasse qui assure

l'assemblage de tous ces éléments... etc. [1]



Numero	DESCRIPTION
1	Tremie de chargement
2	Orifice de levage et de transport
3	Corps de la machine
4	Tableau électrique
5	Couvercel de la tremie
6	Moteur
7	Reducteur epicycloidal
8	Disque d'introduction
9	Groupe fraise
10	Grille
11	Base de la machine
12	Reciption avec goulot d'evacuation

Figure I. 3 les differents elements d'un broyeur [3]

I.4 Les familles des broyeurs

Quel que soit le type de broyage, qu'il soit sec ou humide, les mécanismes impliqués dans la fragmentation demeurent les mêmes. La seule distinction concerne l'utilisation finale du produit.

Pour classer ces broyeurs, nous nous référons au mode de fonctionnement. Selon Meric (25), cette classification peut s'organiser de la manière suivante :

- Les broyeurs à écrasement lent, tels que les broyeurs à meules,
- Les broyeurs utilisant la percussion, la compression ou les chocs, comme les broyeurs à boulets.

En réalité, la diversité des broyeurs disponibles est incommensurable. La plupart d'entre eux fonctionnent de manière complexe, intégrant plusieurs mécanismes. C'est pourquoi les classifications récentes s'appuient sur un regroupement par famille de broyeurs :

- Les broyeurs à chute, tels que les broyeurs à boulets, à barres, semi-autogènes et autogènes.
- Les broyeurs à écrasement vertical, comprenant les broyeurs à meules et à cylindres.

Les broyeurs de conception récente présentent deux caractéristiques majeures : une réduction du nombre de pièces mécaniques en mouvement et une augmentation, même si elle est localisée, de l'énergie réellement dédiée à la fragmentation.

I.5 Les différents types de broyeurs

I.5.1 Broyeurs à barreaux

Les broyeurs à barreaux fonctionnent de manière similaire aux broyeurs à boulets, mais utilisent de longues tiges en acier comme éléments de broyage plutôt que des boulets.

Principe de fonctionnement : Les barres s'entrechoquent et broient le matériau par un mouvement de rotation et de glissement à l'intérieur du broyeur.



Figure I. 4 les différents éléments d'un broyeur [3]

I.5.2 Broyeurs à Cylindres Verticaux (VRM)

Les broyeurs à cylindres verticaux (VRM) constituent des équipements de broyage de pointe qui exploitent des rouleaux pour écraser et réduire en poudre les matériaux en les soumettant à une pression contre une table rotative.

Principe de fonctionnement : Le matériau est introduit sur la table rotative, où il est broyé par les rouleaux, lesquels exercent des forces de pression et de cisaillement sur celui-ci.



Figure I. 5 Broyeurs à cylindres verticaux (VRM) [5]

I.5.3 Broyeurs à marteaux

Les broyeurs à marteaux sont des dispositifs qui emploient des marteaux rotatifs pour écraser et broyer divers matériaux.

Principe de fonctionnement : Le matériau est introduit dans la chambre du broyeur, où il est frappé par les marteaux, ce qui entraîne sa pulvérisation en particules de plus petite taille.

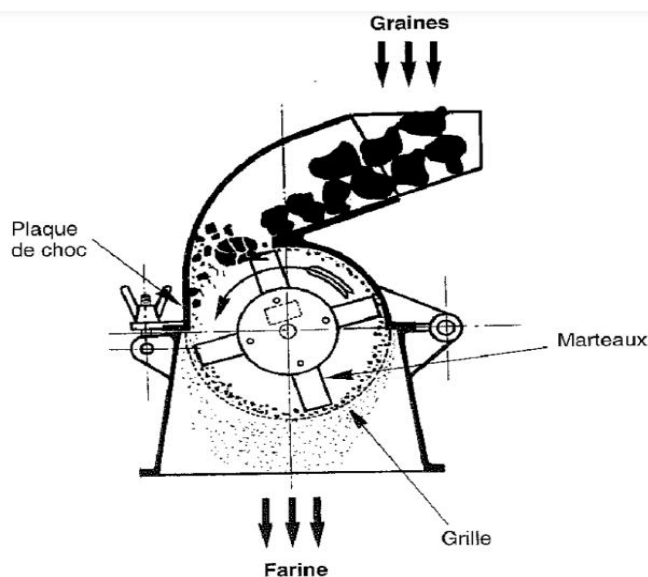


Figure I. 6 Broyeurs à marteaux [6]

I.5.4 Broyeurs à attrition

Les broyeurs à attrition utilisent une série de disques ou de plaques en rotation pour broyer les matériaux par friction et cisaillement.

Principe de fonctionnement : La matière est introduite entre les disques rotatifs, où elle est broyée par l'action de frottement.

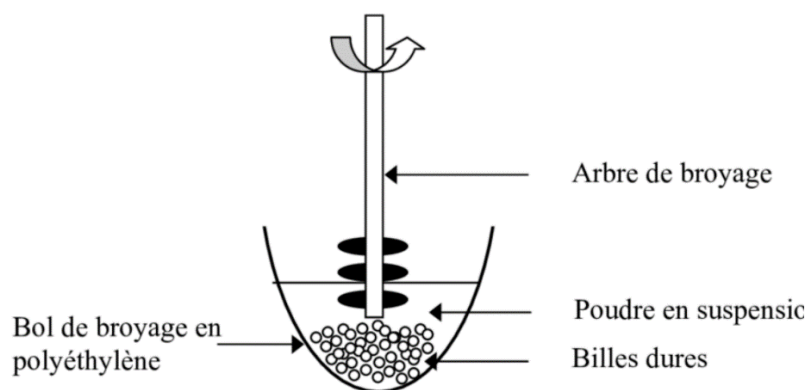
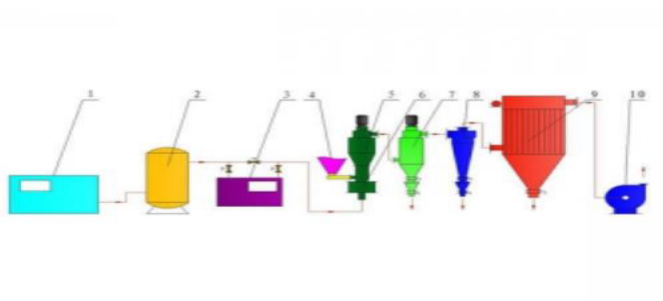


Figure I. 7 Broyeurs à attrition [7]

I.5.5 Broyeurs à jet

Les broyeurs à jet exploitent des jets d'air ou de gaz comprimé à grande vitesse pour réduire les matériaux par impact entre les particules.

Principe de fonctionnement : le matériau est introduit dans une chambre où il est accéléré par les jets, ce qui entraîne des collisions avec d'autres particules, provoquant ainsi une diminution de la taille des particules.



1. Compresseur à air

3. Lyophilisateur

5. Classificateur

7. Classificateur

9. Collecteur à impulsion à sac

2. Réservoir à air

4. Alimentation

6. Machine principale du broyeur à jet cyclonique

8. Collecteur cyclonique

10. Ventilateur de tirage

Figure I. 8 Broyeurs à jet [8]

I.5.6 Broyeurs à billes planétaires

Les broyeurs à billes planétaires constituent des appareils de broyage de dimensions réduites, mais d'une grande puissance énergétique. Ils fonctionnent en utilisant plusieurs bocaux de broyage qui tournent autour d'un axe central.

Principe de fonctionnement : Les boccas de broyage effectuent des rotations dans des directions opposées, ce qui engendre des impacts à haute énergie permettant ainsi de réduire le matériau en poudre.

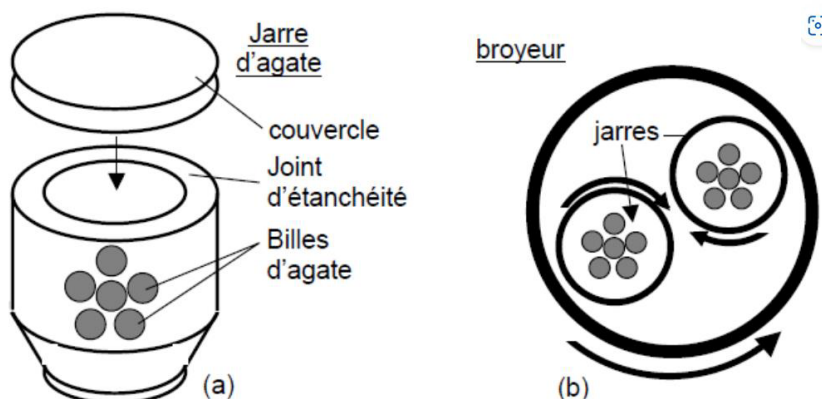


Figure I. 9 Broyeurs à billes planétaires [9]

I.5.7 Broyeurs à boulets

Les broyeurs à boulets sont des dispositifs cylindriques qui tournent autour d'un axe horizontal et sont partiellement remplis d'un agent de broyage (généralement des billes en acier ou en céramique).

Principe de fonctionnement : le matériau est introduit dans le broyeur et broyé par l'impact et l'attrition des éléments broyants lors de la rotation du broyeur.

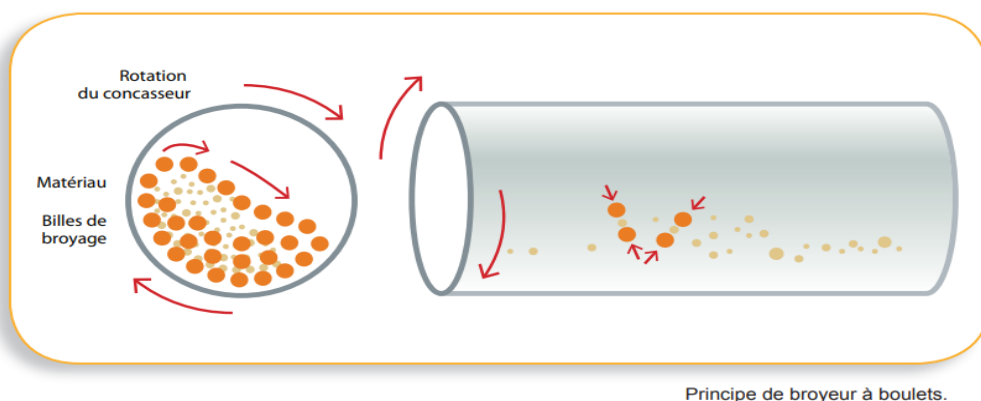


Figure I. 10 Principe de broyeur à boulets [10]

Après avoir exploré les différents dispositifs et principes du broyage, il est essentiel de comprendre les caractéristiques du matériau à traiter, à savoir l'hématite. Ce minerai, riche en fer,

présente des particularités physiques et chimiques qui influencent directement le choix du type de broyeur et ses paramètres de fonctionnement.

I.6.L'Hématite

L'hématite est un minéral et une forme courante de fonte oxyde. Il est connu pour son éclat métallique distinctif brun rougeâtre à noir. Le nom « hématite » est dérivé du mot grec « haima », qui signifie sang, en raison de sa couleur rougeâtre lorsqu'il est en poudre ou sous forme de grains fins.

L'hématite a une formule chimique Fe_2O_3 , indiquant qu'elle est constituée de deux atomes de fer (Fe) liés à trois atomes d'oxygène (O). Il a une teneur élevée en fer et constitue l'un des minerais de fer les plus abondants sur Terre. On le trouve souvent dans les milieux sédimentaires, métamorphiques et roches ignées.

I.6.1 Propriétés chimiques et physiques de l'hématite

Composition : L'hématite est constituée d'atomes de fer (Fe) et d'atomes d'oxygène (O), ayant une proportion de deux atomes de fer associés à trois atomes d'oxygène dans chaque unité de formule (Fe_2O_3).

Contenu en fer : L'hématite est une source précieuse de fer, représentant généralement environ 70 % de fer en poids. Cette importante quantité de fer en fait une ressource utile pour l'extraction du fer et la production d'acier.

Structure cristalline : L'hématite se cristallise dans le système cristallin trigonal, donnant naissance à des cristaux rhomboédriques. La structure cristalline est composée d'atomes d'oxygène qui sont proches les uns des autres, tandis que des ions de fer occupent des emplacements interstitiels.

Stabilité : L'hématite est un composé qui demeure stable dans des conditions normales. Il est résistant aux produits chimiques qui causent l'érosion et demeure relativement inchangé pendant de longues périodes.

Propriétés rédox : L'hématite possède la capacité de s'engager dans des réactions d'oxydoréduction, ce qui signifie qu'elle peut émettre et recevoir des électrons. Il peut être transformé en magnétite (Fe_3O_4) ou en fer métal grâce à des agents réducteurs.

Propriétés magnétiques : la calcite pure n'est pas elle-même magnétique ; néanmoins, certains échantillons de calcite peuvent montrer un léger magnétisme en raison de la présence de faibles quantités d'impuretés de magnétite. Ces échantillons d'hématite magnétique sont souvent utilisés dans des applications de bijouterie et de thérapie.

Comportement acido-basique : L'hématite reste non soluble dans l'eau et dans la plupart des acides. Il est stable et non affecté par des acides faibles tels que l'acide chlorhydrique dilué ou l'acide sulfurique. Néanmoins, les acides en forte concentration ainsi que les bases puissantes peuvent, avec le temps, nuire et dissoudre l'hématite.

Réactivité : la magnétite peut participer à des réactions avec différentes substances chimiques dans des conditions appropriées.

I.6.2 Utilisations industrielles de l'hématite

Minerai de fer : L'hématite est l'une des principales sources de minerai de fer. Il est largement exploité pour sa teneur en fer, qui est extraite et traitée pour produire du fer et de l'acier. Le fer et l'acier sont des matériaux essentiels utilisés dans la construction, la fabrication, les transports et bien d'autres industries.

Production d'acier : L'hématite est un ingrédient clé dans la production de l'acier. Il est utilisé comme matière première de minerai de fer pour les hauts fourneaux. Le fer extrait de l'hématite est combiné à d'autres matériaux, tels que le coke (carbone) et le calcaire, dans le haut fourneau pour produire de la fonte en fusion. Ce fer en fusion est ensuite converti en acier par divers processus de raffinage.

Industrie des pigments et des peintures : L'hématite est également utilisée comme pigment dans l'industrie des peintures et des pigments. Sa couleur distinctive allant du brun rougeâtre au noir, ainsi que sa capacité à fournir opacité et durabilité, le rendent adapté à la production de pigments rouges et bruns. Les pigments hématite sont utilisés dans diverses applications, notamment les peintures, les revêtements, les encres, les plastiques et les céramiques.

I.6.3 L'exploitation de la mine de fer de Gara Djebilet

Élément chimique utilisé depuis la préhistoire, le fer compose 5 % de la croûte terrestre. Les alliages contenant du fer étant utiles dans l'alimentation, les médicaments, mais surtout pour la fonte et tous les produits de la sidérurgie, environ 98 % étant destinés à l'acier, dont 70 % de matières premières brutes et 30 % à partir de la ferraille. Le minerai de fer est une roche contenant du fer, généralement sous la forme d'oxydes, comme l'hématite. Les minerais de fer ont une teneur en fer variable selon le minéral ferrique ; sachant également que l'isomorphisme, presque toujours présent dans les minéraux naturels, réduit la teneur théorique. Par rapport à leur teneur en fer, les minerais sont classés en minerais pauvres : $Fe = 30 \%$, en minerais moyens : $Fe = 30 \% \div 50 \%$; et en minerais riches : $Fe = 50 \%$.

Le processus d'exploitation du minerai de fer se déroule en différentes phases, débutant par l'exploration et l'extraction, puis se poursuivant avec le concassage, le criblage et l'enrichissement.

Chacune de ces phases est cruciale pour garantir une extraction optimale du fer contenu dans le minerai, tout en réduisant les déchets.

I.6.3.1 Exploration et extraction

L'exploration consiste à identifier des gisements de minerai de fer viables au moyen d'études géologiques et de forages. Une fois le gisement localisé, les méthodes d'extraction dépendent de la profondeur et des caractéristiques du minerai. Les deux principales méthodes sont : Exploitation à ciel ouvert et exploitation minière souterraine

I.6.3.2 Présentation du concassage

Le concassage est le processus de réduction de gros morceaux de minerai de fer en morceaux plus petits et plus faciles à gérer. L'objectif principal du concassage est de réduire la taille du minerai pour le rendre apte à un traitement ultérieur, comme l'enrichissement. Le concassage est essentiel car il améliore la surface du matériau en utilisant le broyeur à boulets.

I.6.4 Contraintes technologiques liées au broyage de l'hématite

L'hématite est un minerai dense (masse volumique de $5,26 \text{ g/cm}^3$) et relativement dur (dureté Mohs : 5,5 – 6,5), ce qui la rend difficile à broyer finement sans une forte consommation d'énergie. Ces propriétés imposent le recours à des broyeurs robustes comme les broyeurs à boulets. La densité élevée de l'hématite influence le choix de la charge broyante, avec des boulets de plus grand diamètre pour favoriser l'impact. De plus, son pouvoir abrasif élevé nécessite l'emploi de revêtements internes (chemises) résistants à l'usure, comme le caoutchouc ou les aciers alliés.

La faible porosité du minerai réduit aussi les effets de lubrification dans le broyage humide, ce qui demande un contrôle précis de l'humidité. Ces contraintes justifient le dimensionnement spécifique du broyeur à boulets proposé dans notre étude.

Conclusion

Ce premier chapitre a permis d'établir les bases théoriques nécessaires à la compréhension du processus de broyage, en insistant sur les différents types de broyeurs et leurs mécanismes de fonctionnement. Il a également introduit l'hématite, minerai objet de cette étude, en détaillant ses propriétés, ses usages industriels et ses conditions d'exploitation en Algérie.

Nous avons souligné les défis techniques que pose le broyage de ce minerai, en justifiant les choix technologiques du broyeur proposé.

Ce socle théorique est essentiel pour aborder dans les prochains chapitres la conception spécifique d'un broyeur à boulets destiné à traiter ce matériau.

Chapitre I : Aperçu général sur le broyage et présentation de l'hématite

Dans ce contexte, le chapitre suivant sera consacré à une étude détaillée du broyeur à boulets. Nous y analyserons son fonctionnement, ses variantes, ses composants, ainsi que les paramètres opérationnels qui conditionnent son efficacité dans le broyage de l'hématite.

CHAPITRE II

APERÇU SUR LE BROYEUR A BOULET

Introduction

Le broyeur à boulets est un équipement incontournable dans les procédés de broyage utilisés dans les industries minières et métallurgiques. Compte tenu de ses performances et de sa robustesse, il est particulièrement adapté au traitement de minerais durs comme l'hématite.

Ce chapitre présente les éléments essentiels à la compréhension de son fonctionnement. Après un bref rappel historique, nous décrivons les principes de broyage, les différents types de broyeurs à boulets, ainsi que les matériaux utilisés pour les boulets. Les composants mécaniques principaux sont également analysés, ainsi que les paramètres opérationnels qui influencent directement l'efficacité du broyage.

Cette étude constitue une base indispensable pour le dimensionnement technique du broyeur présenté dans le chapitre suivant.

II.1 Historique des broyeurs à boulets

Evolution de la conception et des applications industrielles.

Les broyeurs à boulets sont des équipements utilisés dans l'industrie pour réduire la taille des matériaux, généralement en les broyant en une poudre fine. Leur histoire remonte à plusieurs siècles et est marquée par des évolutions technologiques significatives.

II.1.1 Origines anciennes

Antiquité : Les premières formes de broyage remontent à l'Antiquité, où les hommes utilisaient des pierres pour écraser des grains et d'autres matériaux. Cependant, ces méthodes étaient rudimentaires et manuelles.

Moyen Âge : Les moulins à eau et à vent ont commencé à être utilisés pour broyer des matériaux, mais ces systèmes étaient encore limités en termes de capacité et de finesse de broyage.

II.1.2 Révolution industrielle (18e-19e siècle)

18e siècle : Avec l'avènement de la Révolution industrielle, la demande pour des méthodes de broyage plus efficaces a augmenté. Les premières versions de broyeurs à boulets ont commencé à apparaître, utilisant des boulets en métal pour broyer les matériaux.

19e siècle : Les broyeurs à boulets ont été largement adoptés dans l'industrie minière et métallurgique. Ils étaient utilisés pour broyer le minerai en une poudre fine, facilitant ainsi

l'extraction des métaux. Les premières conceptions étaient simples, avec des cylindres rotatifs contenant des boulets en acier ou en fer.

II.1.3 20^e siècle : Améliorations et modernisation

Début du 20^e siècle : Les broyeurs à boulets ont été améliorés avec l'introduction de matériaux plus résistants et de conceptions plus efficaces. Les revêtements internes des broyeurs ont été optimisés pour réduire l'usure et augmenter la durée de vie des équipements.

Milieu du 20^e siècle : L'automatisation et le contrôle des processus ont commencé à être intégrés dans les broyeurs à boulets, permettant une meilleure régulation de la finesse du produit final et une réduction des coûts opérationnels.

Fin du 20^e siècle : Les broyeurs à boulets ont continué à évoluer avec l'introduction de technologies de broyage à haute performance, telles que les broyeurs à boulets à décharge centrale et les broyeurs à boulets à compartiments multiples.

II.1.4 21^e siècle : Innovations et durabilité

Début du 21^e siècle : Les broyeurs à boulets ont bénéficié de l'utilisation de matériaux composites et de revêtements céramiques, améliorant leur efficacité et réduisant leur impact environnemental.

Années 2010 et au-delà : Les préoccupations environnementales et la nécessité de réduire la consommation d'énergie ont conduit à des innovations dans la conception des broyeurs à boulets.

Les systèmes de broyage à haute efficacité énergétique et les technologies de recyclage des matériaux sont devenus des priorités

II.2 Principes de fonctionnement

II.2.1 Mécanismes de broyage

Met en œuvre un mode de fragmentation complexe où interviennent simultanément des forces de frottement, d'écrasement et de percussion. Il se compose d'un tambour cylindro-conique revêtu intérieurement de plaques de blindage et partiellement rempli de corps broyant. La rotation du broyeur provoque le brassage du matériau à traiter avec les boulets.

Le broyage peut s'effectuer en voie sèche avec des boulets.

La nature et la quantité de corps broyant sont en fonction de la nature du matériau à traiter et de ses granulométries d'entrée et de sortie.

Le broyeur travaille généralement en association avec un appareil de classification (boucle fermée avec un crible ou un hydro cyclone) destiné à retirer du produit broyé les particules ayant atteint la taille désirée et ne renvoyer au broyage que les fractions n'ayant pas encore atteint ce degré de finesse (charge circulante).

II.2.2 types de broyeurs à boulets (continu, discontinu)

Le broyeur à boulets continu fonctionne en flux ininterrompu, où les matériaux sont introduits en permanence à une extrémité et le produit fini est extrait en continu à l'autre extrémité.

Ce type de broyeur est particulièrement adapté aux industries nécessitant une production à grande échelle, comme les cimenteries, les mines ou l'industrie chimique. Il offre une efficacité énergétique optimisée pour les opérations massives et permet une intégration facile dans des systèmes automatisés. Cependant, il nécessite un contrôle précis des paramètres de fonctionnement, comme le débit et la taille des boulets, et est moins flexible pour s'adapter à des changements fréquents de matériaux ou de conditions de broyage. De plus, son investissement initial est généralement élevé.

En revanche, le broyeur à boulets discontinu fonctionne par lots. Les matériaux sont chargés, broyés pendant un temps déterminé, puis déchargés avant de recommencer avec un nouveau lot. Ce type de broyeur est idéal pour les applications nécessitant une grande flexibilité, comme dans les laboratoires de recherche, l'industrie pharmaceutique ou la production de céramique fine. Il permet un contrôle précis de chaque lot et facilite le nettoyage entre les cycles, ce qui est crucial pour éviter les contaminations croisées. Cependant, il est moins adapté aux grandes productions en raison de ses temps d'arrêt fréquents entre les lots et de sa moindre efficacité énergétique pour les volumes importants. Son coût d'investissement est généralement plus modéré que celui d'un broyeur continu.

II.3 Technologies et matériaux utilisés

II.3.1 Matériaux des boulets

Les matériaux constituant les boulets jouent un rôle essentiel dans l'efficacité du broyage. Leur choix dépend principalement de la dureté du minerai, de l'environnement chimique (broyage sec ou humide), de la résistance à l'usure et du coût du matériau.

Les principaux matériaux utilisés sont :

II.3.1.1 Acier au carbone : Les boulets en acier au carbone sont économiques et largement utilisés pour le broyage de matériaux peu abrasifs. Cependant, ils s'usent plus rapidement que d'autres matériaux plus résistants.



Figure II 1 boulets en acier au carbon [12]

II.3.1.2 Acier allié: Les boulets en acier allié contiennent des éléments comme le chrome, le manganèse, et le molybdène, qui améliorent leur dureté et leur résistance à l'usure. Ces boulets sont adaptés pour le broyage de matériaux plus durs et abrasifs.

II.3.1.3 Fonte à haute teneur en chrome : Les boulets en fonte à haute teneur en chrome (généralement entre 10% et 30% de chrome) sont très résistants à l'usure et à la corrosion. Ils sont idéaux pour le broyage de matériaux très abrasifs et sont couramment utilisés dans les industries minières et cimentières.



Figure II 2: boulets en fonte [13]

II.3.1.4 Céramique : Les boulets en céramique (par exemple, en alumine) sont utilisés dans des applications spécifiques où la contamination par des métaux doit être évitée, comme dans l'industrie pharmaceutique ou alimentaire. Ils sont également résistants à l'usure mais peuvent être fragiles.



Figure II 3 boulets en ceramique [14]

II.3.1.5 Zirconium : Les boulets en zircone (oxyde de zirconium) sont utilisés pour leur résistance à l'usure et leur inertie chimique, ce qui les rend adaptés pour des applications où la pureté des matériaux broyés est critique.

Ce tableau comparatif permet de mieux orienter le choix des boulets en fonction de la nature du minerai à broyer et des exigences du procédé.

Matériau	Dureté	Résistance à l'usure	Coût	Application typique
Acier	Élevée	Bonne	Faible	Minerais durs, broyage standard
Fonte	Moyenne	Moyenne à bonne	Moyen	Milieus abrasifs, environnement humide
Céramique	Élevée	Très élevée	Élevé	Broyage sans contamination métallique
Zirconium	Très élevée	Très élevée	Très élevé	Procédés de haute pureté, laboratoire

Tab. II. 1 Comparaison des principaux matériaux utilisés pour les boulets de broyage

II.4 Les composants du broyeur

II.4.1 Coquille cylindrique

La coquille cylindrique est la structure principale du broyeur à boulets, généralement en métal et conçue pour tourner autour de son axe.

Elle peut être horizontale ou légèrement inclinée, en fonction de la conception et de l'application.

La coquille est partiellement remplie d'éléments de broyage et du matériau à broyer.

Sa rotation facilite l'action de culbutage et de broyage de l'agent, garantissant ainsi une décomposition efficace de la matière.

II.4.2 Supports de broyage

Les agents de broyage sont les billes ou autres formes placées à l'intérieur de la coquille cylindrique pour effectuer le broyage.

Ces billes sont généralement fabriquées dans des matériaux tels que l'acier, l'acier inoxydable, la céramique ou le caoutchouc, en fonction de l'application et du matériau à broyer.

Les grosses billes sont utilisées pour broyer les matériaux grossiers, tandis que les petites billes réduisent les espaces vides et produisent des produits plus fins.

Le choix du matériau et de la taille du support de broyage a un impact significatif sur l'efficacité du broyage et la qualité du produit final.

II.4.3 Système d'entraînement

Le système d'entraînement est responsable de la rotation de l'enveloppe cylindrique.

Il comprend généralement un moteur électrique, une boîte de vitesses et d'autres composants mécaniques pour assurer une rotation régulière et contrôlée.

La vitesse de rotation peut être réglée pour optimiser l'efficacité du broyage en fonction des différents matériaux et des tailles de particules souhaitées.

Un système d'entraînement bien conçu assure un fonctionnement régulier et minimise la consommation d'énergie.

II.4.4 Système de décharge

Le système de décharge permet au matériau broyé de sortir du broyeur à boulets une fois le processus de broyage terminé.

Il peut comprendre des mécanismes tels que des grilles, des cribles ou des systèmes de débordement, en fonction de la conception.

Le système de décharge garantit que seuls les matériaux correctement broyés sortent du broyeur, tandis que les particules plus grosses continuent d'être broyées. Une bonne conception du système de décharge est essentielle pour maintenir l'efficacité du broyage et éviter les blocages.

II.4.5 Chemises

Les chemises sont des couches protectrices installées sur la surface intérieure de l'enveloppe cylindrique pour prévenir l'usure causée par le produit de broyage et le matériau.

Les matériaux courants des chemises sont l'acier au manganèse, le caoutchouc ou d'autres matériaux résistant à l'abrasion.

Les revêtements ne protègent pas seulement l'enveloppe, ils améliorent également l'efficacité du broyage en optimisant le mouvement de l'agent de broyage.

L'inspection et le remplacement réguliers des revêtements sont nécessaires pour maintenir les performances et la longévité du broyeur à boulets.

II.4.6 Châssis métallique

Le cadre métallique fournit un support structural à l'ensemble du broyeur à boulets.

Il assure la stabilité pendant le fonctionnement et supporte le poids de la coquille cylindrique, du matériau de broyage et du matériel.

Le bâti est généralement fabriqué dans des matériaux durables pour résister aux contraintes et aux vibrations générées pendant le broyage.

Une conception robuste du bâti est essentielle pour assurer un fonctionnement sûr et fiable.

II.4.7 Matériau à broyer

Le matériau à broyer est introduit dans la coquille cylindrique avec l'agent de broyage.

Le type et les propriétés du matériau (dureté, teneur en eau, etc.) influencent le choix du support de broyage et des paramètres de fonctionnement.

Une alimentation et une distribution correctes du matériau dans le broyeur sont essentielles pour obtenir un broyage uniforme et la taille de particule souhaitée.

Dans un broyeur à boulets classique, le mouvement des boulets est fonction de la Vitesse de rotation et du diamètre interne du broyeur. Ce mouvement a une influence sur les modes de broyage mis en jeu pour broyer la poudre. Pour un même diamètre de broyeur, lorsque la vitesse augmente, les billes passent d'un régime de glissement à un régime dans lequel elles restent plaquées contre les parois du broyeur [15].

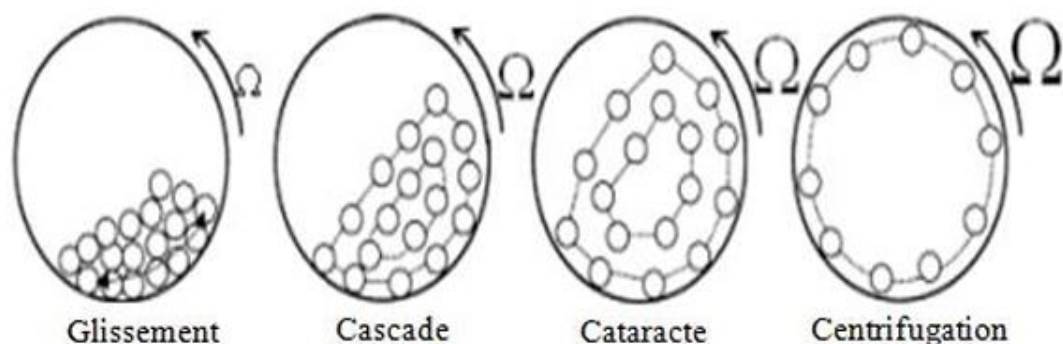


Figure II 4 Régimes de broyage dans un broyeur à boulets (axe horizontal), vitesse de rotation du broyeur croissante de gauche à droite [15]

Dans les broyeurs à boulets industriels, la vitesse est réglée de manière à ce que le mouvement des boulets soit de type cascade. En effet, dans cette configuration, les boulets

retombent perpendiculairement à la surface du broyeur, ce qui permet d'atteindre l'énergie de choc maximale

II.5 Variables d'opération

II.5.1 La Vitesse de Rotation

La vitesse de rotation du broyeur se définit comme un pourcentage de la vitesse critique (V_c), laquelle est établie comme la vitesse à laquelle la charge adhère à la surface du blindage.

Les broyeurs à boulets fonctionnent à une vitesse aussi élevée que possible tout en évitant la centrifugation des corps broyant, c'est-à-dire autour de 70 à 80 % de la vitesse critique.

La vitesse critique V_c correspond à la vitesse à laquelle les corps broyants sont plaqués contre la paroi du broyeur. Elle s'exprime par la formule :

$$V_c = \frac{42.3}{\sqrt{D}} \quad (D \text{ en m})$$

Où, D est le diamètre interne du broyeur et d le diamètre maximal des boulets.

Par exemple, pour un broyeur de $D \approx 0.91\text{m}$, $V_c \approx 44\text{tr/min}$.

Un fonctionnement optimal est généralement atteint à 70 à 80 % de cette vitesse.

Lorsque la vitesse de rotation est relativement faible, l'action de culbutage des boulets est relativement douce ; le mouvement du corps broyant est en cascade et il conduit à un broyage fin qui augmente la production de schlamms et l'usure du blindage. Lorsque la vitesse de rotation est élevée, le mouvement du 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 [16]

II.5.2 La charge de boulets

La charge de boulets désigne l'ensemble des boulets présents dans le broyeur. Le volume de cette charge, comprenant à la fois les boulets et la pulpe, représente environ 40 à 50 % du volume interne du broyeur (Wills, 2006). La puissance requise par le moteur du broyeur est généralement utilisée comme indice pour évaluer la charge de boulets. Il est courant de procéder au chargement régulier des broyeurs avec de nouveaux corps broyant en fonction d'une puissance cible établie selon un calendrier précis. Il convient d'augmenter cette puissance cible en cas d'usure du blindage de la coquille (qui se manifeste sur une période de quelques semaines) et des extrémités du broyeur (sur une période de six à douze mois) (Austin et al 1984).

Il est possible d'arrêter le broyeur et de mesurer la hauteur comprise entre l'ensemble des boulets (lit de boulets) et le sommet du broyeur. Cela permet d'estimer la fraction volumique de boulets [16].

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 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.

Equation

$$J = \frac{(\text{Masse de boulets} / \text{Densité des boulets})}{(\text{Volume du broyeur}) * 1 / (1 - 0.4)}$$

II.5.3 La charge de minerai

La charge de minerai fait référence à la matière à broyer. Le volume apparent formel (effectif) du minerai U permet d'établir un lien entre la charge de minerai et la charge de boulets J , en tenant compte de la porosité formelle du lit de boulets.

Par analogie, le remplissage du broyeur par le minerai peut être exprimé comme une fraction du volume total du broyeur occupé par le lit de minerai. En considérant une porosité formelle de 0,4, nous avons :

$$F_c = \frac{(\text{Masse de boulets} / \text{Densité de la poudre})}{(\text{Volume du broyeur}) * 1 / (1 - 0.4)}$$

II.5.4 Le blindage des broyeurs

Le blindage des broyeurs doit posséder une épaisseur adéquate afin de résister à l'usure, tout en étant suffisamment rugueux pour prévenir les glissements excessifs des corps broyant et de la matière à traiter. Ce blindage est fabriqué à partir de matériaux métalliques, tels que les fontes et les aciers alliés, ainsi que de caoutchouc ou de céramique.

Ce dernier type de matériau est particulièrement utilisé lorsque la contamination par des particules ferreuses dans la matière à broyer est indésirable.

Il existe une corrélation significative entre la taille des boulets et la configuration du blindage du broyeur. Pour les boulets de grande taille, utilisés dans le cadre du broyage grossier, le revêtement est épais et présente de nombreuses ondulations ou cannelures prononcées, ce qui facilite leur relevage. En revanche, pour les boulets de petite taille, employés lors du broyage fin,

le blindage est moins épais et présente des ondulations moins marquées, ainsi qu'un nombre réduit de plaques relevées.

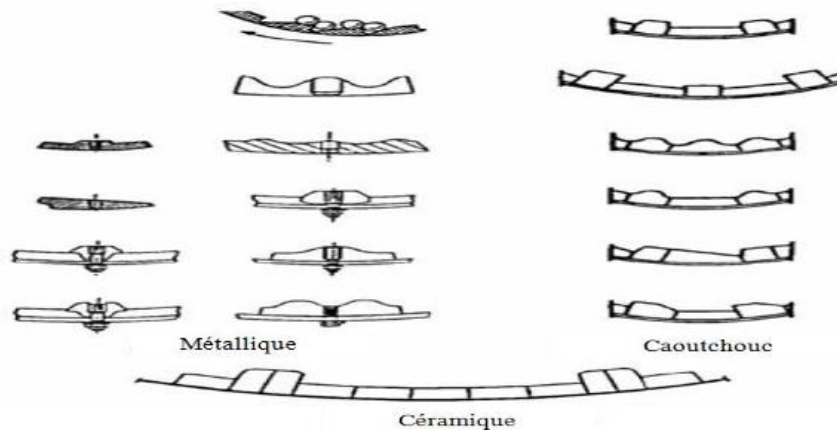


Figure II 5 illustre les formes de blindage les plus couramment adoptées pour la virole du broyeur [17]

L'impact de la configuration des plaques de blindage sur le comportement de la charge

Paul W. Clary a mené une étude sur l'influence de la géométrie des plaques de blindage sur le comportement de la charge, utilisant un broyeur à boulets d'un diamètre de 5 mètres et une fraction volumique de 40 % avec 23 plaques. Quatre simulations ont été effectuées, chacune présentant des angles de faces différents. Les résultats de ces simulations sont illustrés à la figure II 5.

Le broyeur à boulets tourne à 80% de la vitesse critique et chargé à 40% de roches et de boulets, pour des plaques d'angles de visage (a) 85°, (b) 60°, (c) 45°, (d) 22.5° [18].

II.5.6 L'énergie de fragmentation du broyeur

L'énergie (en kWh) nécessaire à l'arbre du moteur pour entraîner l'appareil à vide est calculée par tonne de corps broyant pour les broyeurs à boulets () (voir Figure III.6 ci-dessous) à partir de relation suivante :

$$\omega_b = 4.879D^{0.3} \cdot (3,2 - 3j) \cdot \left(1 - \frac{0.1^{(9-10f)}}{2}\right) + Z_b$$

Avec :

j : taux de remplissage du broyeur (fraction du volume du broyeur occupée par les corps broyant), variant entre 0,40 et 0,50 pour les broyeurs à boulets

F : Fraction de la vitesse critique NC à laquelle tourne le broyeur, fonction du diamètre inter blindage du broyeur 0,66 à 0,80 pour les broyeurs à boulets)

II.5.7 Effet de la dimension des boulets sur le broyage

Le choix de la dimension des boulets est tributaire de la distribution granulométrique du minerai alimenté, de la taille souhaitée du produit de broyage ainsi que de la dureté du minerai. Par ailleurs, les coûts liés à l'énergie et aux corps broyant doivent également être pris en considération lors de la sélection de la taille desdits corps broyant. La règle élaborée par Allis Chalmers pour la détermination du diamètre des boulets à incorporer dans un broyeur est présentée par Rowland (1978).

II.6 – Schéma fonctionnel et coupes du broyeur

L'analyse fonctionnelle d'un broyeur à boulets est grandement facilitée par l'usage de représentations graphiques, notamment les coupes longitudinales et transversales. Ces schémas permettent de visualiser la disposition interne des composants, leurs interactions, ainsi que les chemins de circulation de la matière et de l'énergie.

◆ La coupe longitudinale met en évidence l'alignement des composants majeurs : la coquille cylindrique, les revêtements internes (chemises), les boulets, le système d'entraînement, ainsi que les ouvertures d'entrée et de sortie du matériau. Elle illustre le fonctionnement général du broyeur et les mouvements longitudinaux du matériau.

◆ La coupe transversale, quant à elle, donne une vue perpendiculaire à l'axe du broyeur, exposant l'agencement des boulets à l'intérieur de la virole, les formes du blindage, ainsi que le comportement dynamique de la charge lors de la rotation.

Ces coupes sont essentielles pour le dimensionnement, la maintenance, ainsi que la compréhension pédagogique du fonctionnement du broyeur. Elles servent aussi à justifier certains choix techniques dans la conception, notamment la position des capteurs ou l'optimisation de la circulation de la matière broyée.

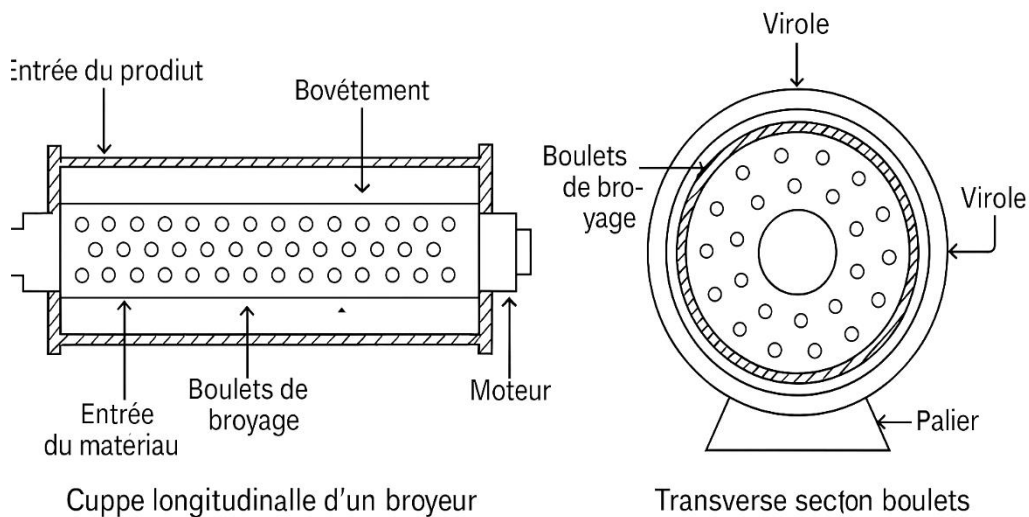


Figure II 6 Coupes du broyeur

Conclusion

Ce chapitre a permis d'examiner en détail les caractéristiques du broyeur à boulets, ses composants, ses matériaux constitutifs, ainsi que les principales variables d'opération influençant le broyage.

L'analyse a mis en lumière l'importance de paramètres tels que la vitesse de rotation, la charge de boulets, ou encore le blindage du broyeur. L'intégration de représentations schématiques et l'étude des composants ont permis une meilleure compréhension du fonctionnement de l'appareil.

La transition vers le chapitre suivant portera sur le dimensionnement complet du broyeur à boulets, en intégrant les aspects mécaniques et énergétiques, ainsi qu'un système d'automatisation basé sur Arduino visant à optimiser les performances de broyage.

Chapitre III

DIMENSIONNEMENT DU BROYEUR A BOULETS

Introduction

Le dimensionnement du broyeur à boulets pour le broyage de l'hématite exige une évaluation précise de plusieurs paramètres, incluant les vitesses de rotation, les puissances absorbées, les charges, les dimensions géométriques et le choix des composants mécaniques (moteur, transmission, roulements).

III.1 Paramètres de broyage du broyeur à boulets

III.1 1. Rapport longueur/diamètre du broyeur

Le rapport longueur/diamètre $\frac{L}{D}$ d'un broyeur à boulets est un paramètre crucial pour garantir un bon comportement dynamique et une efficacité de broyage optimale. Ce rapport ne doit pas dépasser 1.5.

L : Longueur intérieure du broyeur

D : Diamètre intérieur du broyeur

Pour ce broyeur, nous avons :

Longueur intérieure $L=1,41$ m

Diamètre intérieur $D=0,89$ m

Le rapport est donc : $\frac{L}{D} = \frac{1,41}{0,89} \approx 1,58$

Ce rapport est légèrement supérieur à la valeur maximale recommandée (1.5), ce qui peut entraîner des ajustements à faire dans la conception finale, mais il reste acceptable.

III.1 2. Calcul de la vitesse critique du broyeur

La vitesse critique V_c du broyeur à boulets est la vitesse à laquelle les billes de broyage commencent à ne plus avoir un mouvement de rotation et restent collées aux parois du tambour. Elle est donnée par la formule suivante :

$$V_c = \frac{42.3}{\sqrt{D_{in} - d_{max}}}$$

D_{in} : Diamètre interne du broyeur ;

d_{max} : diamètre maximal des boulets ;

Calcul du diamètre maximal des boulets

Le diamètre maximal des boulets d_{max} est calculé avec la formule suivante :

$$d_{max} = A * \sqrt{\frac{d_{20}}{K}} * \sqrt[3]{\frac{\rho W_t}{C\sqrt{D}}}$$

Où :

d_{max} : Le diamètre maximal des billes de broyage (mm) ;

A : Le facteur de correction (pour le broyage des billes A = 20,17 ;

D₂₀ = 13050 μm : granulométrie de la matière alimentée (20 % de refus);

K = 355 : coefficient de correction du broyage à sec (valeur adaptée à l'hématite) ;

ρ = 3,09 g/cm³ : masse volumique des boulets ;

W_i = 13,6 kWh/t : consommation d'énergie spécifique pour l'hématite

C = 75 La vitesse de rotation, tr/m ;

D = 0.91 Le diamètre interne du broyeur, m ;

$$d_{max} = 20.17 * \sqrt{\frac{13050}{355}} * \sqrt[3]{\frac{3.09 * 13.6}{75 * 0.91}} = 102.2$$

Le diamètre maximal des boulets est environ 103 mm, ce qui est cohérent avec les besoins pour broyer l'hématite efficacement.

Calcul de la vitesse critique

La vitesse critique est calculée comme suit : $V_c = \frac{42.3}{\sqrt{0.91 - 0.103}} = 47 \text{ trous/min}$

En pratique, les broyeurs fonctionnent à environ 75 % de cette vitesse pour un fonctionnement optimal :

$$V_{op} = 0,75 \times 47 = 35,25 \text{ tr/min}$$

Donc :

$$V_c = 35.25 \text{ trous/min}$$

III.1 3. Calcul du volume du broyeur

Le volume utile du broyeur est calculé en utilisant la formule du volume d'un cylindre :

$$V_B = \pi r^2 L = \pi (0.445)^2 \cdot 1.41 = 0.877180 \text{ m}^3$$

Avec :

- r = 0,445 m (rayon interne du broyeur)
- L = 1,41 m } (longueur interne du broyeur)

III.1 4. Calcul du volume de la charge de broyage

Le volume total de la charge V_{charge} est calculé en fonction du taux de remplissage j, qui est fixé à 32 %.

$$V_{charge} = V_B \times j = 0,877 \times 0,32 = 0,2807 \text{ m}^3$$

$$V_{charge} = V_B \times j = 0.877180 \times 0.32 = 0.28067 \text{ m}^3$$

$$V_{charge} (100\%) = \text{produits (30\%)} + \text{boulets (70\%)}$$

Volume de l'hématite (30 % de la charge) :

$$V_c = V_{\text{charge}} \times 0.3 = 0.084201 \text{ m}^3$$

Volume des boulets (70 % de la charge) :

$$V_{bc} = V_{\text{charge}} \times 0.7 = 0.196469 \text{ m}^3$$

III.1 5. Poids des constituants

- Poids des boulets :

$$P_b = \rho_b \times V_{bc} \times g = 7200 \times 0.1965 \times 9.81 = 13876 \text{ N}$$

- Poids de l'hématite :

$$P_c = \rho_c \times V_c \times g = 5200 \times 0.0842 \times 9.81 = 4294 \text{ N}$$

III.1 6. Calcul du nombre de boulets

Le volume d'un boulet V_b est calculé avec la formule suivante :

$$V_b = \frac{4}{3} \pi r^3$$

Où $r = 0,0515 \text{ m}$.

Le nombre de boulets nécessaires pour remplir le volume des boulets dans la charge est donc :

$$N_b = V_{\text{boulets}} / V_{\text{boulet}}$$

- Calcul volume de boulet

$$V_b = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} \pi (0.0515)^3 = 5.7 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

Donc :

$$N_b = \frac{0.196469}{5.7 \times 10^{-4}} = 344 \text{ boulets}$$

- La masse d'un seul boulet

$$m_b = V_b \times \rho_b = 5.7 \times 10^{-4} \times 7200 = 4.12 \text{ Kg}$$

III.1 7. Intégration de l'automatisation avec Arduino

L'automatisation via Arduino permet de surveiller et de réguler plusieurs paramètres de manière dynamique pour optimiser les performances du broyeur :

- Capteur de charge : Mesure la charge effective dans le broyeur et ajuste la vitesse du moteur via un variateur de fréquence pour maintenir une charge optimale. Cela permet d'éviter les surcharges et de maximiser l'efficacité énergétique.

- Capteur de température : Surveille la température des composants (moteur, roulements, etc.) et envoie une alerte si un seuil critique est dépassé, permettant un arrêt automatique ou une réduction de la vitesse pour éviter les dommages.

- Capteur d'humidité : L'humidité du minerai (hématite) est un facteur important qui influence la résistance au broyage. Si l'humidité est élevée, le capteur ajuste la vitesse du broyeur pour éviter l'encrassement et garantir une efficacité maximale du broyage.

- Électrovanne : Contrôle la lubrification et le refroidissement en fonction des besoins détectés par les capteurs, prolongeant ainsi la durée de vie des composants mécaniques.

L'Arduino centralise toutes ces informations et prend des décisions en temps réel pour ajuster les paramètres du broyeur, garantissant ainsi une efficacité énergétique maximale, une régulation constante de la qualité de broyage, et la prévention des pannes.

III.2 Puissance absorbée par le broyeur et contrôle par variateur de vitesse

La puissance nécessaire à l'entraînement du broyeur est déterminée à l'aide d'une formule empirique tenant compte des dimensions du broyeur, du taux de remplissage et d'un coefficient lié au type de broyage. La formule utilisée est :

$$P=K \times D^{2.5} \times L \times \phi$$

où :

- P est la puissance absorbée (en kW),
- D est le diamètre intérieur du broyeur (en mètres),
- L est la longueur du broyeur (en mètres),
- Φ est le facteur de remplissage (généralement pris égal à 1),
- K est un coefficient, pris ici égal à 10 pour un broyage à sec.

Avec $D=0.89$ m et $L=1.41$ m , on obtient : $P=10 \times (0.89)^{2.5} \times 1.41 \times 1 \approx 10.2$ Kw

Cette puissance représente l'énergie nécessaire pour faire fonctionner le broyeur à la vitesse optimale de broyage.

Ajout du variateur de vitesse

Pour assurer une flexibilité et une efficacité maximales, un variateur de vitesse est intégré au système d'entraînement. Ce variateur permet d'ajuster la vitesse de rotation du moteur électrique qui entraîne le broyeur. Un microcontrôleur Arduino est utilisé pour lire les données en temps réel (niveau de charge, conditions de broyage, humidité, etc.). En fonction de ces données, Arduino commande dynamiquement le variateur de fréquence afin de :

- maintenir la vitesse optimale de fonctionnement à 33.6 tr/min,

- ou l'adapter automatiquement selon les conditions de broyage (matière plus dure, taux d'humidité élevé, etc.).

Cette régulation automatique permet d'optimiser le rendement énergétique du broyeur, de prolonger la durée de vie mécanique du système, et d'améliorer la qualité du broyage selon les caractéristiques du matériau.

III.3 Choix du moteur électrique

Le choix du moteur électrique est une étape cruciale dans le dimensionnement d'un broyeur à boulets, car il doit fournir la puissance nécessaire pour entraîner la charge broyante, tout en compensant les pertes dues aux éléments de transmission mécanique.

Rendement de la transmission

Les pertes mécaniques du système sont estimées à partir des rendements des composants suivants:

Engrenage: $\eta_1 = 0,97$

Courroie trapézoïdale: $\eta_2 = 0,95$

Roulements: $\eta_3 = 0,99$

Le rendement global du système est donc : $\eta = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 = 0,97 \times 0,95 \times 0,99 \approx 0,912$

Par précaution un rendement arrondi à $\eta = 0,94$ est adopté pour tenir compte des incertitudes et garantir la fiabilité du dimensionnement.

Puissance absorbée par le moteur

La puissance mécanique nécessaire pour entraîner le broyeur est évaluée à :

$P = 10,2 \text{ kW}$

La puissance absorbée par le moteur, en tenant compte du rendement global, est :

$$P_{\text{moteur}} = \frac{P}{\eta} = \frac{10,2}{0,94} = 10,85 \text{ kW}$$

Le choix d'un moteur de 11 kW s'explique donc par cette estimation de la puissance absorbée, ce qui permet une marge de sécurité d'environ 1,4 %.

Spécifications techniques du moteur choisi

Le moteur retenu est un modèle asynchrone triphasé standard de 11 kW, conforme à la norme internationale IEC 60034-1.

Il est alimenté sous une tension de 380 V (50 Hz) et présente un courant nominal compris entre 17 et 25 A selon la charge appliquée.

Sa vitesse nominale est de 720 tr/min, ce qui correspond à un moteur à 6 pôles (calculée selon

$$N = \frac{120 \times f}{P}$$

Dispositif de protection

Pour assurer la sécurité de l'installation, un disjoncteur magnétothermique réglé entre 17 et 25 A est recommandé, en accord avec les prescriptions des normes de protection des moteurs (NF C15-100 ou IEC 60947).

III.4 Automatisation avec Arduino

Pour assurer un contrôle intelligent et adaptatif du système de broyage, un dispositif d'automatisation est mis en œuvre à l'aide d'une carte Arduino, interfacée avec un variateur de fréquence (VFD) et plusieurs capteurs.

L'Arduino joue un rôle de supervision en temps réel du moteur et adapte son fonctionnement selon les données des capteurs intégrés :

Capteur d'humidité : mesure le taux d'humidité de l'hématite. Si celui-ci dépasse un seuil critique, l'Arduino peut réduire la vitesse du moteur pour éviter un colmatage ou ajuster l'ouverture d'une électrovanne si un système de régulation de l'humidité est présent.

Capteur de charge : surveille la charge interne du broyeur. En cas de surcharge ou de sous-charge, Arduino ajuste dynamiquement la vitesse du moteur via le VFD pour optimiser l'efficacité énergétique.

Capteur de température : surveille la température du moteur et des composants. Si une température anormale est détectée, Arduino peut déclencher un ralentissement ou un arrêt du moteur pour prévenir les dommages.

Électrovanne : éventuellement utilisée pour humidifier ou refroidir, elle peut être activée automatiquement selon les données recueillies.

Ce système automatisé permet:

Une réduction de la consommation énergétique en évitant les périodes de fonctionnement à vide ou inefficace.

Une prévention des pannes par détection et intervention rapide en cas d'anomalie.

Une amélioration de la qualité du broyage grâce à une régulation constante et adaptative des paramètres critiques (charge, température, humidité).

III.5 Détermination des rapports de transmission

La transmission de la puissance du moteur au broyeur exige une réduction de vitesse importante. En effet, la vitesse nominale du moteur est de 720 tr/min, alors que la vitesse optimale de fonctionnement du broyeur est de 33.6 tr/min.

Le rapport de transmission total à atteindre est donc :

$$R_{\text{total}} = \frac{N_m}{N_a} = \frac{720}{33.6} = 21.43$$

Pour atteindre ce rapport, on décompose la transmission en deux étapes :

Transmission par courroie trapézoïdale :

Poulie menante (d_1) : 125 mm

Poulie menée (d_2) : 450 mm

$$\text{Rapport } R_{\text{courroie}} = \frac{d_2}{d_1} = 3.6$$

Engrenages de réduction :

$$\text{Rapport } R_{\text{engrenage}} = \frac{R_{\text{total}}}{R_{\text{courroie}}} = \frac{21.43}{3.6} = 5.95$$

Cette configuration permet de répartir la réduction de manière équilibrée entre la courroie (premier étage) et les engrenages (deuxième étage).

Un tel agencement est préféré car il limite la charge sur chaque composant tout en maintenant une compacité raisonnable de l'ensemble.

III.6 Calcul de la transmission par courroies trapézoïdales

III.6.1 Choix du type de courroie

La courroie est choisie à partir du nomogramme constructeur en fonction de la puissance transmise et de la vitesse du moteur.

Pour :

Puissance moteur : 11 kW

Vitesse moteur : 720 tr/min

La courroie SPA est adaptée à cette application.

Le profil de courroie SPA a été retenu pour sa capacité à transmettre une puissance modérée (~10–15 kW) avec une bonne compacité.

Par rapport à une SPZ (plus étroite), elle offre une meilleure longévité, tandis que la SPB, plus large, serait surdimensionnée et imposerait un encombrement inutile.

De plus, les poulies SPA sont largement disponibles sur le marché avec des diamètres standards, conformément à la norme ISO 4183.

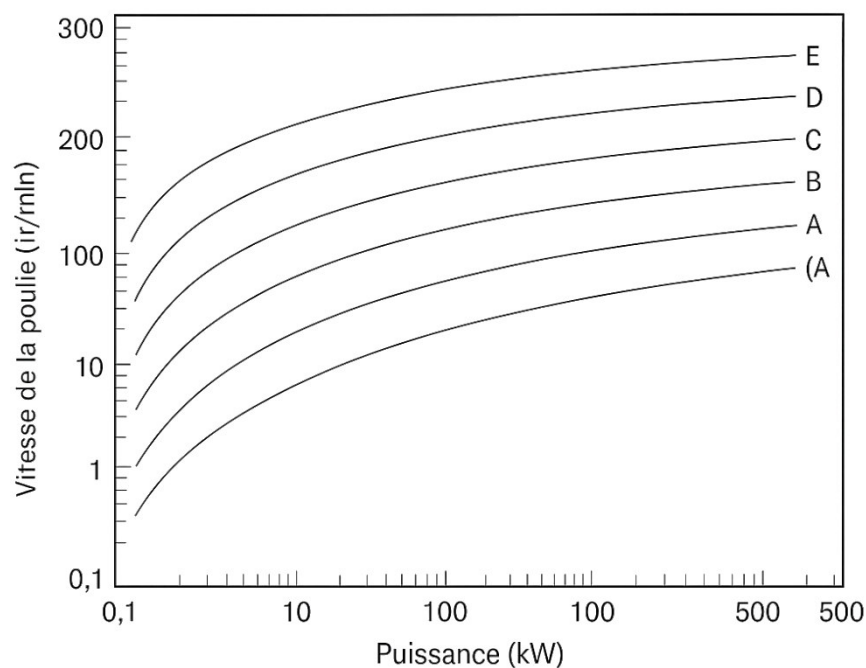


Figure III. 1 Nomogramme pour le choix des courroies trapézoïdales étroites.

III.6.2 Diamètres des poulies

- Poulie moteur (d_1) = 125 mm
- Poulie réceptrice (d_2) = 450 mm

Rapport de transmission :

$$R_c = \frac{d_2}{d_1} = \frac{450}{125} = 3.6$$

III.6.3 Longueur de la courroie et entraxe

Longueur estimée avec la formule :

$$L = 2A + \frac{\pi \times (d_1 + d_2)}{2} + \frac{(d_2 - d_1)^2}{4\pi A}$$

Choix d'une longueur standard : $L = 1600$ mm

Distance entre axes recalculée : $A = 488$ mm

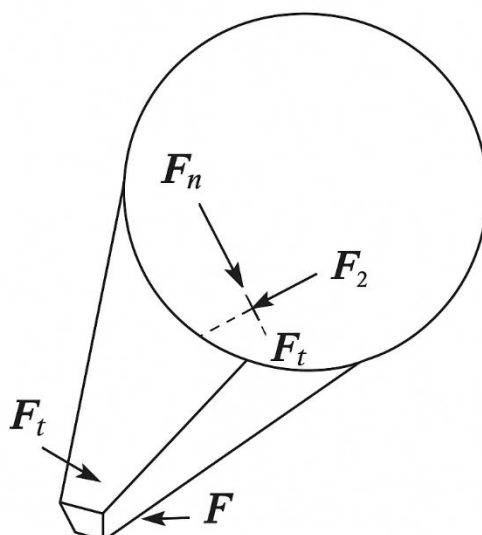


Figure III. 2 Forces dans les courroies trapézoïdales étroites

III.6.4 Vitesse linéaire de la courroie

$$v = \frac{\pi \times d_1 \times N}{60} = \frac{\pi \times 0.125 \times 720}{60} = 4.71 \text{ m/s}$$

Cette valeur est conforme aux recommandations ($v < 30 \text{ m/s}$).

III.6.5 Nombre de courroies

La puissance transmissible par courroie SPA étant d'environ 2.5 kW dans ces conditions, il faut:

$$N_b = \frac{P_{\text{moteur}}}{P_{\text{par Courroie}}} = \frac{11}{2.5} \approx 5 \text{ courroies}$$

III.6.6 Tension des brins et forces

Force périphérique transmise :

$$F = \frac{1000 \times P}{V} = \frac{1000 \times 11}{4.71} = 2335.5 \text{ N}$$

Tension statique par brin :

$$T = \frac{F}{\text{nb de courroies} \times \sin \frac{\alpha}{2}} \approx 37.73 \text{ daN}$$

Réaction sur les arbres : estimée à partir des tensions T, des angles d'enroulement (généralement 162°), et de la géométrie pour dimensionner les paliers.

III.7 Réducteur

Le réducteur est un composant essentiel dans la transmission de puissance mécanique. Il permet d'adapter la vitesse de rotation élevée du moteur (720 tr/min) à la vitesse réduite de travail du broyeur (33.6 tr/min), tout en augmentant le couple disponible.

III.7.1 Transmission par engrenage

Un engrenage est un système mécanique constitué de deux roues dentées transmettant un mouvement de rotation d'un arbre à un autre, avec un rapport de transmission constant.

Avantages des engrenages :

- Transmission sans glissement
- Haut rendement (jusqu'à 97 %)
- Possibilité de transmettre des couples importants
- Compact et robuste

III.7.2 Matériaux et contraintes

Les engrenages sont fabriqués en acier C45, un acier non allié trempé à la flamme. Sa limite d'élasticité est de 360 MPa. Le module normalisé retenu est : $m = 4 \text{ mm}$.

III.7.3 Dimensionnement

La réduction nécessaire (rapport engrenage) est environ 5.95.

Pour une roue motrice (pignon) de 12 dents, la roue menée aura :

$$Z_2 = Z_1 \times \text{rapport} = 12 \times 5.95 \approx 72 \text{ dents}$$

Diamètre primitif d'une roue :

$$d = m \times Z \Rightarrow d_1 = 4 \times 12 = 48 \text{ mm} ; d_2 = 4 \times 72 = 288 \text{ mm}$$

Largeur de dent recommandée :

$$b = 10 \times m = 40 \text{ mm}$$

Les efforts transmis sur les dents sont calculés à partir du couple transmis par le moteur :

$$C = \frac{P \times 9550}{n} = \frac{11 \times 9550}{720} = 145.97 \text{ Nm}$$

Force sur la dent (au rayon primitif) :

$$F = \frac{C}{\frac{d_1}{2}} = \frac{145.97}{\frac{0.048}{2}} = 6082 \text{ N}$$

III.8 Accouplement

L'accouplement est la liaison entre l'arbre moteur et l'arbre mené (broyeur). Un accouplement élastique est choisi pour les raisons suivantes :

- Absorbe les chocs et vibrations
- Compense les désalignements angulaires et axiaux
- Protège les équipements contre les charges excessives
- Type d'accouplement

L'accouplement élastique compact est adapté. Il est constitué de deux moyeux métalliques reliés par un élément élastique (souvent en caoutchouc ou polyuréthane).

Les paramètres importants à considérer sont :

Couple transmissible : $C = 145.97 \text{ Nm}$

Alésage des arbres : 60 mm (diamètre de l'arbre moteur et de l'arbre de broyeur)

Vitesse de rotation : 33.6 tr/min

Les dimensions sont choisies en fonction de normes DIN 740.

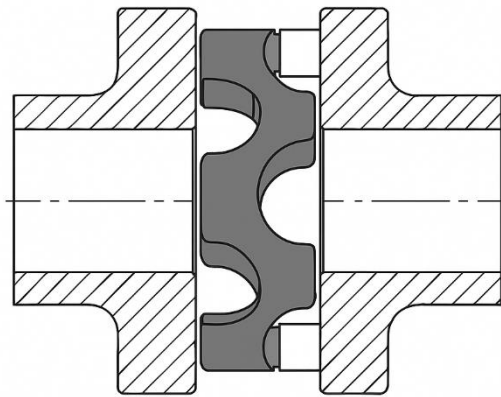


Figure III. 3 Accouplement élastique compact

III.9 Calcul de la force sur la clavette

La clavette est un élément d'assemblage assurant la liaison entre un arbre et une pièce tournante (poulie, roue dentée, etc.).

Données :

Matériau : acier inoxydable X20Cr13

Limite élastique $\sigma = 550 \text{ MPa}$

Clavette : $b = 11 \text{ mm}$, $h = 18 \text{ mm}$, $J = d - 6 = 54 \text{ mm}$

Coefficient de sécurité : $s = 2$

III.9.1 Calcul du couple transmis

$P = 11 \text{ kW}$, $N = 33.6 \text{ tr/min}$

$$C = \frac{P \times 9550}{N} = \frac{11 \times 9550}{33.6} \approx 3126 \text{ Nm}$$

Force tangentielle transmise par la clavette :

$$F = \frac{C}{\frac{d}{2}} = \frac{31260}{\frac{60}{2}} = 104.2 \text{ N}$$

Contrainte de cisaillement admissible :

$$\tau = \frac{\sigma}{s} = \frac{550}{2} = 275 \text{ MPa}$$

Vérification de résistance avec la surface de cisaillement de la clavette :

$$S = b \times J = 11 \times 54 = 594 \text{ mm}^2$$

$$\tau_{\text{réelle}} = \frac{F}{S} = \frac{104.2}{594} \approx 0.175 \text{ MPa} \ll 275 \text{ MPa}$$

La clavette choisie est donc conforme.

III.10 Résistance des matériaux (RDM)

III.10.1 Dimensionnement de l'arbre

On considère les efforts appliqués sur l'arbre, dus au poids des composants (boulets, hématite, éléments tournants).

Réactions aux appuis :

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow R_A + R_B = 19.3 \text{ kN (poids total)}$$

$$\sum M = 0 \Rightarrow R_B = \frac{P \times l_1}{L_{\text{total}}} \Rightarrow \text{calcul à partir de la figure}$$

Moment fléchissant maximum :

$$M_{\text{max}} = 19.2 \text{ kN.m} = 19200000 \text{ N.mm}$$

Diamètre à la flexion :

$$\sigma = \frac{M \times R}{I}$$

$$I = \pi \times D^4 / 64 ; R = D/2$$

$$I = \frac{\pi \times D^4}{64} ; R = \frac{D}{2}$$

En résolvant pour $\sigma = 550 \text{ MPa}$, on trouve :

$$D \approx 56 \text{ mm}$$

Moment de torsion :

$$T = 3126 \text{ Nm} ; \tau = \frac{T \times R}{I_p}$$

$$I_p = \frac{\pi \times D^4}{32}$$

On obtient $D \approx 18 \text{ mm}$ (mais 56 mm est retenu car plus contraignant).

L'arbre est donc dimensionné à 56 mm pour répondre à la flexion et à la torsion simultanées.

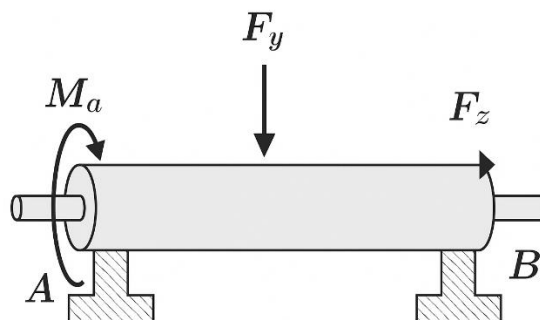


Figure III. 4 Représentation des efforts appliqués sur l'arbre

III.11 Calcul de roulement

Pour supporter les efforts générés lors du fonctionnement du broyeur, nous avons choisi des roulements à billes à une rangée à contact radial. La durée de vie théorique de ces roulements peut être estimée à l'aide de la formule suivante :

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^n$$

Où :

$n=3$ pour les roulements à billes ;

L_{10} : est la durée de vie d'un roulement (en million de tour). ;

C : est la charge dynamique que supporte le roulement en N ;

P : est la charge dynamique équivalente que supporte le roulement en N qui est calculé par la relation suivante :

Calcul de la charge dynamique équivalente P

Elle est obtenue par la relation :

$$P = x \times F_r + y \times F_a$$

avec :

F_r : la force radiale supportée par le roulement,

F_a : la force axiale supportée par le roulement,

x et y : des coefficients normalisés dépendant du type et des dimensions du roulement.

Caractéristiques du roulement choisi :

$d = 60$ mm (diamètre intérieur),

$D = 110$ mm (diamètre extérieur),

$B = 22$ mm (largeur),

Charge dynamique fournie par le constructeur : $C=5530$ daN

Supposons une charge dynamique équivalente $P=20.601 \times 10^3 \text{ N}$, on obtient :

$L_{10}=(55300/20601)^3 \approx 19.34$ millions de tours

$$\frac{55300}{20601}$$

$$L_{10} = \left(\frac{55300}{20601} \right)^3$$

Durée de vie en heures

Pour convertir en heures de fonctionnement, on utilise :

$$L_{10} H = L_{10} \times \frac{10^6}{60} \times N$$

avec $N=35.25 \text{ tr/min}$ (vitesse de rotation de l'arbre moteur). Donc :

$$L_{10} H = 19.34 \times \frac{10^6}{60} \times 35.25 \approx 9145.34 \text{ heures}$$

Durée de vie en années

Pour une utilisation de 8 heures par jour pendant 240 jours par an :

$$L_{10} E = 9145.34 \times 8 \times 240 = 4.7 \text{ années}$$

Surveillance des roulements par Arduino

Afin de maximiser la durée de vie effective des roulements, un système de surveillance basé sur Arduino a été mis en place. Ce système peut :

Surveiller la température des paliers (via capteur de température),

Détecter l'humidité dans la zone de roulement (condensation ou fuite d'eau),

Détecter des anomalies de vibration (à l'aide d'un accéléromètre),

Déclencher des alertes ou couper le moteur automatiquement en cas de surchauffe ou de défaillance suspectée,

Afficher les données sur un écran LCD ou les transmettre via communication série (USB, Wi-Fi, etc.).

Cette intégration augmente considérablement la sécurité, la maintenance préventive et la durée de vie réelle des roulements.

III.12 Automatisation du système de broyage avec Arduino

Afin d'optimiser le fonctionnement du broyeur et de garantir un contrôle précis et intelligent du processus de broyage, un système d'automatisation basé sur Arduino a été mis en place. Ce système permet la gestion dynamique des capteurs, des actionneurs, ainsi que la régulation de la vitesse de rotation du broyeur.

III.12.1 Capteurs intégrés

Plusieurs capteurs sont utilisés pour surveiller les conditions de fonctionnement du broyeur :

Capteur de charge : mesure le poids de la charge dans le broyeur et permet d'ajuster la vitesse de rotation en conséquence.

Capteur d'humidité : détecte le taux d'humidité du matériau broyé afin d'ajouter de l'eau automatiquement si nécessaire.

Capteur de température : surveille la température du moteur et des roulements pour éviter la surchauffe.

Capteur de vitesse (tachymètre) : permet de mesurer la vitesse de rotation réelle du broyeur.

III.12.2 Actionneurs utilisés

Les capteurs communiquent avec l'Arduino qui commande les actionneurs suivants :

Électrovanne : permet l'ajout d'eau dans le broyeur pour ajuster l'humidité en fonction des données mesurées.

Variateur de vitesse : module la fréquence d'alimentation du moteur pour ajuster la vitesse de rotation à la valeur optimale (par défaut : 33.6 tr/min), ou selon les conditions de charge et de broyage.

Écran LCD ou interface utilisateur : affiche les paramètres en temps réel (humidité, température, vitesse, état de l'électrovanne, etc.) et signale les éventuels défauts.

III.12.3 Logique de fonctionnement

Le programme embarqué dans l'Arduino suit une logique de contrôle automatique :

Lecture en continu des valeurs des capteurs.

Si humidité < seuil minimal, l'Arduino ouvre l'électrovanne pour injecter de l'eau.

Si la charge du broyeur est trop faible ou trop élevée, il ajuste la vitesse via le variateur.

En cas de surchauffe ou d'humidité excessive, il interrompt le fonctionnement pour éviter les pannes.

Un affichage en temps réel permet à l'opérateur de suivre l'évolution du processus.

Cette solution basée sur Arduino permet un fonctionnement autonome, économique et intelligent du broyeur, avec des réglages dynamiques adaptés aux propriétés du matériau traité. Elle améliore la sécurité, la qualité de broyage, et réduit l'usure des composants mécaniques par une régulation efficace.

III.13. Représentation du broyeur conçu et intégration de l'automatisation

La présente section illustre la modélisation finale du broyeur à boulets développé dans le cadre de ce projet. Cette représentation repose sur les résultats du dimensionnement mécanique détaillés

dans les sections précédentes, et inclut l'intégration fonctionnelle des éléments du système d'automatisation.

Le broyeur conçu est destiné au traitement de l'hématite, un minéral dense et abrasif. Sa conception tient compte des contraintes mécaniques et énergétiques, tout en incorporant un dispositif de régulation automatique permettant d'optimiser le fonctionnement en temps réel. Ce dispositif est basé sur une carte Arduino, associée à des capteurs de charge, capteurs de température, capteurs d'humidité et à une électrovanne, le tout commandé via un variateur de fréquence.

La Figure III.5 présente une vue globale du broyeur avec ses composants principaux, incluant l'interface de commande automatisée. La Figure III.6 détaille les dimensions essentielles de l'équipement ainsi que l'emplacement des éléments électroniques et mécaniques intégrés. Ces figures permettent de visualiser concrètement la structure du broyeur tel qu'il a été conçu et d'apprécier l'articulation entre la partie mécanique et le système de contrôle automatique.

Cette modélisation constitue une étape essentielle pour le passage à la fabrication, tout en offrant une base pour d'éventuelles améliorations futures, notamment en termes d'optimisation énergétique et de maintenance prédictive.

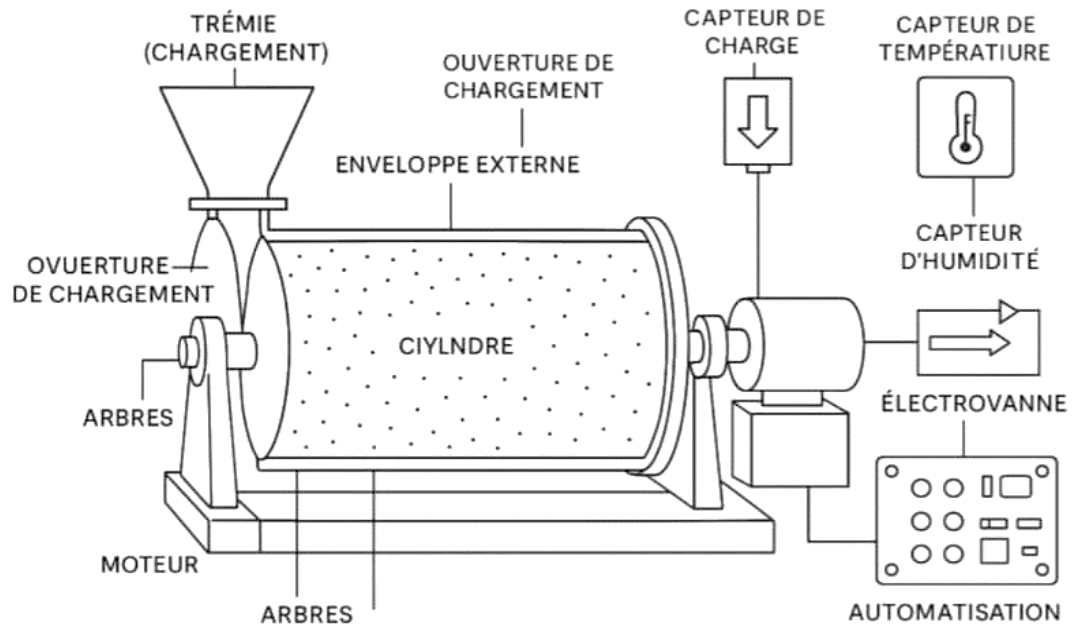


Figure III. 5 Vue globale du broyeur conçu avec système d'automatisation

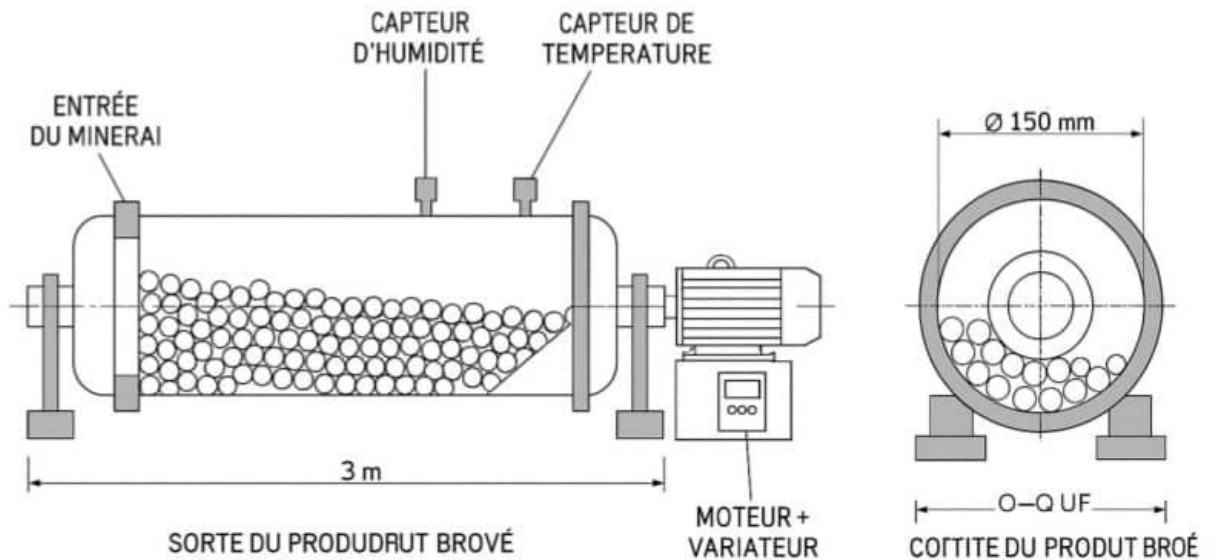


Figure III. 6 Schéma coté du broyeur avec intégration des composants d'automatisation

III.14. Programmation du système de contrôle avec Arduino

Afin d'assurer un fonctionnement optimal et autonome du broyeur à boulets, une programmation embarquée a été développée sur une carte Arduino UNO. Cette carte agit comme une unité centrale de traitement, en recevant les signaux provenant de différents capteurs et en envoyant des ordres aux actionneurs.

La logique de contrôle repose sur un algorithme simple mais efficace, visant à :

Adapter la vitesse de rotation du broyeur via un variateur de fréquence (VFD) en fonction de la charge interne,

Détecter toute anomalie thermique au niveau du moteur ou des roulements à l'aide d'un capteur de température,

Évaluer l'humidité du minerai grâce à un capteur d'humidité, pour éviter tout risque de colmatage,

Activer une électrovanne si nécessaire, pour humidifier ou refroidir le système.

Le programme a été codé en langage C++ (Arduino) à l'aide de l'environnement de développement Arduino IDE.

Un extrait représentatif du code source est présenté en Annexe I.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons procédé au calcul des paramètres de broyabilité du broyeur à boulets, ainsi que des charges et de la puissance équivalente. De plus, nous avons spécifié le modèle des roulements et les types de boulonnerie à utiliser.

Nous avons également déterminé les dimensions géométriques optimales du broyeur, y compris la vitesse critique, le diamètre des boulets, le volume utile et la charge de broyage adaptée à l'hématite.

Le choix du moteur électrique a été justifié sur la base de la puissance absorbée et des pertes mécaniques du système de transmission. Un moteur de 11 kW à 720 tr/min a été retenu, en conformité avec les normes IEC.

Le système de transmission par courroies trapézoïdales SPA et engrenages a été dimensionné pour assurer une réduction efficace de vitesse. Les calculs mécaniques, y compris ceux des forces sur clavette et du dimensionnement de l'arbre, garantissent la fiabilité du système.

Une attention particulière a été portée à l'intégration de l'automatisation par Arduino, qui permet une gestion intelligente des paramètres de broyage (charge, humidité, température) en temps réel, via un variateur de fréquence.

Ce dimensionnement global, associant mécanique classique et automatisation, constitue une base solide pour la modélisation technique et la mise en œuvre du broyeur, comme nous le verrons dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV :
RÉALISATION DU PROTOTYPE DE
BROYEUR À BOULETS

Introduction

Ce chapitre décrit la concrétisation de la conception théorique à travers la fabrication d'un prototype de broyeur à boulets à échelle réduite. Il présente les matériaux utilisés, les composants mécaniques installés, le système de transmission par chaîne, ainsi que l'intégration du variateur de vitesse. Une automatisation basée sur Arduino a été prévue, mais non finalisée, faute de capteurs disponibles.

IV.1 Fabrication du prototype

IV.1.1 Composants et matériaux utilisés

Virole (tambour) : fabriquée en tôle métallique (épaisseur non mesurée), formée par roulage puis soudée à deux flasques circulaires.

Châssis : réalisé en profilés d'acier soudés, garantissant une bonne rigidité.

Paliers : conçus en acier, soudés directement au châssis, assurant une fixation permanente.

Moteur électrique : moteur monophasé, de puissance modérée, adapté au fonctionnement du tambour à vide ou avec faible charge.

Transmission : assurée par une chaîne de transmission, type chaîne à rouleaux, reliant le pignon moteur à la roue dentée de l'arbre du tambour.

Variateur de fréquence : utilisé pour ajuster la vitesse du moteur selon les besoins.

Boulets de broyage : représentés par des billes métalliques pour les tests de rotation.

IV.1.2 Étapes d'assemblage

Roulage et soudure de la virole.

Fixation des flasques latéraux.

Soudure des paliers et supports latéraux sur le châssis.

Montage du moteur sur un support réglable.

Installation de la chaîne de transmission et tension correcte de celle-ci.

Branchement du moteur au variateur de fréquence.

IV.2 Prototype assemblé

Le prototype finalisé est illustré ci-dessous. Il fonctionne correctement en rotation grâce à la transmission par chaîne et à la régulation via variateur.

Figure IV 1 Prototype du broyeur à boulets – Transmission par chaîne

La chaîne de transmission a été choisie pour sa fiabilité mécanique, sa résistance à la traction et sa capacité à supporter des charges modérées avec un bon rendement.

IV.3 Système de commande et automatisation

IV.3.1 Variateur de vitesse

Le variateur de fréquence monophasé installé permet :

D'ajuster manuellement la vitesse de rotation du tambour,

De protéger le moteur contre les démarrages brusques et les surcharges,

D'optimiser les performances énergétiques selon la charge.

IV.3.2 Automatisation prévue

L'automatisation du broyeur devait être assurée par une carte Arduino Uno avec des capteurs :

- Capteur de charge pour ajuster la vitesse en temps réel,
- Capteur de température moteur,
- Capteur d'humidité
- du minéral.

Chapitre IV : Réalisation du prototype de broyeur à boulet

Ces capteurs n'étaient pas disponibles, donc seule la programmation Arduino a été préparée, en attente de la phase d'intégration complète.

Conclusion

La réalisation du prototype de broyeur à boulets a permis de concrétiser les choix de conception abordés dans les chapitres précédents. Le système a été fabriqué à échelle réduite, en intégrant des composants mécaniques robustes, un moteur adapté, une transmission par chaîne efficace, et un variateur de fréquence permettant une régulation manuelle de la vitesse.

Les différentes étapes de fabrication et d'assemblage ont été menées avec rigueur, aboutissant à un prototype fonctionnel capable d'assurer une rotation stable du tambour. Le choix de la chaîne de transmission s'est révélé judicieux, garantissant un bon rendement tout en assurant une robustesse mécanique suffisante pour les essais à vide et sous faible charge.

L'aspect automatisé, bien que prévu, n'a pu être entièrement implémenté en raison de l'indisponibilité des capteurs nécessaires (charge, température, humidité). Toutefois, la programmation Arduino a été préparée, ce qui constitue une base solide pour une future intégration du contrôle intelligent du broyage.

Ce chapitre démontre que le prototype est opérationnel dans sa forme actuelle, et qu'il constitue une plateforme évolutive pour des améliorations futures, notamment dans la supervision automatique du processus de broyage et l'adaptation dynamique aux conditions de fonctionnement.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

À travers ce mémoire, nous avons mené une étude complète visant à concevoir un broyeur à boulets destiné au traitement de l'hématite, un minerai stratégique pour l'industrie métallurgique. Le travail a commencé par une analyse approfondie du procédé de broyage, des différents types de broyeurs, ainsi que des propriétés spécifiques de l'hématite, qui influencent fortement le choix des équipements de traitement.

Nous avons ensuite procédé au dimensionnement détaillé du broyeur, en prenant en compte les paramètres mécaniques, énergétiques et opérationnels essentiels à un fonctionnement optimal. Les calculs ont permis de déterminer les dimensions du broyeur, les caractéristiques du moteur, les systèmes de transmission, ainsi que les forces mécaniques mises en jeu.

Une contribution majeure de ce projet est l'intégration d'un système d'automatisation basé sur Arduino, assurant une régulation intelligente et en temps réel des principales variables de fonctionnement, telles que la vitesse, la charge, la température et l'humidité. Cette approche permet non seulement d'améliorer la qualité du broyage, mais aussi de prolonger la durée de vie des composants et de réduire la consommation énergétique.

Ce travail constitue une base solide pour le développement d'équipements industriels performants, alliant robustesse, précision et modernité. Des perspectives futures pourraient inclure l'optimisation énergétique par simulation numérique ou l'extension du système à des broyeurs à échelle industrielle.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

Siemens – Industrial Motors <https://new.siemens.com/global/en/products/drives/electric-motors.html>

WEG Motors (outil de sélection inclus) <https://www.weg.net/institutional/FR/fr/>

Gates Corporation <https://www.gates.com/>

Annexe A :

Code Arduino du système de contrôle

Annexe A : Code Arduino du système de contrôle

```
#include <DHT.h> // Capteur d'humidité
#define DHTPIN 2
#define DHTTYPE DHT11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

const int tempPin = A0;    // Capteur de température
const int loadPin = A1;    // Capteur de charge
const int vfdPin = 9;      // Contrôle PWM du variateur
const int electrovalvePin = 8; // Électrovanne

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(vfdPin, OUTPUT);
  pinMode(electrovalvePin, OUTPUT);
  dht.begin();
}

void loop() {
  float temp = analogRead(tempPin) * (5.0 / 1023.0) * 100; // en °C
  float load = analogRead(loadPin); // Lecture brute
  float humidity = dht.readHumidity(); // %

  // Contrôle du VFD selon la charge
  if (load > 800) {
    analogWrite(vfdPin, 100); // Réduction de vitesse
  } else {
    analogWrite(vfdPin, 200); // Vitesse normale
  }

  // Gestion de la température
  if (temp > 70) {
```

```
    analogWrite(vfdPin, 0); // Arrêt de sécurité
}

// Contrôle de l'humidité
if (humidity < 20) {
    digitalWrite(electrovalvePin, HIGH); // Activer
} else {
    digitalWrite(electrovalvePin, LOW); // Désactiver
}

delay(1000); // Pause d'une seconde
}
```