

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Fabrication mécanique et productique /Construction mécanique

Présenté par :

Chaouki Gouarir & Hemza Touina & Abdelhadi Bziani

Thème

Etude et réalisation d'un broyeur à billes pour
les matériaux de construction

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
Mr. ABDELMALEK Elhadi	MCA	Président
Mr. CHERIF Saib	MCA	Encadreur
Mr. ABDELKRIM Bourezge	IP	Cas encadreur
Mr. HOUARI Zeggane	MCB	Examineur

Année Universitaire : 2024 / 2025

N° d'ordre : GM/...../2025

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu de nous avoir donné le courage, la foi et la sagesse nécessaires pour entreprendre cet humble travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude l'encadreur Mr. Saïb Cherif et Mr. Abdelkrim Bourezeg, pour leurs efforts remarquables dans la réalisation de ce projet. Nous sommes reconnaissants pour leur soutien et leur dévouement tout au long du processus. Leurs conseils avisés, leur expertise et leur engagement ont grandement contribué à la qualité et à la réussite de ce projet.

Nous remercions les enseignants Salman Ibrahim, Aoufi Belkacem, Aimer Nour El-Din et Fejel Amer. Merci et reconnaissance à tous les enseignants et à la communauté universitaire de l'Université de M'sila.

Nous remercions également nos familles et nos proches pour leur soutien financier et moral tout au long de nos études.

À tous nos collègues, sans exception, avec qui nous avons partagé de bons souvenirs, à tous ceux qui ont contribué à ce travail de près ou de loin.

Nous vous disons merci.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude et la réalisation d'un broyeur à billes destiné à la réduction des débris issus de la démolition de bâtiments (déchets lourds) en poudre fine. Cette poudre peut ensuite être réutilisée dans diverses industries. Le broyeur à billes est un équipement largement utilisé dans plusieurs secteurs industriels, notamment ceux du ciment, des engrais, de la céramique, et bien d'autres.

Le principe de fonctionnement de ce type de broyeur repose sur la rotation d'un cylindre autour d'un axe horizontal. Ce cylindre est partiellement rempli de billes métalliques ou céramiques. Lors de la rotation, les billes se déplacent à l'intérieur du cylindre, entrent en collision entre elles ainsi qu'avec les matériaux à broyer, provoquant ainsi leur fragmentation en particules plus fines.

Mots-clés :

Broyeur à billes ; Broyage ; conception ; dimensionnement ; simulation

Abstract

This thesis focuses on the study and design of a ball mill intended for grinding demolition debris from buildings (heavy waste) into a fine powder, with the goal of reusing the resulting material in various industrial applications. Ball mills are commonly employed in a range of industries, such as cement production, fertilizer manufacturing, ceramics, and more.

The functioning of the ball mill relies on the rotation of a horizontal cylindrical chamber that is partially filled with metallic or ceramic balls. As the cylinder rotates, the balls are set into motion, colliding with one another and with the debris inside. These impacts break down the material into increasingly finer particles, enabling its transformation into a reusable form.

Keywords:

Ball Mill. Grinding. Design. Dimensioning Simulation

ملخص

يتناول هذا المشروع دراسة وتصميم مطحنة كروية (broyeur à billes) تُستخدم لتحويل مخلفات المباني الناتجة عن عمليات الهدم (النفايات الثقيلة) إلى مسحوق ناعم، وذلك بهدف إعادة تدويرها واستخدامها في صناعات أخرى. وتُعدّ هذه المطحنة من المعدات واسعة الانتشار في العديد من القطاعات الصناعية، خاصة في صناعات الإسمنت، والأسمدة، والسيراميك، وغيرها من المجالات ذات الصلة.

تعتمد آلية عمل المطحنة على مبدأ دوران أسطوانة أفقية حول محورها، وتكون هذه الأسطوانة مملوءة جزئيًا بكرات معدنية أو خزفية وخلال دوران الأسطوانة، تتحرك الكرات داخلها وتتصادم فيما بينها ومع المواد المطلوب طحنها، مما يؤدي إلى تفتيت تلك المواد وتحويلها إلى جزيئات دقيقة.

الكلمات المفتاحية :

طاحونة الكرات ; الطحن ; التصميم ; تحديد الأبعاد; المحاكاة.

Table des matières

Table des matières

Introduction générale.....	8
Chapitre 1 : Généralité sur les broyeurs.....	9
Introduction :.....	9
I.1 Définition de l'opération de broyage	9
I.2 Les types de broyage	10
I.3 Types d'équipements de broyage.....	10
Conclusion.....	15
Chapitre 2 : Dimensionnement.....	16
Introduction	16
II.1 Paramètres de broyages du broyeur à billes	16
II.1.1 Vitesse critique du broyeur	16
II.1.2 Rapport de transmission [14] :	16
II.1.3 Volume du Tambour	18
II.1.4 Le choix de la courroie de transmission :	20
II.2 Calcul de la résistance des matériaux (RDM) :	21
II.2.1 Simulation par ANSYS Workbench.....	21
II.2.2 Etude des sollicitations statiques dans le broyeur :	22
II.2.3 Etude des sollicitations dynamiques dans le broyeur :	26
Conclusion.....	30
Chapitre 3 : Principaux composants du broyeur à billes	31
Introduction	31
III.1 Le tambour du broyeur	31
III.1.1 Fonctions du tambour : le tambour assure les fonctions principales suivantes :	31
III.1.2 Les caractéristiques géométriques du tambour utilisé :.....	32
III.1.3 La conception et fabrication du tambour :.....	32
III.2 La porte d'ouverture pour le chargement et le déchargement :	32
III.3 L'arbre du broyeur	33
III.4 La table de support :	33
III.4.1 Les matériaux utilisés pour fabriquer la table de support.....	33
III.4.2 Caractéristiques de la table de support :	34
III.4.3 Dimensions et conception	34
III.4.4 L'assemblage de la table du support	34

III.5 Les paliers :.....	34
III.5.1 Type de paliers utilisés dans notre projet.....	34
III.5.2 Caractéristiques techniques du palier type UCP205 :.....	35
III.5.2 Les Avantages du palier UCP205	35
III.5.3 montage des paliers	36
III.6 poulies trapézoïdales :.....	36
III.7 Le courroie.....	37
III.8 Les corps broyant (les billes).....	37
III.9 Le moteur électrique asynchrone triphasé (AC)	38
III.9.1 Motivations pour le choix du moteur asynchrone triphasé (AC)	38
III.9.2 Caractéristiques techniques du moteur utilisé dans ce projet :.....	39
III.9.3 Variateur de vitesse (VFD)	39
Conclusion.....	40
Chapitre 4 : La fabrication du broyeur à billes	41
Introduction	41
Étapes principales pour la fabrication du broyeur à billes.....	41
IV.1 La 1 ^{ère} étape Préparation de la matière première et l'équipement nécessaires	41
IV.2 La 2 ^{ème} étape : Usinage des deux arbres de rotation.....	41
IV.3 La 3 ^{ème} étape : Polissage et découpage.....	41
IV.4 La 4 ^{ème} étape : Opération de Perçage et taraudage de l'arbre	42
IV.5 La 5 ^{ème} étape : Adaptation la bouteille de gaz	43
IV.6 La 6 ^{ème} étape : Centrage et soudage des deux arbres sur les côtés du tambour	43
IV.7 La 7 ^{ème} étape : Test de l'effet balourd sur le tambour	44
IV.8 La 8 ^{ème} étape : Réalisation de la table de support pour le broyeur à billes.....	44
IV.9 La 9 ^{ème} étape : Réalisation d'une table d'ajustement et de fixation pour le moteur électrique :.....	45
IV.10 Le 10 ^{ème} étape : Assemblage	45
IV.11 L'essai de mise en marche :	46
Conclusion et Perspectives (exemple).....	47
Références bibliographiques.....	55

La liste de figure

Figure I.1 Broyage à billes.....	9
Figure I.2 Broyeurs à billes	11
Figure I.3 Broyeur à couteaux.....	12
Figure I.4 Broyeur à marteaux.....	12
Figure I.5 broyeur à cône.....	13
Figure I.6 Broyeur à mâchoire.....	13
Figure I.7 broyeur à percussion.....	14
Figure I.8 broyeur à cylindres.....	15
Figure II.1 la relation linéaire entre la vitesse de rotation N (tr/min) et la fréquence f (Hz).....	17
Figure II.2 La chaîne cinématique	20
Figure II.3 Les profils des courroies trapézoïdales standards [21].....	21
Figure II.4 Géométrie du tambour	22
Figure II.5 Maillage du tambour	22
Figure II.6 Les conditions aux limites et application des charges	23
Figure II.7 Déformation totale.....	24
Figure II.8 Contrainte équivalent	25
Figure II.9 Force de réaction sur l'appui gauche.....	25
Figure II.10 réaction droite.....	26
Figure II.11 Application d'une rotation (8.085rd/s).....	27
Figure II.12 Déformation totale	28
Figure II.13 la contrainte équivalent.....	28
Figure II.14 La Force de réaction sur l'appui gauche	29
Figure II.15 La Force de réaction sur l'appui droit	29
Figure III.1 Prototypage du broyeur à billes réalisé.....	31
Figure III.2 Porte d'ouverture.....	32
Figure III.3 L'arbre du broyeur.....	33
Figure III.4 Table de support.....	33
Figure III.5 Palier type UCP205 [22].....	35
Figure III.6 Fixation des paliers	36
Figure III.7 poulies trapézoïdales	37
Figure III.8 courroie trapézoïdale (en V)	37
Figure III.9 Billes en acier pour le broyeur à billes	38
Figure III.10 Moteur électrique asynchrone triphasé (AC)	38
Figure III.11 Variateur de vitesse.....	40
Figure IV.1 Usinage de l'arbre.....	41
Figure VI.2 Polissage et découpe	42
Figure IV.3 Perçage et taraudage de l'arbre.....	42
Figure IV.4 les étapes d'adaptation de la bouteille à gaz.....	43
Figure IV.5 Réalisation de l'ouverture pour le chargement et le déchargement des matières premières.....	43
Figure IV.6 Les opération de montage des deux arbres sur le tambour	43
Figure IV.7 Vérification la rotation précise, régulière et sans vibrations.....	44
Figure IV.8 Réalisation de la table de support pour le broyeur à billes	44
Figure IV.9 Table d'ajustement et de fixation pour le moteur électrique.....	45
Figure IV.10 Le broyeur à billes en phase finale	46
Figure IV.11 Mesure le courant absorbé par le moteur électrique du broyeur en charge.....	46

La liste de tableau

Tableau II.1 Désignation de la chaîne cinématique.....	20
Tableau II.2 les avantage de la courroie trapézoïdale (en V)	20
Tableau II.3 Profil de la courroie à choisir.....	21
Tableau II.4 résultats numériques de l'analyse	20
Tableau II.5 Valeur des forces de la réaction.....	26
Tableau III.1 composants d'un broyeur à billes	31
Tableau III.2 Les caractéristiques du tambour	32
Tableau III.3 Caractéristiques techniques du palier type UCP205.....	35
Tableau III.4 Les Avantages du palier UCP205.....	35
Tableau III.5 Caractéristiques techniques du moteur	39

Introduction
générale

Introduction générale

Dans un contexte industriel en constante évolution, marqué par des avancées technologiques rapides et une quête permanente d'optimisation des procédés, les techniques de transformation des matériaux occupent une place stratégique. Parmi celles-ci, le broyage constitue une étape essentielle, visant principalement à la réduction granulométrique des matières solides. Cette opération joue un rôle clé non seulement dans l'amélioration des propriétés physico-chimiques des matériaux, mais aussi à simplifier leur manipulation, de leur transport, de leur transformation, tout en contribuant à la qualité finale du produit.

C'est dans ce cadre que le broyeur à billes s'impose comme un équipement de référence. Son succès repose sur plusieurs atouts : une conception mécanique relativement simple, une robustesse élevée face à l'usure, et surtout, une grande capacité à traiter une vaste gamme de matériaux, y compris les plus durs et abrasifs. Ce type de broyeur est constitué d'un cylindre rotatif rempli partiellement de billes (en acier, en céramique ou en d'autres matériaux résistants). Lorsque le cylindre est mis en rotation, les billes sont entraînées par la gravité et la force centrifuge, générant des chocs et des frottements qui fragmentent progressivement les matériaux jusqu'à atteindre la finesse souhaitée.

Ce procédé, fondé sur l'impact et l'abrasion, permet d'obtenir des poudres fines et homogènes, ce qui est fondamental dans les domaines où la qualité du matériau conditionne directement les performances du produit fini. C'est notamment le cas dans l'industrie du ciment, où la finesse du clinker influe sur la résistance mécanique du béton, ou dans le secteur de la céramique, où l'homogénéité des poudres est cruciale pour garantir une cuisson uniforme et des propriétés esthétiques optimales. Dans l'industrie chimique et la métallurgie, la granulométrie des composants joue un rôle déterminant sur la réactivité chimique et sur le rendement global des procédés.

L'un des grands avantages du broyeur à billes réside dans sa polyvalence : il peut fonctionner en voie sèche ou humide, en fonction des exigences du procédé industriel. Cette flexibilité permet son intégration aussi bien dans des lignes de production de grande capacité que dans des unités plus modestes ou artisanales. On le retrouve ainsi dans la fabrication de matériaux de construction modernes, de silicates, de matériaux réfractaires, d'engrais, de métaux non ferreux, et même dans la production de vitrocéramique. Dans les usines d'extraction minière, il intervient également dans les étapes d'enrichissement et de préparation des minerais.

En résumé, le broyeur à billes ne se limite pas à une simple fonction de broyage : il constitue un maillon essentiel dans la chaîne de valorisation des matières premières. À la croisée de la mécanique des procédés, de la chimie des matériaux et de l'ingénierie industrielle, il joue un rôle déterminant dans la performance, la rentabilité et la durabilité des filières de production modernes.

Chapitre I
Généralité sur les
broyeurs

Chapitre 1 : Généralité sur les broyeurs

Introduction :

Parmi les avantages industriels de broyage nous citons : la réduction de la taille des particules, homogénéisations du mélange, préparation pour les procédés ultérieurs et la valorisation des déchets (notamment les débris de démolition des agglomérations ; ou les matériaux de construction), ceci est le but essentiel de notre projet afin d'avoir une bonne qualité de broyage. L'opération de broyage s'effectue par des broyeurs manuels, semi-automatique, automatique mécanique ou électriques.

Les broyeurs sont des équipements indispensables dans de nombreuses industries, car ils permettent de réduire la taille des matériaux solides en particules plus fines. Ils jouent un rôle fondamental dans des secteurs variés tels que l'exploitation minière, la construction, l'industrie chimique, l'agriculture, l'agroalimentaire et le recyclage.

Il existe différents types de broyeurs, parmi lesquels les broyeurs à billes, à marteaux, à cône et à mâchoires. Chacun de ces modèles présente des caractéristiques spécifiques, le rendant adapté à des usages particuliers. Ils permettent de traiter une grande diversité de matériaux, comme les minéraux, les roches, les métaux ou encore les déchets.

En fragmentant les matériaux, les broyeurs facilitent leur manipulation, leur transformation ou leur valorisation. Leur utilisation contribue non seulement à améliorer l'efficacité et la productivité des procédés industriels, mais aussi à réduire les coûts de production et à optimiser la qualité des produits finis.

I.1 Définition de l'opération de broyage

L'opération de broyage consiste à réduire la taille des matériaux solides, généralement par des actions mécaniques telles que la compression, l'impact ou le frottement. Elle est réalisée à l'aide d'équipements spécifiques (comme les broyeurs à boulets, les broyeurs à marteaux ou à cylindres) afin d'obtenir des particules plus fines, homogènes et adaptées aux besoins de transformation ultérieurs [1].

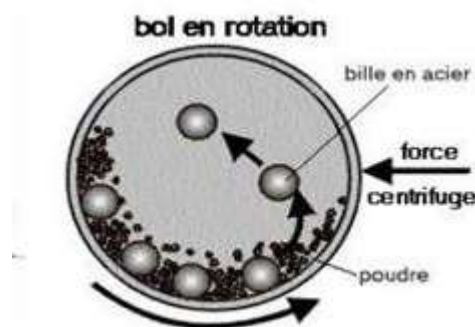


Figure I.1 Broyage à billes.

I.2 Les types de broyage

I.2.1 Selon le mode d'action mécanique :

- Broyage par compression : Les matériaux sont écrasés entre deux surfaces (ex. : broyeur à mâchoires, broyeur à cylindres).
- Broyage par impact (choc) : Les particules sont projetées contre des surfaces dures ou entre elles (ex. : broyeur à marteaux, broyeur à percussion).
- Broyage par attrition (frottement) : Les particules sont usées ou râpées par frottement (ex. : broyeur à disques, broyeur colloïdal).
- Broyage par découpe : Utilisé surtout pour les matériaux fibreux ou plastiques (ex. : broyeur à couteaux).

I.2.2 Selon la taille finale des particules :

- Broyage grossier : Taille des particules : >1 mm (préparation des matériaux bruts).
- Broyage fin : Taille des particules : 100 µm à 1 mm (utilisé dans la fabrication de poudres).
- Broyage ultrafin ou micronisation : Taille : <100 µm, voire en nanomètres (utilisé dans les secteurs pharmaceutique, cosmétique, ou chimique).

I.1.3 Selon le milieu de broyage :

- Broyage à sec : Sans ajout de liquide, souvent plus simple et économique.
- Broyage humide : Avec ajout d' eau ou d' un liquide.

I.3 Types d'équipements de broyage

Les broyeurs peuvent être classés en plusieurs catégories selon différents critères, notamment le mode de fonctionnement, la configuration structurelle, ou encore le type de déchargement. Voici les principaux types [2] :

I.3.1 Broyeurs à billes

Le broyeur à billes est un équipement industriel de broyage largement utilisé dans divers secteurs pour réduire la taille des matériaux solides. Il se compose essentiellement d'un cylindre métallique rotatif, monté horizontalement, partiellement rempli de boulets – généralement en acier, en fonte ou en céramique qui jouent le rôle d'agents broyants. Lors de la rotation du cylindre autour de son axe, les boulets sont entraînés par la paroi, puis retombent sous l'effet de la gravité, créant ainsi des forces d'impact et de friction sur les matériaux introduits. Ce mécanisme provoque la fragmentation progressive des particules solides, jusqu'à obtenir la granulométrie souhaitée [3].

Le broyeur à billes peut fonctionner selon deux modes : en voie sèche, lorsque le matériau est broyé sans ajout de liquide, ou en voie humide, lorsque de l'eau ou un autre liquide est utilisé pour faciliter le broyage et limiter la poussière. Ce choix dépend de la nature du matériau traité, des propriétés recherchées et des exigences du procédé industriel.

Grâce à sa polyvalence, sa robustesse, et sa capacité à traiter de grandes quantités de matière, le broyeur à billes est utilisé dans de nombreuses industries. On le retrouve notamment dans :

- L'industrie du ciment, pour le broyage du clinker et d'autres additifs.
- La fabrication de céramique, pour obtenir des poudres fines et homogènes essentielles à la qualité des produits finis.
- La métallurgie, pour le traitement et l'enrichissement des minerais métalliques ou non métalliques.
- L'industrie chimique, pour la production de poudres réactives et homogènes.
- La fabrication d'engrais, de pigments, de matériaux réfractaires, et bien d'autres domaines où la réduction granulométrique est une étape critique.
- En plus de son efficacité, le broyeur à boulets permet un contrôle précis de la finesse de broyage, ce qui est essentiel pour garantir la qualité du produit fini. Il peut être intégré dans des installations industrielles complexes, en amont ou en aval d'autres opérations comme le concassage, le tamisage, ou le mélange [4].



Figure I.2 Broyeurs à billes

I.3.2 Broyeur à couteaux

Parfois appelés granulateurs, ils mettent en œuvre un système rotor-stator qui cisaille le produit broyé. Leur capacité de production dépend de la puissance fournie (de l'ordre de 250 à 1500 Watts), de la vitesse du rotor ainsi que de la longueur et du nombre des couteaux dont la forme.

Peut aussi éventuellement varier. Ces appareils sont particulièrement recommandés pour le traitement des matériaux fibreux tels que les légumes, les plantes aromatiques et certaines épices mais aussi pour les matières plastiques et le papier. Les tailles obtenues sont généralement de l'ordre de 1 à 6 mm À titre indicatif, les débits peuvent être très importants et dépasser plusieurs dizaines de tonnes à l'heure comme lors du broyage des betteraves en sucrerie. Certains appareils sont munis de dispositifs d'alimentation permettant d'introduire des pièces de grande taille [5].

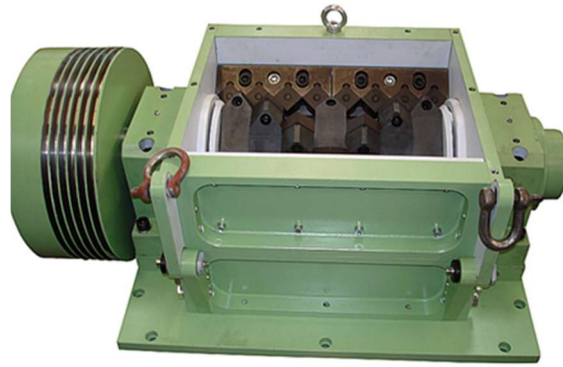


Figure I.3 Broyeur à couteaux

I.3.3 Broyeur à marteaux

Le broyeur à marteaux est composé d'un rotor assemblé axialement, tournant dans une chambre de broyage dont la partie inférieure est un tamis. Le produit introduit dans la chambre est frappé par les marteaux en rotation rapide, et quitte la chambre lorsqu'il peut passer à travers le tamis du fond [6].

Ils produisent une réduction de taille par impact entre les particules et une surface dure. Les principaux facteurs régissant le procédé sont :

- la taille et la forme du tamis associé
- Le type de marteaux
- la vitesse périphérique des marteaux (20 à 60m.s-1)

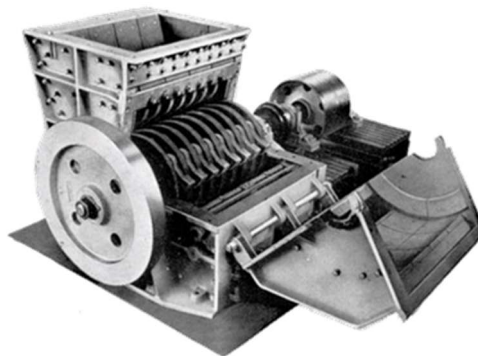


Figure I.4 Broyeur à marteaux

I.3.4 Broyeur à cône

Les concasseurs giratoires sont utilisés pour les roches dures et très dures et d'après leur destination sont divisés en concasseurs grossiers, intermédiaires et fins.

Dans tous les types de ces concasseurs le minerai est écrasé entre une couronne à axe vertical (stator ou cône fixe) et un noyau conique (rotor ou cône mobile) dont l'axe est animé d'un mouvement spécial : point supérieur fixe, point inférieur tournant dans un plan horizontal. La

superficie du cône mobile en rapprochant de celle du cône fixe écrase le minerai se trouvant entre elles. Lors du recul de la superficie du cône mobile de celle du cône fixe s'effectue le déchargement du produit concassé sous l'action de la pesanteur [7].

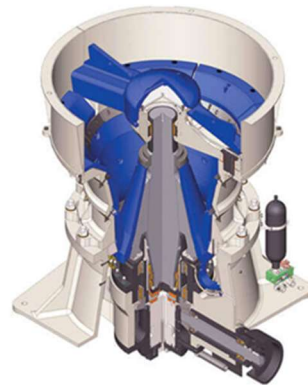


Figure I.5 broyeur à cône

I.3.5 Broyeur à mâchoire

La chambre de concassage est constituée par deux mâchoires disposées en V dont l'une est fixe et l'autre mobile. Cette dernière est articulée autour d'un axe horizontal qui peut être placé à la partie supérieure de l'appareil ou à la partie inférieure. Les mâchoires opèrent entre deux plaques latérales. Les matériaux sont concassés par compression et s'évacuent par gravité (Blazy et Jdid, 1991). Selon le mode de transformation d'un mouvement vertical, créé par un système excentrique ou bielle, en un mouvement de battement périodique communiqué à la mâchoire mobile [8].

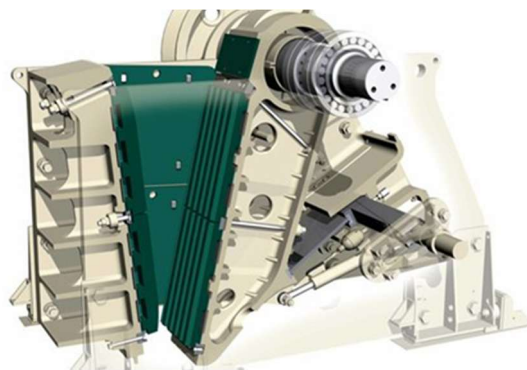


Figure I.6 Broyeur à mâchoire

I.3.6 Broyeurs à percussion

Les broyeurs à percussion utilisent une technique qui consiste à concasser le produit alimenté par choc plutôt que par pression. Le phénomène d'attrition est également utilisé dans ce type de concasseur par le réglage des écrans. Les grands concasseurs à percussion présentent une capacité de l'ordre de 1500 t/h [9].

Le rotor du concasseur est généralement équipé de marteaux ou de couteaux, en fonction du type de matériau à concasser. Les couteaux seront préférés au concassage des matériaux mous,

élastiques, fibreux ou collants (argiles par exemple) tandis que les marteaux seront préférés pour des matériaux durs et abrasifs (roches par exemple).

Cette machine combine l'énergie de rotation avec l'énergie de percussion pour concasser les matériaux. Si les granulats ne sont pas cassés par la percussion des blocs, l'énergie supplémentaire emmagasinée lors de la frappe permet de les casser lors de la rencontre avec les marteaux du rotor (ou couteaux).

Cette machine fonctionne généralement en continu.

Il y a une différence fondamentale entre le matériau concassé par compression (précédemment Introduit) ou par impact. Dans le matériau concassé par compression, des contraintes internes restent et peuvent aider à une deuxième réduction de taille. L'impact, lui, donne une fracture directe sans qu'il reste des contraintes internes [10].



Figure I.7 broyeur à percussion

I.3.7 Broyeur à cylindre

Dans ce type de broyeurs le broyage s'effectue par l'écrasement ininterrompu avec la trituration du minerai par les cylindres tournants dans les sens inverses (fig. I-12). On utilise ces concasseurs pour les minerais de moyenne à dureté élevée.

Les cylindres de broyage à haute pression correspondent en quelque sorte à la nouvelle génération des concasseurs à rouleaux, et sont de plus en plus présents dans l'industrie extractive. L'avantage de ce dernier est que l'espace entre les cylindres est modulable tandis que pour le modèle précédent, il était fixe. Grâce à l'électronique, l'écart entre les rouleaux peut être modulé suivant le type de roche extraite traité [11].



Figure I.8 broyeur à cylindres

Conclusion

Les broyeurs en général quelle que soit leurs types ou leurs tailles, sont des machines mécaniquement impressionnantes et leur fonction ne s'arrête pas là. Elle apparait aussi dans leur simplicité en même temps, et leurs modes de fragmentation consistent à soumettre les solides à fragmenter à une contrainte créée par des forces de cisaillement. Par conséquent, ils nous permettent de réduire le volume.

Chapitre II

Dimensionnement

Chapitre 2 : Dimensionnement

Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons l'ensemble des calculs essentiels liés au broyeur à billes, dans le but d'en assurer le bon fonctionnement, ainsi qu'une efficacité et des performances optimales. Ces calculs incluent notamment la vitesse critique, le taux de remplissage, la puissance nécessaire, le volume de charge, ainsi que le choix de la courroie de transmission. Tous ces paramètres mécaniques fondamentaux contribuent à garantir la fiabilité et la durabilité de l'appareil.

II.1 Paramètres de broyages du broyeur à billes

Ces paramètres influencent directement l'efficacité et la qualité du processus de broyage dans un broyeur à billes. Les plus importants sont :

II.1.1 Vitesse critique du broyeur

La vitesse critique d'un broyeur à billes est la vitesse de rotation à laquelle les corps broyants (les billes) commencent à être entraînés contre la paroi du tambour cylindrique horizontal sans retomber, ceci est une condition pour le bon fonctionnement, par contre ceci amène à une diminution à l'efficacité du broyage, elle représente donc une limite théorique à ne pas dépasser pour assurer un broyage optimal [12].

Au départ, nous utilisons un moteur tournant à une vitesse de 940 tr/min. Cette vitesse étant trop élevée pour le bon fonctionnement d'un broyeur à billes, un système de poulie et courroie a été mis en place afin de réduire la vitesse à 251 tr/min. Toutefois, cette vitesse s'est également révélée inadéquate pour garantir un broyage optimal. Par conséquent, un variateur de vitesse a été intégré au système afin de permettre un réglage plus précis et progressif de la vitesse de rotation, assurant ainsi un fonctionnement plus adapté et plus efficace à la machine.

La vitesse critique, en tours par minute (tr/min), est généralement donnée par la formule [13] :

$$N_c = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \quad (\text{EqII.1})$$

N_c : vitesse critique

D : Diamètre intérieur du broyeur (m)

II.1.2 Rapport de transmission [14] :

$$r = \frac{N_1}{N_2} = \frac{D_2}{D_1} \quad (\text{EqII.2})$$

$$r = \frac{D_2}{D_1} = \frac{35}{131} = 0.2671$$

$$r = \frac{N_1}{N_2}$$

$$N_1 = r * N_2$$

$$N_1 = 0.2671 * 940$$

$$N_1 = 251 \text{tr/min}$$

N_2 : Vitesse de rotation du moteur

N_1 : Vitesse de rotation du bouteille

II.1.2.1 La formule pour exprimer le pourcentage de la vitesse par rapport à la vitesse nominale :

La relation entre la fréquence et la vitesse de rotation est donnée par [15].

$$N = \frac{f}{f_{nominal}} * N_{nominal} \quad (\text{EqII.3})$$

$$f = \frac{N}{N_{nominal}} * f_{nominal}$$

$$f = \frac{77}{251} * 50$$

$$f = 15.34 \text{ Hz}$$

N : vitesse réelle en tr/min

$N_{nominal}$: vitesse nominale du moteur

f : la fréquence actuelle

$f_{nominal}$: La fréquence nominale du moteur (généralement 50 Hz)

Le graphique ci-dessous présente la relation linéaire entre la vitesse de rotation N (tr/min) et la fréquence f (Hz). On observe que le point calculé ($N = 77$ tr/min) correspond à une fréquence de 15,34 Hz.

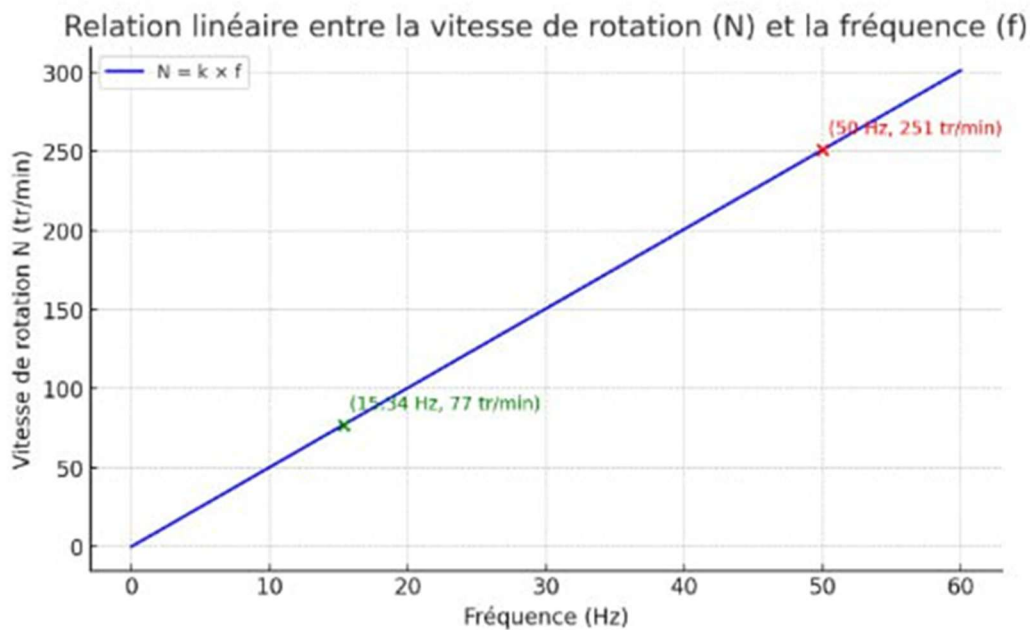


Figure II.1 la relation linéaire entre la vitesse de rotation N (tr/min) et la fréquence f (Hz) [16].

II.1.2.2 Calcule la Vitesse critique :

$$N_c = \frac{42,3}{\sqrt{D}}$$

Et D=0.3m donc :

$$N_c = \frac{42,3}{\sqrt{0,3}} \qquad N_c = 77 \text{ Tours}/\text{min}$$

II.1.3 Volume du Tambour

Le volume du tambour du broyeur, de forme cylindrique, est donné par la relation suivante [17] :

$$V_T = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 L \qquad \text{(EqII.4)}$$

Avec :

$$D=0.3 \text{ m}$$

$$L=0.65 \text{ m}$$

$$\text{Alors : } V_{Tambour} = 0,0459225 \text{ m}^3$$

II.1.3.1 Charge du broyeur

Volume des charges (100%) = j*Volume des produits + j*Volume des billes [18].

Avec j : Taux de remplissage

Volume des produits = 30%

Volume des billes = 70%

Alors :

$$V_{charge} = j(0.3V_{totale} + 0.7V_{totale}) = jV_{totale} \qquad \text{(EqII. 5)}$$

$$V_{charg} = jV_{Tambour}$$

j=0,32 (soit 32 % du volume du tambour)

$$\text{Alors : } V_{charge} = 0.32*0,0459225= 0,0146952 \text{ m}^3$$

$$V_{billes} = V_{charge} * 0.7$$

$$V_{produit} = V_{charge} * 0.3$$

Alors :

$$V_{billes} = 0,0146952 * 0.7 = 0,01028664 \text{ m}^3$$

$$V_{produit} = 0,0146952 * 0.3 = 0,00440856 \text{ m}^3$$

II.1.3.2 Masse d'une seule bille

$$V_{bille} = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (\text{EqII. 6})$$

$$V_{bille} = \frac{4}{3}\pi(0,025)^3 = 6,5 \times 10^{-5} m^3$$

$$\text{Alors : } m_{bille} = \rho_{bille} * V_{bille} \quad (\text{EqII. 7})$$

$$m_{bille} = 7850 * 6.5 \times 10^{-5} = 0,51339 \text{ kg}$$

II.1.3.3 Calcul de la puissance absorbée par le broyeur

Voici une formule empirique couramment utilisée pour estimer la puissance absorbée par un broyeur à billes en fonction de ses dimensions et de sa charge broyant [19] :

$$P = k * D^{2.5} * L * j * \omega^2 \quad (\text{EqII. 8})$$

Où :

P : Puissance absorbée (kW)

D : Diamètre intérieur du broyeur (m)

L : Longueur du broyeur (m)

j : Taux de remplissage de la charge broyante (fraction entre 0 et 1)

ω : vitesse de rotation (rad/s)

k : Coefficient empirique dépendant du type de broyeur, des matériaux broyés, et de l'efficacité énergétique (souvent déterminé expérimentalement), cas typique k=10.4

Donc :

$$P = 10.4 * (0.3)^{2.5} * 0.65 * 0.32 * (70)^2 = 522,511 \text{ W}$$

$$P = 0,522 \text{ kw} \approx 0,55 \text{ kw}$$

$$P = 10.4 * (0.3)^{2.5} * 0.65 * 0.32 * (70)^2 = 522,511 \text{ W}$$

$$P = 0,522 \text{ kw} \approx 0,55 \text{ kw}$$

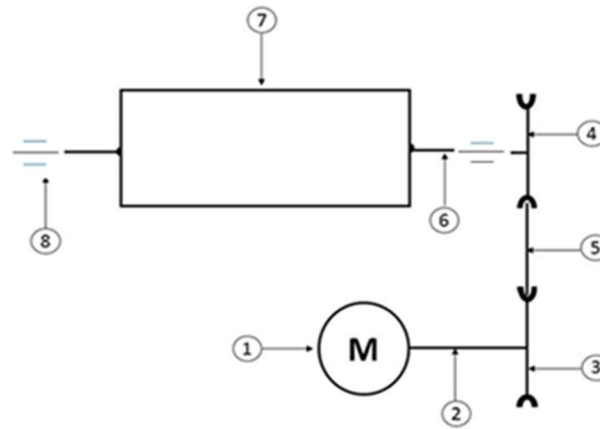


Figure II.2 La chaîne cinématique
Tableau II.1 Désignation de la chaîne cinématique

Numéro	Designation	Nombre d'éléments
1	Moteur électrique	1
2	Arbre moteur	1
3	Poulie	1
4	Poulie moteur	1
5	Courroie	1
6	Arbre	2
7	Tambour	1
8	Palier	2

II.1.4 Le choix de la courroie de transmission :

Le choix du type de courroie dans un système de transmission mécanique dépend principalement du rapport de transmission souhaité, ainsi que des conditions de fonctionnement telles que la puissance à transmettre, la vitesse de rotation, la distance entre les arbres, et le niveau de précision requis. En fonction de ces paramètres, différents types de courroies peuvent être utilisés, tels que les courroies plates, les courroies trapézoïdales (ou en V), et les courroies synchrones (crantées). Chaque type présente des avantages et des limites spécifiques qui influencent directement l'efficacité et la fiabilité du système de transmission.

II.1.4.1 Le meilleur choix dans notre cas est une courroie trapézoïdale (en V)

II.1.4.1.1 Les avantages de la courroie trapézoïdale (en V) :

La courroie trapézoïdale offre une excellente adhérence grâce à sa forme en V, qui s'encastre parfaitement dans la gorge de la poulie. Le frottement latéral ainsi généré réduit considérablement le glissement, ce qui la rend particulièrement fiable pour les applications à forte charge, telles que les broyeurs et les compresseurs [20]. De plus, elle est facilement disponible sur le marché

Tableau II.2 les avantage de la courroie trapézoïdale (en V)

Application	Avantage
Grâce à la forme en V qui s'encastre dans la gorge de la poulie	Excellente adhérence
Le frottement est amplifié sur les flancs	Glissement réduit
Parfait pour les broyeurs, compresseurs, machines-outils	Fiable pour charges élevées
Large choix de profils (A, B, C, etc.)	Facile à trouver et standardisée

II.1.4.1.2 Profil de la courroie à choisir :

Les courroies trapézoïdales sont disponibles en plusieurs profils, définis en fonction de la puissance à transmettre. Le profil A est adapté aux faibles puissances, tandis que le profil B convient aux puissances moyennes à élevées. Quant au profil C, il est conçu pour les applications nécessitant la transmission de charges importantes.

Chaque profil est caractérisé par des dimensions standardisées, ce qui facilite le processus de sélection en fonction des exigences mécaniques et des conditions d'utilisation spécifiques. Le tableau ci-dessous présente une comparaison des profils [20].

Tableau II.3 Profil de la courroie à choisir

Puissance typique	Hauteur	Largeur en haut	Type
Faible à moyenne	8 mm	13 mm	A
Moyenne à forte	11 mm	17 mm	B
Forte	14 mm	22 mm	C

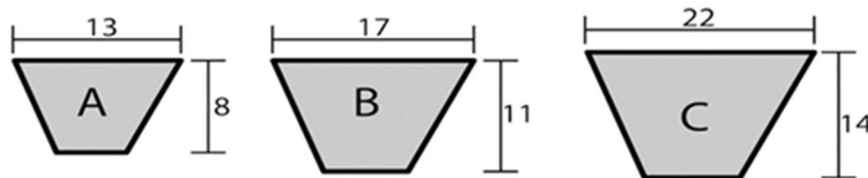


Figure II.3 Les profils des courroies trapézoïdales standards [21].

II.2 Calcul de la résistance des matériaux (RDM) :

Dans le cadre de l'étude de la résistance des matériaux (RDM), pour évaluer les efforts mécaniques appliqués aux composants structurales qui constituent le broyeur à billes (tels que l'arbre, le tambour et les paliers), dans le but de garantir leur résistance, leur rigidité et leur capacité à supporter les charges statiques ainsi que les charges dynamiques engendrées par la rotation du broyage. Il est donc nécessaire de réaliser une simulation en RDM à l'aide du logiciel ANSYS Workbench afin de prédire le comportement mécanique des éléments sollicités.

II.2.1 Simulation par ANSYS Workbench

La simulation numérique est devenue un outil incontournable dans l'analyse et la conception des systèmes mécaniques.

II.2.1.1 Géométrie

Le modèle présenté représente une structure cylindrique avec deux arbres d'axes coaxiaux, souvent utilisée dans les broyeurs, convoyeurs ou systèmes de transmission par rotation. Cette structure cylindrique est soumise à des efforts mécaniques tels que le moment de torsion transmis par les arbres et la flexion résultante de la charge répartie ou concentrée sur la surface du cylindre. Dans le cadre de l'étude en Résistance des Matériaux (RDM), la géométrie du broyeur cylindrique nécessite une analyse de la contrainte de cisaillement due à la torsion, ainsi qu'une vérification de la flèche maximale et des contraintes normales dues à la flexion au niveau des arbres, le tambour et les paliers. Les sections des arbres aux extrémités sont dimensionnées pour assurer la transmission du couple sans dépasser la limite élastique du matériau. Cette modélisation constitue une étape essentielle pour valider la résistance et la durabilité des constituants sous les sollicitations mécaniques attendues.

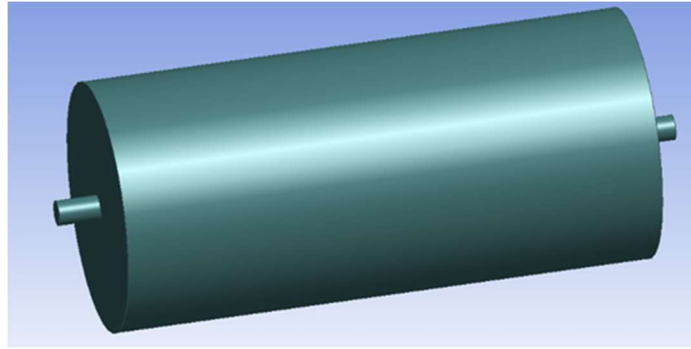


Figure II.4 Géométrie du tambour

II.2.1.2 Maillage

Le maillage d'un cylindre muni de deux arbres, une phase cruciale dans l'analyse par la méthode des éléments finis (MEF). Cette opération consiste à discrétiser le modèle géométrique en un ensemble d'éléments finis (souvent tétraédriques en 3D), permettant de simuler le comportement mécanique de la pièce sous différentes sollicitations. Le choix du type et de la taille du maillage dépend de la précision souhaitée et de la complexité des chargements. Dans ce cas, on observe un maillage relativement régulier qui assure un bon compromis entre précision de calcul et performance numérique. Cette étape est indispensable avant l'application des conditions aux limites et des charges, afin d'obtenir des résultats fiables sur les contraintes, les déformations et les déplacements dans le solide.

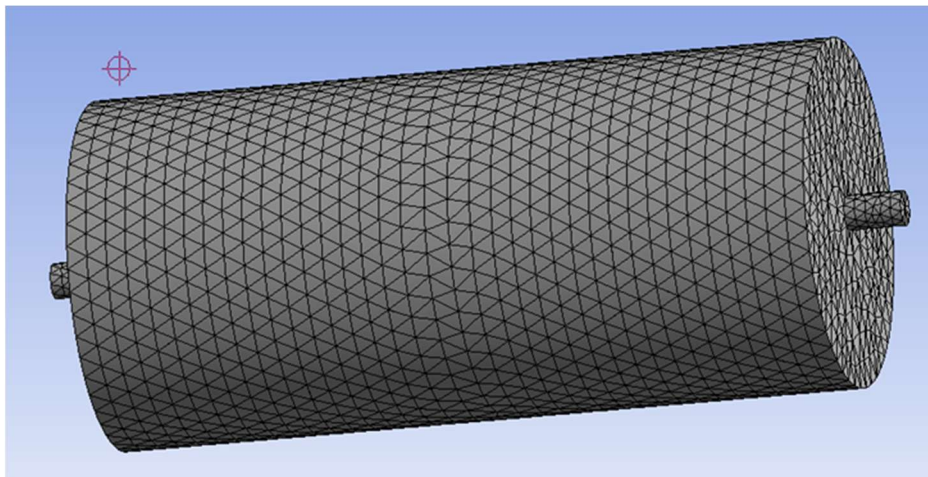


Figure II.5 Maillage du tambour

II.2.2 Etude des sollicitations statiques dans le broyeur :

L'étude des sollicitations statiques dans le broyeur à billes permet d'évaluer les contraintes et déformations dues aux charges permanentes, notamment le poids propre de la structure et la masse du matériau broyé. Cette étape est essentielle pour vérifier la résistance mécanique du broyeur

II.2.2.1 Les conditions aux limites et application des charges (Billes) :

Les conditions aux limites et la charge externe sur le modèle maillé. Les surfaces B et C, situées aux extrémités des axes, sont encastées ou bloquées, ce qui signifie qu'elles ne peuvent ni se déplacer ni se déformer – cela simule un montage fixe sur des paliers. La flèche rouge en A représenté une force

verticale descendante, appliquée sur la surface du cylindre, simulant par exemple un poids propre ou une charge exercée par un matériau à l'intérieur. Cette configuration permet d'analyser le comportement mécanique de la structure cylindrique sous contraintes, notamment les déplacements, les contraintes de flexion et les zones de concentration d'efforts.

Pour le point A (flèche rouge), positionné latéralement, on a appliqué :

Il représente une force ou une charge exercée sur la surface latérale du cylindre.

La direction de la flèche indique le sens d'application de la force (généralement une compression, une traction ou une charge latérale)

Le placement de la charge en positionné latéralement du cylindre est souvent utilisé pour étudier les effets d'un chargement latéral ou asymétrique.

L'objectif est d'observer comment se modifient la répartition des contraintes et les déformations sous l'effet d'une charge déséquilibrée

Si la charge est appliquée exactement au centre, le modèle peut devenir trop symétrique, ce qui risque de masquer certains comportements réels pouvant apparaître lorsque les charges sont appliquées de manière excentrée

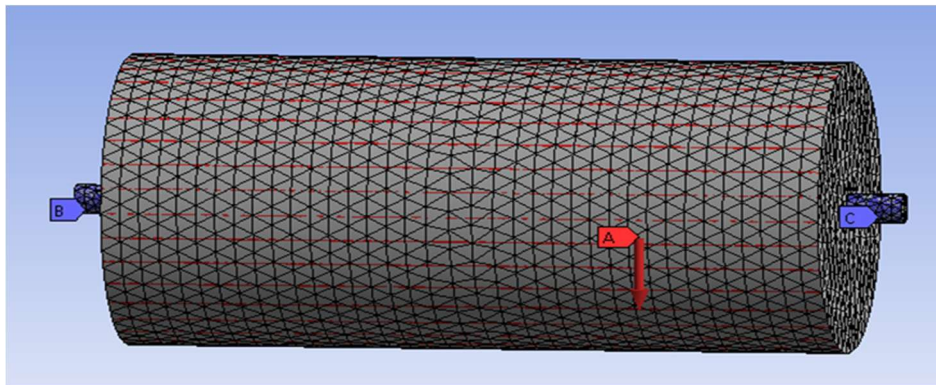


Figure II.6 Les conditions aux limites et application des charges

II.2.2.2 Résultats de l'étude statique

L'étude des sollicitations statiques dans le broyeur à billes vise à analyser les contraintes et déformations dues aux charges permanentes, telles que le poids propre de la structure et la masse du matériau broyé à l'intérieur.

Les extrémités B et C sont encastées, simulant un montage fixe sur des paliers, empêchant tout déplacement ou déformation.

La force appliquée en A est une charge verticale descendante, représentant par exemple le poids du matériau.

Cette configuration permet d'évaluer :

- Les déplacements de la structure
- Les contraintes de flexion
- Les zones critiques de concentration d'efforts

L'objectif est de vérifier la capacité mécanique du cylindre à supporter les charges appliquées sans défaillance, garantissant ainsi la sécurité et la fiabilité du broyeur

II.2.2.2.1 Déformation totale

les résultats d'une analyse des contraintes dans l'environnement ANSYS pour un système soumis à une analyse de type "Static Structural".

Type de résultat : Déformation totale (Total Deformation)

Unité : mètre (m)

Temps : 1 (ce qui signifie que l'analyse est statique et non temporelle)

Les résultats sont illustrés à l'aide d'une échelle de couleurs représentant l'ampleur des déformations :

Déformation maximale (en rouge) :

$1,3412 \times 10^{-8}$ m

Déformation minimale (en bleu) : 0 m

Ces valeurs sont très faibles, ce qui indique que la structure est rigide et résistante à la déformation sous les charges appliquées

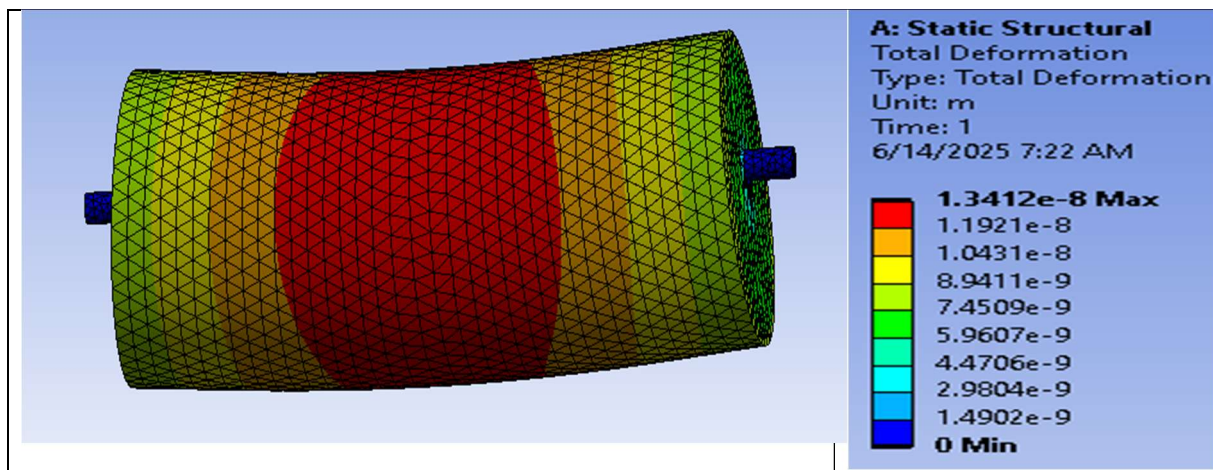


Figure II.7 Déformation totale

II.2.2.2.2 Contrainte équivalente

les résultats d'une analyse des contraintes réalisée avec ANSYS dans un contexte de Static Structural, représentant la répartition de la contrainte équivalente (von Mises).

Type de résultat : Contrainte équivalente (von Mises)

Unité : Pascal (Pa)

Temps : 1 (analyse statique – non temporelle)

Contrainte maximale : 50523 Pa (en rouge)

Contrainte minimale : 2.0618 Pa (en bleu)

Les contraintes sont globalement faibles, ce qui montre que la structure fonctionne dans un régime sûr. Les zones en rouge concentrent le plus de contrainte, alors que les autres zones restent peu sollicitées.

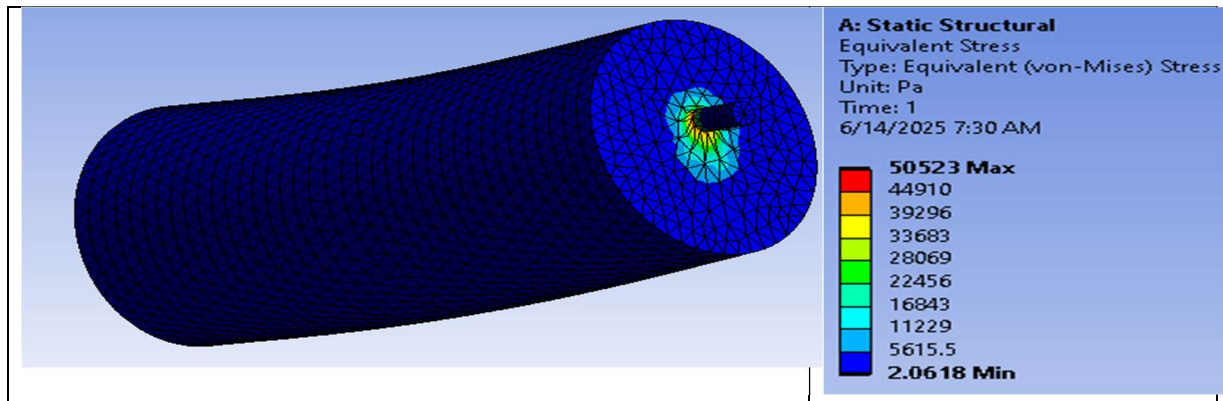


Figure II.8 Contrainte équivalent

II.2.2.2.3 Force de réaction sur l'appui gauche

Les résultats affichés correspondent à la force de réaction générée au niveau du support cylindrique (Cylindrical Support) défini comme appui gauche dans la simulation.

Tableau II.4 résultats numériques de l'analyse

Direction	Valeur (N)
X Axis	0,010145 N
Y Axis	49,984 N
Z Axis	-0,19216 N
Total	49,985 N

La composante la plus significative est sur l'axe Y avec environ 49,98 N, ce qui reflète le comportement attendu d'un appui supportant une charge verticale.

Les composantes selon les axes X et Z sont faibles (quasi nulles), ce qui peut indiquer une contrainte de mouvement libre ou très faible dans ces directions.

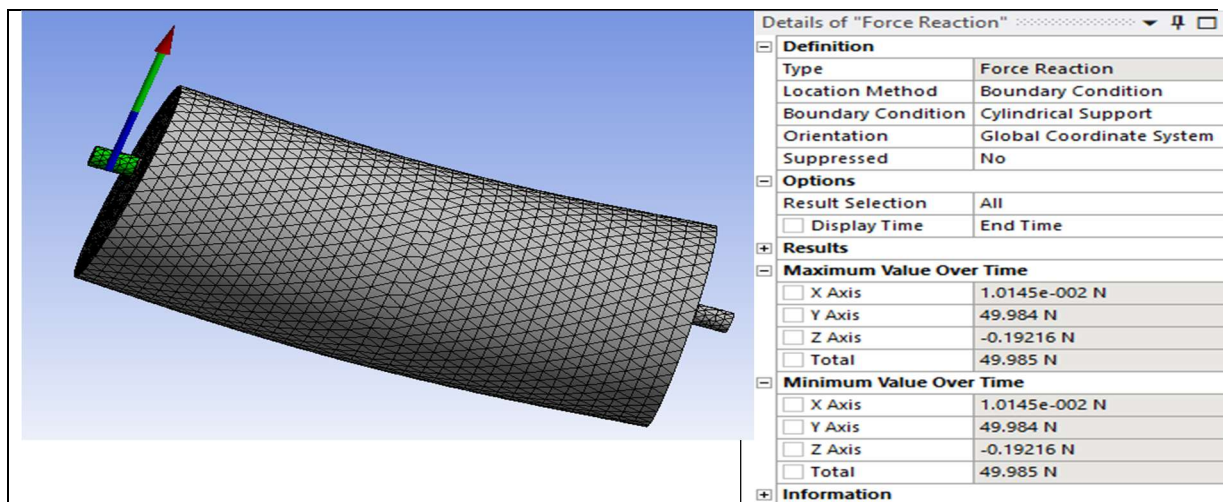


Figure II.9 Force de réaction sur l'appui gauche

II.2.2.2.4 Force de réaction sur l'appui droit

Les résultats de la "force de réaction" au niveau de la condition de limite "Cylindrique Support 2" montrent que la réaction principale est concentrée selon l'axe vertical Y), avec une valeur constante de 50.016 N, ce qui indique que la charge appliquée agit principalement dans cette direction. En revanche,

les forces selon les axes X et Z sont très faibles, traduisant une stabilité dans ces directions et une absence d'influence significative. La constance des valeurs maximales et minimales tout au long de l'analyse témoigne de la régularité et de l'équilibre de la charge appliquée dans le temps. Ces résultats confirment la pertinence du type de support utilisé et la bonne répartition des charges dans le modèle étudié.

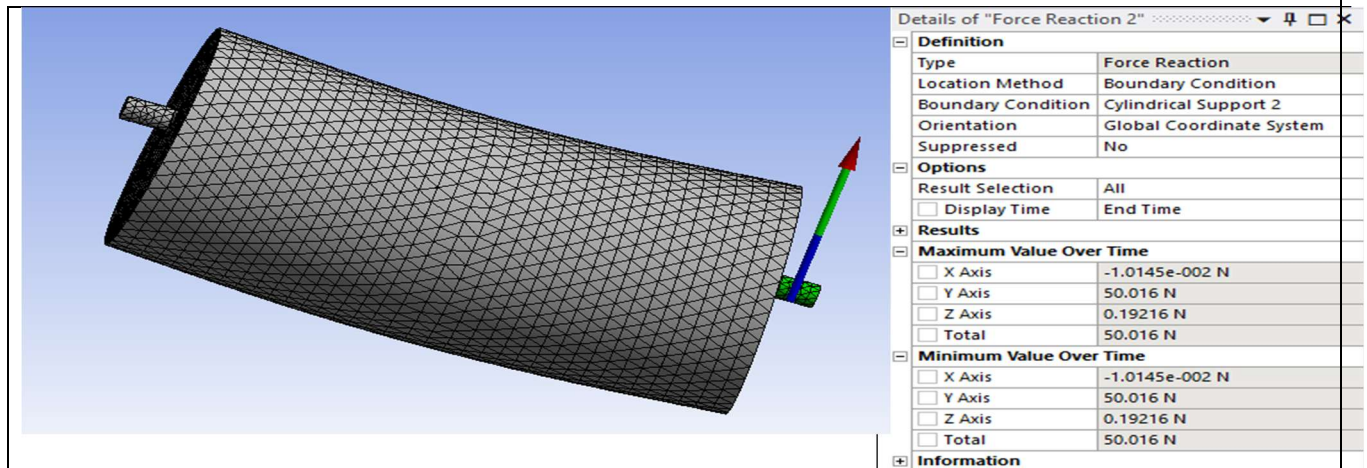


Figure II.10 réaction droite

Tableau II.5 Valeur des forces des réactions

réaction	F (N)
Extrémité gauche	49.985
Extrémité droite	50.016

Le tableau ci-dessus montre les résultats de la force de réaction au niveau des extrémités du support cylindrique indiquent une répartition très équilibrée des charges :

Extrémité gauche : 49.985 N

Extrémité droite : 50.016 N

Cette différence (≈ 0.031 N) est négligeable et peut être attribuée à des arrondis numériques ou à des variations infimes dans la modélisation. Cela confirme que la charge appliquée est bien centrée et symétrique, avec une composante principale selon l'axe vertical (Y).

II.2.3 Etude des sollicitations dynamiques dans le broyeur :

Le fonctionnement du broyeur à billes engendre des sollicitations dynamiques, dues à la rotation du cylindre, les forces centrifuges et aux impacts répétés des billes contre les parois.

L'objectif de cette étude est d'identifier les zones les plus sollicitées.

Dans le cadre de la simulation de la structure cylindrique en rotation, nous avons choisi l'application d'une vitesse angulaire de 77 tr /min qui est la vitesse critique pour le bon fonctionnement du broyeur. Cette étape est cruciale pour analyser les effets dynamiques ou mécaniques tels que la distribution des contraintes, la déformation due à la force centrifuge résultante ou encore le comportement vibratoire.

Grâce au module de simulation mécanique d'ANSYS Workbench, permet de modéliser avec précision ce type de chargement rotatif (Figure II.7).

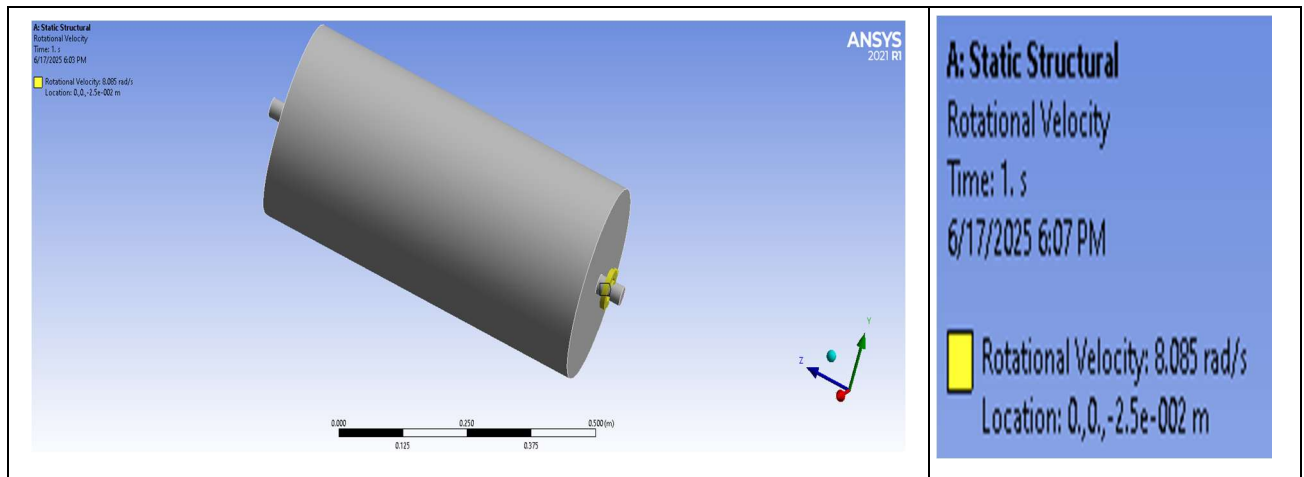


Figure II.11 Application d'une rotation (8.085rd/s)

II.2.3.1 Résultats de l'étude dynamique

L'analyse structurelle statique réalisée sur le modèle montre une déformation totale très faible, avec une valeur maximale de $4,0444 \times 10^{-8}$ m, indiquant une grande rigidité du modèle ou une charge appliquée peu importante. La distribution des déformations, visualisée par un dégradé de couleurs allant du bleu au rouge, révèle des zones immobiles et d'autres plus sollicitées. Par ailleurs, l'évaluation des contraintes équivalentes selon le critère de von Mises met en évidence une variation significative des efforts internes (de 79,017 Pa à

$1,5211 \times 10^5$ Pa), permettant d'identifier les zones potentiellement critiques. Enfin, l'étude des réactions aux supports cylindriques montre des forces de réaction totales similaires (152 N), principalement orientées selon l'axe Y, avec de légères composantes sur les axes X et Z. Ces résultats sont essentiels pour évaluer la stabilité du modèle et l'efficacité du système de support.

II.2.3.1.1 Déformation totale

Analyse structurelle statique (Static Structural) illustrant la déformation totale (Total Deformation) d'un modèle soumis à une charge donnée, exprimée en mètres. L'analyse indique que la déformation maximale enregistrée est de $4,0444 \times 10^{-8}$ m, tandis que la déformation minimale est nulle, ce qui révèle l'existence de zones restées immobiles. L'échelle de couleurs montre la répartition des déformations sur l'ensemble du modèle, avec un dégradé allant du bleu (déformation minimale) au rouge (déformation maximale). Ces résultats reflètent le comportement du modèle face à la charge appliquée et suggèrent que les déformations sont très faibles, traduisant une grande rigidité du modèle ou une charge relativement faible.

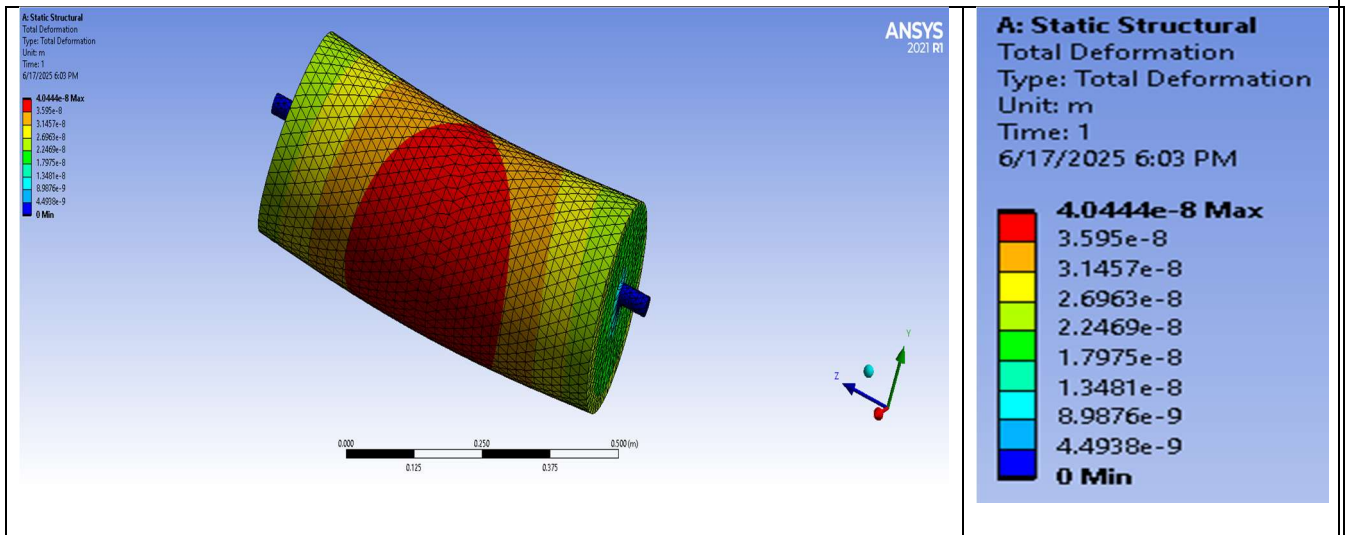


Figure II.12 Déformation totale

II.2.3.1.2 La contrainte équivalente

La répartition de la contrainte équivalente selon le critère de von Mises résultant d’une analyse structurelle statique d’un modèle géométrique, exprimée en pascals (Pa). Les résultats indiquent que la contraint maximal atteint $1,5211 \times 10^5$ Pa, tandis que la contrainte minimale est de 79,017 Pa, révélant une variation significative des contraintes au sein du modèle. Le critère des Mises est utilisé pour évaluer le risque de rupture du matériau sous des charges combinées. L’échelle de couleurs illustre la distribution de ces contraintes, allant du bleu (valeurs faibles) au rouge (valeurs élevées), ce qui permet d’identifier clairement les zones à forte concentration de contraintes susceptibles de représenter un point faible structurel.

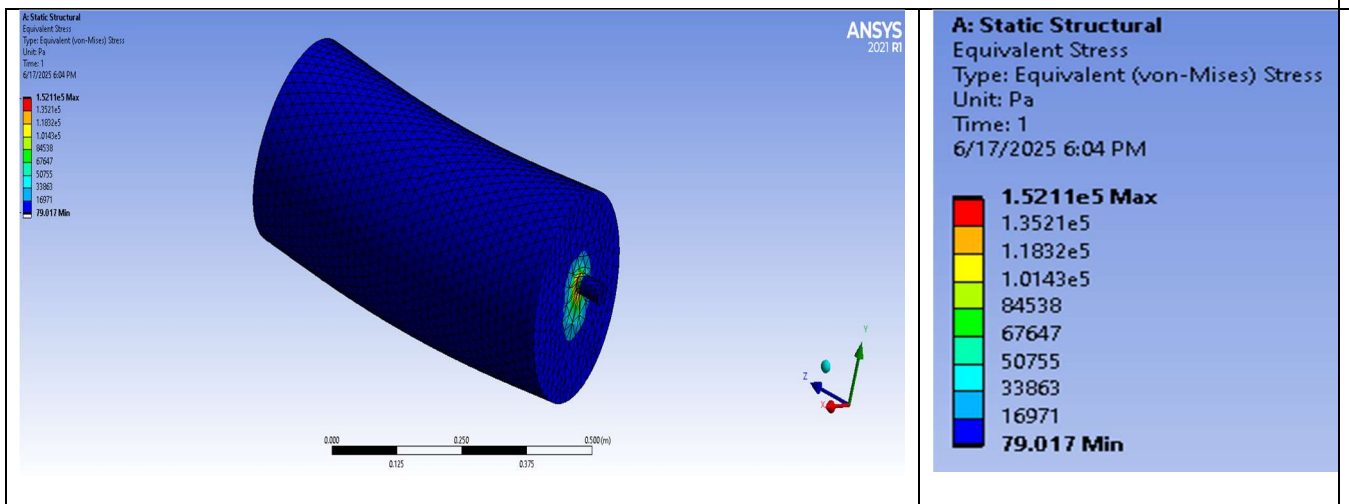


Figure II.13 La contrainte équivalent

II.2.3.1.3 Force de réaction sur l’appui gauche et droit

Les résultats indiquent que le support cylindrique génère une force de réaction totale de 152,05 N, principalement dirigée selon l’axe Y, suivie de l’axe Z, tandis que la composante selon l’axe X est négligeable. Ces valeurs sont essentielles pour comprendre la répartition des efforts et valider l’efficacité du support appliqué au modèle.

Les figures (II.15 et II.16) présent les schémas des réactions des appuis dans les coté.

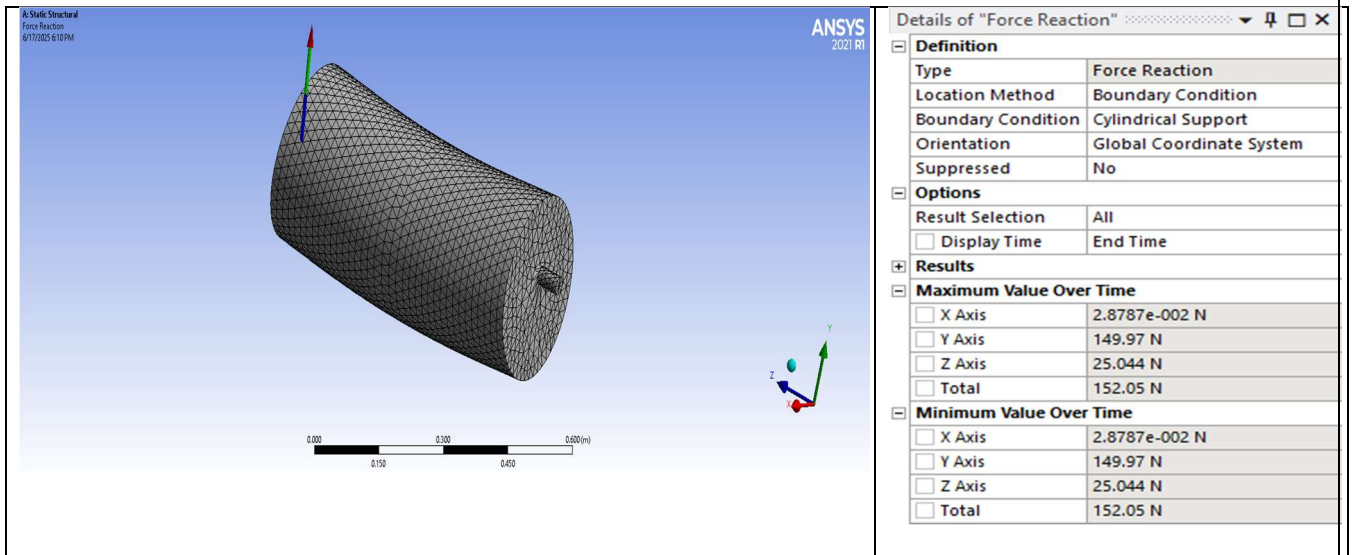


Figure II.14 La Force de réaction sur l'appui gauche

À l'extrémité gauche, la force de réaction est de 152.05 N.

À l'extrémité droite, elle est de 152.1 N.

La faible différence entre les deux valeurs indique que la charge est répartie de façon quasi uniforme entre les deux côtés, ce qui renforce la stabilité du modèle et confirme l'efficacité.

II.2.3.1.3 La Force de réaction sur l'appui droit

Les résultats montrent que le deuxième support cylindrique génère une force de réaction totale de 152,1 newtons, concentrée principalement dans la direction positive de l'axe Y et la direction négative de l'axe Z, tandis que la force sur l'axe X est faible et négative, indiquant une composante mineure de réaction dans cette direction. Ces données sont utiles pour analyser le comportement du deuxième support et le comparer au premier en termes de contribution à la stabilité du modèle.

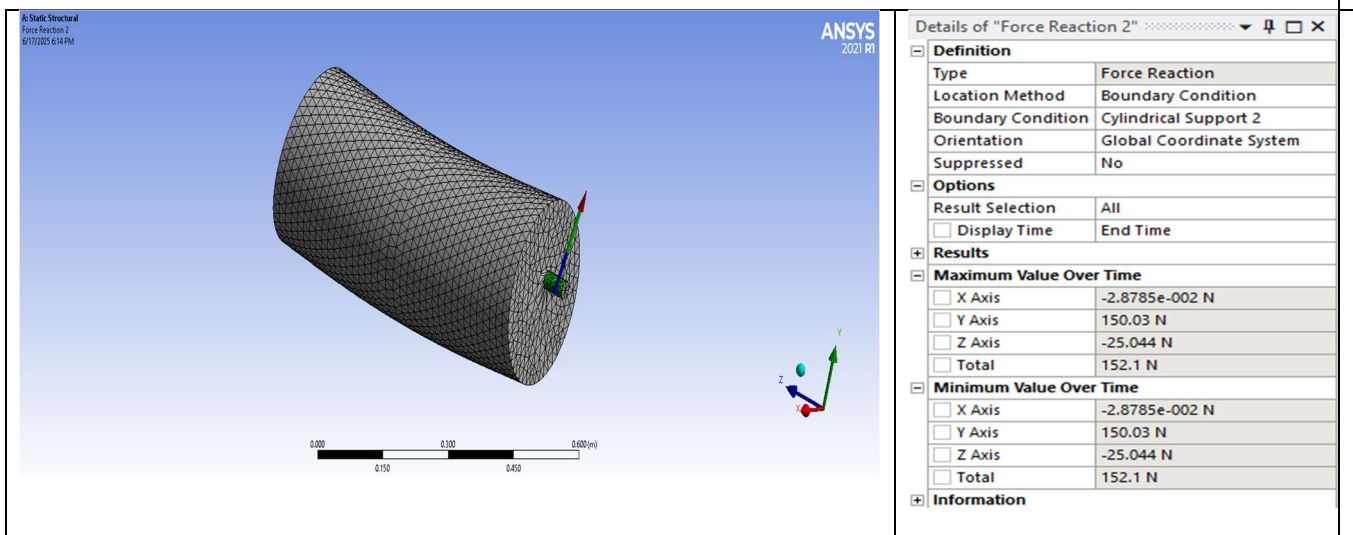


Figure II.15 La force de réaction sur l'appui droit

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons procédé à l'analyse complète des paramètres de broyage du broyeur à billes, ce qui nous a permis de définir les conditions optimales de fonctionnement. Les différentes charges statiques et dynamiques ont été évaluées afin de dimensionner correctement les composants soumis aux efforts. Le choix du modèle de paliers a été effectué selon les normes en vigueur, assurant la fiabilité et la sécurité de l'assemblage. Ces éléments constituent une base solide pour les étapes suivantes de conception et de simulation mécanique.

Chapitre III
Principaux composants
du broyeur à billes

Chapitre 3 : Principaux composants du broyeur à billes

Introduction

Le broyeur à billes est constitué de plusieurs composants essentiels, assurant un bon fonctionnement, des performances élevées ainsi qu'une bonne stabilité de l'ensemble, et qui se compose notamment du tambour, des billes de broyage, du moteur, du système de transmission, des paliers, de la structure portante et des orifices de chargement et de déchargement.

Schéma du broyeur à billes proposé pour la réalisation.

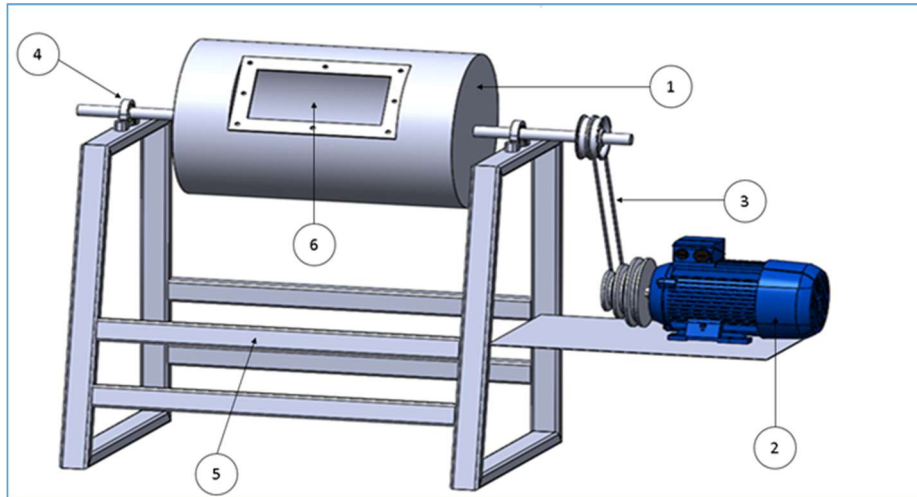


Figure III.1 Prototype du broyeur à billes réalisé

Tableau III.1 Les composants du broyeur à billes

N°	Element
1	Tambour
2	Moteur
3	Système de transmission (poulie et courroie)
4	Paliers
5	table de support
6	Porte d'ouverture de chargement et de déchargement

III.1 Le tambour du broyeur

Le tambour constitue l'élément central du broyeur à billes. C'est à l'intérieur de ce cylindre que se déroule l'opération de broyage, sous l'effet des mouvements de rotation générés par le moteur et de la friction entre les billes et les matériaux à broyer. Il doit être conçu de manière à résister aux forces mécaniques et à l'usure, tout en assurant une efficacité de broyage optimale.

III.1.1 Fonctions du tambour : le tambour assure les fonctions principales suivantes :

- Contenir les matériaux à broyer ainsi que les billes de broyage.
- Assurer un mélange homogène des composants grâce à une rotation continue.
- Transmettre les forces de broyage par l'effet combiné de la chute et du frottement des billes.

III.1.2 Les caractéristiques géométriques du tambour utilisé :

Tableau III.2 Les caractéristiques géométriques du tambour

Caractéristique	Valeur ou description
Forme	Cylindrique
Matériaux	Tôle en acier
Longueur	630 mm (à adapter au projet)
Diamètre	300 mm (à adapter au projet)
Épaisseur	3 à 5 mm
Fermeture	Deux flasques soudées
Couverture	pour le remplissage et le déchargement avec porte de fermeture

III.1.3 La conception et fabrication du tambour :

Pour la conception et la fabrication du tambour, une bouteille de gaz de type GPL a été récupérée, puis modifiée conformément aux exigences du projet. Cette modification a permis d'obtenir la forme cylindrique souhaitée, en adéquation avec les caractéristiques techniques nécessaires à la réalisation du tambour et à son utilisation dans le système de broyage.

III.2 La porte d'ouverture pour le chargement et le déchargement :

La porte d'ouverture de chargement et de déchargement permet un accès direct à l'intérieur du broyeur, facilitant ainsi les opérations de maintenance ainsi que le chargement et le déchargement du matériau broyant.

Cette porte a été conçue de manière à garantir une bonne étanchéité grâce à l'utilisation d'un joint souple, tout en permettant une ouverture et une fermeture aisées à l'aide de deux paumelles, avec un maintien sécurisé assuré par deux boulons (02), renforçant ainsi la sécurité et la fiabilité du fonctionnement.



Figure III.2 Porte d'ouverture

III.3 L'arbre du broyeur

L'arbre du broyeur constitue un élément mécanique central, chargé de transmettre le mouvement de rotation du moteur au tambour cylindrique rotatif. Il s'agit d'un axe cylindrique en acier, dimensionné pour traverser les paliers et supporter l'ensemble des charges appliquées : le poids du tambour, des billes de broyage ainsi que celui des matériaux à broyer



Figure III.3 L'arbre du broyeur

III.4 La table de support :

La table de support est conçue pour supporter et résister aux charges mécaniques, et il constitue l'un des éléments essentiels de la composition du broyeur.

Dans le cas d'un broyeur à billes, La table de supportes principalement composée du châssis porteur, des supports et des dispositifs de fixation.

Ce bâti doit être dimensionné de manière à résister aux efforts dynamiques, aux vibrations ainsi qu'à l'usure, tout en assurant la sécurité de l'utilisateur et la fiabilité du fonctionnement du système

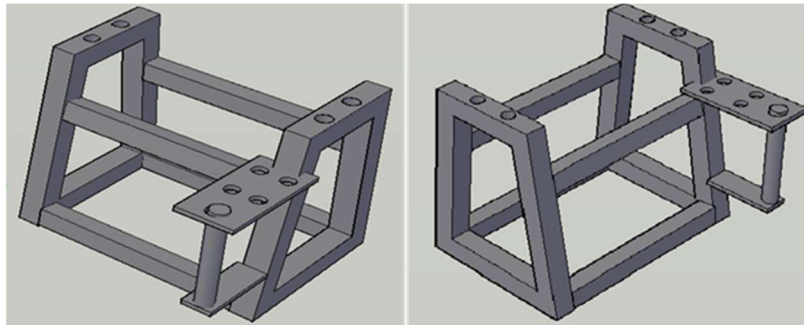


Figure III.4 Table de support

III.4.1 Les matériaux utilisés pour fabriquer la table de support

La table de support a été fabriquée à partir de profilés métalliques soudés, composés de tubes rectangulaires ou carrés et ronds en acier. Ces matériaux ont été sélectionnés pour leur :

- Excellente résistance mécanique.
- l'opération de soudage est facile.
- Bonne disponibilité et coût raisonnable.

III.4.2 Caractéristiques de la table de support :

- Supporter le poids du tambour, des billes et des matériaux à broyer.
- Résister aux vibrations générées lors du processus de broyage.
- Maintenir l'alignement précis entre le moteur et le tambour.
- Permettre un accès facile pour les opérations d'entretien et le remplacement des composants.

III.4.3 Dimensions et conception

Les dimensions de la table de support ont été déterminées en fonction de plusieurs critères techniques et ergonomiques, notamment :

- Le diamètre et la longueur du tambour.
- Le type et les dimensions du moteur utilisé.
- L'espace nécessaire à l'installation du système de transmission.
- Les considérations ergonomiques, telles que la hauteur optimale pour faciliter les opérations de chargement et de déchargement

III.4.4 L'assemblage de la table du support

L'assemblage de la table de support a été réalisé selon les étapes suivantes :

- Découpe des profilés métalliques en acier, conformément aux dimensions spécifiées dans les plans techniques.
- Pointage, puis soudage des différents éléments, avec vérification de l'équerrage afin d'assurer un alignement précis et une géométrie conforme.
- Application d'une peinture anti-rouille sur l'ensemble de la structure pour garantir une protection efficace contre la corrosion.
- Fixation des supports de paliers et du moteur sur la structure mécanique, conformément aux positions définies dans la conception

III.5 Les paliers :

Les paliers constituent des éléments mécaniques essentiels dans la conception d'un broyeur à billes.

Leur fonction principale est de supporter l'arbre de rotation du tambour tout en autorisant un mouvement rotatif fluide, avec un minimum de frottements. En plus de faciliter la rotation, ils permettent la transmission des charges mécaniques – issues du poids du tambour, des billes de broyage et des matériaux à broyer, contribuant ainsi à la stabilité et à la durabilité de l'ensemble.

III.5.1 Type de paliers utilisés dans notre projet

Dans le cadre de ce projet, des paliers à semelle munis de roulements à billes intégrés ont été utilisés.

Ce type de palier, fixé solidement à la table de support à l'aide de vis, offre une excellente stabilité mécanique.

Grâce à leur roulement interne, ces paliers permettent une rotation fluide de l'arbre, tout en réduisant les frottements et en assurant une répartition optimale des charges.

Le palier utilisé dans notre projet est un palier à semelle de type UCP205, conçu pour un arbre de diamètre 25 mm.

Ce modèle est équipé d'un roulement à billes intégré et assure le serrage de l'arbre par des vis pointeaux, garantissant ainsi un maintien sûr et une bonne transmission de mouvement.

Ce type de palier est largement utilisé dans les applications industrielles pour sa robustesse, sa facilité de montage et sa compatibilité avec des charges modérées à élevées.

III.5.2 Caractéristiques techniques du palier type UCP205 :

Tableau III.3 Caractéristiques techniques du palier type UCP205

Caractéristique	Valeur
Diamètre intérieur (d)	25 mm
Diamètre extérieur (D)	52 mm
Largeur totale (B)	34,1 mm
Nombre de vis de serrage	2 vis (M6 généralement)

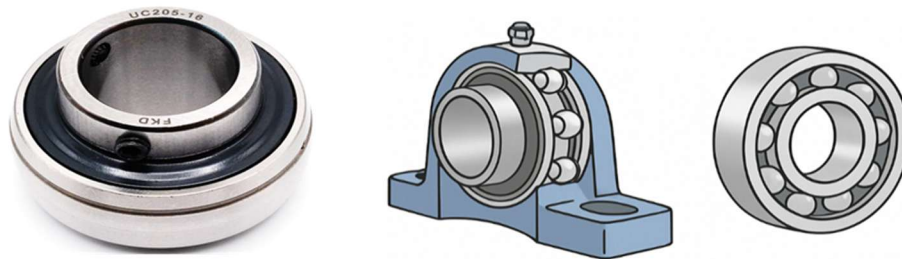


Figure III.5 Palier type UCP205 [22].

III.5.2 Les Avantages du palier UCP205

Tableau III.4 Les Avantages du palier UCP205

Avantage	Description
Facilité d'installation	installation facilement sur une surface plane à l'aide de deux boulons.
Correction du désalignement	Équipé d'un roulement UC205 qui corrige les petits défauts d'alignement de l'arbre.
Fixation simple	Grâce aux vis latérales intégrées dans la bague intérieure du roulement.
Entretien facile	Peut être lubrifié avec de la graisse via un graisseur spécifique.
Bonne résistance mécanique	Corps en fonte ou en acier robuste, adapté aux environnements industriels.
Prix abordable et large disponibilité	Composant standard largement disponible à un coût économique.

Remplacement facile	Le roulement peut être remplacé sans démonter toute la structure.
---------------------	-------------------------------------------------------------------

III.5.3 montage des paliers

Le montage des paliers a été réalisé selon les étapes suivantes :

- Les paliers sont solidement fixés à La table de support l'aide de vis de fixation, garantissant ainsi leur stabilité durant le fonctionnement.
- L'arbre de rotation est inséré avec précision dans les roulements intégrés, puis immobilisé à l'aide de vis de pression latérales afin d'éviter tout glissement axial ou rotation non contrôlée.
- Une lubrification adéquate à la graisse est appliquée à l'intérieur du roulement, conformément aux recommandations, afin d'assurer un fonctionnement fluide, réduire l'usure et prolonger la durée de vie du système.



Figure III.6 Fixation des paliers

III.6 poulies trapézoïdales :

La poulie est un élément mécanique couramment utilisé dans les systèmes de transmission de mouvement. Elle permet de transférer l'énergie mécanique d'un arbre moteur vers un arbre récepteur à l'aide d'une courroie. Le principe de fonctionnement repose sur la rotation synchronisée de deux roues (poulies) reliées entre elles par une courroie souple, assurant ainsi la transmission de la force motrice.

Outre la transmission du mouvement, l'utilisation de poulies permet également d'adapter la vitesse de rotation (grâce au rapport de diamètres entre la poulie motrice et la poulie réceptrice) et, dans certains cas, d'orienter ou de simplifier la disposition mécanique du système.



Figure III.7 Poulies trapézoïdales

III.7 Le courroie

Les courroies sont des éléments mécaniques essentiels dans de nombreux systèmes de transmission de puissance. Utilisées principalement pour transférer l'énergie entre deux ou plusieurs arbres rotatifs, elles jouent un rôle crucial dans le fonctionnement de nombreuses machines industrielles, agricoles et domestiques. On les retrouve dans des dispositifs aussi variés que les moteurs de voitures, les machines-outils, les convoyeurs ou encore les appareils électroménagers [26].



Figure III.8 courroie trapézoïdale (en V)

III.8 Les corps broyant (les billes)

Les billes utilisées dans les broyeurs à billes présentent généralement un diamètre variant entre 25 mm et 103 mm. Ces dimensions sont choisies en fonction de la nature du matériau à broyer ainsi que du stade du broyage (grossier ou fin) [23].

– Les billes de grand diamètre (60 mm à 103 mm) :

Principalement employées pour la fragmentation des particules grossières, ces billes permettent de briser efficacement les morceaux de matière de grande taille grâce à leur masse importante et à leur énergie d'impact élevée.

– Les billes de petit diamètre (25 mm à 50 mm) :

Elles sont destinées à la réduction des particules fines, assurant une finesse de broyage accrue. Elles sont particulièrement adaptées aux étapes finales du procédé, où l'on vise une granulométrie homogène et maîtrisée.

Ainsi, le choix du diamètre des billes revêt une importance capitale pour optimiser l'efficacité du broyage et adapter le procédé aux caractéristiques spécifiques du matériau à traiter.



Figure III.9 Billes en acier pour le broyeur à billes

III.9 Le moteur électrique asynchrone triphasé (AC)

Le moteur électrique constitue un composant central dans le fonctionnement du broyeur à billes, puisqu'il fournit l'énergie mécanique nécessaire à la mise en rotation du tambour contenant les billes et les matériaux à broyer.

Dans le cadre de ce projet, un moteur asynchrone triphasé à courant alternatif (AC) a été retenu. Ce choix repose sur plusieurs avantages techniques et économiques, parmi lesquels :

- Fiabilité et robustesse, assurant un fonctionnement continu et stable dans des environnements industriels,
- Simplicité d'installation et d'entretien,
- Coût modéré par rapport à d'autres types de moteurs,
- Compatibilité avec un variateur de vitesse (VFD), permettant de contrôler précisément la vitesse de rotation en fonction des exigences du processus de broyage.

Ce type de moteur est donc particulièrement adapté aux applications nécessitant une régulation de vitesse, une durabilité élevée et une maintenance réduite, comme c'est le cas dans les broyeurs à billes industriels [28].

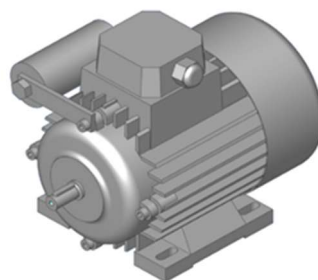


Figure III.10 Moteur électrique asynchrone triphasé (AC)

III.9.1 Motivations pour le choix du moteur asynchrone triphasé (AC)

Le moteur asynchrone triphasé a été retenu pour ce projet en raison de ses nombreuses qualités techniques, économiques et pratiques. Ce choix se justifie par plusieurs critères déterminants, parmi lesquels :

- Sa capacité à fournir un couple élevé et constant, y compris à basse vitesse, ce qui est essentiel pour assurer une mise en rotation efficace et régulière du tambour de broyage.
- Sa robustesse face à un fonctionnement en régime prolongé, permettant une utilisation continue sans risque de surchauffe ni de dégradation prématurée.
- La possibilité de réguler précisément sa vitesse grâce à l'intégration d'un variateur de fréquence (VFD), ce qui permet d'ajuster les performances du moteur aux exigences spécifiques du processus de broyage.
- Sa simplicité d'installation, d'exploitation et de maintenance, grâce à une conception éprouvée et largement adoptée dans le domaine industriel.
- Sa disponibilité étendue sur le marché et son coût d'acquisition relativement faible, en font une solution économiquement pertinente pour les applications industrielles.

III.9.2 Caractéristiques techniques du moteur utilisé dans ce projet :

Tableau III.5 Caractéristiques techniques du moteur

Caractéristique	Valeur indicative (selon plaque signalétique)
Type	VZ 80H6
Nombre de phases	3 (Triphasé)
Tension nominale	220/380 V
Fréquence	50 Hz
Puissance nominale	0.55 kW
Vitesse de rotation	Environ 940 tr/min (RPM)
Facteur de puissance ($\cos \varphi$)	0.75
Degré de protection	IP44 ou équivalent
Classe d'isolation	Refroidissement par ventilateur intégré (IC411)

III.9.3 Variateur de vitesse (VFD)

Afin d'assurer un contrôle précis de la vitesse de rotation du tambour du broyeur à billes, un moteur asynchrone triphasé a été couplé à un variateur de vitesse (VFD – Variable Fréquence Drive) de marque LS, comme le montre la figure ci-dessous [29].

Le variateur de vitesse constitue un élément clé du système d'entraînement. En modulant la fréquence et la tension délivrées au moteur, il permet d'ajuster sa vitesse de rotation en fonction des exigences du procédé de broyage. Cette flexibilité est essentielle pour adapter l'énergie mécanique fournie à la nature du matériau traité, ce qui contribue à optimiser l'efficacité du broyage, à réduire la consommation énergétique et à prolonger la durée de vie du moteur.

III.9.3.1 Fonctions principales du variateur de vitesse :

- Assurer un démarrage et un arrêt progressifs du moteur (rampes d'accélération et de décélération),
- Réguler la vitesse de rotation en fonction des propriétés du matériau à broyer,
- Protéger le moteur contre les surcharges, sursensions et échauffements excessifs,

- S'intégrer facilement à un système de commande externe, tel qu'un automate programmable ou des interrupteurs de contrôle.

III.9.3.2 Les caractéristiques techniques du variateur de vitesse utilisé :

- Marque / Modèle : VZ (modèle industriel standard),
- Tension d'entrée : 220 V – 380 V (monophasé ou triphasé selon configuration),
- Tension de sortie : Triphasé 0 – 400 V,
- Fréquence de sortie : 0 – 400 Hz,
- Puissance nominale : de 0,5 kW à 2,2 kW,
- Refroidissement Par air (ventilé).



Figure III.11 Variateur de vitesse

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'étude des différents composants principaux qui constituent le broyeur à billes, à travers une présentation détaillée des éléments fonctionnels de chaque partie, tels que : la table de support, le tambour, l'arbre, les paliers, le moteur, Variateur de vitesse, ainsi que le mécanisme de transmission par courroie et poulies.

L'accent a été mis sur les exigences mécaniques et les conditions optimales de fonctionnement lors de la conception ou du choix de chaque composant.

Cette étude a également permis de mieux comprendre l'interaction entre les composants, ainsi que leur rôle essentiel dans l'assurance d'une transmission fluide du mouvement et dans l'efficacité du processus de broyage, ce qui constitue un facteur déterminant pour la réussite globale du projet.

Ainsi, ce chapitre représente une étape clé dans le processus de conception mécanique du broyeur, et prépare le passage aux phases suivantes de l'assemblage et de la fabrication mécanique.

Chapitre IV
La fabrication du
broyeur à billes

Chapitre 4 : La fabrication du broyeur à billes

Introduction

Le présent chapitre constitue la partie centrale de cette étude, puisqu'il vise à valoriser le travail réalisé en obtenant un produit à la fois plus précis et conçu dans un délai réduit. Il détaille également le processus de fabrication du broyeur à billes [31].

Pour parvenir à la réalisation du broyeur à billes, nous avons suivi plusieurs étapes clés, permettant d'assurer la précision et la qualité du produit final :

Étapes principales pour la fabrication du broyeur à billes

IV.1 La 1^{ère} étape Préparation de la matière première et l'équipement nécessaires

Le processus commence par la préparation des matériaux bruts, tels que l'acier utilisé pour fabrication du la table de support de broyeur et le tambour.

Cette phase nécessite également de préparer les équipements nécessaires aux différentes opérations de fabrication, tels que le tour parallèle, la perceuse, poste de soudage, la machine de découpe, ainsi que les outils utilisés pour les travaux d'atelier.

IV.2 La 2^{ème} étape : Usinage des deux arbres de rotation

Pour la fabrication des deux arbres de rotation, nous avons utilisé un barreau en acier de 40 mm de diamètre, que nous avons usinée au tour parallèle afin de réduire son diamètre à 25 mm, comme l'illustre les photographies ci-jointes.



Figure IV.1 Usinage de l'arbre

IV.3 La 3^{ème} étape : Polissage et découpage

Après l'obtention du diamètre approprié, Nous avons poli les deux arbres de rotation à l'aide de papier abrasif. Pour améliorer l'état de surface, Par la suite Nous avons utilisé une scie mécanique pour découper les deux arbres de rotation à la longueur appropriée (voir les figures IV.2).

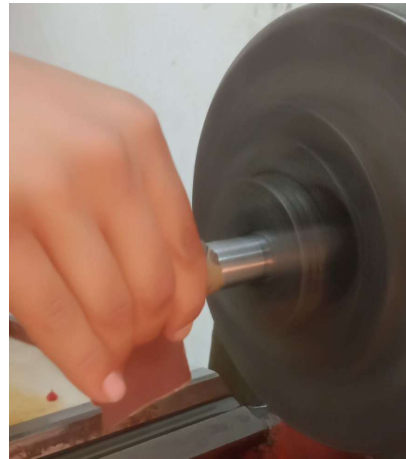


Figure VI.2 Polissage et découpe

IV.4 La 4ème étape : Opération de Perçage et taraudage de l'arbre

Pour un montage sécurisé de la poulie, des trous ont été percés aux extrémités de l'arbre, suivis d'un taraudage pour accueillir les vis de fixation. Cette opération garantit un assemblage stable et une bonne transmission du mouvement, l'opération de perçage et taraudage sont illustrées par les figures suivantes.

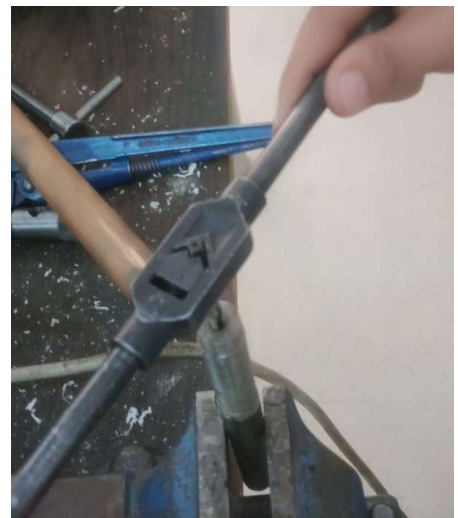


Figure IV.3 Perçage et taraudage de l'arbre

IV .5 La 5ème étape : Adaptation la bouteille de gaz

Une bouteille à gaz GPL, destinée à l'origine à une automobile, a été tronçonnée à l'aide d'une tronçonneuse puis soudée à l'aide d'un poste de soudage, afin d'obtenir une longueur totale de 630 mm.



Figure IV.4 Les étapes d'adaptation de la bouteille à gaz

Après l'adaptation de la bouteille à gaz, une ouverture a été réalisée pour le chargement et le déchargement des matières premières.

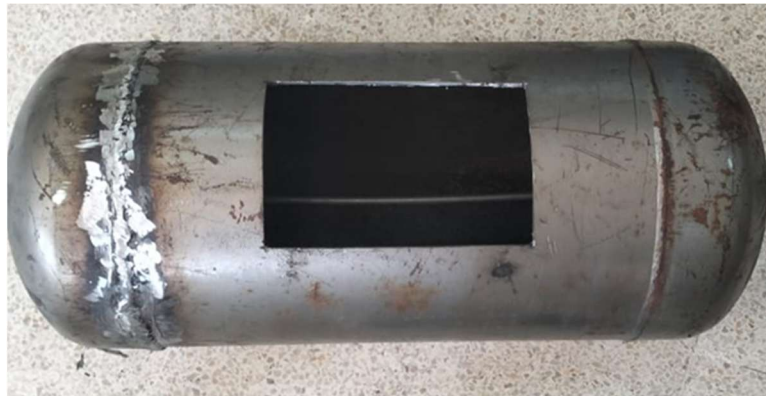


Figure IV.5 Réalisation de l'ouverture pour le chargement et le déchargement des matières premières.

IV.6 La 6ème étape : Centrage et soudage des deux arbres sur les côtés du tambour

Dans cette étape, Nous avons centré les deux arbres en perçant latéralement le tambour, puis nous avons fait passer une tige métallique en acier d'un côté à l'autre pour garantir le centrage des deux arbres de rotation. Après l'opération de soudage, la tige a été tronçonnée intérieurement des deux côtés du tambour. La figure IV.6 montre l'opération complète.



Figure IV.6 Les opérations de montage des deux arbres sur le tambour

IV.7 La 7ème étape : Test de l'effet balourd sur le tambour

Pour assurer une bonne rotation du tambour vide plus précise, régulière et sans vibrations, un comparateur a été utilisé pour effectuer des tests sur le broyeur à billes, comme illustré sur la figure suivante.



Figure IV.7 Vérification la rotation précise, régulière et sans vibrations

IV.8 La 8ème étape : Réalisation de la table de support pour le broyeur à billes

Pour réaliser la table du support, nous avons suivi plusieurs étapes. Tout d'abord, nous avons déterminé les dimensions requises, à savoir la longueur, la largeur et la hauteur. Ensuite, nous avons découpé le métal à l'aide d'une tronçonneuse, en respectant précisément les mesures indiquées sur le plan. Nous avons procédé à la découpe des pieds ainsi que des cadres supérieur et inférieur. Une fois toutes les pièces préparées, nous les avons assemblées par soudage, ce qui a permis de former le cadre final de la table.

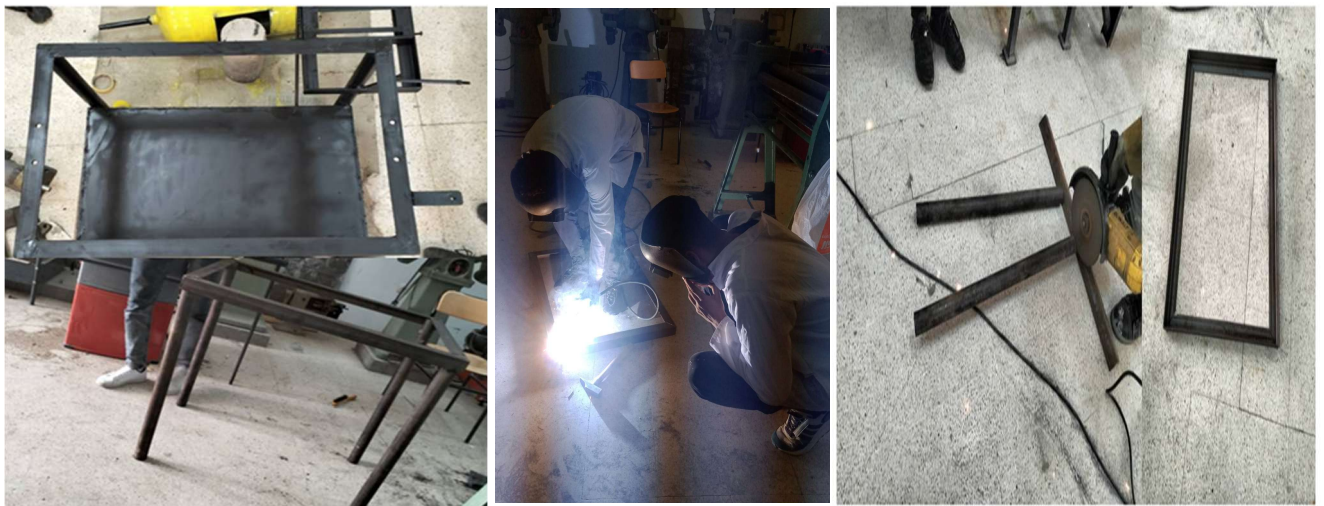


Figure IV.8 Réalisation de la table de support pour le broyeur à billes

IV.9 La 9ème étape : Réalisation d'une table d'ajustement et de fixation pour le moteur électrique :

Nous avons conçu une table réglable qui porte le moteur électrique permettant un déplacement libre du moteur, afin de faciliter le réglage de la tension au niveau de la courroie et d'assurer une précision optimale dans l'alignement et la fixation.



Figure IV.9 Table d'ajustement et de fixation pour le moteur électrique

IV.10 Le 10ème étape : Assemblage

Après avoir terminé la fabrication et la réalisation des différentes pièces, nous avons procédé à l'assemblage des composants restants, à savoir le moteur électrique, les poulies et les paliers. Cette étape permet d'effectuer l'installation finale en vue d'obtenir un ensemble fonctionnel et opérationnel.

Le moteur est monté sur une table réglable, permettant d'ajuster la tension de la courroie ou de la chaîne. Il est directement connecté au variateur de vitesse (VFD), qui contrôle la vitesse de rotation. La sortie de l'arbre moteur entraîne une poulie et une courroie trapézoïdale, lesquelles actionnent le tambour du broyeur.

Le variateur est relié d'un côté à l'alimentation secteur et de l'autre aux bornes U, V, W du moteur. Les paramètres de fonctionnement, tels que la vitesse maximale, les rampes d'accélération et de décélération, ainsi que les protections, peuvent être réglés par une interface de contrôle.



Figure IV.10 Le broyeur à billes en phase finale

IV.11 L'essai de mise en marche :

Dans cette nous avons effectué un essai réel de fonctionnement du broyeur à billes, en broyant une quantité d'environ 1 kg de graviers utilisé dans la construction. Et 20 billes de broyage. Le résultat obtenu s'est avéré satisfaisant.

Par la suite La vérification du sens de rotation du moteur électrique a été effectuée, suivant la mesure du courant absorbé au niveau de tambour chargé a donné un résultat de 0,6 A. Cette dernière, comparée à la valeur nominale (1.6 A), ce qui constitue une valeur satisfaisante et permet un fonctionnement du moteur électrique en toute sécurité.



Figure IV.11 Mesure le courant absorbé par le moteur électrique du broyeur en charge



Figure IV.12 Les graviers et les billes de broyage utilisés comme médias de fragmentation

*Conclusion et
Perspectives*

Conclusion et Perspectives (exemple)

À l'issue de ce travail de recherche et de conception, il est possible d'affirmer que le développement d'un broyeur à billes constitue une étape déterminante dans l'optimisation des procédés de broyage et l'amélioration de la production dans divers secteurs industriels. Ce projet nous a permis de mettre en œuvre des connaissances théoriques acquises au cours de notre formation, tout en intégrant des procédés industriels concrets en vue de concevoir et réaliser un broyeur à billes horizontal à la fois performant et technologiquement avancé.

La conception d'un tel dispositif requiert une compréhension approfondie de nombreux paramètres, notamment les propriétés des matériaux, les exigences spécifiques du broyage ainsi que les notions d'efficacité énergétique et mécanique. L'utilisation de logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) et d'outils de simulation numériques nous a permis d'optimiser les choix techniques afin de garantir des performances élevées et une grande fiabilité de l'équipement.

Par ailleurs, le processus de fabrication a joué un rôle fondamental dans l'assurance de la qualité et de la durabilité du produit final. En sélectionnant des matériaux adéquats et en respectant des spécifications précises, le broyeur a été fabriqué pour répondre aux exigences industrielles en matière de robustesse et d'efficacité.

Nous espérons que ce mémoire constitue une référence utile pour les chercheurs, ingénieurs et professionnels œuvrant dans le domaine de la conception et de la fabrication de broyeurs à billes.

Par ailleurs, nous formulons le vœu que cette étude contribue à enrichir les travaux futurs dans ce domaine, en stimulant l'innovation technologique et en favorisant une meilleure productivité dans les industries concernées.

Enfin, nous exprimons notre profonde reconnaissance à toutes les personnes ayant soutenu et accompagné la réalisation de ce projet. Nous souhaitons que ce travail puisse servir de base à de futures recherches et projets de développement dans le domaine des équipements industriels.

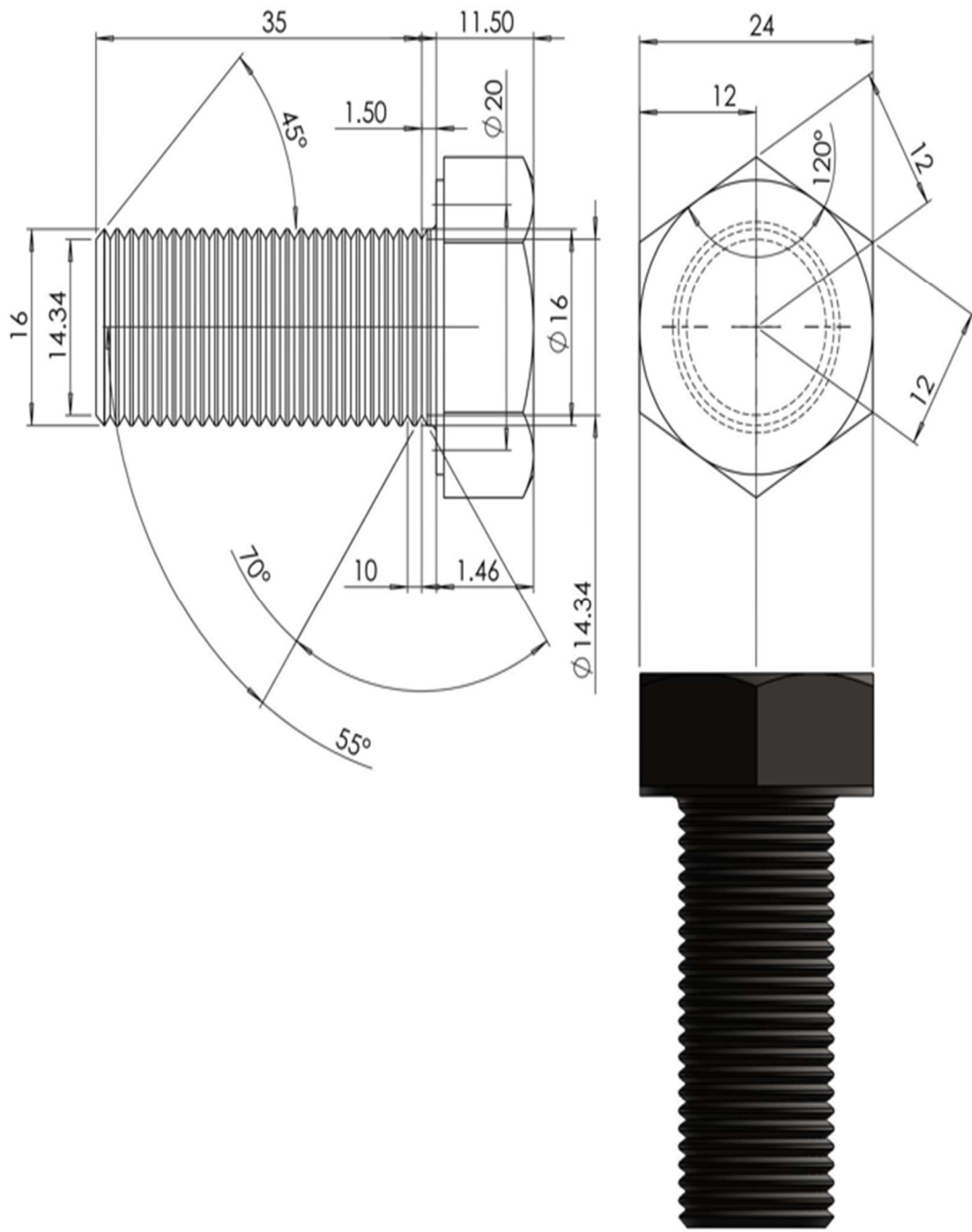
Parmi nos futures perspectives figure le revêtement de la surface interne du tambour, ou encore la réalisation d'un broyeur à billes horizontal programmable, fonctionnant à sec ou en milieu humide.

Annexes A

GAMME D'USINAGE DE L'ARBRE DE POULIE

Pha	Désignation	Machine	Outils	Croquis
100	Contrôle de pièce brute		Pied à coulisse	<p style="text-align: center;">400 mm</p> <p style="text-align: center;">40 mm</p>
200	Dressage en : Ebauche + Finition surface ① CF = 350 mm Centrage surface ①	Tour parallèle	Outil de dressage 45° Pied à coulisse Foret à center 60°	<p style="text-align: center;">350 mm</p>
	Chariotage Ebauche + Finition Surface ② CF = 25 mm Surface Op : EB - F CF = 25 mm	Tour parallèle	Outil de charioter 90° Pied à coulisse	<p style="text-align: right;">25 mm \varnothing</p> <p style="text-align: right;">②</p>
	Perçage surface ①, $\varnothing 8$ mm, Co = $\varnothing 8$ mm	Tour parallèle	Foret $\varnothing 8$ mm Pied à coulisse	<p style="text-align: right;">$\varnothing 8$ mm</p> <p style="text-align: right;">①</p>

Annexes B



UNIVERSITE MOHAMED- BOUDIAF MS'ILA

GOUARIR&

C35

FABRICATION MECANIQUE & PRODUCTIQUE

TOUNIA & ZIANI

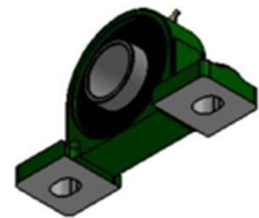
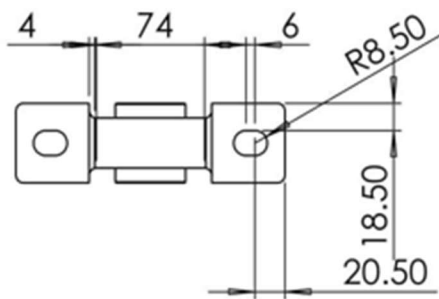
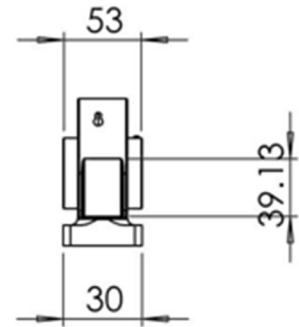
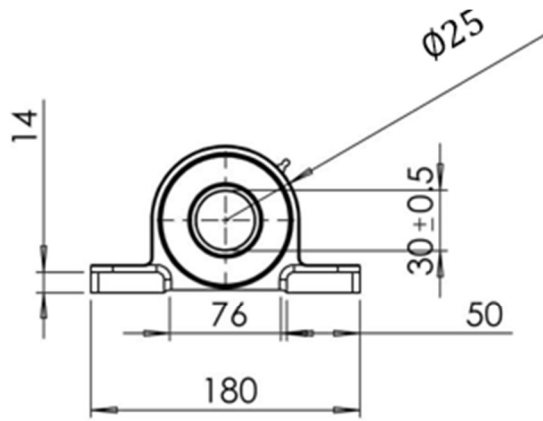
ECHELLE: 1: 5

Vis d'assemblage les paliers

NUM : 1

18/06/2025





UNIVERSITE MOHAMED- BOUDIAF MS'ILA

GOUARIR&

C35

FABRICATION MECANIQUE & PRODUCTIQUE

TOUNIA & ZIANI

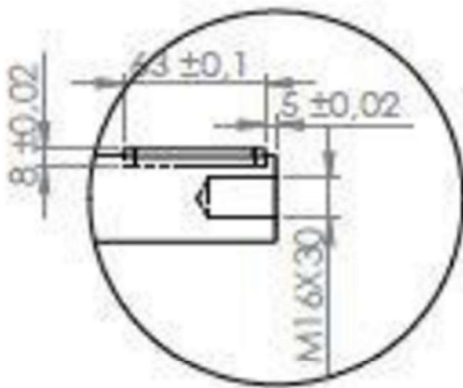
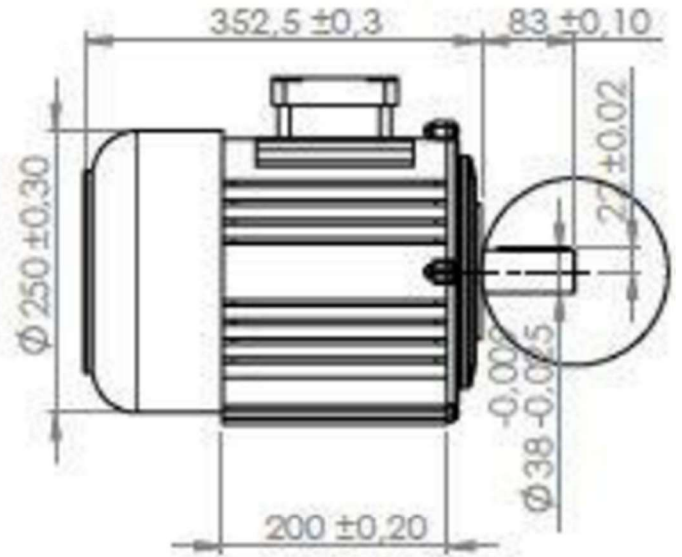
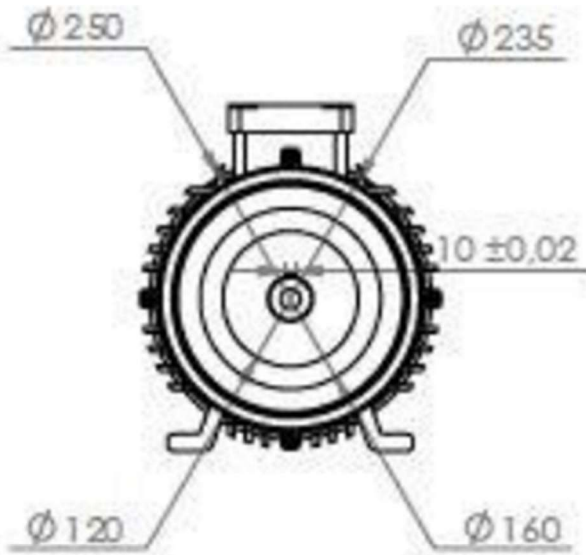
ECHELLE: 1: 5

Les paliers

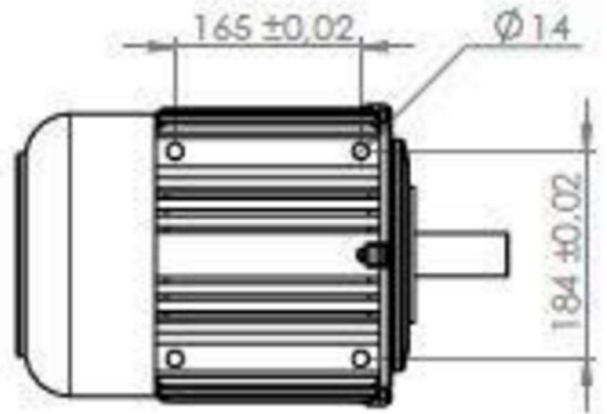
NUM : 2



18/06/2025



DETAIL AO
SCALE 2 : 7



UNIVERSITE MOHAMED- BOUDIAF MS'ILA

GOUARIR&

C35

FABRICATION MECANIQUE & PRODUCTIQUE

TOUNIA & ZIANI

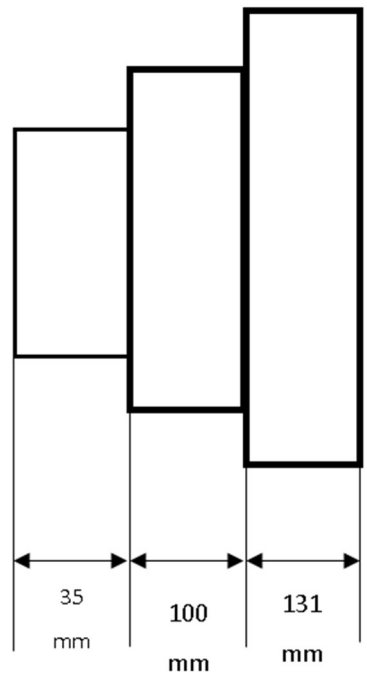
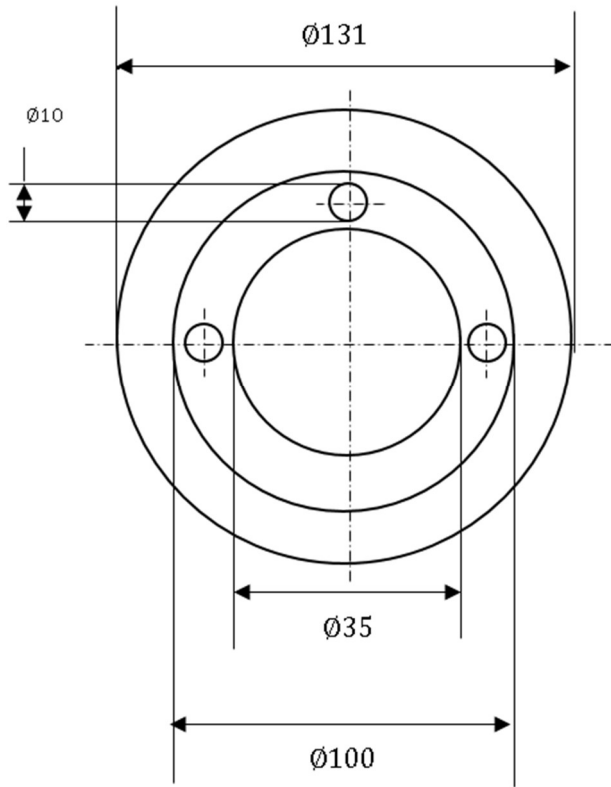
ECHELLE: 1: 5

Moteur électrique

NUM : 3

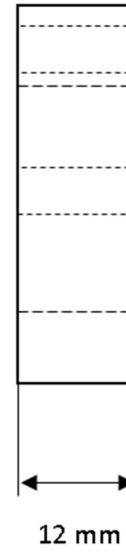
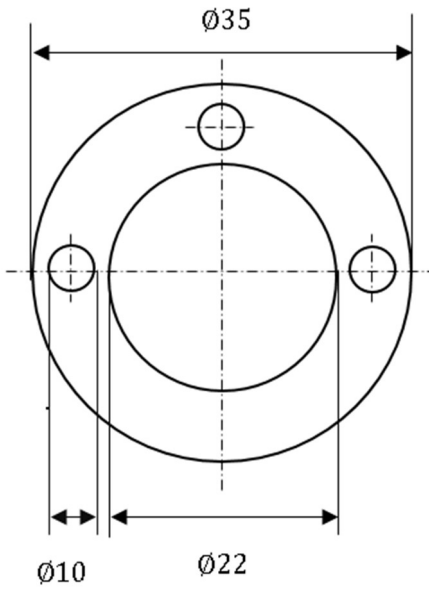


18/06/2025



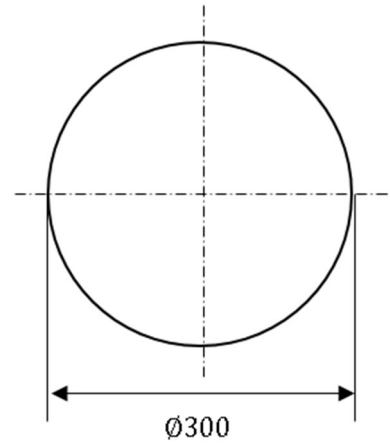
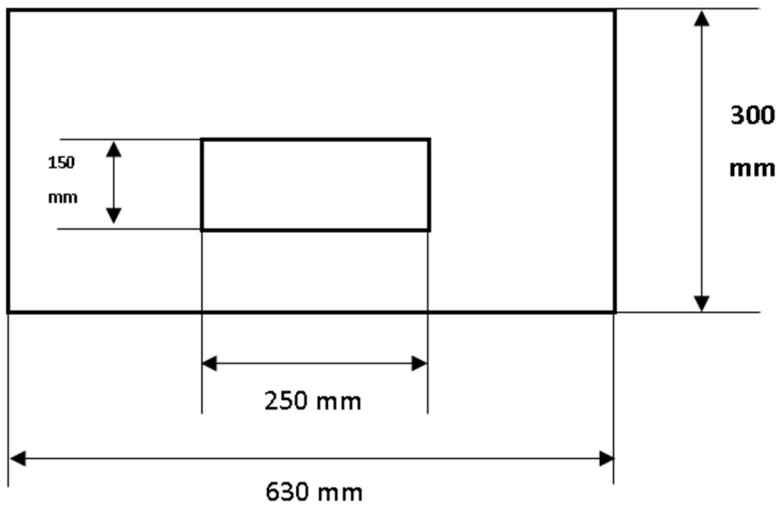
UNIVERSITE MOHAMED- BOUDIAF MS'ILA		GOUARIR & TOUNIA & ZIANI
C35	FABRICATION MECANIQUE & PRODUCTIQUE	
ECHELLE: 1: 5	La poulie	NUM : 4
		18/06/2025





UNIVERSITE MOHAMED- BOUDIAF MS'ILA		GOUARIR & TOUNIA & ZIANI
C35	FABRICATION MECANIQUE & PRODUCTIQUE	
ECHELLE: 1: 5	La rondelle	NUM : 5
		18/06/2025





UNIVERSITE MOHAMED- BOUDIAF MS'ILA		GOUARIR & TOUNIA & ZIANI
C35	FABRICATION MECANIQUE & PRODUCTIQUE	
ECHELLE: 1: 5 	Tambour	NUM : 6
		18/06/2025

Références bibliographiques...

- [1] BACHIRI Salim, et al. "Etude et réalisation d'un broyeur pour les bouteilles en plastiques". 2012, PhD Thesis. Université abderrahmane mira Bejaia.
- [2] SEIGLE J., "Les Usines d'Hagondange (Moselle)". Revue de Métallurgie, 1922, 19.6: 313-351.
- [3] CHAMAYOU Alain; FAGES Jacques. "Broyage dans les industries agroalimentaires". 2003.
- [4] BENSADI Ahmed. "Etude de l'usure du concasseur à marteaux intermédiaires EV250" 300-2-85. 2018. PhD Thesis. Université Mohamed Boudiaf-M'sila.
- [5] DJAFER Mohamed; DJEMAA Youcef, "L'étude de Faisabilité d'une Unité de Transformation laitière (lait en poudre)", Région Centre. PhD Thesis.
- [6] FAKHREDDINE LAIFA, "Etude technico-économique des marteaux du concasseur EV250X300-2-85 de l'usine LAFARGE CIMENT de M'SILA" . 2017. PhD Thesis. Faculte de technologie, Universite Mohamed Boudiaf-M'sila.
- [7] LEROY Somer, "Moteurs asynchrones triphasés atmosphères explosibles poussiéreuses", (2001) Catalogue, 3215 F-2.33, p 83.
- [8] CHAUSSERIE-LAPRÉE Jean. "Les meules des habitats protohistoriques de Martigues", 1998, Documents d'archéologie méridionale, 21.1: 211-235.
- [9] RENAUD Jean, "Récolte des fourrages à travers les âges". France Agricole Editions, 2002.
- [10] SCHLOSSER Alexandre, "Étude du lien entre dentisterie et oreille à travers une innovation dans le traitement de la surdité: le système SoundBite" . 2016. PhD Thesis. Université de Lorraine.
- [11] Wills B. A. & Finch, J. A., "Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery", (8th ed.), (2016) , Elsevier.
- [12] Bond F.C.. "Crushing and Grinding Calculations", (1961) British Chemical Engineering, Vol. 6, Nos. 6 and 8.
- [13] K. MOUSSACEB et D. MERABET, " Modélisation et quantification des minéraux dans les minérales à ciment", février - mars 2006, Revue : ciment, béton, plâtres et chaux, no877.
- [14] M. N. DE NOIREFONTANE, "Etude structurale et cristallographie du composé majoritaire du ciment : le silicate tricalcique", 2000.thèse de doctorat, Ecole polytechnique, Palaiseau, France.
- [15] L. PLISKIN, "la fabrication du ciment", 1993, 216, Paris, Eyrolles.
- [16] SEN, P.C. "Principes des machines électriques et de l'électronique de puissance", 2^e édition, New York : John Wiley & Sons, Inc., 1996, 824 p. ISBN : 978-0471376204
- [17] CECORAMA, "Cours de cimenterie : Théorie et technologie, Edition Cecorama, liège, Belgique", 1994.
- [18] CHIHAOUI Ramdane, " Durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis d'un environnement chimiquement agressif "(Mémoire de Magister-USTMB d'Oran-2008).

- [19] S. Gaydardzhiev," Mineral Processing I"2015, Support de cours ULG,.
- [20] E.-A.J. Pierre Blazy, "Fragmentation, applications, Technique de l'ingénieur", A5070.
- [21] ELODIE ROMILLIAT, "Etude des modes d'action d'agents de mouture sur le broyage du Clinker", (2006), Thèse, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, pp 8-37.
- [22] ZEBBOUDI AMMAR et DJOUDER FATAH et TIDJET MEHANNI, "Influence des Paramètres de broyage sur les caractéristiques minéralogiques et texturales de minerai de Phosphate noir de la mine de Djebel Onk (Tébessa)",2013-2014, Mémoire master, université A MIRA,
- [23] RONALDO QUISPE, "Effets des conditions d'opération d'un broyeur à boulets 40x40 cm sur la rétention des corps broyant de petite taille université laval", 2014.