République algérienne démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Dr Yahia FARES de Médéa
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique



Mémoire de Fin d'études
Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en Construction Mécanique

Titre :

Etude, conception et dimensionnement d`un broyeur planétaire pour le broyage mécanique à haute Energie

Préparé par : Wail Nadjib AFFROUN
Seif-EddineKHERRAZ

Dirigé par : Dr. R. BOUGHEDAOUI
Dr. N. AMOURA

Juin 2024

DEDICACES

A ceux dont nous avons toujours recherché la satisfaction, et non auprès des personnes, nous vous dédions cette recherche : nos parents, les personnes les plus chères à notre cœur.

A nos chers professeurs et compagnons de notre parcours scientifique, nous vous dédions ce travail avec amour et plaisir. Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements au Dr. N. AMOURA et au Dr. R. BOUGHEDAOUI, qui nous ont aidés pas à pas, dans l'élaboration de ce travail.

Sans oublier notre famille à l'université, nos frères, nos collègues et ceux qui ont abandonné les cours, nous vous dédions ce travail et vous remercions pour chaque information que vous nous avez enseignée.

Enfin, nous remercions tous ceux qui nous ont aidé et ont laissé leur marque dans ce travail. Tout notre respect et notre gratitude.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et notre gratitude à toutes les personnes que nous avons rencontrées au cours de notre parcours académique dans cette prestigieuse université. Nous tenons particulièrement à remercier nos professeurs qui nous ont guidés dans notre cheminement vers la réalisation de notre thèse finale. Sans oublier nos frères et collègues de l'université pour chaque information ou idée qu'ils n'ont pas hésité à nous apporter.

Nous tenons à remercier tous nos amis et toutes les personnes chères à nos cœurs qui nous ont soutenus dans la réalisation de ce travail.

Enfin, louange à Dieu qui nous a donné la patience et la force de bien mener à bien ce parcours académique.

RESUMES

ملخص

الكسارة الكوكبية هي أداة أساسية لتقليص حجم المواد في مختلف مجالات الاستخدام، مثل البحث. تعمل عن طريق وضع مواد الطحن في جرار مع كرات الطحن. تتمركز هذه الاطروحة على دراسة وتصميم مطحنة كوكبية لأغراض مخصصة للبحث العلمي و قد اقتصر تصميم هذه الالة على فهم طريقة عملها والعمل الموجه اليها ، ليتم بعد ذلك حساب ابعاد ومقاسات كل قطعة وتصميمها باستخدام برنامج **SOLID WORKS** وتجربة فعالية عمل هذه الالة للوصول الى الهدف المرجو وهو تصميم كسارة كوكبية فعالة ووظيفية.

الكلمات المفتاحية: التمثيل الميكانيكي، الحجم، آلية الكواكب، **SOLID WORKS.**

Abstract

A planetary mill is an essential tool for reducing the size of materials in various applications, such as research. It works by placing grinding materials in a jar with grinding balls. This thesis focuses on the study and design of a planetary mill for research purposes. The design of this machine is limited to understanding its operation and the tasks directed to it. Subsequently, the dimensions and measurements of each component are calculated and designed using the **SOLIDWORKS** software. The effectiveness of the machine's operation is then tested to achieve the desired goal of designing a functional and effective planetary mill.

Key Words: Mechanical alloying, Dimensioning, Planetary mechanism, SolidWorks.

Résumé

Un broyeur planétaire est un outil essentiel pour réduire la taille des matériaux dans diverses applications, telles que la recherche. Il fonctionne en plaçant les matériaux de broyage dans un bocal avec des billes de broyage. Cette thèse se concentre sur l'étude et la conception d'un broyeur planétaire à des fins de recherche. La conception de cette machine est limitée à la compréhension de son fonctionnement et des tâches qui lui sont attribuées. Par la suite, les dimensions et les mesures de chaque composant sont calculées et conçues à l'aide du logiciel **SOLIDWORKS**. L'efficacité du fonctionnement de la machine est ensuite testée pour atteindre l'objectif souhaité, à savoir la conception d'un broyeur planétaire fonctionnel et efficace.

Mots-clés : Mécanosynthèse, dimensionnement, mécanisme planétaire, SolidWorks

SOMMAIRE

DEDICACES 2
REMERCIEMENTS 3
RESUMES 4
SOMMAIRE 5
LISTE DES FIGURES 9
LISTE DES TABLEAUX 11
Les Symboles 12
INTRODUCTION GENERALE 13
1. Chapitre1 Généralités sur les matériaux nanostructurés 14
1.1 Introduction 15
1.2 Définition des Nanomatériaux 15
1.3 Classification 16
1.3.1 Les matériaux de dimension 0 16
1.3.2 Les matériaux de dimension 1 16
1.3.3 Les matériaux de dimension 2 17
1.3.4 Les matériaux de dimension 3 17
1.4 Technique d'élaboration des nanomatériaux 18
1.4.1 La voie physique 19
1.4.2 La voie chimique 21
1.4.3 Les procédés mécaniques 22
1.5 L'application des matériaux nanostructures 25
1.6 Conclusion 26
2 Chapitre 2 : Caractéristiques et fonctionnement des broyeurs 27
2.1 Principe du broyage mécanique 28
2.1.1 Le champ de contraintes 28

2.2 Les paramètres du broyage mécanique 29
2.2.1 Les paramètres difficilement contrôlables 29
2.3 Phénomène de fragmentation lors du broyage 29
2.4 Mécanismes de formation 31
2.4.1 Stade primaire 31
2.4.2 Stade intermédiaire 31
2.4.3 Stade final 31
2.4.4 Stade complet 32
2.5 Physique de la fracture 32
2.5.1 Définition 32
2.5.2 Point de rupture 33
2.6 Mode de fragmentation et types de broyeur utilises 34
2.7 Caractéristiques des matériaux à broyer 34
2.7.1 La dureté 34
2.7.2 L'abrasivité 35
2.7.3 Le clivage 35
2.7.4 L'adhésivité 35
2.7.5 La forme 36
2.7.6 La distribution de taille 36
2.8 Les broyeurs 36
2.8.1 Définition 36
2.8.2 Types des broyeurs 37
2.9 Conclusion 41
3 Chapitre 3 Dimensionnement 42
3.1 Introduction 43
3.2 Etude cinématique 43
3.2.1 Représentation schématique 43
3.2.2 Schéma cinématique du broyeur planétaire 47

3.2.3 Explication du mécanisme 47
3.3 Dimensionnement des éléments du broyeur planétaire 48
3.3.1 Choix du moteur 48
3.3.2 Choix du système poulie-courroie 49
3.3.3 Calcul de la courroie 51
3.3.4 Dimensionnement d'arbre 56
3.3.5 Choix des roulements 59
3.3.6 Dimensionnement du train épicycloïdal 63
3.3.7 Choix des jarres : 69
3.3.8 Conclusion : 70
3.3.9 Choix Les billes : 70
3.4 Conclusion : 72
4 . Chapitre4 Conception et simulation numérique. 73
4.1 Introduction : 74
4.2 Le programme utilisé dans la conception et la modélisation: 74
4.3 Modélisation géométrique: 75
4.3.1 Conception du carter du broyeur : 75
4.3.2 Conception des poulies : 76
4.3.3 Conception du train épicycloïdal : 76
4.3.4 Jarre de broyage : 77
4.3.5 Arbres de transmission de broyeur: 77
4.3.6 La forme finale de la machine 78
4.4 Simulation numérique : 78
4.4.1 Méthodologie d'analyse basée sur la théorie des éléments finis: 78
4.4.1.1 Choix de la géométrie et du maillage: 78
4.4.2 Simulation de l'arbre : 79
Conclusion Générale 83
Conclusion Générale 84

Références bibliographiques. 86

Annexes 88

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1:Comparaison de différentes tailles de matériaux à l'échelle nanométrique. 16
Figure 1-2: Classification dimensionnelle des nanostructure..... 18
Figure 1-3: Schéma d'un atomiseur à l'eau..... 20
Figure 1-4: Atomisation par gaz..... 20
Figure 2-1: Phénomène de fragmentation lors du broyage. 30
2. Figure 2-2: Différentes étapes d'agglomération au cours du broyage. 30
Figure 2-3: Principe du broyage mécanique formation d'agrégats par chocs mécaniques 31
Figure 2-4 :. 32
Figure 2-5: Mode de fragmentation 33
Figure 2-6: Echelle de dureté de Mohs. 35
Figure 2-7: Broyeur Attriteur 38
Figure 2-8: Broyeur vibrant 1D..... 38
Figure 2-9: Broyeur vibrant 3D..... 39
Figure 2-10 : Schéma général du broyeur planétaire PM200..... 39
Figure 3-1: Dessin schématique de la transmission à engrenages planétaires 43
Figure 3-2: Train épicycloïdal simple..... 44
Figure 3-3: Schéma cinématique (roue planétaire bloqué). 45
Figure 3-4: Schéma cinématique (couronne bloquée). 45
Figure 3-5:Schéma cinématique: transmission poulie-courroie 46
Figure 3-6:Schéma cinématique broyeur planétaire. 47
Figure 3-7: schéma poulie-courroie cranté..... 49
Figure 3-8: Gammes puissances transmissibles des courroies crantées. 51
A partir des informations précédentes et de la courbe suivante Figure 3-9 :..... 53
Figure 3-9: Puissance de base des courroies crantées. 54
Figure 3-10: Représentation des efforts appliqués sur l'arbre..... 57
Figure 3-11: Composants d'un roulement à billes. 60
Figure 3-13: Roulements à rouleaux conique. 61
Figure 3-12:Roulements à rouleaux cylindriques et à rouleaux coniques. 61
Figure 3-14: Le mouvement des billes dans une jarre (a) en cascade, (b) en érosion,(c) en roulis..... 71
Figure 4-1 : carter du broyeur. 75
Figure 4-2:poulie crantée. 76

Figure 4-3:épicycloïdal. 76
Figure 4-4: Couvercle de la jarre de broyage et bol de broyage. 77
Figure 4-5 : Arbres (A) et (B) de transmission de broyeur. 77
Figure 4-6: broyeur planétaire. 78
Figure 4-7 :déplacement total cas torsion. 79
Figure 4-8 : Contrainte équivalente (von-Mises) cas compression. 80
Figure 4-9: Déformation élastique équivalente cas torsion. 80
Figure 4-10: Déplacement total cas flexion. 81
Figure 4-11: Contrainte équivalente (von-Mises) cas compression. 81
Figure 4-12 : Déformation élastique équivalente cas flexion. 82

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1: Caractéristique des différents des types de broyeurs..... 40
Tableau 3-1 : Tableau montrant le dessin cinétique d'un broyeur planétaire..... 47
Tableau 3-2:Caractéristique du moteur..... 49
Tableau 3-3: Choix du nombre des dents de la poulie..... 51
Tableau 3-4: Dimensions principales courroies crantée (NF ISO 5294 et 5296)..... 52
Tableau 3-5: Coefficient correcteur ***Kb***et largeur b en fonction de type de courroie. 54
Tableau 3-6: Récapitulatif des paramètres de conception..... 56
Tableau 3-7 :Caractéristiques du roulement choisi..... 62
Tableau 3-8 : Nombre de dents de la roue planétaire en fonction de la couronne 65
Tableau 3-9:Caractéristique d'un engrenage droit..... 67
Tableau 3-10: Les propriétés physiques du matériau AISI 304. 70
Tableau 3-11: Volumes et poids des jarres. 70
Tableau 3-12:Les propriétés physiques du matériau AISI 1020 71

Les Symboles

p_{eff} : Puissance effective.

P_m : La puissance nominale du moteur.

K_s : Le coefficient de service.

R : Rapport de réduction.

N_D : vitesse de rotation de la poulie réceptrice.

N_d : Vitesse de rotation de la poulie motrice.

D_d : Le diamètre de la poulie motrice.

D_D : Le diamètre de la poulie réceptrice.

Z_d : Le nombre de dents de la poulie motrice.

Z_D : Le nombre de dents de la poulie réceptrice.

ρ : Le pas fait référence à la distance entre deux crans successifs sur la surface de la poulie.

V_1: La vitesse linéaire.

P_b: Puissance de base de la courroie.

P_{adm} : Puissance admissible.

K_b: Coefficient correcteur.

E : Calcul d'entraxe.

L_p : La largeur de la courroie.

f_r : Fréquence de passage de la courroie.

θ_d : Angle d'enroulement de la petite poulie.

θ_D : Angle d'enroulement de la grande poulie.

INTRODUCTION GENERALE

L'utilisation d'outils simples pour décomposer les matériaux solides remonte à des milliers d'années. Depuis les temps anciens où les humains utilisaient des pierres et des bâtons pour diverses tâches, jusqu'au développement de machines simples au Moyen Âge comme les moulins en pierre, la quête pour améliorer l'efficacité du broyage a été constante. Le début de la révolution industrielle au XVIIIe siècle a marqué un tournant significatif avec l'apparition des premiers broyeurs mécaniques alimentés à la vapeur, basés sur le principe du broyage par pression entre deux surfaces solides.

Le XXe siècle a vu un développement considérable dans la technologie des broyeurs, avec l'émergence de divers types tels que le concasseur à mâchoires, le concasseur à cône et le concasseur à percussion, chacun répondant à des besoins industriels spécifiques. Aujourd'hui, les broyeurs planétaires modernes sont des outils sophistiqués et efficaces, intégrant des technologies avancées comme l'automatisation et le contrôle informatique, utilisés dans un large éventail d'applications, de l'exploitation minière à l'industrie aérospatiale.

Parallèlement, la métallurgie des poudres, une technique ancienne utilisée par les potiers et les céramistes, est devenue une science dans les années 1930. Elle permet de produire des métaux ou alliages avec des propriétés spéciales sans nécessiter de fusion complète du matériau, ce qui est particulièrement utile pour fabriquer des pièces mécaniques identiques de manière économique. Avec l'avènement des nanomatériaux, la capacité à modifier et contrôler les propriétés des matériaux à une échelle nanométrique a ouvert de nouvelles perspectives dans des domaines variés tels que le magnétisme, la mécanique, la catalyse et l'optique.

Cette recherche se concentre sur la conception et le dimensionnement d'un modèle de broyeur planétaire, destiné à être utilisé pour les métaux dans divers domaines comme la pharmacie, la métallurgie et la chimie. Le modèle proposé sera soutenu par une étude complète du broyeur, incluant une analyse cinématique de tous les composants mécaniques ainsi qu'une étude de résistance basée sur la RDM (Résistance des Matériaux) et des simulations numériques réalisées avec le logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) SOLIDWORKS. Cette étude servira également de base pour une éventuelle réalisation future dans les ateliers de notre université, visant une utilisation interne pour les besoins de recherche et d'expérimentation.

1. Chapitre1 Généralités sur les matériaux nanostructurés

1.1 Introduction

Au cours des vingt dernières années, de nombreuses études sur la synthèse et les utilisations technologiques des matériaux nanostructures ont connu un développement rapide. Le fait que ces matériaux aient des propriétés physiques différentes de celles des solides de tailles conventionnelles a suscité cette attention, ce qui a été prouvé par différentes méthodes expérimentales. Au cours de ce premier chapitre, nous visons à établir les diverses catégories de matériaux nanostructures et à exposer leurs méthodes d'élaboration. La microstructure des poudres à nano grains obtenus par broyage haute énergie sera notre point de focalisation, ainsi que quelques domaines d'application spécifiques.

1.2 Définition des Nanomatériaux

Un nanomatériau est défini comme un matériau constitué de nano-objets, dont au moins une des dimensions physiques est comprise entre 1 et 100 nanomètres[1]. Ces nano-objets peuvent se présenter sous diverses formes, telles que des particules, des fibres, des tubes, des couches minces ou des composants structurels. En raison de leurs dimensions réduites, les nanomatériaux possèdent des caractéristiques uniques propres à l'échelle nanométrique, qui influencent leurs propriétés physiques, chimiques et mécaniques.

Les applications des nano-objets sont vastes et variées. Par exemple, ils peuvent être utilisés comme catalyseurs dans les réactions chimiques, offrant une surface réactive accrue et une meilleure efficacité. Dans le domaine médical, les nano-objets servent de vecteurs pour le transport ciblé de médicaments vers des cellules spécifiques, améliorant ainsi la précision et l'efficacité des traitements thérapeutiques. En microélectronique, ils sont employés pour le polissage de « wafers » et de disques durs, contribuant à la fabrication de dispositifs plus performants et miniaturisés. En outre, les nano-objets jouent un rôle crucial dans la création de nouveaux matériaux aux propriétés améliorées, tels que les matériaux composites renforcés par des nanotubes de carbone ou des nanoparticules [2].

Les nanomatériaux offrent également des opportunités prometteuses dans d'autres domaines, tels que l'énergie, où ils sont utilisés pour développer des systèmes de stockage et de conversion d'énergie plus efficaces, et l'environnement, où ils permettent de concevoir des technologies de dépollution et de filtration plus avancées. Grâce à leur polyvalence et à leurs propriétés uniques, les nanomatériaux sont au cœur de nombreuses innovations technologiques et scientifiques.

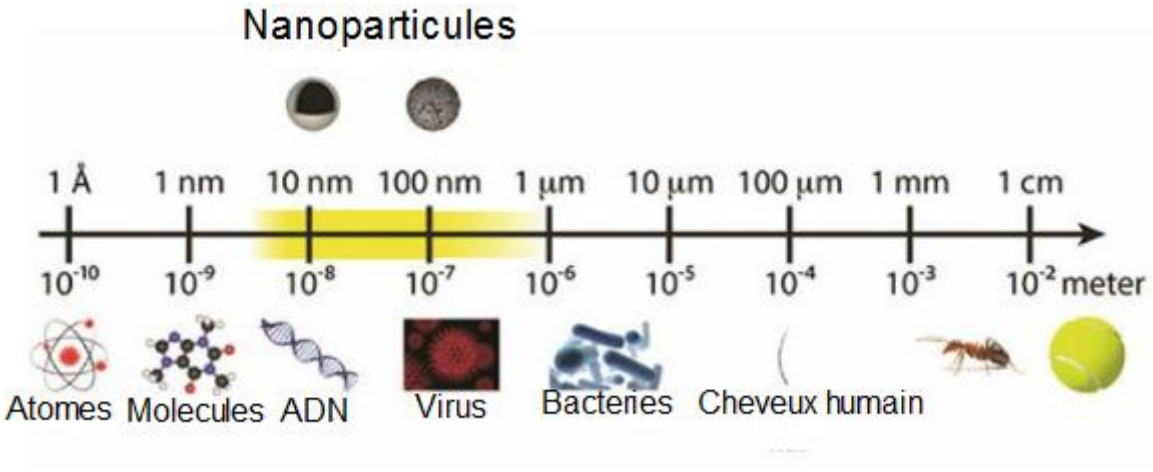


Figure 1-1:Comparaison de différentes tailles de matériaux à l'échelle nanométrique.[3]

1.3 Classification

Les nanomatériaux peuvent être classés en quatre familles selon leurs formes :

1.3.1 Les matériaux de dimension 0

Il s'agit d'assemblages de grains nanométriques dispersés de façon aléatoire ou structurée dans une matrice. Ces structures sont fréquemment rencontrées dans les cristaux colloïdaux utilisés dans l'optique et dans les fluides magnétiques.

1.3.2 Les matériaux de dimension 1

Les nanostructures comprennent les nano fils et les nanotubes. En général, les nano fils sont des objets longilignes de nano-taille, avec des dimensions allant d'un nanomètre à quelques dizaines de nanomètres pour la section et de 500 nm à 10.000 nm.
Nanomètres en termes de taille. La transmission de signaux électriques, optiques et même chimiques est souvent utilisée à leur aide.

Par exemple, les nanotubes de carbone se composent d'un ou de plusieurs tubes concentriques. Les atomes de carbone sont disposés en réseau hexagonal et deux demi-molécules de fullerènes sont présentes à chaque extrémité.

1.3.3 Les matériaux de dimension 2

Cette catégorie de nanomatériaux comprend les multicouches dont l'épaisseur est caractérisée par des dimensions nanométriques. Les multicouches peuvent être homogènes ou composées de nano-blocs. Leur principale caractéristique réside dans une densité d'interface élevée, ce qui signifie que les interfaces entre les couches successives sont très fréquentes et rapprochées.

Les interfaces des multicouches peuvent varier en termes de nature et de composition chimique par rapport aux couches individuelles, ce qui confère à ces structures des propriétés uniques. La distance limitée entre les interfaces successives entraîne une modification significative de la plupart des caractéristiques physiques des matériaux. Par exemple, les multicouches peuvent présenter des propriétés électroniques, magnétiques et optiques très différentes de celles des matériaux en vrac.

Les structures multicouches sont d'une grande importance théorique et technologique. Théoriquement, elles sont cruciales pour l'étude des mécanismes quantiques fondamentaux, tels que les effets de confinement quantique et les interactions à l'échelle nanométrique. Techniquement, elles sont essentielles en raison de leurs caractéristiques spécifiques, comme la magnétorésistance géante, qui a des applications dans les dispositifs de stockage de données et les capteurs.

1.3.4 Les matériaux de dimension 3

Les matériaux nano phrasés sont principalement composés de grains mono ou polyphasés avec une taille caractéristique comprise entre 1 nm et 100 nm. Ils se composent généralement de deux grandes familles d'atomes : ceux qui se cristallisent et ceux qui se trouvent aux interfaces et ont une distribution déférente[4].

Différentes méthodes sont utilisées pour fabriquer de tels matériaux, telles que la mécano synthèse. Deux méthodes supplémentaires ont été mises au point afin de fabriquer les matériaux nanostructures[5].

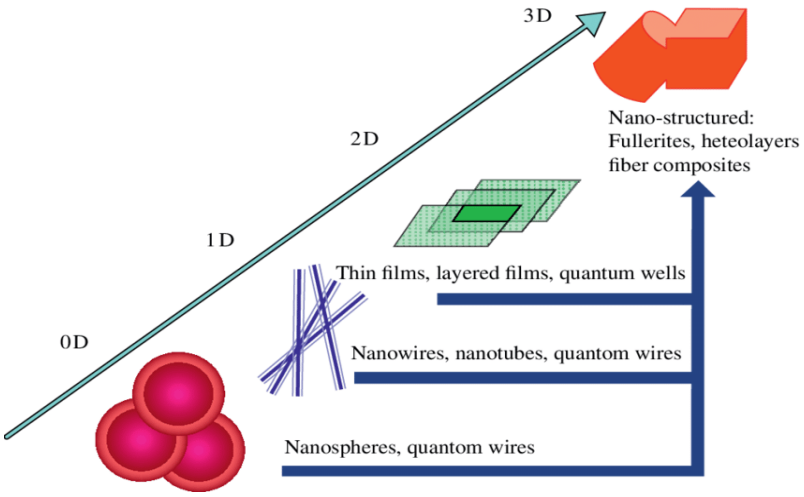


Figure 1-2: Classification dimensionnelle des nanostructures[6]

1.4 Technique d'élaboration des nanomatériaux

Les techniques d'élaboration des nanomatériaux sont variées et adaptées aux propriétés spécifiques souhaitées. Parmi les méthodes les plus courantes, on trouve l'épitaxie par jet moléculaire, qui permet la croissance contrôlée de films minces atomiques, et la synthèse par sol-gel, où les précurseurs chimiques forment un gel qui est ensuite transformé en nanomatériaux. La méthode de dépôt chimique en phase vapeur (CVD) est largement utilisée pour la production de nanotubes et de nanofibres[2], tandis que l'électrodéposition permet de créer des structures métalliques nanométriques.[7]

Le broyage à haute énergie, ou mécanosynthèse, est une technique physique où des matériaux en poudre sont broyés pour obtenir des nanoparticules. La lithographie, utilisée principalement en microélectronique, permet la structuration de nanomatériaux à des échelles très fines. Enfin, l'irradiation laser pulsée est une méthode pour déposer des couches minces de matériaux nanostructurés. Chacune de ces techniques offre des avantages uniques, permettant de fabriquer des nanomatériaux aux propriétés optimisées pour des applications spécifiques dans divers domaines technologiques et industriels.

1.4.1 La voie physique

Il est possible de fabriquer des nanoparticules en utilisant une phase vapeur extraite d'un matériau source, soit par chauffage soit par bombardement. La vapeur du matériau désiré est généralement refroidie par collision avec un gaz neutre, permettant la collecte du matériau sur une paroi froide. Une autre méthode pour obtenir des nano poudres consiste à utiliser des micro-ondes pour agir sur des poudres de taille millimétrique. La création de couches minces d'épaisseur nanométrique peut être réalisée par la méthode de dépôt physique en phase vapeur (PVD). Les nanotubes de carbone peuvent être produits par des techniques telles que l'ablation laser, la décharge plasma ou la décomposition catalytique. Ces diverses méthodes permettent la fabrication de nanomatériaux aux propriétés spécifiques adaptées à diverses applications technologiques.

1.4.1.1 *L'atomisation*

L'Atomisation est une méthode fréquemment employée dans la fabrication de poudres. On utilise un jet de métal ou d'alliage fondu pour pulvériser à l'aide d'un jet de gaz ou d'eau sous pression[8]. Cette méthode offre de nombreux bénéfices, tels que la possibilité d'obtenir des poudres de grande pureté et, dans le cas de l'atomisation au gaz, des poudres sphériques. Une autre technique consiste à centrifuger un jet de métal liquide sous vide afin de disperser les gouttelettes qui se refroidissent pendant leur trajectoire. Ce procédé donne également lieu à l'obtention de particules sphériques.

1.4.1.2 *L'atomisation par l'eau*

Dans cette méthode, des jets d'eau à haute pression sont projetés sur le filet de métal en fusion, entraînant la rupture du film de métal liquide en petites gouttelettes qui se solidifient rapidement. Un système d'atomisation à l'eau comprend plusieurs éléments essentiels, tels que l'équipement de fusion, le système de pressurisation de l'eau, les buses d'atomisation, la chambre d'atomisation, ainsi que le système de collecte et de séchage de la poudre produite. En fonction du métal ou de l'alliage à atomiser, la fusion peut être réalisée par induction à l'air, sous gaz inerte ou sous vide. Parfois, des fours de fusion à arc électrique ou à gaz sont également utilisés. Cette méthode permet de produire des nanoparticules métalliques avec des propriétés spécifiques adaptées à diverses applications industrielles[9]

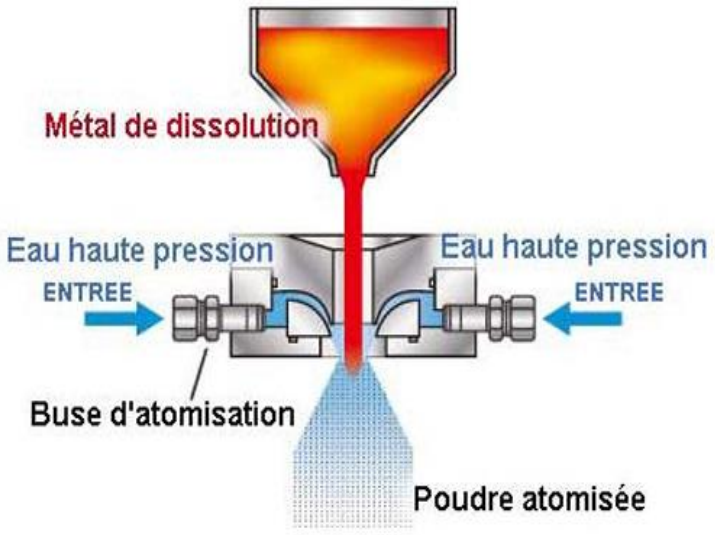


Figure 1-3: Schéma d'un atomiseur à l'eau[6]

1.4.1.3 *Atomisation par gaz*

La méthode la plus couramment utilisée pour la production de poudres consiste à fondre la matière première sous une couverture d'air, de gaz inerte ou sous vide. Ensuite, la chambre est remplie de gaz pour permettre à l'alliage fondu de passer à travers une buse où un jet d'air ou de gaz à grande vitesse, comme de l'azote (N), de l'hélium (He) ou de l'argon (Ar), vient heurter le jet de métal liquide afin de le briser en fines gouttelettes. Les poudres obtenues sont généralement sphériques, bien qu'il puisse y avoir quelques particules satellites formées lorsque de plus petites particules adhèrent à des particules plus volumineuses pendant la solidification. La granulométrie des particules varie généralement de 1 à 500 micromètres. Cette méthode est principalement utilisée pour les alliages de nickel (Ni), de cobalt (Co) et de fer (Fe), mais elle est également applicable aux alliages de titane (Ti) et d'aluminium (Al). (Figure 1-4)

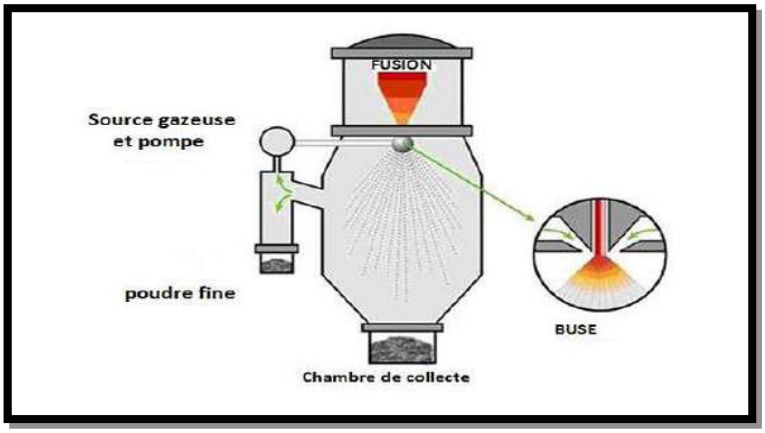


Figure 1-4: Atomisation par gaz [6]

1.4.1.4 *Méthode électrolytique*

Dans cette méthode, le métal à pulvériser est utilisé comme anode (positif) tandis que le substrat sur lequel la poudre doit être déposée sert de cathode (négatif). Les deux électrodes sont immergées dans une solution électrolytique appropriée. Lorsque le courant électrique est appliqué, les ions métalliques de l'anode migrent à travers l'électrolyte et se déposent sur la cathode sous forme de couches fines. Après accumulation, la poudre métallique est récupérée de la cathode. La solution contenant les ions métalliques est appelée électrolyte; par exemple, une solution de sulfate de cuivre peut être utilisée pour produire de la poudre de cuivre. Dans ce cas, la poudre de cuivre se dépose sur une plaque d'aluminium, qui sert de cathode. Cette méthode permet de contrôler précisément la composition et la pureté des poudres métalliques produites, et elle est couramment utilisée pour fabriquer des poudres de haute qualité pour diverses applications industrielles.

1.4.1.5 *Le procédé d'hydrogène dissous*

Cette méthode consiste à dissoudre une quantité d'hydrogène dans le métal liquide, puis à verser ce métal dans une chambre sous vide. En raison du vide dans la chambre d'atomisation, l'hydrogène précipite soudainement, provoquant l'explosion du métal liquide. Cette explosion disperse le métal en petites gouttelettes qui se solidifient rapidement dans l'atmosphère neutre de la chambre. Bien que la taille des particules produites par ce procédé ne puisse pas être précisément contrôlée, elles peuvent adopter des formes variées, allant de sphériques à floconneuses, selon les conditions de la chambre sous vide utilisée. Ce procédé permet de produire des poudres métalliques avec des caractéristiques uniques, adaptées à certaines applications spécifiques, bien que la variabilité de la taille des particules puisse limiter certaines utilisations.

1.4.2 La voie chimique

Les méthodes de fabrication couramment utilisées dans l'industrie pour produire des matériaux nanostructurés incluent les réactions en phase vapeur et les réactions en milieu liquide. Dans les réactions en phase vapeur, les matériaux précurseurs sont vaporisés puis introduits dans un réacteur de dépôt chimique en phase vapeur (CVD). À l'intérieur du réacteur, les molécules précurseur se fixent à la surface d'un substrat maintenu à une température constante. En réagissant entre elles ou avec d'autres espèces présentes dans le réacteur, ces molécules se déposent sur le substrat pour former les nanostructures désirées.

Les réactions en milieu liquide, quant à elles, sont réalisées en utilisant une solution aqueuse ou organique contenant les réactifs nécessaires. Ces réactions permettent la production de nanoparticules par précipitation. Les conditions physico-chimiques de la solution sont ajustées pour induire un changement chimique ou une modification de phase, conduisant à la formation de nanoparticules. Ces méthodes offrent un contrôle précis sur la taille et la forme des nanoparticules produites.

En résumé, ces techniques de fabrication permettent de produire des matériaux nanostructurés en ajustant les réactions chimiques ou les transformations de phase dans des environnements en phase vapeur ou liquide. Elles sont essentielles pour la création de matériaux aux propriétés spécifiques et adaptées à diverses applications industrielles et technologiques.

1.4.3 Les procédés mécaniques

Ces procédés reposent principalement sur des méthodes de fragmentation (Choc), parmi lesquelles on trouve diverses techniques de broyage. Quelques exemples de ces techniques sont les suivantes :

1.4.3.1 *Le procédé Marco-Mesh*

Aux États-Unis, General Motors a développé un système de broyage des copeaux d'usinage d'acier ou de fonte malléable appelé procédé Marco-Mesh. Cette méthode utilise des broyeurs à marteaux pour réduire les copeaux en poudres de granulométrie fine, généralement comprise entre 0,2 et 0,7 mm Les poudres obtenues possèdent différentes propriétés qui les rendent adaptées à diverses applications industrielles.

Ces poudres sont principalement utilisées pour la production de pièces de grande taille par deux méthodes principales. La première méthode consiste en un compactage à froid suivi d'un frittage, où les poudres sont pressées à froid pour former une pièce solide, puis chauffées pour atteindre la densité et la résistance souhaitées. La seconde méthode est le forgeage à chaud des poudres, où les poudres sont directement fragmentées et consolidées lors du processus de frittage à haute température.

1.4.3.2 *Le procédé cold Stream*

Dans cette technique, le matériau à pulvériser est propulsé par un jet de gaz à haute vitesse et projeté sur une cible définie. La poudre résultante est ensuite tamisée, et les particules de plus grande taille sont réintroduites dans le système pour subir un nouvel impact sur la cible. La détente adiabatique des gaz à la sortie de la buse provoque un effet de

refroidissement significatif, favorisant la fragilisation des particules. Ce processus est effectué à une température bien inférieure à celle de l'air ambiant, ce qui aide à maintenir l'intégrité des matériaux pulvérisés.

Le procédé Cold Stream est fréquemment utilisé pour pulvériser des substances dures, abrasives et coûteuses, telles que le carbure de tungstène, les alliages de tungstène, le molybdène et le béryllium. Cette technique permet de produire des poudres fines et homogènes, adaptées à des applications exigeant des matériaux de haute performance. Grâce à sa capacité à traiter des matériaux difficiles à broyer par d'autres méthodes, le procédé Cold Stream est particulièrement prisé dans les industries où la qualité et la précision des poudres sont essentielles.

1.4.3.3 *La voie mécanique*

La mécano synthèse est une technique qui offre la possibilité de fabriquer des matériaux structurés à des échelles nanométriques à temps ambiant. Cette méthode est particulièrement adaptée à la fabrication de matériaux qui seraient difficiles, voire impossibles à obtenir par des techniques traditionnelles comme la fusion et la soudure. Dans les années 60, John Benjamin a développé la mécano synthèse, principalement pour produire des dispersions d'oxydes comme (Al2O3, Y2O3) dans des alliages de nickel, dans le but d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques. La méthode présente de nouvelles opportunités pour concevoir et fabriquer des matériaux avancés à l'échelle nanométrique.

Deux terminologies sont couramment utilisées pour décrire le broyage à haute énergie :

- **Mécanosynthèse (mechanical alloying)** : Cette terminologie est utilisée lorsque les poudres initiales ont une composition différente de celle(s) obtenue(s) à l'arrivée.
- **Broyage mécanique (mechanical milling)** : Cette terminologie est utilisée lorsque la composition des poudres reste inchangée avant et après le broyage.

La mécanosynthèse permet de créer des matériaux avec des structures et des propriétés améliorées, ouvrant la voie à des applications innovantes dans divers domaines industriels. Elle joue un rôle crucial dans le développement de nouveaux matériaux composites, alliages et nano composites, qui bénéficient de caractéristiques mécaniques, thermiques et électriques supérieures.

En résumé, la voie mécanique, et en particulier la mécanosynthèse, constitue une méthode efficace et polyvalente pour la fabrication de matériaux nanostructurés, offrant des solutions avancées pour répondre aux besoins croissants en matériaux performants dans les secteurs technologiques de pointe.

1.4.3.4 *Le broyage mécanique et la mécano-synthèse*

1.4.3.4.1 Le broyage mécanique

Un processus utilisé pour préparer des matériaux sous forme de poudre en réduisant la taille des particules par la fracture des grains grâce à l'énergie mécanique transmise lors des collisions entre les billes en mouvement. L'effet du broyage mécanique dépend de la ductilité du matériau et de la forme des particules. Ainsi, les particules fragiles sont facilement cassables, tandis que les matériaux mous comme l'étain ont tendance à être déformés ou agglomérés. De plus, les particules sphériques sont moins susceptibles d'être cassées car elles ont plus de chances d'être éjectées par les billes, contrairement aux particules allongées qui restent bloquées. Le broyage mécanique peut également réduire la cristallinité d'un matériau et peut même conduire à son amorphisation.

1.4.3.4.2 La mécano-synthèse

La synthèse mécanique est une méthode passionnante qui tire parti du fraisage mécanique pour créer des matériaux aux propriétés uniques. Cette technique consiste à mélanger des poudres de différents métaux, alliages ou composés, puis à appliquer une énergie mécanique élevée pour provoquer des réactions chimiques entre ces matériaux. Ce processus convertit ainsi l'énergie mécanique en énergie chimique, conduisant à la formation de nouvelles phases et à l'homogénéisation du mélange.

Lors du broyage mécanique, les particules subissent des fractures et des soudures répétées, ce qui favorise la diffusion des éléments à l'échelle atomique. Cela permet une répartition plus uniforme des composants dans le matériau final, améliorant ainsi ses propriétés. Cependant, il est important de noter que la texturation mécanique peut nécessiter un temps de traitement plus long que le fraisage mécanique conventionnel, en raison de la complexité des réactions chimiques impliquées.

Les éléments nécessaires pour l’élaboration des matériaux par mécano synthèse :

- Des poudres élémentaires ou pré alliées constituant le produite à élaborer.
- Un moyen de choc : des billes ou des barreaux suivant la technique adoptée.
- Un type de mouvement permettant des chocs successifs.

1.5 L’application des matériaux nanostructures

En ce qui concerne les nanomatériaux pour les applications aérospatiales, de nombreux défis techniques sont repérés et sont soumis à des recherches approfondies. Deux domaines de recherche particuliers sont particulièrement intéressants : les polymères renforcés de nanotubes de carbone et les polymères biocompatibles. Matériaux fabriqués à partir d'une déformation plastique forte (SPD).

Les recherches sur les polymères renforcés de nanotubes de carbone portent sur leur capacité à améliorer les caractéristiques mécaniques des matériaux composites utilisés dans le domaine de l'aérospatiale. Les nanotubes de carbone, grâce à leur solidité et à leurs caractéristiques particulières, ont la capacité de renforcer.

L'aérospatiale peut également être intéressée par les matériaux produits par déformation plastique sévère (SPD). Le SPD consiste à traiter les matériaux de manière à créer des microstructures à grains ultrafins ou nanocristallines, ce qui donne aux matériaux des caractéristiques spécifiques.

Des améliorations mécaniques, comme une résistance plus élevée et une ductilité améliorée Et cela conduit à atteindre les échantillons broyés aux plus petites tailles à l'échelle du nanomètre. Les scientifiques explorent les méthodes de SPD pour les alliages métalliques employés dans le domaine de l'aérospatiale, dans le but de créer des matériaux plus légers, plus solides et plus résistants [10]

➢ **Les nanomatériaux sont employés** pour protéger les aubes des moteurs d'avion. On réalise actuellement des recherches visant à modifier les caractéristiques moléculaires de ces revêtements pour les rendre plus solides à la surface de la lame. Fait de métal les oxydes métallique et offrant aux moteurs la possibilité de fonctionner à des températures plus élevées. L'objectif de cette étude est d'optimiser les performances et l'efficacité des moteurs en rendant les revêtements nanométriques appliqués aux aubes plus efficaces. La protection thermique et le contrôle jouent un rôle essentiel dans les conditions extrêmes de l'environnement. En améliorant les dispositifs de protection thermique des engins spatiaux réutilisables, il serait envisageable de diminuer les dépenses liées à leur utilisation.

➢**La flexibilité et la sécurité** des missions dans les voyages spatiaux habités sont renforcées grâce au transport spatial. Il est crucial de prendre en compte les matériaux céramiques et les

composites à base de fibres lors de la conception des systèmes de protection thermique. Les couches de protection et les composants tels que ces matériaux sont employés.

Les buses, les compartiments de combustion des moteurs de fusée et les boucliers thermiques des systèmes de rentrée spatiale.

➢**Formation d'une matrice céramique** à partir de polymères oligo- et silico-organiques précurseurs pour l'élaboration de structures complexes.

1.6 Conclusion

Après avoir étudié les différentes étapes du traitement et de la rentrée dans le processus de fabrication des poudres métallurgiques et des nanomatériaux, il est évident que le broyage est un élément essentiel dans ces domaines. Dans le Deuxième chapitre, une analyse approfondie La section est dédiée à l'étude d'un broyeur spécialement conçu pour ces matériaux, soulignant son rôle crucial dans le processus de transformation. En outre, le chapitre II présente une analyse approfondie du broyage des poudres métallurgiques, en exposant les diverses techniques de broyage et les différents types de broyeurs employés. Ces renseignements offrent une base solide pour appréhender les principes essentiels et les aspects concrets du broyage des poudres métallurgiques et des nanomatériaux, ce qui ouvre la voie à des progrès technologiques.

2 Chapitre 2 : Caractéristiques et fonctionnement des broyeurs

2.1 Principe du broyage mécanique

L'utilisation du broyage mécanique est une technique efficace pour mélanger des poudres d'éléments purs ou combinés à une échelle atomique. Contrairement au broyage traditionnel, qui a été utilisé depuis des siècles pour simplement réduire les matériaux en poudre, le broyage à haute énergie est une méthode de broyage performant.

En utilisant cette technique, on peut obtenir des matériaux sous forme de poudres nanométriques, qu'elles soient monophasées ou polyphasées. On effectue cette modification en appliquant une série de chocs mécaniques sur les particules à l'intérieur d'une pièce.

Le processus de broyage permet de réduire la matière en petits morceaux ou en poudre. La compréhension des mécanismes impliqués dans ce processus est encore loin d'être totale. Pour expliquer la rupture des particules qui sont soumises à des forces mécaniques.

Prenons l'exemple de la fracture mécanique. Les méthodes traditionnelles de fragmentation impliquent de faire face au solide à fragmenter à une contrainte engendrée par des forces de contact. En général, le champ de contrainte obtenu est anisotrope et est influencé par des paramètres inhérents au matériau, tels que le nombre et la direction des forces appliquées, ainsi que la vitesse de déformation. Au moment de concevoir les équipements, il est essentiel de considérer les paramètres suivants [11].

2.1.1 Le champ de contraintes

Le solide est soumis à des forces qui exploitent les discontinuités pour initier et propager des fissures. La répartition de ces fissures détermine la taille, la forme des fragments et les nouvelles surfaces générées. Ces caractéristiques dépendent des propriétés intrinsèques du matériau, qui influencent son comportement lorsqu'il est déformé.

2.1.1.1 *Energie*

Le champ des contraintes fournit l'énergie requise pour fracturer le matériau. La rupture d'une fissure nécessite une quantité d'énergie supplémentaire, car elle entraîne une consommation d'énergie. La quantité d'énergie nécessaire pour propager une fissure est liée à la section.

2.1.1.2 *Vitesse de déformation*

Elle conditionne le comportement du matériau.

2.1.1.3 *Réduction des dimensions du matériau*

Le volume d'énergie requis n'est pas illimité et souvent il nécessite des étapes successives impliquant l'utilisation de divers types d'appareils en série.

2.2 Les paramètres du broyage mécanique

- Le broyage à haute énergie est une procédure complexe qui nécessite une multitude de paramètres interdépendants, dont la maîtrise totale reste encore à faire, mais qui ont une influence significative sur les caractéristiques du produit final obtenu. On peut regrouper ces paramètres en deux groupes.
- Deux types différents :
  - Les paramètres contrôlables
  - Les types de broyeurs
  - Le rapport masse billes/masse de la poudre
  - L'intensité du broyage
  - Le taux de remplissage
  - Le temps de broyage

2.2.1 Les paramètres difficilement contrôlables

- La température
- L'atmosphérique de broyage
- La contamination

2.3 Phénomène de fragmentation lors du broyage

Tous les types de fragmentation requièrent un équipement particulier et impliquent des mécanismes de fragmentation spécifiques. Cette méthode implique de broyer en même temps deux matériaux, A et B. À l'origine, les particules des différents composants sont fragmentées (voir Figure 2-1) jusqu'à ce que la taille limite soit atteinte. Dans cette procédure, l'un des composants se décompose plus rapidement, c'est-à-dire le composant B. Ainsi, B atteint sa taille de fragmentation limite avant A.[12]

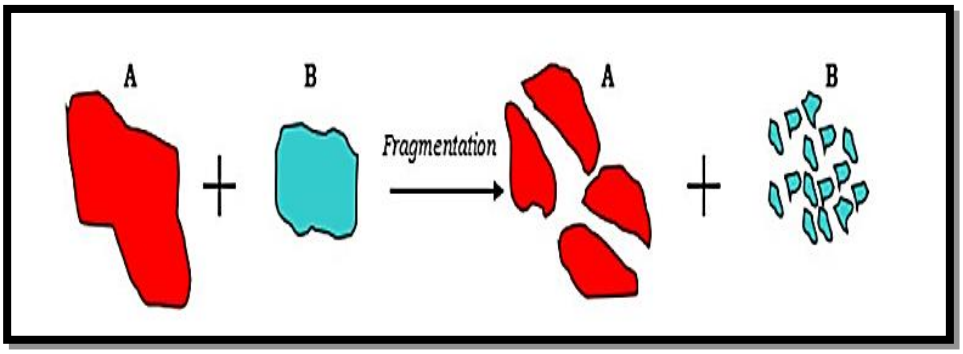
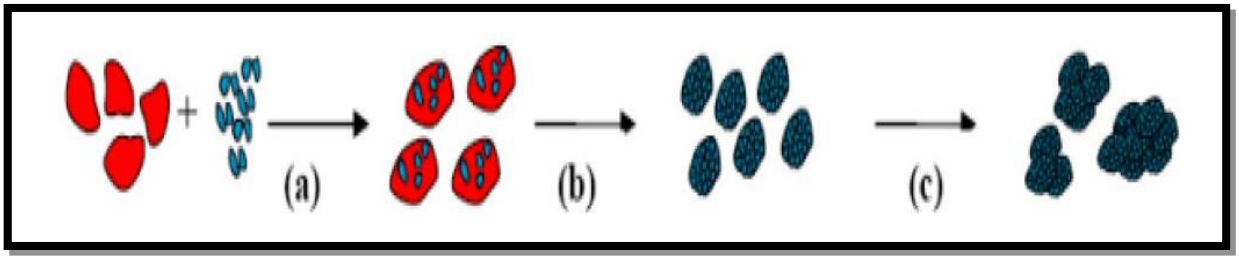


Figure 2-1: Phénomène de fragmentation lors du broyage.[13]

En raison des forces entre les particules, les particules plus grosses vont avoir tendance à se fixer sur les particules plus fines du constituant B. Le phénomène s'intensifie à mesure que le broyage se poursuit. On va faire face à plusieurs stades d'agglomération : la simple fusion entre deux éléments.

Un nombre élevé de particules, puis le stade de l'enrobage des particules, et enfin le stade de l'Agglomération des particules entre elles. Les caractéristiques du phénomène observé varient en fonction de la durée de l'opération et de l'affinité des produits. Les différents stades d'agglomération évoluent lors du broyage, comme illustré dans la (Figure 2-2).



2. Figure 2-2: Différentes étapes d'agglomération au cours du broyage.[13]

Pendant le broyage à haute énergie, les particules de poudre se retrouvent piégées entre les billes ou entre les billes et la paroi du récipient. Elles subissent des déformations plastiques, accompagnées de phénomènes de durcissement et d'élévation locale de la température. Les particules se fracturent, et les fragments résultants se soudent ensuite entre eux. En général, environ 1000 particules, d'un poids total d'environ 0,2 mg, sont emprisonnées lors de chaque collision (Figure 2-3).

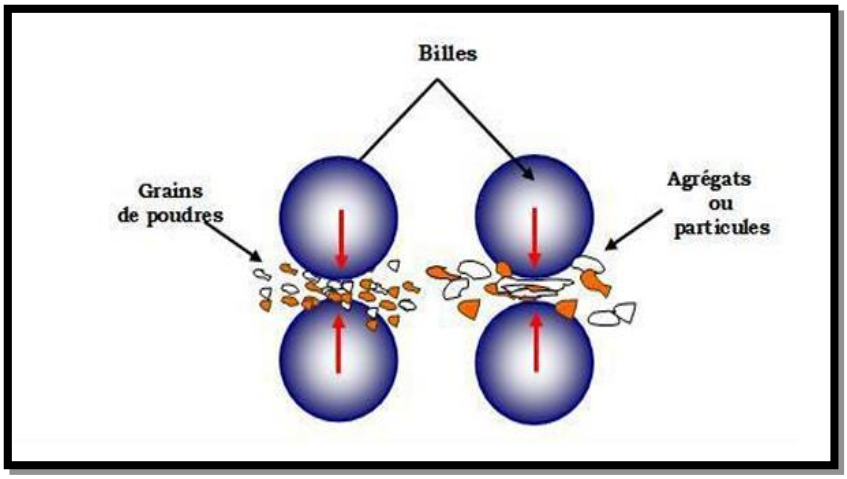


Figure 2-3: Principe du broyage mécanique formation d'agrégats par chocs mécaniques[13]

2.4 Mécanismes de formation

D'une manière générale, on peut classer les phénomènes de transformation qui surviennent dans la poudre en 4 étapes[12].

2.4.1 Stade primaire

Pendant les premières heures de broyage, on peut observer des lamelles alternées des éléments initiaux. Les particules peuvent avoir une taille allant de quelques microns à100 μm. L'identification des éléments de départ dans le composé formé est possible en raison de la prédominance du phénomène de fracture.

2.4.2 Stade intermédiaire

Plus le temps de broyage est long, plus la compétition entre les phénomènes de fracture et de soudage est intense, plus les particules de poudre sont affinées. La matrice commence à se dissoudre dans les éléments solutés. La présence de défauts plus nombreux dans le réseau cristallin et une augmentation de la température locale encourage la création de zones de solution solide.

2.4.3 Stade final

À cette étape, la structure microstructurale des particules semble assez homogène à l'échelle macroscopique, sans structures lamellaires. Il est possible d'atteindre une composition chimique homogène de toutes les particules, ce qui entraîne la formation d'un alliage ayant une composition chimique homogène.

Une structure similaire au mélange initial. La dureté des particules de poudre atteint en outre un état de saturation, c'est-à-dire qu'elle cesse d'augmenter de manière significative.

2.4.4 Stade complet

La structure métastable des particules de poudre formées à ce stade est très déformée et la composition de l'alliage est proche de celle du mélange initial.

2.5 Physique de la fracture

2.5.1 Définition

Quand une contrainte croissante est exercée sur un solide, il subit des déformations qui peuvent éventuellement entraîner sa fragmentation. En règle générale, la courbe qui illustre la corrélation entre la déformation et la contrainte (Figure 2-4) permet de distinguer deux principaux éléments. Champs[11] :

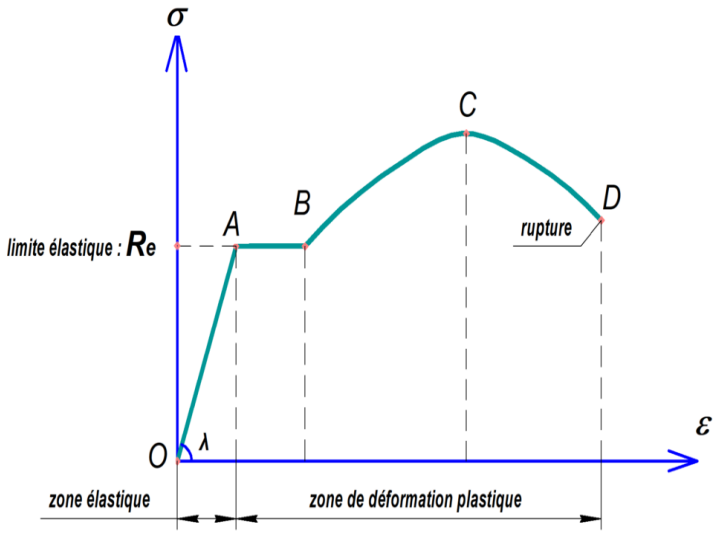


Figure 2-4 : Contrainte =f (déformations).

Dans la première zone, la déformation du matériau est liée à la force exercée. C'est dans cette zone que le module d'Young (E) peut être mesuré. Ce sont des déformations élastiques qui se produisent ici, ce qui implique qu'elles peuvent être réversibles. Autrement dit, À la libération de la contrainte, le solide reprend sa forme initiale.

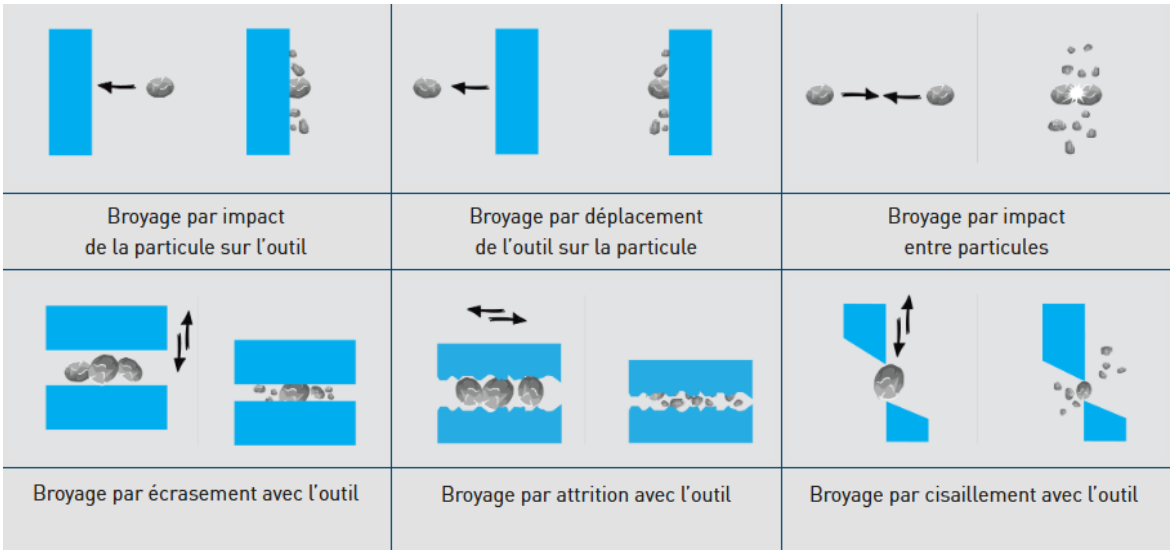


Figure 2-5: Mode de fragmentation[14]

Au-delà d'un point connu sous le nom de limite d'élasticité, la contrainte est élevée et on entre dans une zone de plasticité où les déformations deviennent irréversibles. Un point de rupture marque la fin de ce domaine de plasticité, où le matériau se brise une fois que ce point est atteint.[11]

2.5.2 Point de rupture

La rupture est qualifiée de fragile lorsque le point de rupture est très proche du point de limite d'élasticité. Elle est alors brusque et se propage rapidement en suivant des surfaces de cohésion minimale.

Si le point de rupture se trouve après un large espace de plasticité, on parle de rupture ductile, qui est progressive et que la contrainte doit être maintenue jusqu'à la séparation des débris. Les courbes de déformation-contrainte offrent la possibilité de diviser les matériaux en trois catégories principales :

1. **Les matériaux fragiles :** Ne présentent pas de domaine d'élasticité
2. **Les matériaux semi fragiles :** Ces matériaux se cassent en présence de défauts
3. **Les matériaux malléables :** Qui présentent une grande plasticité et présentent de grandes déformations avant d'atteindre le point de rupture.

2.6 Mode de fragmentation et types de broyeur utilises

Suivant le type de broyeur utilisé, les contraintes infligées au produit à broyer (Figure 9) sont de nature différente :

On utilise fréquemment la compression ou l'écrasement, en particulier dans les industries alimentaires où on trouve souvent des **broyeurs à cylindres lisses ou cannelés**.

- **Les broyeurs à impacts** offrent la possibilité d'atteindre diverses tailles, allant du broyage grossier avec des marteaux au broyage ultra fin avec des jets d'air en passant par le broyage fin avec des broches.
- **Le broyage par attrition** est mis en œuvre dans les broyeurs à colloïdes ou broyeurs à disques.
- **Le découpage et le cisaillement** qui permettent éventuellement l'obtention de produit de dimension finie **(couteaux**) sur des matières qui peuvent présenter une certaine élasticité.

2.7 Caractéristiques des matériaux à broyer

Le comportement d'un ensemble de particules lors d'un processus de broyage est étroitement lié à la nature de ces particules. Dans ce contexte, nous fournissons ci-dessous un aperçu des principales propriétés qui sont pertinentes pour évaluer la facilité de broyage d'un matériau. Ces propriétés doivent être prises en compte lors de la sélection d'un type de broyeur approprié.

2.7.1 La dureté

La résistance à la pénétration d'un matériau est évaluée en fonction de sa dureté. On utilise un pénétrateur de forme spécifique pour appliquer une force connue sur la surface du matériau à tester pendant une période déterminée. Plus l'empreinte est faible, plus le matériau est perçu comme étant dur. Malgré cela, Il est difficile de définir la dureté, mais les tests de dureté sont couramment utilisés en raison de leur simplicité et de leur non-détérioration. Les résultats donnent une description succincte des caractéristiques mécaniques du matériau étudié. On utilise généralement l'échelle de Mohs pour représenter la dureté (Figure 2-6). Il est important de souligner que les matériaux utilisés dans les industries minières ont habituellement une dureté maximale de 4 sur cette échelle.



Figure 2-6: Echelle de dureté de Mohs.[12]

2.7.2 L'abrasivité

En raison d'une consommation d'énergie assez forte, le broyage entraîne une contrainte qui dépasse largement le point de rupture. Cela donne naissance à des particules de taille inférieure à la particule d'origine, et la répartition de taille de ces fragments est très étendue[15].

2.7.3 Le clivage

Un phénomène intermédiaire entre l'abrasion et la désintégration se produit, entraînant la production de particules de taille similaire à celle de la particule d'origine. Ce phénomène est le résultat d'un apport énergétique juste suffisant pour propager les fractures préexistantes dans le matériau traité.

2.7.4 L'adhésivité

L'adhésivité se réfère à la capacité des particules à se coller les unes aux autres (agglomération) ou aux parois du broyeur. Cette propriété est influencée par la taille et la nature des particules, ainsi que par leur taux d'humidité[15].

2.7.5 La forme

La forme et la composition des particules sont essentielles pour les procédés de broyage. En effet, la forme des particules peut être étroitement liée à leurs caractéristiques d'utilisation. Ainsi, il est primordial de choisir le type de broyeur qui propose le mode d'action adéquat.

Afin de donner la forme désirée aux particules.[15]

2.7.6 La distribution de taille

La répartition des particules à broyer joue un rôle essentiel dans le choix d'un broyeur. S'il y a une grande variété de tailles de particules dans le matériau à broyer, il peut être nécessaire de Prévoir différentes étapes de décomposition. Il est aussi rarement conseillé de s'intéresser à broyer jusqu'aux limites maximales d'une machine spécifique, car un broyage excessif peut causer des conséquences néfastes. Le regroupement des particules. Il est donc crucial de parvenir à un équilibre idéal entre les particules.

Le niveau de broyage nécessaire ainsi que les capacités de la machine employée.

2.8 Les broyeurs

2.8.1Définition

Un broyeur est un dispositif employé afin de diminuer la taille, fragmenter ou pulvériser divers matériaux[16]. Il est principalement employé dans les secteurs de l'industrie, de l'agriculture, de l'environnement et du recyclage. Les broyeurs sont spécialement conçus pour traiter différents matériaux. Des déchets industriels, des déchets domestiques, des matériaux de construction, des Plastiques, des métaux, des minéraux, des produits chimiques, des aliments, etc. En général, les broyeurs se composent de deux parties distinctes :

- **Partie mécanique** qui comporte une trémie, des axes, des utiles de broyage (couteaux, lames, marteaux...etc.), un réducteur de vitesse, et une carcasse qui assure l’assemblage de tous ces éléments.
- **Partie électrique** qui contienne un circuit de commande (tableau de commande), et un circuit de puissance (moteur électrique ou thermique).

2.8.2 Types des broyeurs

Les broyeurs qui nous intéressent sont ceux employés dans le domaine industriel afin de diminuer la taille des particules. Des particules et rendre les poudres homogènes. En général, ces broyeurs sont des outils essentiels lors de la production de différents matériaux. Les particules d'alliages pré-alliés ou d'éléments constitutifs. On utilise divers types de broyeurs pour broyer les purs. La plupart du temps, les broyeurs sont constitués de deux parties. D'un ou de plusieurs récipients contenant des billes ou des barres qui opèrent sur les matériaux en formant une poudre[16].

En général, les jarres et les billes (ou barres) sont conçues avec des matériaux résistants à l'usure afin d'éviter toute contamination. En général, le broyage se fait sous atmosphère contrôlée (argon, azote, etc.) dans divers types de broyeurs, classés en fonction de leur classification de leur comportement envers la jarre et/ou les billes. Les principaux types de broyeurs utilisés pour la fabrication de poudres par mécano synthèse sont le broyeur attriteur, le broyeur planétaire et le broyeur vibratoire.

2.8.2.1 *Broyeur de type attriteur*

Un broyeur attriteur est une forme particulière de broyeur qui sert à broyer et disperser des matériaux solides dans un liquide. Celui-ci est aussi appelé broyeur à billes ou broyeur à boulets agité. Le broyeur attriteur est utilisé principalement dans les secteurs de la fabrication. Techniques de peinture, d'encre, de céramique, de chimie et de revêtements.

Le broyeur attriteur fonctionne en tournant un tambour ou une cuve remplie de billes en acier ou en céramique. Le tambour contient du matériau solide et du liquide, puis les billes agissent et broient le matériau pendant que le tambour tourne. Celui-ci Les particules du matériau solide sont réduites par le broyage, ce qui favorise une dispersion homogène dans le liquide (Figure 2-7)[18].



Figure 2-7: Broyeur Attriteur[17]

2.8.2.2 ***Broyeur vibrant***

Ce type de broyeur se divise en 2 sous-types

- Broyeur vibrant 1D :
- Le broyeur vertical vibrant se caractérise par une durée de broyage moyenne d'environ 24 heures. Il est caractérisé par l'emploi d'une seule bille, de diamètre allant de 2 à 7 cm, qui frappe la poudre verticalement. On réalise cette action en utilisant les oscillations verticales produites par un électroaimant placé à la base du broyeur. Le broyeur vibrant, parmi les divers types de broyeurs utilisés pour le broyage, est celui qui produit la plus grande quantité d'énergie.(Figure 2-8)[19]

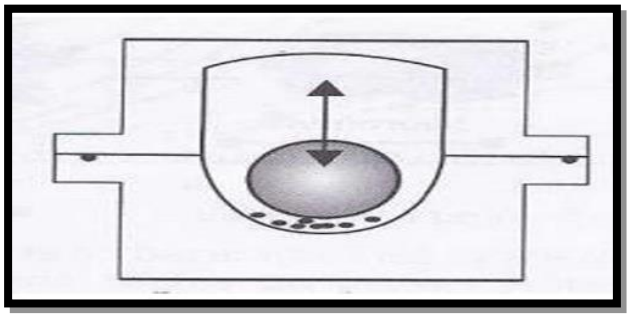


Figure 2-8: Broyeur vibrant 1D[19]

- Broyeur vibrant 3D :

Ce broyeur repose sur le principe de vibrations à haute fréquence, généralement autour de 20 kHz, appliquées à une jarre contenant des poudres et des billes, dans trois directions orthogonales(Figure2-9)[20].

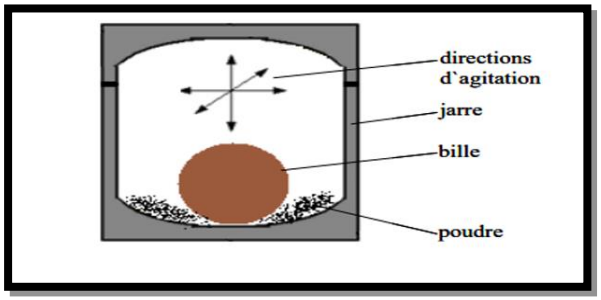


Figure 2-9: Broyeur vibrant 3D

2.8.2.3 *Broyeur planétaire*

Le broyeur planétaire est constitué d'un disque attaché aux jarres. Le disque se déplace dans le sens inverse de celui des jarres. Un exemple de ce genre de broyeur

est exposé dans la (Figure 2-10). Dans le broyeur planétaire, on dispose de billes de diamètres variés. Dans une enceinte inerte, La poudre dans les jarres qui tourne dans le sens contraire.

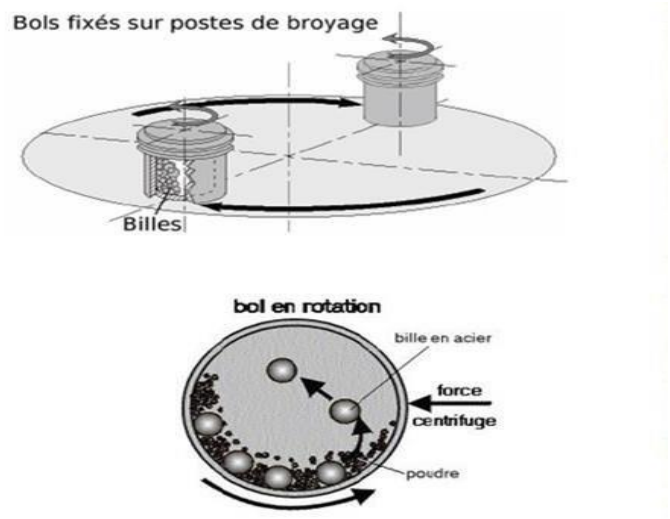


Figure 2-10 : Schéma général du broyeur planétaire PM200[20]

Les chocs et les frottements sont utilisés pour le broyage. Si un chauffage externe n'est pas utilisé, la température moyenne de la cuve varie de 50°C à 120°C, en fonction de la vitesse des billes ; l'élévation. La température locale oscille entre 60°C et 300°C. Afin d'éviter une augmentation excessive de la température, le broyage est habituellement réalisé en plusieurs cycles, alternés par des périodes de repos. Après 24 à 100 heures de broyage, on

parvient à l'état stationnaire, en fonction des matériaux à broyer. Nous avons utilisé ce type de broyeurs lors de notre étude de recherche [20].

Les broyeurs planétaires ont généralement une capacité de poudre d'environ 102 g par jarre. Ce sont des broyeurs à haute énergie, car ils fournissent une énergie bien supérieure à celle des attriteurs. Les paramètres fondamentaux du broyage, tels que la fréquence, l'énergie et la puissance de l'impact, doivent être étudiés en restant à l'écart entre la vitesse du plateau et la vitesse des satellites. Cela offre une flexibilité et un contrôle efficaces des conditions de broyage.

Le type de broyeur utilisé détermine le mode de mouvement des billes et, par conséquent, la manière dont la pression est exercée sur la poudre, que ce soit par frottement ou par choc. La formation des alliages est étroitement liée à l'énergie totale générée par le processus de broyage, et cette énergie dépend de plusieurs facteurs.

Le tableau ci-dessous résume les paramètres principaux des broyeurs tel que

- Des outils de broyage tel que le volume des jarres, diamètre et le nombre de billes.
- De la vitesse de rotation des jarres.
- Des caractéristiques des poudres élémentaires (nature chimique, miscibilité des éléments et la dureté).

Tableau 2-1: Caractéristique des différents des types de broyeurs[20]

	attriteur	planétaire	Vibrant
Nombre des billes	<1000	5-12	4-12
Diamètre des billes (mm)	2-10	10-20	10
Mouvement des billes	Roulement	Roulement+choc	Choc
Vitesse des billes (m/s)	0-0.8	2.5-4	<3.9
Energie cinétique 10^2- J/bille	<1	1-40	<12
Fréquence de choc (Hz)	>1000	100	200
Puissance (W/g. bille)	<0.001	0.01-0.8	<0.24
Température moyenne de la jarre C	150	50-120	60

2.9 Conclusion

Finalement, les broyeurs, peu importe leur type ou leur taille, sont des machines mécaniquement remarquables dont la fonction dépasse les limites. Ils se distinguent également par leur facilité d'utilisation, puisqu'ils décomposent les solides en les contraignant. Obtenue par des forces de torsion. De cette manière, les broyeurs nous offrent la possibilité de diminuer la quantité de matériaux à broyer et de faciliter leur transport.

3 Chapitre 3 Dimensionnement

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous examinerons le dimensionnement des principaux éléments d'un concasseur planétaire. Un dimensionnement précis de ces éléments est essentiel pour garantir que l'équipement fonctionne de manière optimale et efficace. En analysant les contraintes et les forces auxquelles ces pièces sont soumises, ainsi qu'en considérant les propriétés des matériaux utilisés dans le système d'entraînement et de transmission, des concasseurs planétaires robustes et efficaces peuvent être conçus Pour une production plus précise. Cette approche rigoureuse de dimensionnement facilite l'adaptation des équipements aux exigences de diverses applications industrielles et scientifiques.

3.2 Etude cinématique

L'étude de la cinématique d'un broyeur planétaire contribue à comprendre les mécanismes de broyage et à améliorer la conception du broyeur pour obtenir des performances maximales dans le processus de broyage. Cette approche constitue une étape essentielle dans le développement et l'amélioration des broyeurs planétaires largement utilisés dans divers domaines industriels et scientifiques.

3.2.1 Représentation schématique

Comprendre le fonctionnement de la machine de broyage planétaire se limite à comprendre la méthode de transmission du mouvement ,Dans ce cas, le mouvement est transmis via des engrenages planétaires, comme le montre le schéma suivant (Figure 3-1) :

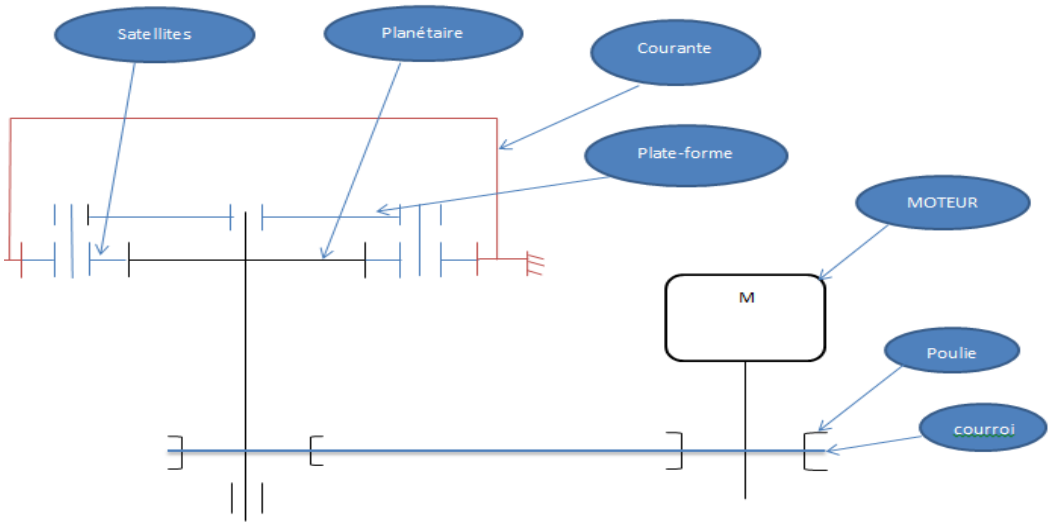


Figure 3-1: Dessin schématique de la transmission à engrenages planétaires

3.2.1.1 *Train épicycloïdal simple*

Un train d'engrenages toroïdaux est un type d'engrenage spécial doté de caractéristiques uniques, car ses vitesses sont déterminées avec précision. Il est généralement constitué d'éléments tels que couronne, roue, lunes et supports de satellite, et est utilisé dans la fabrication d'équipements planétaires et de roues de satellite. La forme et la structure du système planétaire peuvent être vues dans (Figure 3- 2)suivante :



Figure 3-2: Train épicycloïdal simple

1. **Avantage:**

- Possibilité d'arrangement coaxial des arbres.
- Un rapport de réduction très élevé tout en utilisant un nombre minimal d'éléments.
- Présente un excellent rendement lorsqu'il est judicieusement choisi et configuré.

2. **Inconvénients:**

- Coût de fabrication élevé : En raison de leur complexité et des exigences de précision.
- Difficulté d'entretien.

3. **Application :** Les trains épicycloïdaux sont utilisés dans divers domaines notamment:

- Différentiels de voitures.
- La plupart des boîtes de vitesses automatiques d'automobile.
- Multiplicateurs de vitesse de rotation des éoliennes.
- Hélicoptères.
- Fonctionnement : Pour que ce dernier fonctionne, il est impératif que l'un des trois Éléments principaux soit fixé, ce qui donne lieu à trois types de fonctionnement possibles.

- **Roue planétaire bloqué :** entré se fait par la couronne et la sortie par le port satellite le Contraire est valable aussi mais le rapport de vitesse/couple se changera:
- **Porte-satellite bloqué :** si la porteuse satellite est bloqué, Le système fonctionnera comme un train traditionnel avec des engrenages internes, avec une roue de marche arrière (satellite) insérée entre eux.

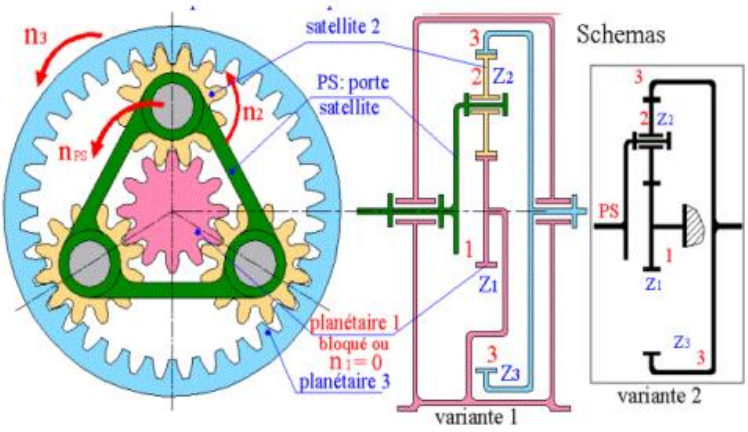


Figure 3-3: Schéma cinématique (roue planétaire bloqué).

- **Blocage de la couronne:** C'est la configuration la plus courante. En bloquant la couronne.

Il y a deux rotations possibles : la rotation de la roue planétaire autour de son axe, et en plus celle du porte satellite autour du même axe.

En utilisant cette configuration, nous obtenons le mouvement nécessaire à notre broyeur planétaire. En reliant le tracteur aux satellites, nous obtenons deux autres mouvements possibles du tracteur. La première est une rotation par rapport à son axe, tandis que la seconde est une rotation par rapport à l'axe de la roue planétaire, mais dans le sens opposé à la première rotation.

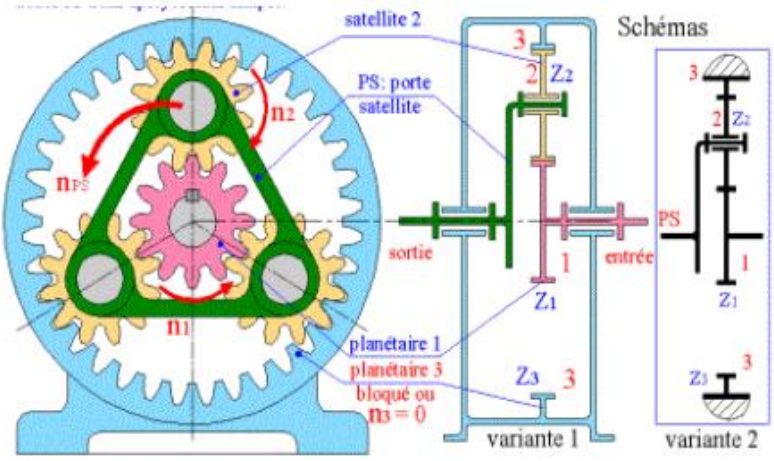


Figure 3-4: Schéma cinématique (couronne bloquée).

3.2.1.2 *Poulie-courroie*

Les courroies jouent un rôle essentiel dans la transmission de la puissance entre deux arbres distants, l'un étant le moteur et l'autre le récepteur. Sa flexibilité permet un fonctionnement silencieux, un montage et un entretien faciles, ainsi qu'un amortissement des chocs, des vibrations et des tremblements. De plus, l'utilisation de courroies présente l'avantage de coûts d'installation relativement faibles (Figure 3-5).

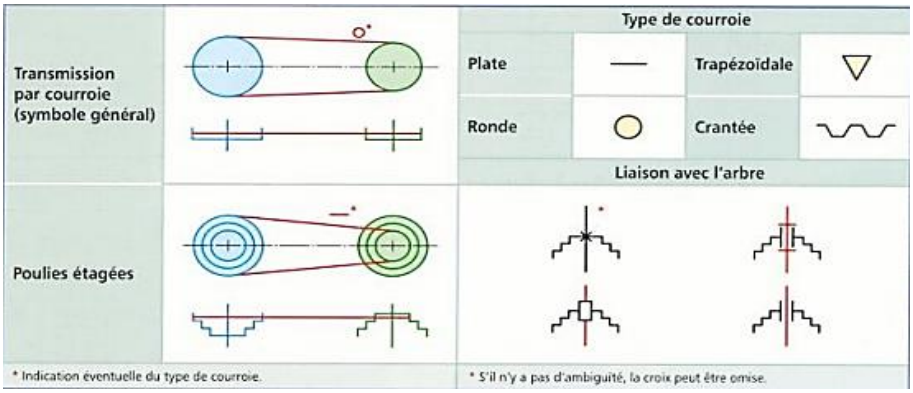


Figure 3-5:Schéma cinématique: transmission poulie-courroie

1) Avantage:

- Absorption des chocs et des vibrations : Les courroies en caoutchouc ou en matériau Élastique permettent d'absorber les chocs et les vibrations.
- Flexibilité et adaptabilité : Les systèmes de transmission par poulie et courroie offrent une grande flexibilité dans la configuration du système
- Fonctionnement silencieux.

2) Inconvénients:

- Glissement et perte de puissance : Cela peut se produire parce que la nature élastique des courroies entraîne un certain glissement entre les poulies et les courroies (ce problème peut être résolu en utilisant une courroie crantée)
- Limites de charge et de puissance : les systèmes d'entraînement par poulies et par courroie ont généralement des limites de charge et de puissance inférieures à celles des transmissions à engrenages.

3.2.2 Schéma cinématique du broyeur planétaire

Le modèle cinématique du concasseur se compose de plusieurs sous-schémas cinématiques pour chaque élément, qui sont ensuite assemblés pour former le schéma complet du concasseur. Cela permet de visualiser les différentes parties de manière simplifiée.

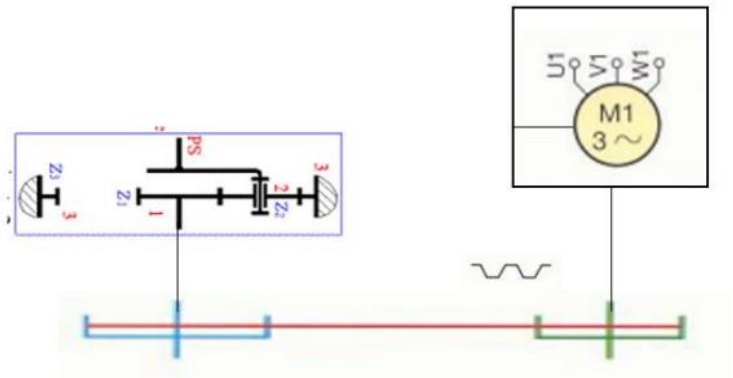


Figure 3-6:Schéma cinématique broyeur planétaire.

Le mouvement est transmis d'arbre en arbre via deux poulies reliées à la courroie, et le plateau pétale montre le dessin précédent (Figure 3.6) :

Tableau 3-1 : Tableau montrant le dessin cinétique d'un broyeur planétaire

Références	Désignations
1	Moteur électrique
2	Transmission poulie-courroie (crantée)
3	Arbre
4	Engrenage planétaire

.

3.2.3 Explication du mécanisme

Le fonctionnement du concasseur dépend de plusieurs éléments qui interagissent pour produire le mouvement nécessaire, le moteur électrique étant la principale source d'énergie. Ce moteur tourne à grande vitesse et est relié à une petite poulie qui tourne à la même vitesse que le moteur.

La petite poulie déplace une grande poulie située à proximité. Bien que la grande poulie soit plus grande que la petite poulie, cela entraîne une vitesse de rotation réduite. En

conséquence, la plus grande poulie tourne plus lentement mais avec une plus grande force de rotation. De cette façon, la puissance du moteur est transférée efficacement à la grande poulie. La rotation de la grande poulie est ensuite transmise à un arbre de couronne dentée, conçu pour transférer le mouvement de rotation aux autres composants du concasseur.

Lorsque le disque planétaire fixé à l'arbre tourne, ce mouvement est également transmis aux roues planétaires. Les satellites effectuent deux types de rotation distincts. Il se déplace en rotation relative autour de l'axe de rotation du planétaire, lui permettant de suivre la trajectoire circulaire du disque. Ensuite, les satellites effectuent une rotation supplémentaire autour de leur axe, mais dans le sens opposé à la première rotation.

Les rotations des satellites créent une force centrifuge au sein de la jarre associée aux satellites. Cette force centrale est formée par le mouvement de rotation des satellites et affecte le mouvement du La poudre dans les bocaux. De cette manière, les billes sont déplacées à l'intérieur des bocaux, permettant ainsi de broyer et d'homogénéiser les matériaux qui s'y trouvent. [13]

3.3 Dimensionnement des éléments du broyeur planétaire

3.3.1Choix du moteur

3.3.1.1 *choix du moteur*

Le moteur approprié est choisi en fonction de son couple, de sa vitesse et de sa puissance. On peut dire que plus le couple est élevé, plus nous nous rapprochons d'un broyeur planétaire qui broie avec une grande précision.

3.3.1.2 *Caractéristique du moteur choisi*

Les types de moteurs varient en fonction de la taille et du type des broyeurs planétaires, avec des vitesses pouvant aller de 100 à 800 tours par minute. En se basant sur les informations disponibles et l'objectif recherché, qui est de fabriquer un broyeur planétaire plus puissant et rapide.

Nous avons recherché sur la page EM Distraction le moteur idéal pour une fraiseuse planétaire, qui porte la référence C36.IE1.6MSE100L1B3, et nous avons obtenu un moteur avec les caractéristiques suivantes : [14]

Tableau 3-2:Caractéristique du moteur.

Puissance nominal	P=1.5 KW
Vitesse de rotation	N=1000 tr/min
Vitesse de rotation nominale	N_n=935 tr/min
Couple nominale	C_n=14.332 Nm
Diameter d`arbre	d_a =28 mm

3.3.2Choix du système poulie-courroie

Après avoir choisi d'utiliser des poulies comme moyen de transmission du mouvement du moteur à l'arbre, nous avons été confrontés au défi de ne pas avoir suffisamment de friction pour assurer une transmission efficace du mouvement. Pour contourner ce problème, nous nous sommes appuyés sur la solution courante consistant à utiliser des courroies dentées, également appelées courroies synchrones, qui comportent des dents le long de leur surface intérieure, leur permettant d'engager leurs poulies compatibles avec leurs propres dents, créant ainsi une connexion solide et empêchant le glissement. Entre la courroie et la poulie,Comme le montre la (Figure3-7).

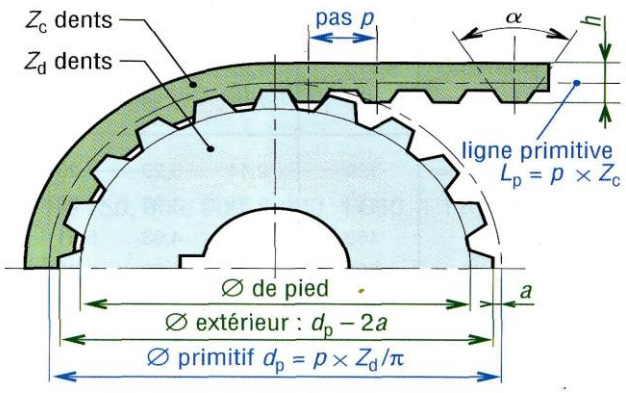


Figure 3-7: schéma poulie-courroie cranté[6]

3.3.2.1 *Puissance effective*

Pour calculer la puissance effective, nous devons disposer de certaines données nécessaires au calcul, et les données ont été extraites des caractéristiques du moteur. Elles sont les suivantes :

• Puissance du moteur : 1.5kw

• Vitesse de rotation de l'arbre du moteur : 1000tr/min

• Vitesse de rotation de l'arbre récepteur : 900tr/min

Alors :

$$p_{eff}=P_m \times K_s \quad (3.1)$$

Avec :

P_m : La puissance nominale du moteur.

K_s : Le coefficient de service.

Le paramètre ks est le paramètre influencé par les conditions de fonctionnement des courroies.

• **Type de moteur :** On a un moteur triphasé CEMER B3, 1.5 KW, 1000 TR/MIN, HA 100, 230/400V, IE1, Alu. Il est vendu sur le site **em-distribution**

• **La tempe de fonctionnement :** D'après les expériences menées sur ce modèle de concasseur, la durée de fonctionnement d'une seule expérience peut varier de 24 heures à 100 heures. Sur cette base, nous prendrons un temps de broyage moyen de 24 heures par jour avec une pause de 1 heure.

• **La nature du couple :** Pour un broyeur planétaire, la nature du couple est un couple variable (V) car les poudres broyées dans le broyeur planétaire sont légères par rapport aux autres éléments du broyeur. Ainsi, des différences peuvent être constatées lors de l'ajout de billes de broyage.

Les valeurs de (K_s) sont extraites des abaques trouvées dans la littérature[21], nous avons extrait la valeur de (K_s), qui est évaluée comme suit :

K_s=1.32

On obtient :

P_{eff}=1.5×1.32=1.98Kw

3.3.2.2 *Choix de la section de la courroie*

Le choix de la section de bande appropriée est un élément important dans la conception du système de convoyeur. Pour cela, nous avons utilisé le graphique extrait de **Guide du**

dessinateur et présenté qui prend en compte des multiples de la force effective calculée et de la vitesse de rotation du moteur, qui est similaire à celle d'une poulie motrice. Sur la base de ces informations, nous avons déterminé que la courroie de type H était la section la mieux adaptée à nos besoins. La section H est spécialement conçue pour supporter des charges et des vitesses élevées, ce qui correspond parfaitement à nos exigences (Figure 3-8) [6]

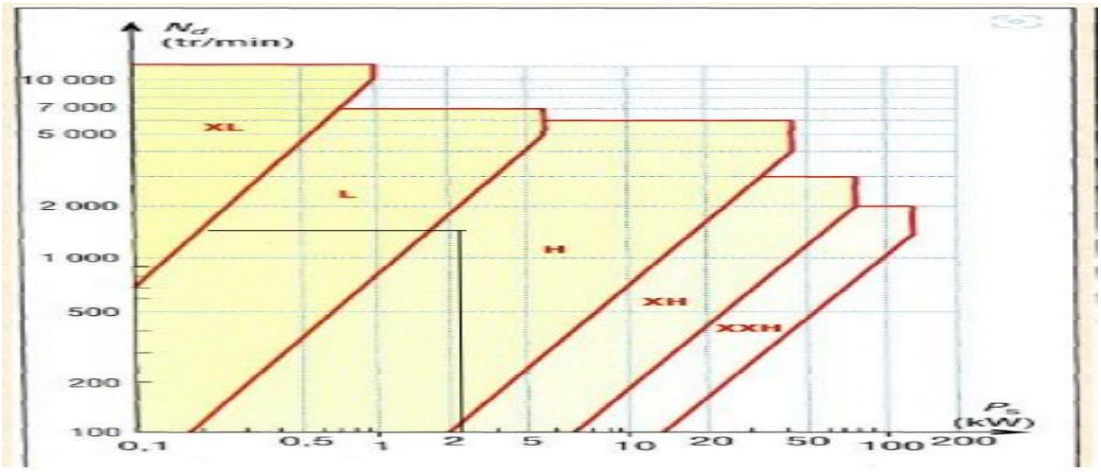


Figure 3-8: Gammes puissances transmissibles des courroies crantées.[6]

3.3.3 Calcul de la courroie

3.3.3.1 *Rapport de réduction*

On le calculer à l'aide de cette relation :

$$R = \frac{N_D}{N_d} = \frac{D_d}{D_D} = \frac{Z_d}{Z_D} \tag{3.2}$$

En raison de la taille du broyeur que nous fabriquons et en comparaison avec d'autres broyeurs planétaires qui varient entre 100 et 800 tours par minute, sur la base de ces informations, nous avons choisi une vitesse de rotation de l'arbre de 900 tours par minute.

$$R = \frac{900}{1000} = 0.9$$

3.3.3.2 *Nombre des dents*

Le nombre de dents de la poulie peut être choisi pour une courroie de type H, et le tableau ci-dessous donne les valeurs à choisir.

Tableau 3-3: Choix du nombre des dents de la poulie.[6]

XL	10 à 72 dents (sauf 23, 25, 31, 33, 37, 50, 51, 53, 54, 55, 61 à 67)
L	10 à 57 dents (sauf 31, 37, 38, 39, 43, 46, 51, 53, 54, 55) et 60, 65, 66, 72, 84, 90, 96, 120
H	14 à 52 dents (sauf 31, 37, 39, 41, 42, 43, 46, 47, 51) et 58, 60, 70, 72, 82, 84, 94, 96, 106, 116, 118, 120, 150
XH	18 à 34 dents (sauf 23, 29, 31, 33) et 38, 40, 46, 48, 58, 60, 70, 72, 78, 80, 82, 84, 94, 96, 118, 120
XXH	18, 19, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 30, 34, 40, 48, 60, 72, 90

Nous avons choisi $Z_d = 36$ pour la poulie motrice, alors et à l'aide de rapport de réduction on obtient :

$$Z_D = \frac{Z_d}{R} \tag{3.3}$$

$Z_D = 40$

3.3.3.3 *Diamètres des poulies*

Le diamètre est connu par la relation suivante :

$$\pi \times D_D = \rho \times Z_D \tag{3.4}$$

ρ : Le pas fait référence à la distance entre deux crans successifs sur la surface de la poulie.

Dans notre cas, le pas de la poulie crantée est déterminé en fonction du type de courroie utilisée. Compte tenu de notre choix de type de courroie H, nous nous basons sur le tableau ci-dessous pour fournir les valeurs nécessaires. Ce tableau est un guide pour sélectionner la poulie dentée appropriée en fonction du type de courroie et des spécifications requises.

Tableau 3-4: Dimensions principales courroies crantée (NF ISO 5294 et 5296).

type	pas p		h	α	largeur courroie mm	nombre de dents Z_c longueur primitive courroie $L_p = p.Z_c$	$2a$ mm
	mm	pouces (")	mm	deg.			
XL (extra légère)	5,08	1/5 "	2,3	50	6,4 - 7,9 - 9,5	30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90 95, 100, 105, 110, 115, 120, 125, 130	0,508
L (légère)	9,525	3/8 "	3,6	40	12,7 - 19,1 - 25,4	33, 40, 50, 56, 60, 64, 68, 72, 76, 80, 86, 92, 98, 104, 112, 120, 128, 136, 144, 160	0,762
H lourde	12,70	1/2 "	4,3	40	19,1 - 25,4 - 38,1 - 50,8 - 76,2	48, 54, 60, 66, 72, 78, 84, 90, 96, 102, 108, 114, 120, 126, 132, 140, 150, 160, 170, 180, 200, 220, 250, 280, 340	1,372
XH (extra lourde)	22,23	7/8 "	11,2	40	50,8 - 76,2 - 101,6	58, 64, 72, 80, 88, 96, 112, 128, 144, 160, 176, 200	2,794
XXH (extra extra renforcée)	31,75	1" 1/4	15,7	40	50,8 - 76,2 - 101,6 - 127	56, 64, 72, 80, 96, 112, 128, 144	3,048

Alors :

$\rho = 12.70$ mm

On le remplace dans l'équation (3.4) :

$D_D = 161.78$ mm

On le remplace dans l'équation (3.4) :

$D_d = 145.53$mm

3.3.3.4 *La vitesse linéaire*

• Pour la poulie motrice [17]:

$$V_1 = \frac{N_d \times \rho \times Z_d}{60} \quad (3.5)$$

$V_1 = 7.62\ m/s$

• Pour la poulie réceptrice : $V_1 = V_2$

3.3.3.5 *Puissance de base de la courroie Pb*

La principale force d'une courroie crantée réside dans sa capacité maximale à transmettre de la puissance sans glisser ni se détériorer. Il s'agit de la force maximale que la courroie peut supporter sans perdre sa stabilité ni être affectée par les conditions normales de fonctionnement, tout en conservant une adhérence efficace aux poulies et en assurant une transmission de force fiable.

Il existe plusieurs façons de calculer cette force. Dans ce cas, y compris l'utilisation du graphique de la (figure 3-9), où nous utiliserons la courbe appropriée pour le type de courroie H et effectuerons une correspondance linéaire pour obtenir la valeur d'énergie requise. Grâce à cette approche, nous pouvons déterminer la puissance appropriée pour notre application, garantissant ainsi que le système de transmission fonctionne de manière efficace et fiable.
A partir des informations précédentes et de la courbe suivante Figure 3-9 :

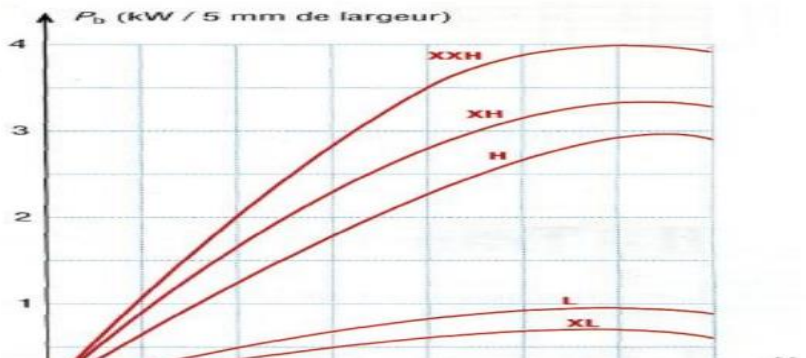


Figure 3-10: Puissance de base des courroies crantées.[6]

$V_0 = 5\frac{m}{s} \rightarrow P_b = 0.62\ kW/5mm$

$V_1 = 10\frac{m}{s} \rightarrow P_b = 1.2\ kW/5mm$

À l'aide de ces Valeur on obtient :

$P_b = 0.86\ kW/5mm$

3.3.3.6 *La largeur de la courroie*

Pour la courroie de type H, nous avons deux valeurs de référence : la largeur de la courroie (b) et le module de largeur (kb). Nous déterminons la valeur la plus basse entre les deux et la multiplions par la résistance de base de la ceinture. Ensuite, nous vérifions si cette valeur répond aux conditions requises telles que la force spécifiée ($Padm$) doit être supérieure ou égale à la force réelle requise ($Peff$). Si la condition est remplie, nous conservons la valeur spécifiée. Si la condition n'est pas remplie, nous passons à la valeur suivante du tableau ou des références disponibles. Cette approche nous permet de déterminer la valeur d'approvisionnement appropriée en fonction des spécifications et des exigences de notre système de convoyeur, garantissant ainsi un fonctionnement optimal et sûr. De tableau ci-dessous on peut obtient la valeur de la largeur de la courroie :

Tableau 3-5: Coefficient correcteur ***Kb***et largeur b en fonction de type de courroie.[6]

K_b	0,84	1,10	1,45	2,20	3,6	5,1	7,9	10,9	17,1	24,2	31,2
b (mm)	6,4	7,9	9,5	12,7	19,1	25,4	38,1	50,8	76,2	101,6	127,0
type de courroie	XL	XL	XL	L	L et H	L et H	H	H, XH et XXH	H, XH et XXH	H, XH et XXH	XXH

Nous calculons maintenant la force spécifiée ($Padm$) et comparons avec la force requise ($Peff$) pour remplir la condition : [15]

$$P_{adm} = P_b \times K_b = 3.096KW \tag{3.6}$$

Alors : $P_{adm} > P_{eff}$

Alors la condition est satisfaite et on prend : $K_b = 3.6$ et $b = 19.1mm$

3.3.3.7 *Calcul d'entraxe E*

Pour calculer l'entraxe entre les 2 poulies on a les conditions suivant :

$$E = \frac{D_D + D_d}{2} \tag{3.7}$$

E=300.185mm .Si $1 \leq \frac{D_D}{D_d} \leq 3$

$E \geq D_D \quad Si \quad \frac{D_D}{D_d} > 3$

Après avoir extrait l'entraxe, nous pouvons maintenant calculer la longueur originale de la courroie.

$$L_p = 2E^2 + \left(\frac{(Z_d + Z_D)P}{2} - 4\rho \times Z_c\right) \times E + \left(\frac{P(Z_D - Z_d)}{2\pi}\right)^2 \tag{3.8}$$

En utilisant la relation (3.7) et la relation (3.8), nous sommes arrivés à cette relation

$$L_p = 2E + 1.5 \times (D_D \times D_d) + \frac{D_D - D_d}{4E} \tag{3.9}$$

Alors :

$L_p = 1082.86mm$

Fréquence de passage de la courroie :

On a : $$f_r = \frac{V}{L_p} \tag{3.10}$$

$f_r = 7.036\ Hz$

3.3.3.8 *Angle d'enroulement*

L'angle d'enroulement de la poulie exprime l'angle formé lorsque la surface de la courroie rencontre la surface de la poulie, et cet angle est d'une grande importance car il détermine la zone de contact entre la courroie et la poulie.

• Angle d'enroulement de la petite poulie:[15]

$$\theta_d = \pi - 2\sin^{-1}\left(\frac{D_D - D_d}{2E}\right) \tag{3.11}$$

$\theta_d = 3.085\, rad$

• Angle d'enroulement de la grande poulie :

$$\theta_D = \pi + 2\sin^{-1}\left(\frac{D_D - D_d}{2E}\right) \quad (3.12)$$

$\theta_D = 3.19\, rad$

Enfin, nous résumons les résultats de tous les paramètres de conception dans le tableau suivant :

Tableau 3-6: Récapitulatif des paramètres de conception.

Le module	$\alpha = 0.686mm$
Hauteur de courroie	$h = 4{,}3mm$
Hauteur des dents	$r = \frac{h}{2} - \alpha = 1.454mm$
Largeur au sommet de dent	$\frac{\mathrm{p}}{2} - 2\mathrm{r} \times \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 0.2\mathrm{mm}$
Diamètre de pied de la petite poulie	$D_d - h = 144.066mm$
Diamètre de pied de la grande poulie	$D_D - h = 129.1mm$
Diamètre extérieur de la petite poulie	$D_d - 2\alpha = 144.158mm$
Diamètre extérieur de la grande poulie	$D_D - 2\alpha = 160.408mm$

3.3.4 Dimensionnement d'arbre

3.3.4.1 *Choix du matériau de l'arbre*

Pour notre arbre, nous avons choisi des aciers de construction mécanique de la famille des aciers non alliés. Nous avons choisi l'acier de type C10, qui fait référence à l'acier ordinaire

ayant une résistance à la rupture d'au moins 460 MPA. Il est important de souligner que cette valeur fait référence à la capacité de l'acier à résister sans rupture aux forces de traction jusqu'à ce seuil spécifié.

De plus, il faut prendre en compte la valeur limite élastique de cet acier, qui est de 340 MPA.

En choisissant cet acier C10, nous nous assurons de disposer d'un matériau de construction solide et capable de résister aux charges et contraintes auxquelles notre arbre sera exposé dans notre application particulière. [18]

3.3.4.2 *Etude mécanique sur l'arbre*

Cet arbre joue un rôle essentiel dans la transmission du mouvement de rotation entre la poulie réceptrice et la roue planétaire. Pour mieux comprendre ses dimensions, il faut comprendre les forces qui lui sont appliquées.

Dans ce cas, l'arbre est exposé à deux types de contraintes : flexion, torsion. Pour déterminer la taille appropriée de colonne et assurer sa résistance à ces pressions, nous calculerons le diamètre requis pour chaque type. Ensuite, nous déterminerons le plus grand diamètre à partir

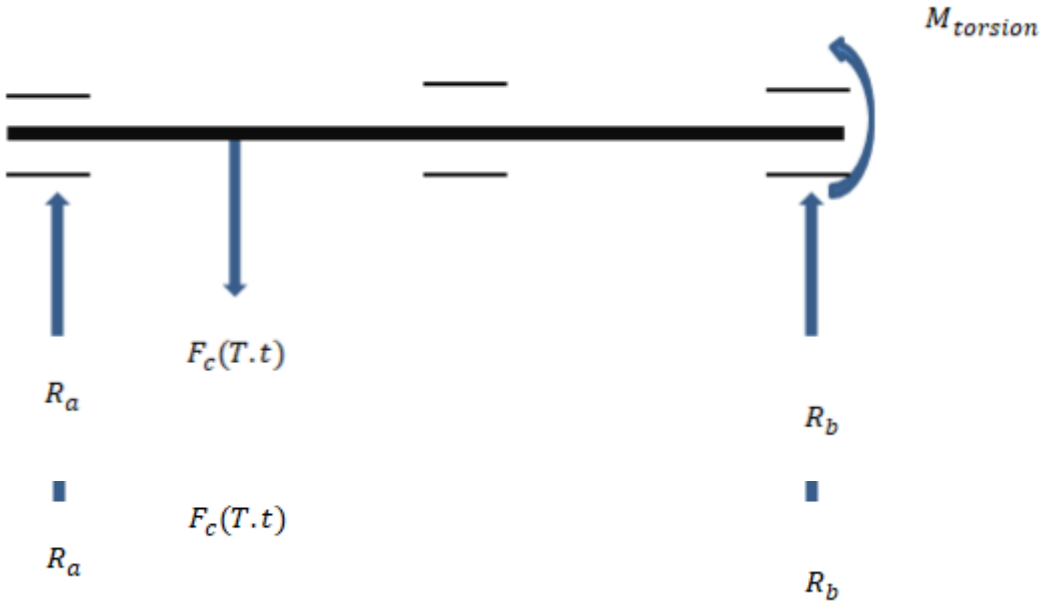


Figure 3-11: Représentation des efforts appliqués sur l'arbre

Le diamètre de la colonne peut être calculé de plusieurs manières, notamment en calculant les pressions appliquées à la colonne, représentées par la flexion et la torsion. Pour calculer ces pressions, nous pouvons utiliser les lois d'élasticité de **Hooke**. [19]

• La flexion:

$$\boldsymbol{\sigma_t = \frac{M \times D}{1I}} \quad (3.13)$$

$$I = \frac{D^4 \times \pi}{64} \quad (3.14)$$

• I_p Moment quadratique polaire en mm^4.

•D Est le rayon maximal de l'arbre.

On obtient cette équation :

$$\sigma_t = \frac{8 \times F_t \times L}{D^3 \pi} \quad (3.15)$$

$$M = F_t \times L \quad (3.16)$$

• la torsion :

$$\tau_t = \frac{F_t \times D^2}{4 \times I_p} \quad (3.17)$$

$$I_p = \frac{\pi \times D^4}{32} \quad (3.18)$$

On obtient cette équation :

$$\tau_t = \frac{8 \times F_t}{\pi \times D^2} \quad (3.19)$$

Puisqu'il existe deux types de forces appliquées à la colonne et que nous avons mis à zéro les forces a compression. Nous pouvons utiliser la loi de **Tresca et de von Mises** pour calculer le diamètre approprié de la colonne.

La norme **Tresca** consiste à comparer la contrainte de cisaillement maximale admissible à la contrainte de cisaillement résultant des charges de flexion et de torsion appliquées à l'arbre. Si la contrainte de cisaillement dépasse la limite admissible spécifiée par les matériaux, cela peut indiquer une possible déformation ou rupture de la colonne. [20]

$$\sigma_e = \sqrt{\left(\sigma_t + \sigma_f\right)^2 + \left(\tau_t + \tau_f\right)^2} \quad (3.20)$$

En regardant les significations que nous avons, la récurrence (3.20) devient de la forme

$$\sigma_e = \sqrt{(\sigma_t)^2 + (\tau_t)^2} \quad (3.21)$$

$$\sigma_e \leq \frac{R_e}{s}$$

Après avoir substitué les équations (3.15) et (3.19) dans l'équation (3.21), l'équation prend la forme suivante :

$$\frac{8\times F_t}{\pi\times D^3}\times\sqrt{\left(\frac{L}{D}\right)^2+3}\leq\frac{R_e}{s} \tag{3.22}$$

Nous pouvons modifier l'équation en termes de couplage. À partir de l'équation :

$$F_t=\frac{2\times C_t}{D} \tag{3.23}$$

Après avoir extrait toutes les données, nous pouvons maintenant calculer le diamètre de la colonne, à partir de l'équation suivante :

$$\frac{16\times C_t}{\pi\times D^3}\times\sqrt{\left(\frac{L}{D}\right)^2+3}\leq\frac{R_e}{s} \tag{3.24}$$

- La hauteur:$L=160mm$
- Le Couple : $C_t=15.32\ Nm$
- La limite élastique :$R_e=340mpa$
- Facteur de sécurité:$s=3$
- Diamètre de l'arbre:$D\geq 18.3\ mm$

On choisit les dimensions globales des colonnes

$D=20mm$

3.3.5Choix des roulements

Les roulements sont des pièces mécaniques qui permettent le mouvement de rotation des essieux et des arbres. Ils sont largement utilisés dans le domaine de la construction mécanique et sont disponibles sous différents types tels que billes, cylindres, tours, aiguilles et roulements à billes. Ces roulements sont conçus pour une utilisation directe sans aucune modification supplémentaire requise.

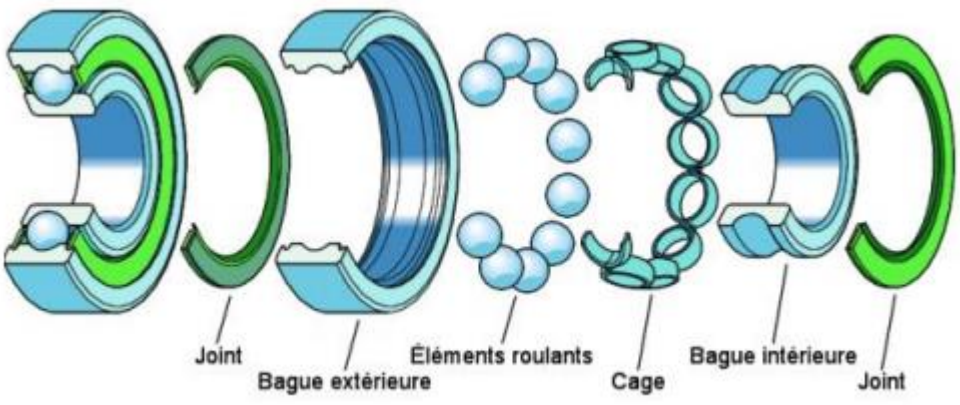


Figure 3-12: Composants d'un roulement à billes.

Le roulement est constitué d'une bague intérieure montée sur l'arbre et d'une bague extérieure montée sur l'arbre (douille ou boîtier), ainsi que des éléments roulants tels que billes, cylindres, cônes, aiguilles, etc.et généralement comprend une cage pour maintenir ces éléments roulants dans leurs positions relatives (Figure 3-11).

Il assure principalement :

- Le positionnement de l'arbre par rapport à l'alésage
- Une rotation précise avec un minimum de frottement
- La transmission des efforts radiaux, axiaux ou les deux à la fois suivant le type de Roulement.

3.3.5.1 *Type de roulements*

Les roulements peuvent être classés en plusieurs types, tels que les roulements à billes, à rouleaux cylindriques, à rouleaux coniques, à aiguilles, à rotules, et bien d'autres encore. Le type de roulement à préconiser pour assurer la liaison pivot d'un palier est conditionné par deux paramètres :

- La direction de la charge qui peut être radiale, axiale ou radiale et axiale.
- L'importance du fléchissement de l'arbre qui résulte des charges radiales.

3.3.5.2 **Choix des roulements**

Le roulement dimensionné a pour fonction de diriger le mouvement de rotation inverse du tracteur et supporte principalement les charges radiales provenant du disque. Dans ce cas, il faut choisir un roulement capable de supporter ces charges radiales.

Puisqu'il existe des forces axiales dues au poids de la colonne et à ce qu'elle supporte, en plus des forces perpendiculaires à l'axe, la meilleure solution pour nous est d'utiliser les Roulements à rouleaux cylindriques et à rouleaux coniques.

Ces roulements sont utilisés pour gérer un mélange de charges radiales et peuvent relever les défis des applications confrontées à de lourdes charges radiales et à des vitesses élevées. Supportant le mouvement axial (à l'exception des roulements à épaulement sur les bagues

intérieure et extérieure), ils offrent une rigidité élevée, un faible frottement et une longue durée de vie (Figure 3-12).

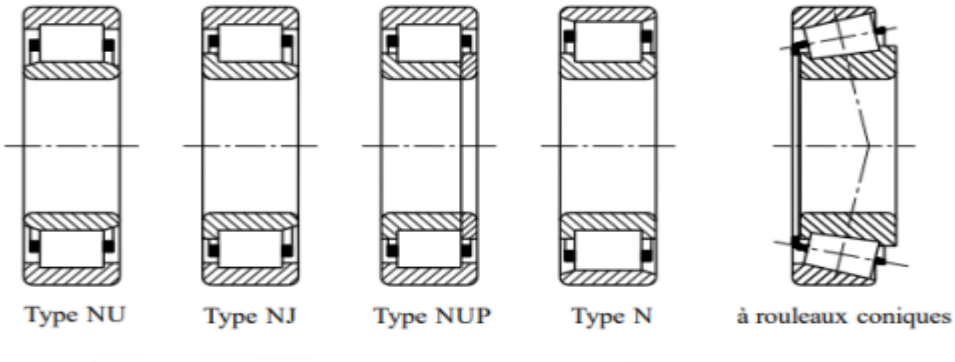


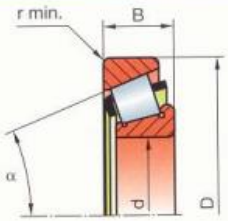
Figure 3-13: Roulements à rouleaux conique.[21]

Figure 3-14:Roulements à rouleaux cylindriques et à rouleaux coniques.

Roulements à rouleaux coniques

Angle de conicité α compris entre 10° et 17°.

Écarts sur B	± 0,250					
d	D	B	r	C_0 N	C N	n max.* tr/min
15	42	14,25	1	20 000	22 400	13 000
17	40	13,25	1	18 600	19 000	13 000
17	47	15,25	1	25 000	28 100	12 000
17	47	20,25	1	33 500	34 700	11 000
20	42	15	0,6	27 000	24 200	12 000
20	47	15,25	1	28 000	27 500	11 000
20	52	16,25	1,5	32 500	34 100	11 000
20	52	22,25	1,5	45 500	44 000	10 000
25	47	15	0,6	32 500	33 500	56 000
25	52	16,25	1	27 000	30 800	47 300
25	52	22	1	11 000	10 000	9 000
30	72	20,75	1,5	56 000	56 100	7 500
30	62	17,25	1	44 000	40 200	8 500
30	62	21,25	1	57 000	50 100	8 500
30	72	28,75	1,5	85 000	76 500	7 000



d	D	B	r	C_0 N	C N	n max.* tr/min
35	72	18,25	1,5	56 000	51 200	7 000
35	72	24,25	1,5	78 000	66 000	5 300
35	72	28	1,5	106 000	84 200	4 800
35	80	32,75	2	114 000	93 500	6 000
40	80	19,75	1,5	68 000	61 600	6 300
40	80	24,75	1,5	86 500	74 800	6 300
40	90	20,25	2	95 000	85 800	4 500
45	85	20,75	1,5	76 500	66 000	6 000
45	85	24,75	1,5	93 000	73 700	5 600
45	100	27,25	2	120 000	108 000	5 300
50	90	21,75	1,5	91 500	76 500	5 800
50	110	29,25	2,5	140 000	125 000	4 800

Tout ce dont nous avons besoin pour choisir les Roulements appropriés est de connaître le diamètre approprié qui peut être utilisé sur notre colonne.

Du livre de Chevalley, on peut obtenir toutes les dimensions des Roulements, et comme ce type de Roulements peut supporter des vitesses très élevées, on prend le type qui a la plus

faible tolérance de vitesse. Il suffira pour bien travailler dans cette machine, et le. La méthode d'extraction de ces informations est présentée dans l'image suivante :

Nous avons choisi la désignation de roulement 32004x pour notre application. Ce roulement est de type ouvert et protégé des deux côtés. Ses fonctionnalités incluent [16] :

Tableau 3-7 :Caractéristiques du roulement choisi.

$d\ (mm)$	$D\ (mm)$	$B\ (mm)$	Charge dynamique $C\ (KN)$	Charge statique $C0$ (KN)
20	42	15	4200	2700

3.3.5.3 *Calcul de la durée de vie du roulement*

La durée de vie du roulement est principalement affectée par la charge dynamique équivalente, qui sera calculée ultérieurement, ainsi que par la charge dynamique de roulement de base. Cette charge dynamique de base est une caractéristique spécifique du roulement et est fournie dans le catalogue SKF selon (la Figure 3-13) et (tableau 3.7).

$$L_{10H} = \frac{10^6}{10N} \times \left(\frac{C}{P}\right)^n \tag{3.25}$$

On prend :

n = 3 Roulements à rouleaux cylindriques et à rouleaux coniques.

P : Charge dynamique équivalente.

La charge dynamique équivalente est calculée sur la base des charges radiales exercées sur les roues du satellite. Ces charges peuvent être déterminées à l'aide de rayons et de vitesses appropriés.

Alors : $F_{a\approx}0$

$F_r = 1532\ N$

Alors la charge dynamique équivalente est comme suite :

$$\begin{cases} p = F_r Si \frac{F_a}{F_r} \leq e \\ p = XF_r + YF_a Si \frac{F_a}{F_r} > e \end{cases} \quad (3.26)$$

Dans notre cas $P = Fr$ dans tous les cas puisque Faest nulle :

Alors : $p = 1532\ N$

A l'aide de l'équation (3.37) on trouve :

$$L_{10H} = \frac{10^6}{10 \times 1200} \times \left(\frac{4200}{1532}\right)^3 \quad (3.27)$$

L_{10H} =1717.0792$heure$

Coefficient de sécurité statique s_0 :

Il est donné par la relation suivant :

$$S_0 = \frac{C_0}{P_0} \quad (3.28)$$

$S_0 = \frac{2700}{1532} = 1.762$

3.3.6 Dimensionnement du train épicycloïdal

Dans un broyeur planétaire, l'élément le plus important est l'engrenage planétaire. Il permet au concasseur planétaire d'obtenir un mouvement unique du tracteur et joue également un rôle nécessaire dans la réduction de la vitesse. Pour ce faire, il est nécessaire de déterminer la taille de l'engrenage afin d'obtenir le rapport de vitesse requis. Les principales propriétés de celui-ci sont ensemble le nombre de dents et l'unité m, qui sont calculées à partir des relations de Lewis. Les relations de Lewis sont des équations mathématiques utilisées pour déterminer, en tenant compte des propriétés géométriques et de résistance de l'engrenage, des paramètres tels que le couple et les contraintes de contact.

3.3.6.1 *Calcul nombre des dents d'engrenage planétaire*

À en juger par la relation de Lewis [22]:

$$\frac{n_1 - n_{ps}}{n_3 - n_{ps}} = \frac{\omega_1 - \omega_{ps}}{\omega_3 - \omega_{ps}} = (-1)^y \frac{Z_3}{Z_1} = r \quad (3.29)$$

Pour obtenir le mouvement recherché, il faut bloquer la couronne du broyeur planétaire et stabiliser la vitesse de rotation NPS afin d'obtenir le rapport de réduction du système planétaire. La formule de Lewis se simplifie:

• Mode 1 :

$$\frac{n_{sortie}}{n_{entree}} = \frac{n_{ps}}{n_1} = -\frac{Z_1}{Z_3+Z_1} = r \tag{3.30}$$

La vitesse d'entrée du planétairen_1

Vitesse de sortie porte-satellite n_{ps}

• Mode 2 :

$$\frac{n_{sortie}}{n_{entree}} = \frac{n_1}{n_{ps}} = -\frac{Z_1+Z_3}{Z_1} = r \tag{3.31}$$

La sortie par le planétaire n_1

L`entrée par porte-satellite n_{ps}

Dans notre cas, il est nécessaire d'utiliser le mode 1.

Pour calculer les différentes dents de l'engrenage, il faut d'abord déterminer le nombre de dents de la couronne et fixer la valeur des portes-satellites. Ensuite, l'équation (3.31) peut être utilisée pour calculer le nombre de dents des engrenages planétaires. Cette équation fournit une relation mathématique pour déterminer le nombre de dents d'un engrenage planétaire en fonction du nombre de dents de la couronne et du rapport de démultiplication requis pour la transmission. Ce processus peut aider à obtenir les valeurs appropriées pour les dents des engrenages planétaires dans un broyeur planétaire.

À l'aide de l'équation (3.31), la fonction f (Z_1) peut être formée, qui dépend du nombre de dents de la couronne. En faisant varier le nombre de dents de couronne à chaque itération, nous pouvons explorer le meilleur rapport de démultiplication. En ajustant le nombre de dents de couronne, le rapport de transmission peut être optimisé pour obtenir les meilleures performances possibles du broyeur planétaire. En utilisant cette approche itérative, on peut trouver le nombre optimal de dents de couronne pour atteindre le rapport de portage souhaité.

$$f(z_1) = \frac{Z_1}{Z_3+Z_1} \tag{3.32}$$

Dans notre méthode, le rapport de transmission maximum pouvant être obtenu est de r =0,33. Nous ajusterons le nombre de dents de la couronne à plusieurs reprises pour atteindre ce rapport de démultiplication spécifique.

Tableau 3-8 : Nombre de dents de la roue planétaire en fonction de la couronne

Nombre de dents de la couronne	La fonction ($Z1$)	Nombre de dents d'engrenage planétaire
60	$\frac{Z_1}{Z_1+60}$	30
70	$\frac{Z_1}{Z_1+70}$	35
80	$\frac{Z_1}{Z_1+80}$	40
90	$\frac{Z_1}{Z_1+90}$	45

Si le rapport de transmission est fixe (0,33), nous avons plusieurs choix. Cependant, pour des raisons de conception ou d'autres critères spécifiques, on peut préférer la deuxième configuration (40 ; 80) qui offre certains avantages esthétiques ou autres. Notre choix final dépendra des contraintes et préférences de notre application, tout en conservant la relation de transmission souhaitée.

3.3.6.2 *Nombre des dents des roues satellites*

En effet, lorsque les roues 1, 2 et 3 s'engrènent dans un système d'engrenage, il existe une relation entre les diamètres primitifs de ces roues. Cette relation est basée sur le principe de base de l'engrenage, selon lequel le rapport de vitesse entre deux engrenages en contact est égal au rapport de leurs diamètres d'origine.

$$D_3 = D_1 + 2D_2 \tag{3.33}$$

À partir de cette relation, nous pouvons conclure que

$$Z_3 = Z_1 + 2Z_2 \tag{3.34}$$

Alors : Z_2 =20

3.3.6.3 *Calcul du module m*

Le coefficient normal peut être calculé à l'aide de la formule suivante, dans cette expression l'unité dépend de l'énergie à transférer :

$$m_n \geq 2.34\sqrt{\frac{F_t}{K\times\sigma_{adm}}} \tag{3.35}$$

Ft Est l'effort tangentiel exercé sur la denture tel que :

$$F_t = \frac{2P}{\omega\times m_n\times Z} \tag{3.36}$$

On obtient :

$$m_n^{1.5} \geq 2.34\sqrt{\frac{2p}{K\times\sigma_{adm}\times\omega\times Z}} \tag{3.37}$$

La résistance pratique du matériau, symbolisée par le symboleσ_{adm}, est un paramètre important à prendre en considération. Dans notre cas spécifique, nous avons choisi d'utiliser du matériau C10 qui présente une résistance à l'extension (Re) de 340 MPA. En réglant le facteur de sécurité de s à 3, nous pouvons ainsi calculer la valeur pratique de la résistance σ_{adm} de manière appropriée.

$$\sigma_{adm} = \frac{R_e}{s} \tag{3.38}$$

$s = 3$ Donc $\sigma_{adm} = 113.33\ Mpa$

Alors le module :

Pour la roue planétaire :$m_{1-2} = 1.368$

$m_{1-2} \approx 2$

Pour les roues satellites :$m_{2-3} = 2.48$

$m_{2-3} \approx 3$

3.3.6.4 *Calcul des éléments de taillage des engrenages*

Les éléments de taillage font référence aux dimensions géométriques de l'engrenage, et nous les résumons dans le tableau suivant :

Tableau 3-9:Caractéristique d'un engrenage droit.

Désignation	Symbole	Formule	Unité	Couronne	Planétaire	Satellites
Nombre de dents	Z	WILLIS	Mm	80	40	20
Diamètre primitif	D	$D = m_n \times Z$	Mm	240	120	60
Diamètre de tête	D_a	$D_a = D + 2$	Mm	242	122	62
Diamètre de pied	D_f	$D_f = D - 2.5$	Mm	237.5	115.5	59.5
Diamètre du cercle de base	D_b	$D_a = D\cos\alpha$	Mm	97.93	48.96	24.48
Saillie	h_a	$h_a = m_n$	Mm	3	3	3
Creux	h_a	$h_a = 1.25m_n$	Mm	1.25	1.25	1.25
Hauteur de dent	h	$h = 2.25m_n$	Mm	2.25	2.25	2.25
Pas	p	$p = \pi \times m_n$	Mm	9.42	9.42	9.42
Largeur de denture	b	$b = Km_n$	Mm	30	30	30

3.3.6.5 *Dimensionnement l'arbre d'un Satellites*

Pour calculer le diamètre de la colonne on utilise la même relation (3.24) :

$$\frac{16 \times C_t}{\pi \times D^3} \times \sqrt{\left(\frac{L}{D}\right)^2 + 3} \leq \frac{R_e}{s}$$

Nous sommes confrontés à un problème : nous ne connaissons pas la valeur dec_t, mais nous pouvons la calculer en utilisant la relation entre la vitesse linéaire et la vitesse angulaire.

Nous avons trois vitesses:

•Planétaire : $$V_p = \omega_p \times \frac{d_p}{2}$$ (3.39) [23]

V_p=5657mm/min

•Satellites : $$V_s = \omega_p \times \frac{d_p + d_s}{2}$$ (3.40)

V_s=8478mm/min

•Couronne :$V_c = 0mm/min$

En utilisant les 3 relations précédentes, on obtient la relation:

$$V_c = V_s + \omega_s \times d_s = 0$$ (3.41)

$$\omega_c = \frac{V_s}{d_s}$$ (3.42)

$\omega_c == 141.3tr/min$

Nous pouvons maintenant calculer le couple après avoir extrait la vitesse angulaire :

$$C_t = \frac{P}{\omega_s} = 10.61N.m$$ (3.43)

Nous revenons à l'équation (3,24) et calculons le diamètre D. Sachant qu'on a pris la longueur de la colonne $L = 75mm$ et pris le même matériau avec lequel a été réalisée la première colonne, dont la valeur de son montage est $R_e = 340Mpa$. Et la constante de sécurité $s = 3$.

$$\frac{16 \times 10.61}{\pi \times D^3} \times \sqrt{\left(\frac{75 \times 10^3}{D}\right)^2 + 3} \leq \frac{340 \times 10^6}{3}$$

Alors :$D = 13.751mm$

$D \approx 15mm$

3.3.7Choix des jarres :

Les tracteurs sont l'élément clé du processus de broyage, influençant de manière cruciale l'efficacité de l'ensemble du processus. Pour développer davantage notre concasseur, nous envisageons la possibilité d'ajouter différentes formes de tracteurs. Les différences entre ces formes résident principalement dans la taille, qui est l'élément crucial que nous devons décider à ce stade pour garantir qu'elle s'adapte correctement à la colonne lors de la prochaine étape de conception.

3.3.7.1 *Dimensions des jarres :*

Il a été conclu que la taille du tracteur est un facteur critique dans notre projet après avoir étudié les usines existantes. Sur la base de cette étude, nous avons pu observer des performances homogènes des différents moulins et des capacités des tracteurs qui y sont utilisés.

Tableau 3- 1 : Dimensions principales pour quelques variantes de jarres

Variante	Hauteur (mm)	Diamètre extérieur (mm)	Diamètre intérieur (mm)
1	85	88	64
2	98	107	83
3	122	132	108
4	170	132	108

.

3.3.7.2 *Matériau des jarres :*

Le matériau des tracteurs de cette section a été choisi avec le plus grand soin, car il est considéré comme un paramètre crucial pour éviter tout incident de casse ou de fissuration. Après une évaluation minutieuse, l'utilisation de l'acier inoxydable AISI 304 a été approuvée, qui présente une excellente résistance à la corrosion et une bonne résistance mécanique, ce qui en fait le matériau idéal pour notre application.

Tableau 3-10: Les propriétés physiques du matériau AISI 304.

Densité	$7.93 g/cm^3$
Module de Young	$193 GPa$
Coefficient de Poisson	0.29

3.3.7.3 *Volume et poids des jarres :*

Dans cette section, nous allons utiliser le logiciel SolidWorks pour calculer le poids et le volume utile des jarres.

Tableau 3-11: Volumes et poids des jarres.

Variantes	Volume utile (L)	Poids (kg)
1	0.25	1.897
2	0.5	3.581
3	1	5.461
4	1.5	7.198

3.3.8 Conclusion :

Différentes formes varient en tailles et en poids. Dans notre cas, nous devons choisir le format qui correspond le mieux à nos besoins. Nous avons donc décidé de choisir la deuxième option, qui présente un volume total de 1 litre réparti entre les deux pots, tout en réduisant le poids.

3.3.9 Choix Les billes :

Les billes du broyeur planétaire sont un élément essentiel du processus de broyage, car elles sont généralement en acier trempé ou en céramique et se caractérisent par une taille petite et uniforme. Ces billes sont chargées dans la chambre de broyage du broyeur, où elles sont exposées à des forces de pression, d'impact et de frottement lors de la collision avec les matériaux à broyer. Le mouvement et l'énergie cinétique des billes contribuent à la fragmentation et à la réduction de la taille des particules. Les propriétés des billes, telles que leur diamètre, leur matériau et leur résistance à l'usure, sont soigneusement sélectionnées en

fonction des exigences spécifiques de broyage, afin de garantir que le concasseur planétaire fonctionne avec une efficacité maximale.

3.3.9.1 *Les performances des billes dans le broyeur planétaire :*

L'énergie d'impact maximale peut être obtenue en minimisant la dissipation d'énergie. Par conséquent, le mouvement de la bille dans la bouteille doit avoir un effet d'abrasion, permettant à la balle de se séparer de la paroi et d'écraser les poudres avec une énergie à haute densité, comme le montre l'image ci-dessous (Figure 3.14).

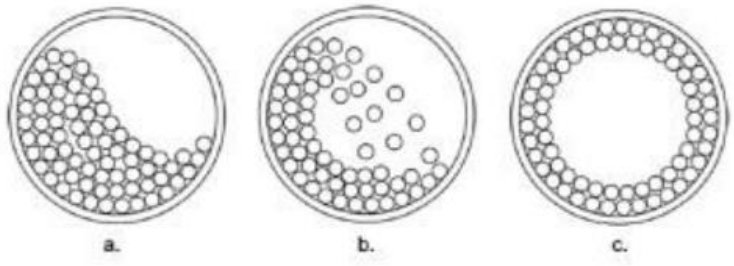


Figure 3-15: Le mouvement des billes dans une jarre (a) en cascade, (b) en érosion,(c) en roulis.

3.3.9.2 *Choix Matériau des de billes :*

La sélection des billes dans un broyeur planétaire est un aspect crucial pour garantir l'efficacité et les performances optimales du processus de broyage. Plusieurs facteurs sont pris en compte lors de la sélection des balles appropriées. L'un des points clés est que le type de matériau utilisé dans les billes est important, et nous avons choisi le métal des billes utilisé parmi l'acier 1020 (AISI 1020).Ses caractéristiques sont les suivantes:

Tableau 3-12:Les propriétés physiques du matériau AISI 1020

Densité	$7.77 g/cm3$
Module de Young	$200 GPa$
Coefficient de Poisson	0.29

.

La taille de la balle est également un paramètre crucial. La poudre est disponible dans différentes tailles, de quelques micromètres à plusieurs millimètres. La taille des billes est déterminée en fonction de la taille de particule cible requise pour le produit final et de la

capacité du broyeur planétaire à traiter différentes tailles de billes. Sur la base de l'expérience, il est possible de choisir la taille appropriée des billes dans le broyeur.

Un bon broyage dépend également du nombre idéal de billes pour broyer le matériau. La détermination du nombre de billes est due à la capacité de la chambre de broyage pour les tailles qu'elle contient.

3.4 Conclusion :

Chaque pièce du concasseur planétaire a une relation tangentielle les unes avec les autres. Les pièces secondaires (pièces achetées) ont été choisies en fonction des pièces fabriquées, telles que (roulements, billes et bocaux). Par conséquent, la sélection peut ne pas être compatible. Avec les pièces fabriquées, mais ces pièces peuvent être changées.

4 . Chapitre4 Conception et simulation numérique.

4.1 Introduction :

La conception est un aspect essentiel de l'ingénierie et de l'industrie, car elle permet de développer des modèles virtuels représentant des systèmes réels, afin d'analyser leur comportement, prédire leurs performances et améliorer leur conception.

La conception implique la création de modèles conceptuels et physiques du système à l'aide d'outils tels que **Solidworks**. Cette phase comprend la définition des spécifications des exigences, le prototypage et la conception virtuelle du système.

D'autre part, la simulation repose sur l'utilisation de ces modèles pour réaliser des expériences virtuelles et étudier le comportement du système dans diverses conditions. Ils peuvent être utilisés pour évaluer les performances, découvrir des problèmes potentiels et les améliorer en ajustant les paramètres de conception et en prenant des décisions éclairées.

Au cours de cette discussion, nous explorerons plus en détail les principes, méthodologies et outils utilisés dans les domaines de la conception et de la simulation, ainsi qu'analyserons leurs avantages et les applications concrètes de ces techniques.

4.2 Le programme utilisé dans la conception et la modélisation:

Dans le domaine de l'ingénierie, il existe de nombreux programmes nécessaires à la conception. Parmi les programmes les plus utilisés figurent **Solidworks**, **Ansys**, **ABAQUS**, etc. Ces programmes sont capables de traiter des problèmes complexes en utilisant un grand nombre d'informations et de variables allant de quelques milliers à quelques centaines de milliers.

Les programmes de génie mécanique sont très efficaces, particulièrement efficaces dans la conception de machines industrielles, l'industrie automobile et la fabrication de biens de consommation. Ces programmes permettent aux ingénieurs de concevoir, d'analyser et d'améliorer leurs conceptions avant qu'elles n'entrent dans la phase de fabrication, réduisant ainsi les coûts, améliorant l'efficacité et prévoyant les problèmes potentiels avant qu'ils ne surviennent réellement.

Dans notre travail, le logiciel principal utilisé pour la conception était Solidworks. Parmi les fonctionnalités offertes par ces logiciels [14], on peut citer :

a) L'analyse statique et dynamique des structures pour évaluer leur comportement sous différentes charges et conditions.
b) La prise en compte de lois de comportement complexes pour modéliser des matériaux avec des propriétés non linéaires.
c) La prise en compte de phénomènes divers tels que l'élasticité, les effets thermiques et d'autres phénomènes physiques pour une analyse plus complète
d) La possibilité de résoudre des problèmes d'optimisation pour trouver les meilleures solutions en fonction de critères spécifiques

4.3 Modélisation géométrique:

4.3.1 Conception du carter du broyeur :

Le carter du broyeur se compose des trois parties principales suivantes : le corps du carter, la porte de maintenance du moteur et la porte d'accès au bol de broyage.

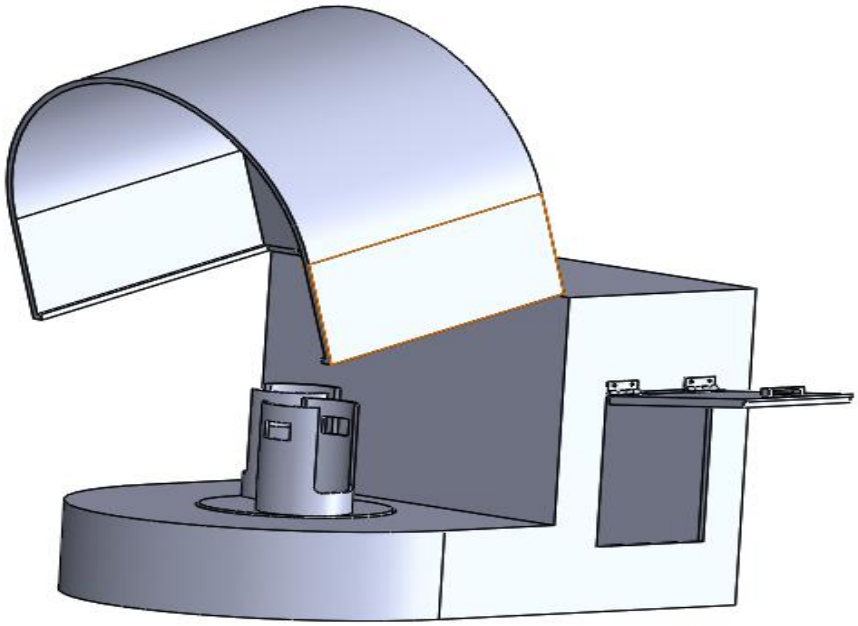


Figure 4-1 : carter du broyeur.

4.3.2Conception des poulies :

Nous avons choisi un système de poulies et de courroies afin de réduire la vitesse et d'augmenter le couple et pour garantir un changement de vitesse sans glissement et un rapport de démultiplication idéal, nous avons choisi une courroie crantée.

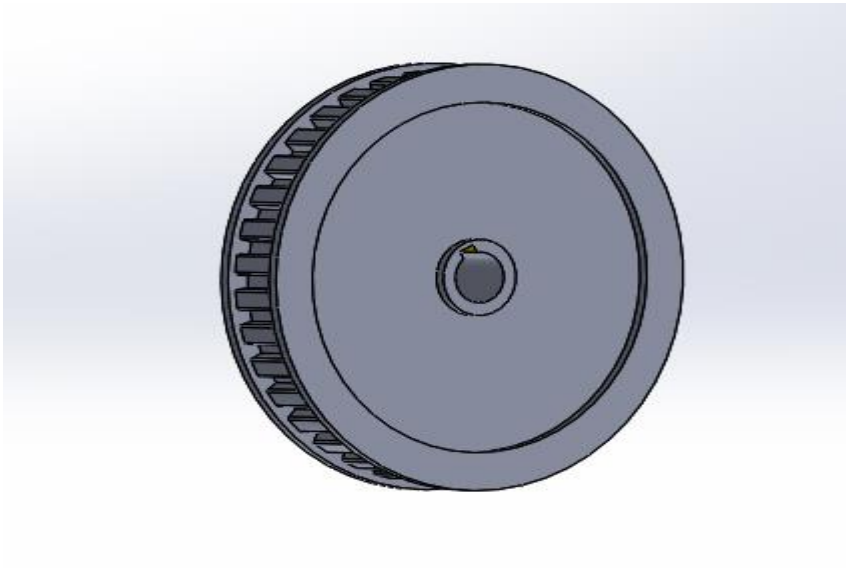


Figure 4-2:poulie crantée.

4.3.3Conception du train épicycloïdal :

Le train épicycloïdal a été principalement choisi pour obtenir le mouvement nécessaire pour le broyage.

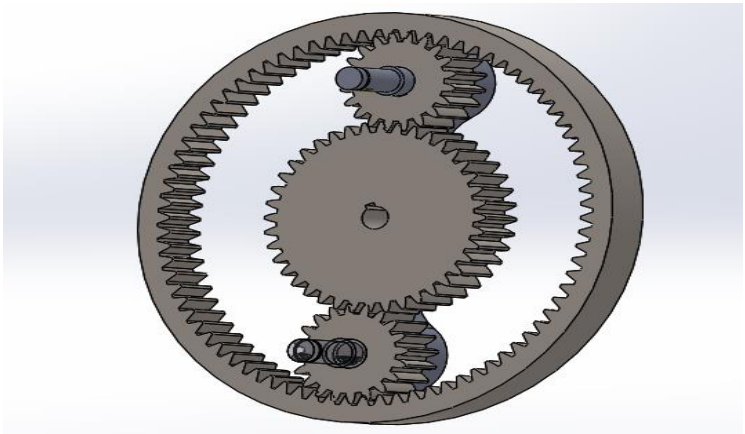


Figure 4-3:épicycloïdal.

4.3.4 Jarre de broyage :

La jarre de broyage est la chambre où l'on ajoute les poudres pour effectuer l'opération de broyage.

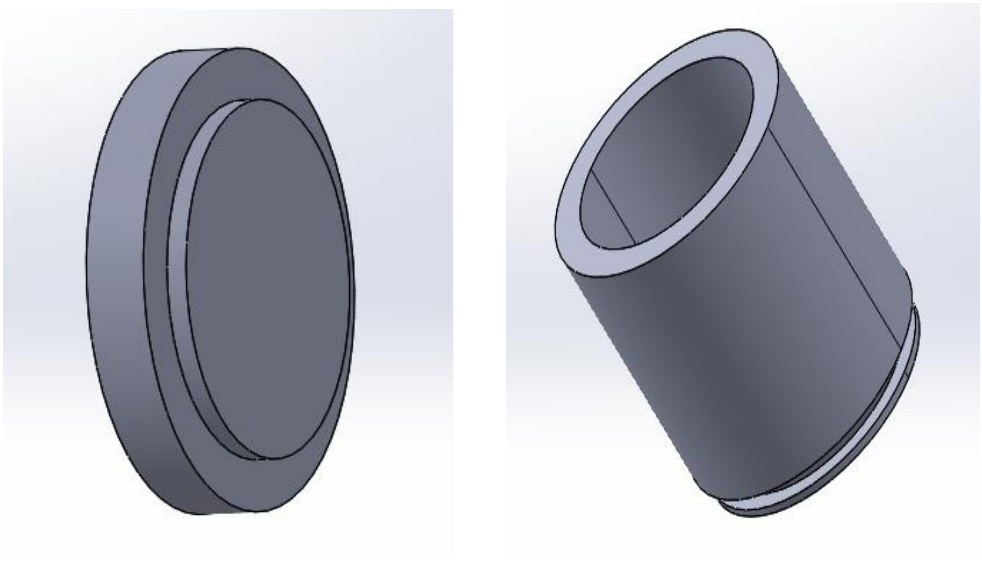


Figure 4-4: Couvercle de la jarre de broyage et bol de broyage.

4.3.5Arbres de transmission de broyeur:

Nous avons calculé les dimensions des colonnes et fixé les dimensions globales pour éviter l'apparition de problèmes techniques, notamment après l'enlèvement de la matière, ce qui entraîne la présence de forces concentrées à l'endroit où la matière a été enlevée. Nous pouvons voir la forme finale. Des colonnes dans les images suivantes :

semblage du broyeur :

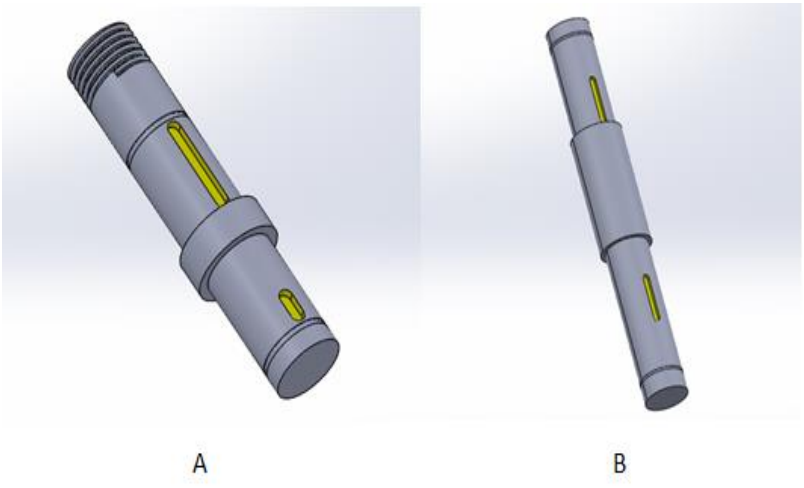


Figure 4-5 : Arbres (A) et (B) de transmission de broyeur.

4.3.6La forme finale de la machine

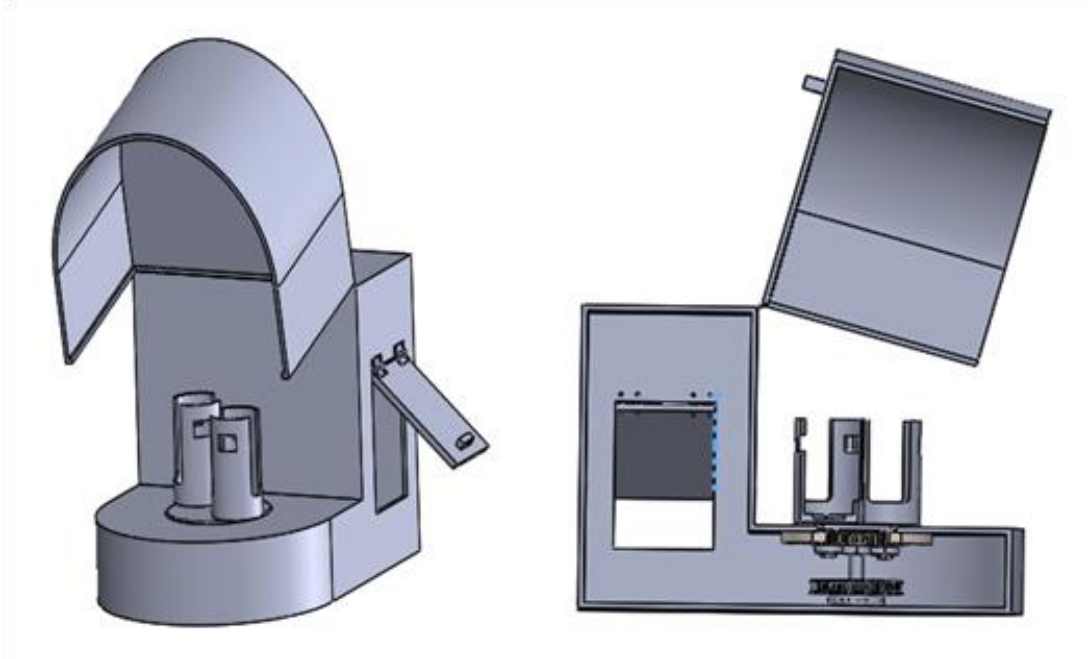


Figure 4-6: broyeur planétaire.

4.4 Simulation numérique :

Il existe plusieurs programmes de simulation, dont les programmes **Ansys** et **Solid Work** qui permettent d'étudier chaque partie du la machine et d'observer son comportement et sa capacité d'endurance. Quant à nous, nous avons choisi le programme **Solid Work** pour simuler la base. Pièces de notre machine.

4.4.1 Méthodologie d'analyse basée sur la théorie des éléments finis:

Le processus de simulation est mené selon une méthodologie spécifique et des objectifs spécifiques liés entre eux :

4.4.1.1 Choix de la géométrie et du maillage:

Le plus important en simulation est de diviser la machine en plusieurs parties afin que chaque pièce soit étudiée séparément. Plus il y a de pièces étudiées, plus les résultats sont précis.

4.4.1.2 *La définition du modèle mathématique :*

Cette méthode consiste à formuler différents aspects du problème étudié, comme la mécanique, la thermique ou les fluides. Il faut également déterminer le type d'analyse à effectuer, qu'elle soit statique, transitoire ou dynamique. Le comportement du matériau

doit être pris en compte pour déterminer s'il est élastique, isotrope, plastique, etc. Enfin, le type d'éléments utilisés dans la modélisation est également choisi essentiel, qu'il s'agisse de poutres, de tiges, de coques, de triangles, de cubes, etc.

4.4.1.3 *Résolution du problème discrétisé:*

A ce stade, toutes les données et toutes les informations sont spécifiées sous forme de matrices, et le comportement de la pièce est prédit à partir de sa solution.

4.4.2 Simulation de l'arbre :

4.4.2.1 *L'arbre en torsion :*

Dans notre cas, nous avons pris en compte le diamètre de la torsion car c'est le plus grand. Nous avons effectué la simulation de torsion en utilisant une face fixe comme support et la force possible a été appliquée à la colonne et les résultats ont été observés dans l'image suivante.

• Déplacement total:

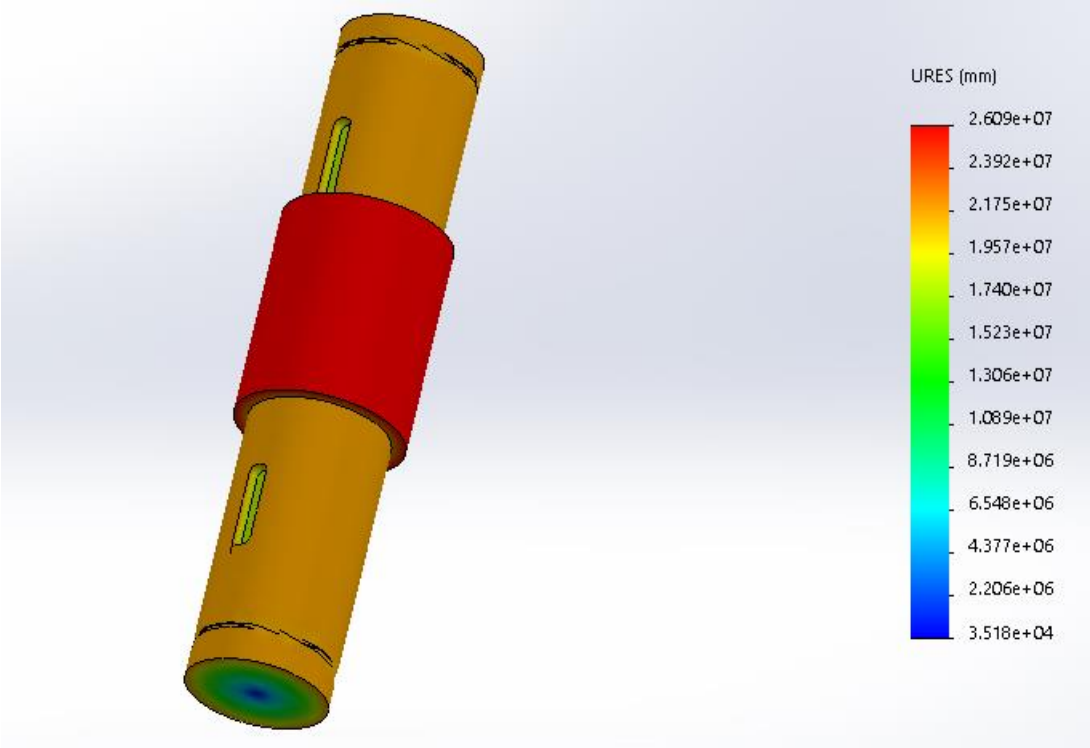


Figure 4-7 :déplacement total cas torsion.

- Contrainte :

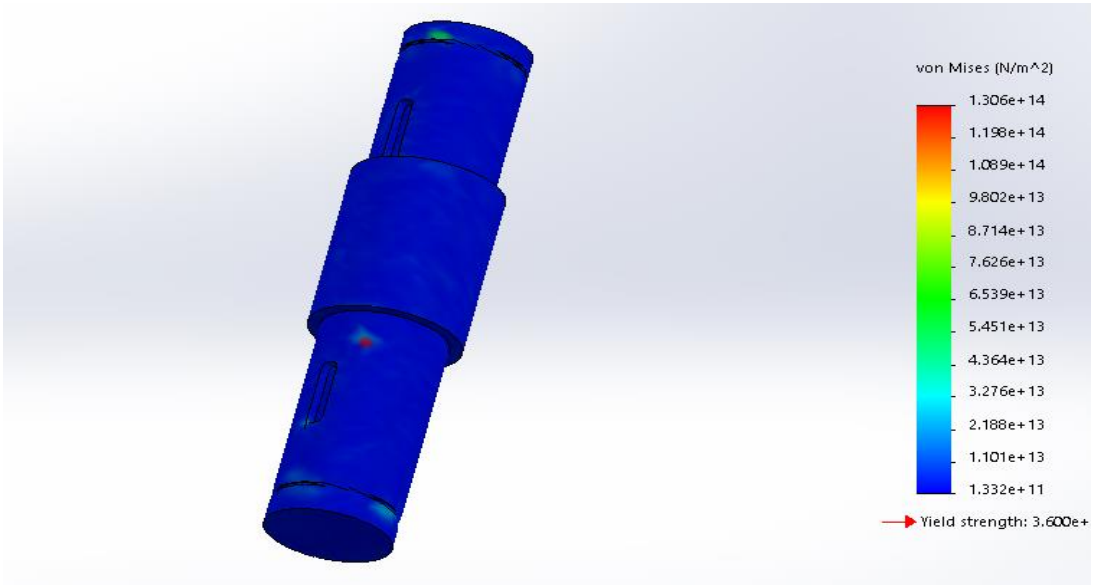


Figure 4-8 : Contrainte équivalente (von-Mises) cas compression.

- Déformation :

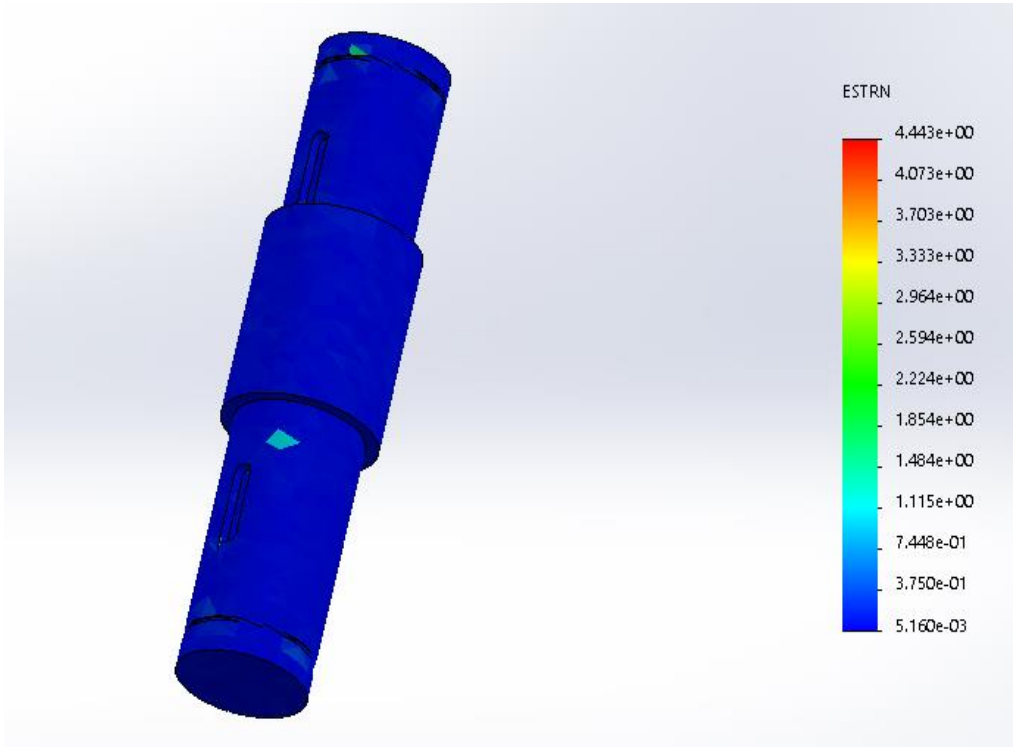


Figure 4-9: Déformation élastique équivalente cas torsion.

4.4.2.2 *L'arbre en flexion:*

Nous avons étudié la même colonne dans le cas de la flexion, et les résultats suivants sont apparus

• Déplacement total:

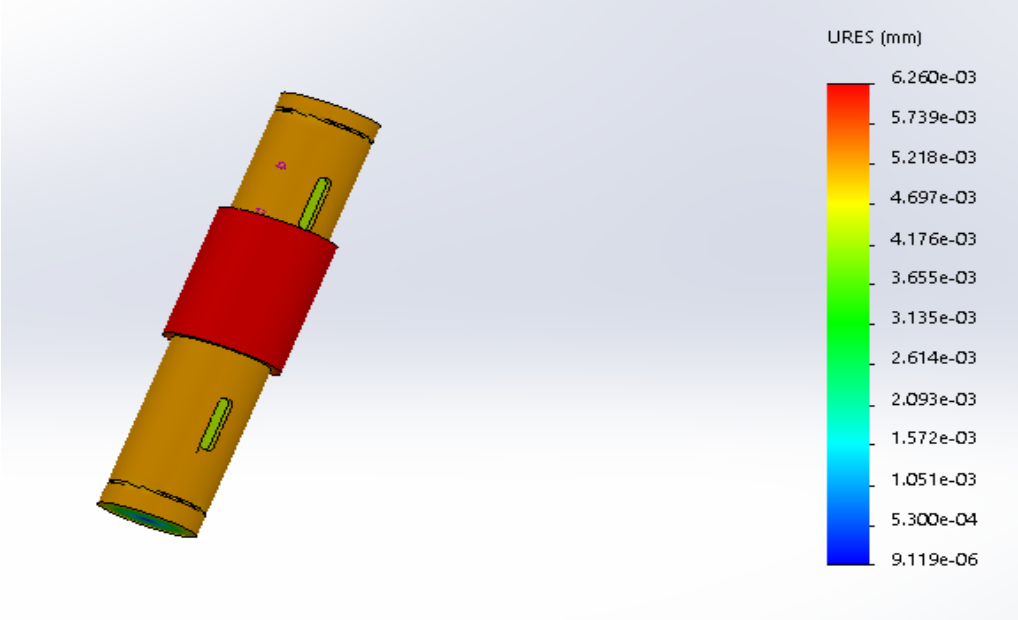


Figure 4-10: Déplacement total cas flexion.

• Contrainte :

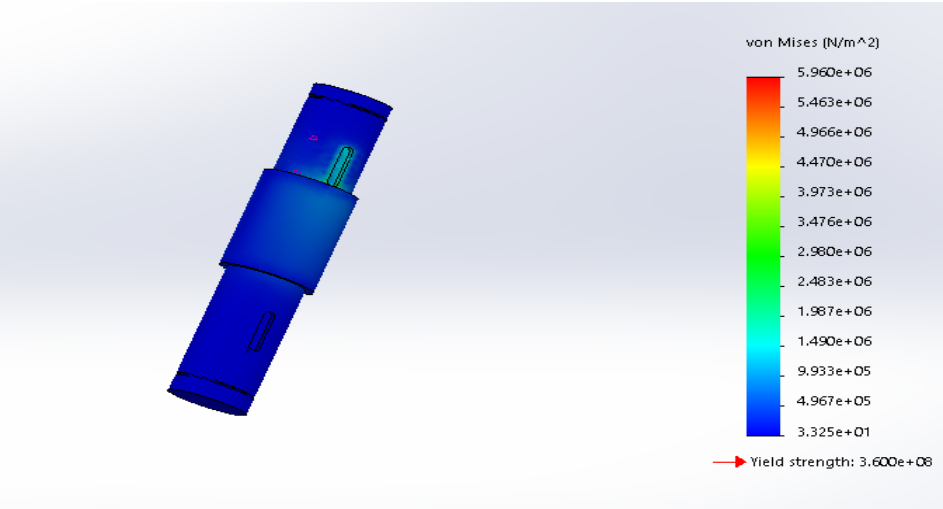


Figure 4-11: Contrainte équivalente (von-Mises) cas compression.

- Déformation :

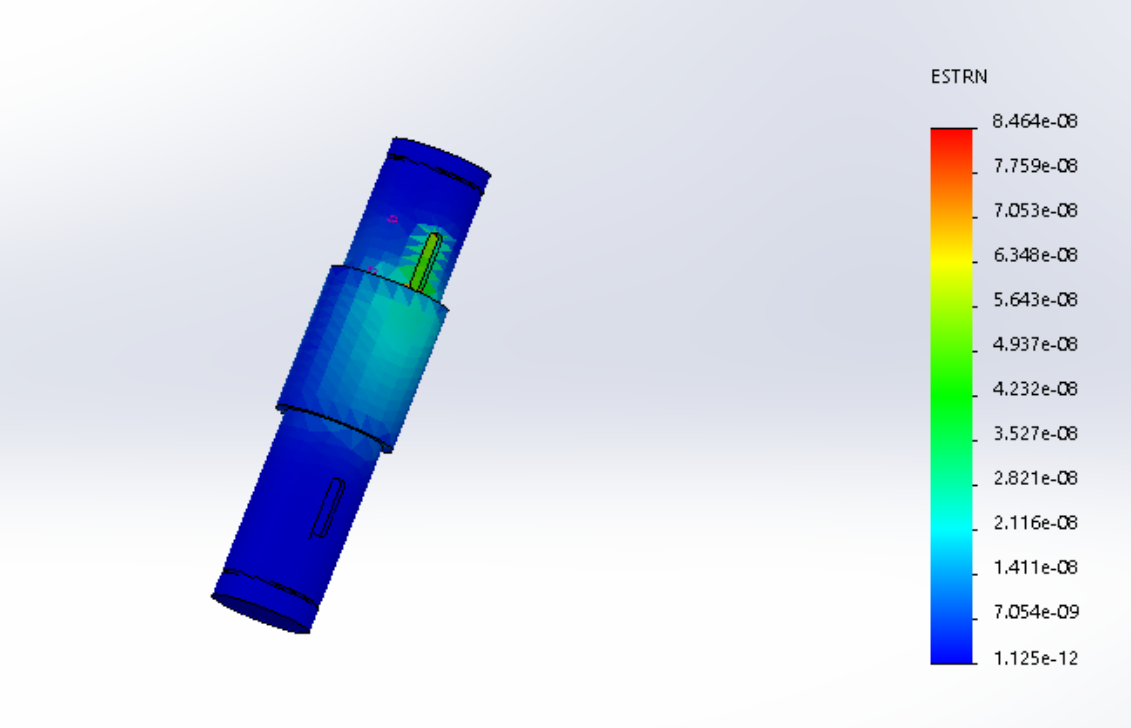


Figure 4-12 : Déformation élastique équivalente cas flexion.

À la lumière des résultats extraits des simulations dans SolidWorks, nous avons obtenu les résultats suivants :

- Le déplacement total a atteint 6,260e-3 micromètres comme limite supérieure.
- La résistance de l'arbre est de 4,443 en cas de torsion et de 1,306e14 en cas de flexion.

En conséquence, l'arbre n'a pas subi de déformations importantes. Par conséquent, nous pouvons dire que l'arbre est apte à être utilisé.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Au terme de ce mémoire, nous avons exploré en profondeur les aspects théoriques et pratiques liés à l'étude, la conception et le dimensionnement d'un broyeur planétaire destiné au broyage mécanique à haute énergie. Nos recherches ont mis en évidence l'importance de ce type de broyeur dans diverses applications, notamment dans les domaines de la recherche scientifique, de la métallurgie, de la pharmacie et de la chimie.

Nous avons commencé par une analyse détaillée des matériaux nanostructurés, en soulignant leurs propriétés uniques et leurs applications potentielles. Cette analyse a été essentielle pour comprendre les exigences spécifiques des matériaux à broyer et les défis associés à leur traitement.

La conception du broyeur planétaire a été réalisée en utilisant le logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) SOLIDWORKS. Nous avons dimensionné et conçu chaque composant du broyeur, en tenant compte des contraintes mécaniques et des performances souhaitées. Les simulations numériques ont été utilisées pour tester et valider l'efficacité du design, garantissant ainsi la fonctionnalité et la fiabilité de la machine.

Ce projet a également permis de démontrer la viabilité de la mécanosynthèse comme méthode efficace pour la fabrication de matériaux avancés à l'échelle nanométrique. La mécanosynthèse offre de nouvelles opportunités pour créer des matériaux aux propriétés améliorées, ouvrant la voie à des innovations dans divers secteurs industriels.

Enfin, cette étude servira de base pour une éventuelle réalisation future de ce broyeur dans les ateliers de notre université. Cette réalisation permettra une utilisation interne pour les besoins de recherche et d'expérimentation, contribuant ainsi à l'avancement des connaissances et des technologies dans le domaine du broyage mécanique.

En conclusion, ce mémoire a non seulement atteint ses objectifs techniques, mais il a également ouvert de nouvelles perspectives pour l'utilisation des broyeurs planétaires dans la recherche scientifique et industrielle. Nous espérons que ce travail

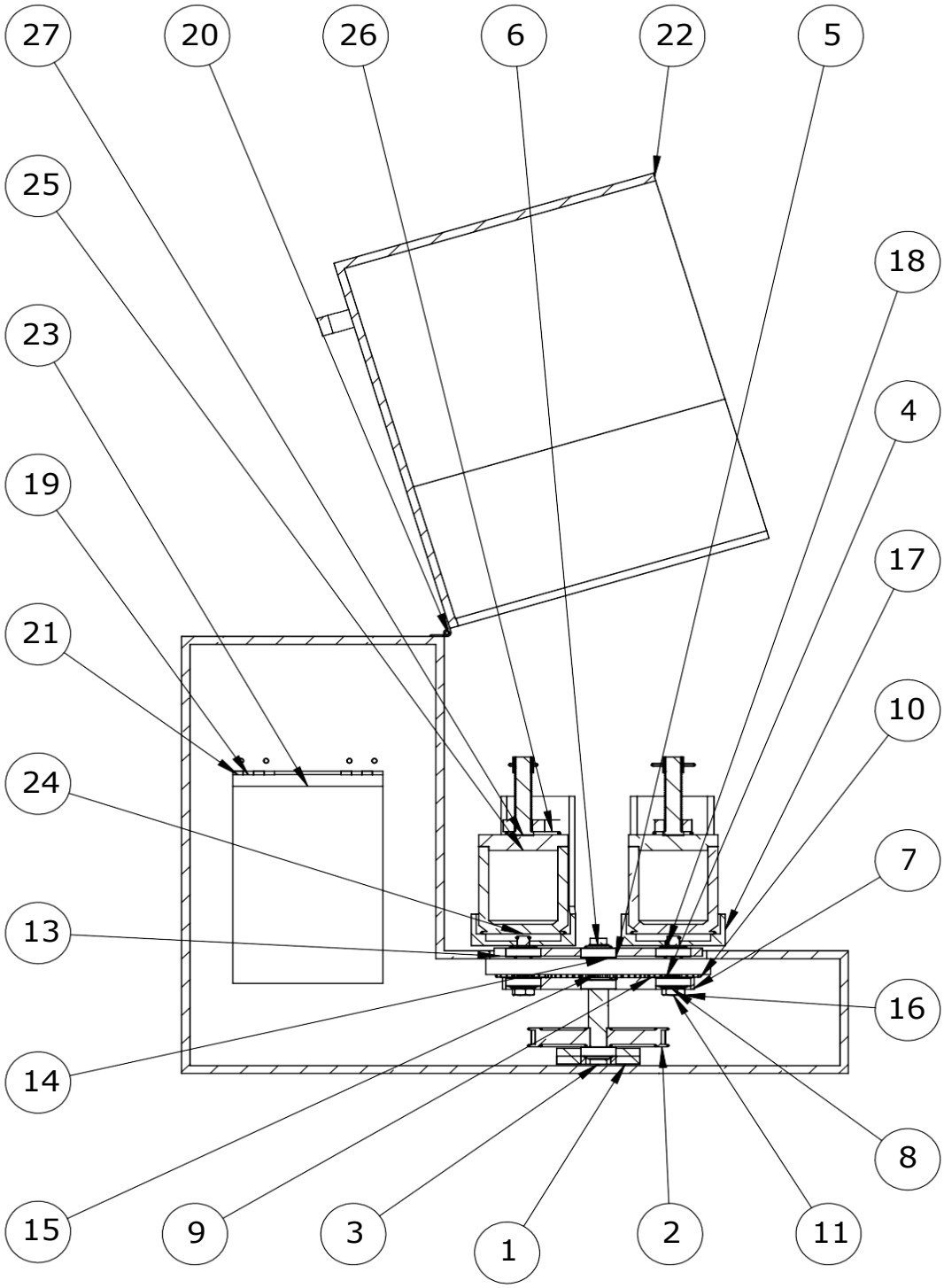
pourra servir de référence pour de futurs projets et contribuer à l'innovation dans ce domaine.

Références bibliographiques.

1. Bleeker, E.A.J., et al., *Interpretation and implications of the European Commission Recommendation on the definition of nanomaterial*2012. 43.
2. Vaezi, M., *Nanomachines Based on Carbon Nanotubes*, 2024.
3. Pabbati, R., K. Reddy, and S. Firdoz, *Applications of Nanomaterials in Biomedical Engineering*, 2021. p. 51-86.
4. Granerød, G., *Dimensions of Yahwism in the Persian Period*

3. *The Material Dimension*, in *Studies in the Religion and Society of the Judaean Community at Elephantine*2016, De Gruyter. p. 81-127.
5. Grafoute, M., *Etude des propriétés structurales et modélisations de poudres nanostructurées de fer obtenues par broyage mécanique*, 2004. p. 138 p.
6. http://www.lpwtechnology.com/fr/technical-library/powder-production/.
7. Ahire, S., et al., *The Augmentation of nanotechnology era: A concise review on fundamental concepts of nanotechnology and applications in material science and technology.* Results in Chemistry, 2022: p. 100633.
8. Marter, I., *Méthode d'interface immergée pour la simulation directe de l'atomisation primaire*, 2017.
9. Kumar, A., et al., *Effect of TiC reinforcement on mechanical and wear properties of AZ91 matrix composites.* International Journal of Metalcasting, 2022. **16**(4): p. 2128-2143.
10. BERRAHAL, Z., *Etude et conception d'un broyeur planétaire*, 2023, ENP.
11. Chamayou, A. and J. Fages, *Broyage dans les industries agroalimentaires*, 2003. p. 375-406.
12. Gaffet, E., *MECHANICAL PROCESSING OF POWDER METALLURGY : NANOMATERIALS SYNTHESIS*2009.
13. Shveikin, G., *Nanomaterials, Nanostructures, and Nanotechnologies, by A. I. Gusev, Moscow: Fizmatlit, 2005.* Inorganic Materials - INORG MATER-ENGL TR, 2006. **42**: p. 696-697.
14. *Usures et Concassage par pression* Available from: https://www.steeltechservices.be/file/si646614/Usures%20et%20Concassage%20par%20pression-fi35270169.pdf.
15. Hadef, F. and A. Otmani, *Mechanical Alloying/Milling*, 2015. p. 263-276.
16. Hanke, T., *Mechanical alloying.* Materials World, 2015.
17. Viart, N., *Méthodes d'élaboration de Matériaux*, 2014.
18. Jaramillo Suárez, H., et al., *DESIGN OF A BALL MILL TYPE ATTRITOR FOR THE PRODUCTION OF MECHANICAL ALLOY*2005.
19. Suryanarayana, C., *Mechanical alloying and milling.* Progress in Materials Science, 2001. **46**(1): p. 1-184.
20. Sabrina, L., *Propriétés structurales et spectroscopie Mossbauer des nanomatériaux , élaboré par mecanosythèse*, in *département de mécanique*2011, Boumerdes
21. Chevalier, A., *Guide du dessinateur inustriel*2004.

Annexes



UNVERSTE Dr YAHYA FARES MEDEA		
	broyeur planétaire	Ech: 1:8
	AFFROUN WAIL NADJIB	

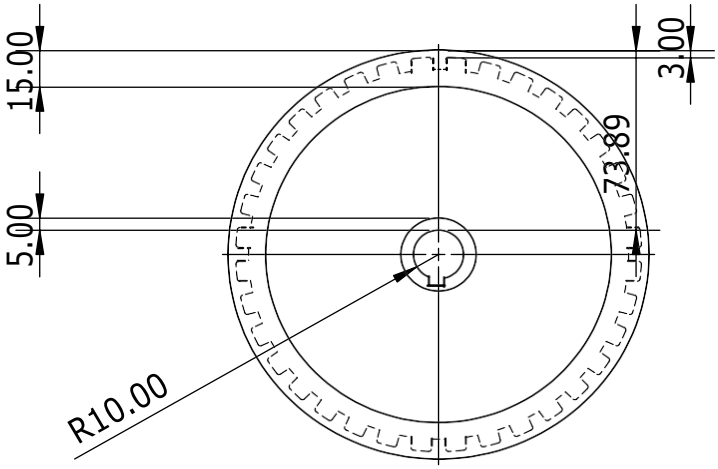
N	PART NUMBER	DESCRIPTION et materiau	REMARQUE	QTY.
1	la cage		usine	1
2	La Poulie		achat	1
3	arbre 1	C10	usine	1
4	un clavet	BS 4235-1 - Square Form A - 3×3 x 21	achat	4
5	Roulements à rouleaux coniques	DIN 720 - 32004X - Full,DE,AC,Full	achat	3
6	Circlip DIN	Circlip DIN 472 - 22 x 2	achat	2
7	Porte satellite		usine	1
8	Roulements à rouleaux coniques	DIN 720 - 30302 - Full,DE,AC,Full	achat	4
9	Planétaire	DIN - Spur gear 3M 40T 20PA 20FW --- S40A75H50L20S2	usine	1
10	Satillite	DIN - Spur gear 3M 20T 20PA 20FW --- S20A75H50L15S2	usine	2
11	Arbre 2	C10	usine	2
12	un clavet	BS 3673-4 - B017M	achat	2
13	le plato		usine	1
14	un bage		achat	1
15	Couronne	DIN - Internal spur gear 3M 80T 20PA 20FW ---S80S270OD 1AF	usine	1
16	ecrou	Hexagon Nut ISO 8675 - M16 x 1.5 - S	achat	2
17	port jarre		usine	2
18	un clavet	BS 4235-1 - Square Form A - 3×3 x 7	achat	2
19	charniere de couvre		achat	4
20	charniere de couvre		achat	4
21	charniere de couvre		achat	4
22	couvre 1		achat	1
23	couvre 2		achat	1
24	la jarre		usine	2
25	couvre de la jarre		usine	2
26	plaque de montage		usine	2
27	vis de pression		usine	2

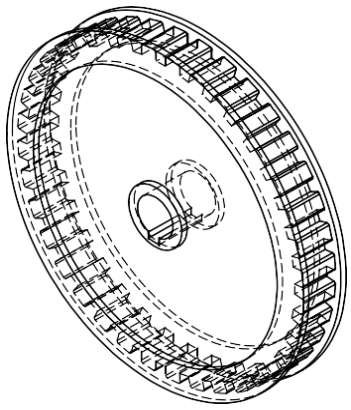
UNVERSTE Dr YAHYA FARES MEDEA

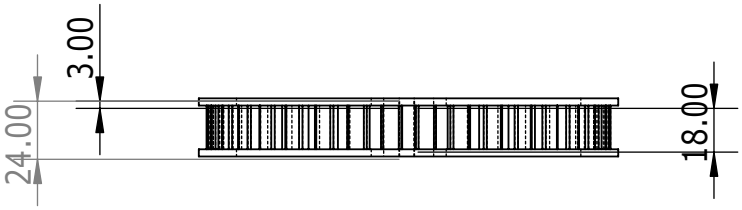
broyeur planétaire

Ech: 1:10

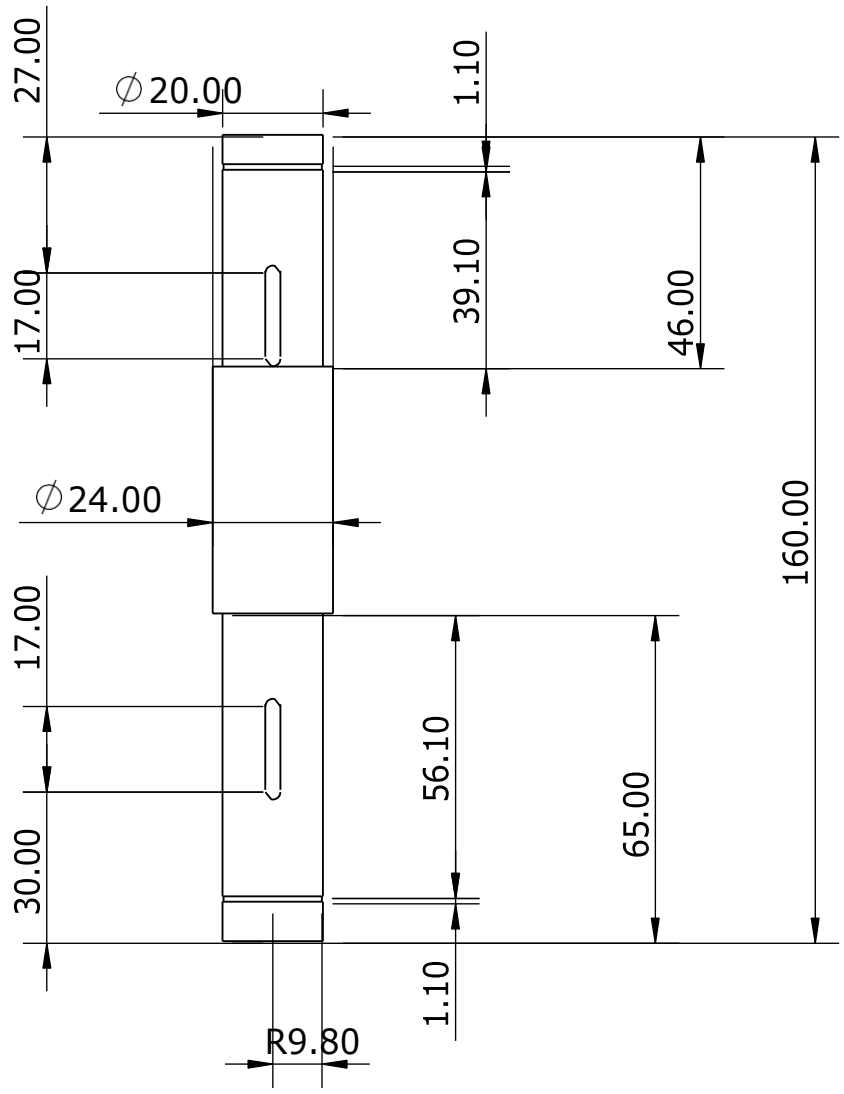
AFFROUN WAIL NADJIB

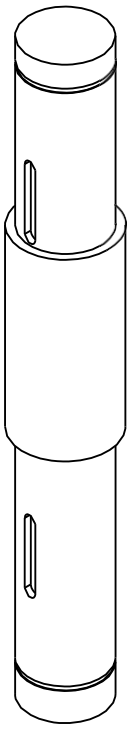


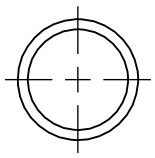




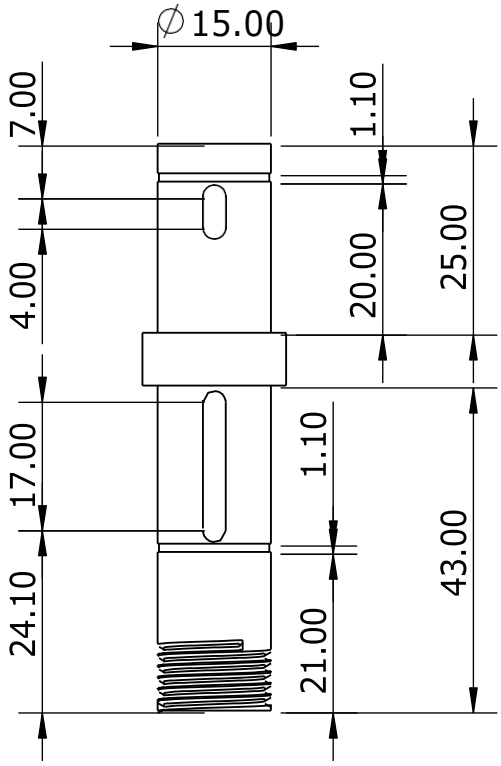
UNVERSTE Dr YAHYA FARES MEDEA		
	La Poulie Réceptrice	**N**:**2**
		Ech: 1:3
	AFFROUN WAIL NADJIB	

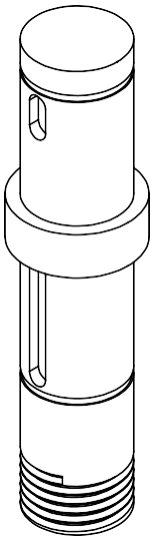


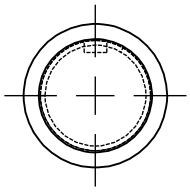




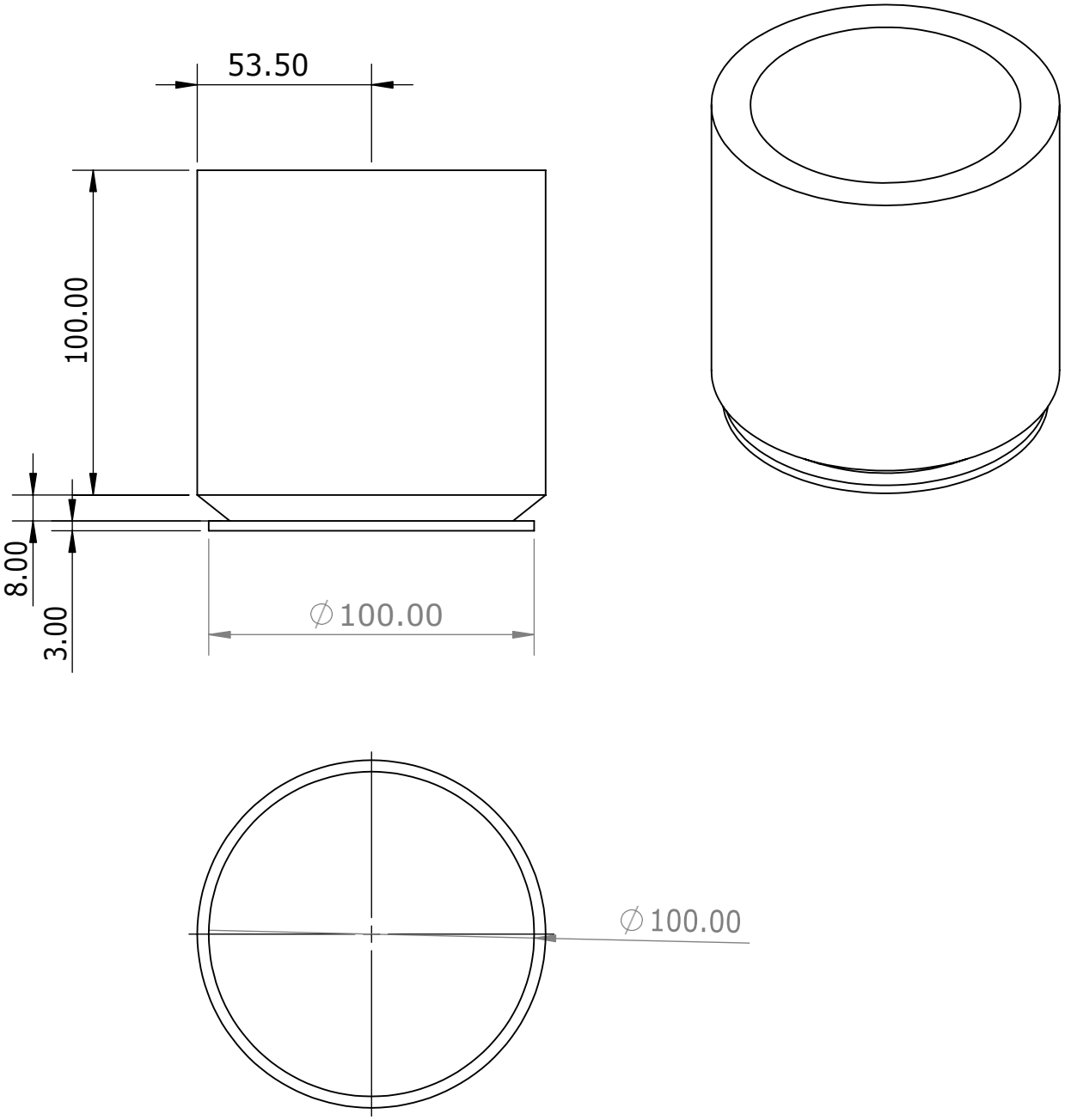
UNVERSTE Dr YAHYA FARES MEDEA		
	ARBRE DE PINOIN Planétaire	N:3
		Ech: 1:1.5
	AFFROUN WAIL NADJIB	



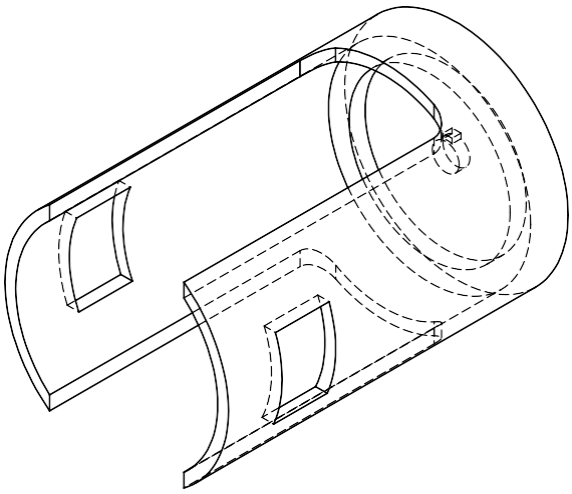


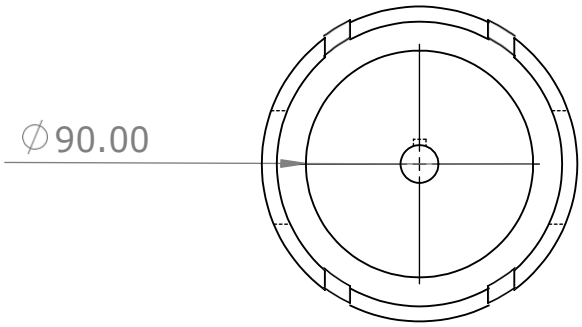


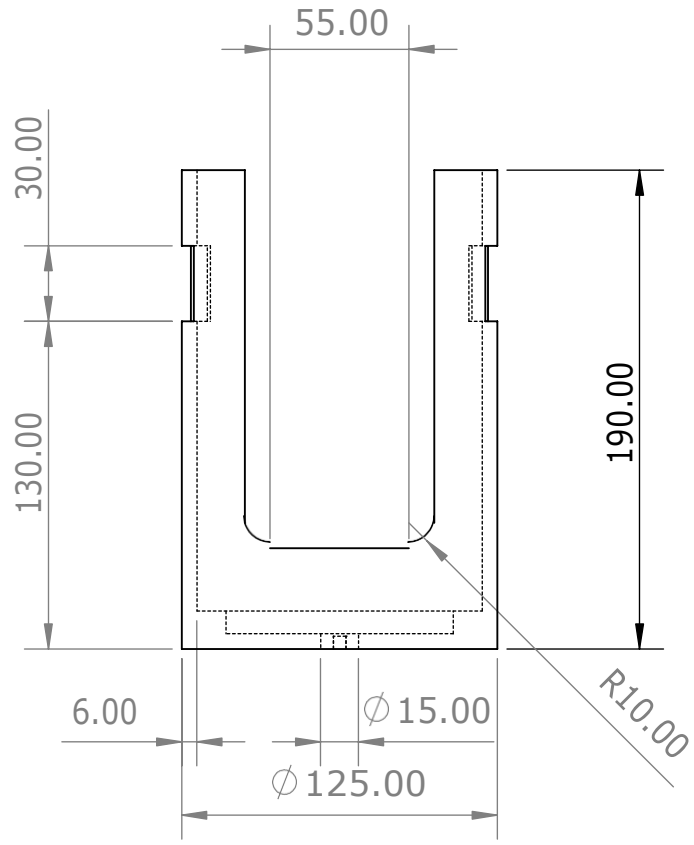
UNVERSTE Dr YAHYA FARES MEDEA		
	AREBRE DE PINION SATILITES	N:11
		Ech: 1:1
	AFFROUN WAIL NADJIB	



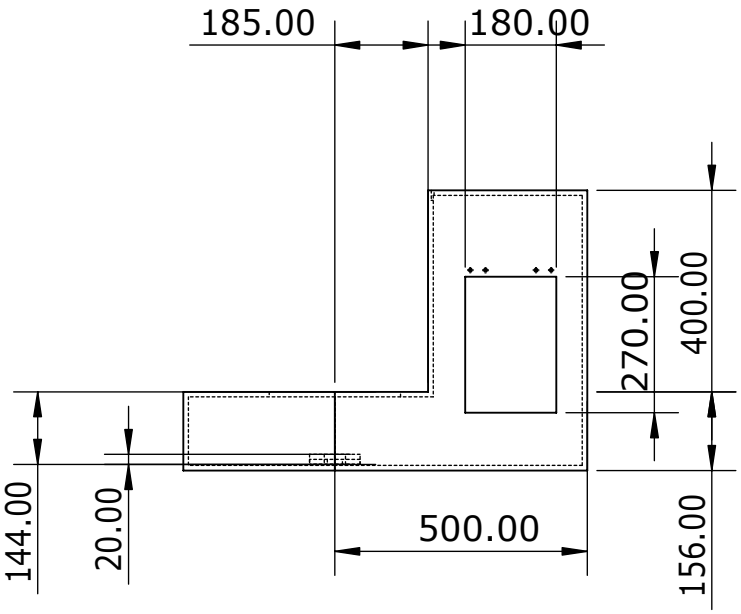
UNVERSTE Dr YAHYA FARES MEDEA		
	La Jarre	N:24
		Ech: 1:2
	AFFROUN WAIL NADJIB	

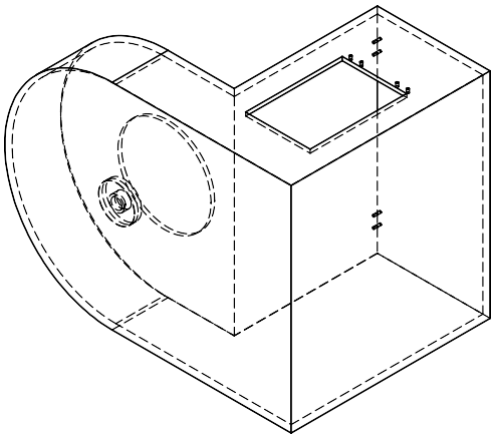


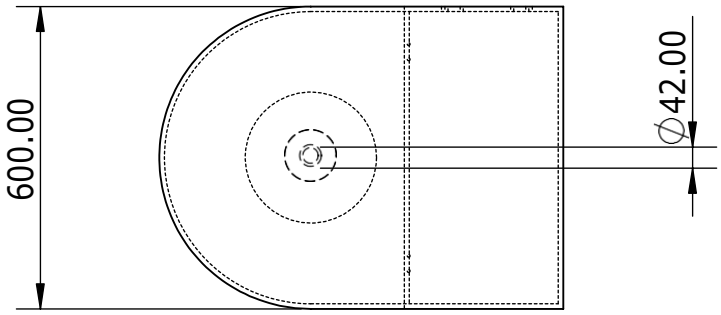


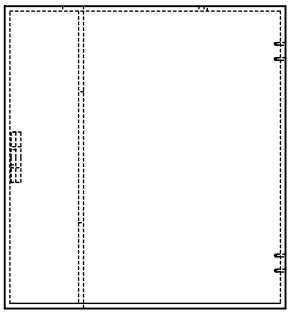


UNVERSTE Dr YAHYA FARES MEDEA		
	Support Des Jarres	N:17
		Ech: 1:3
	AFFROUN WAIL NADJIB	

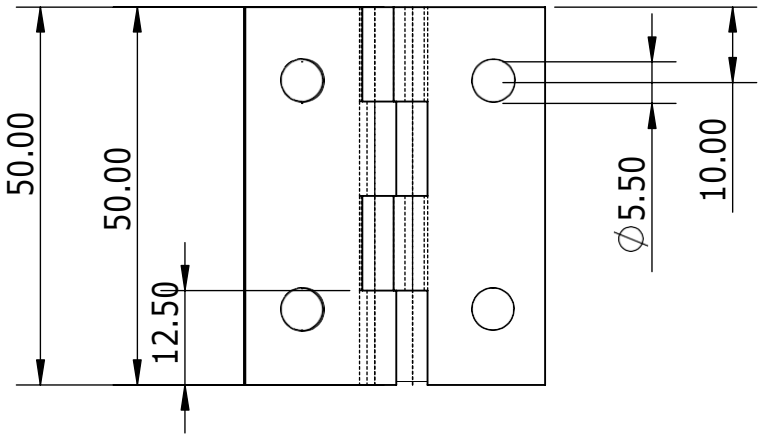


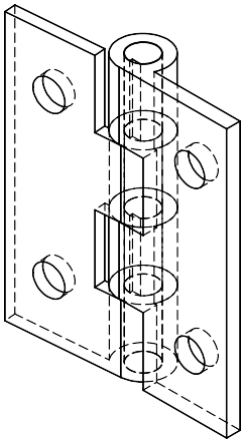


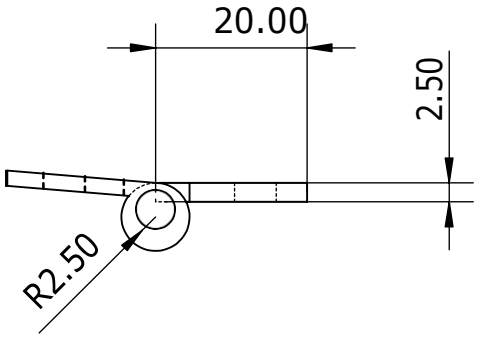




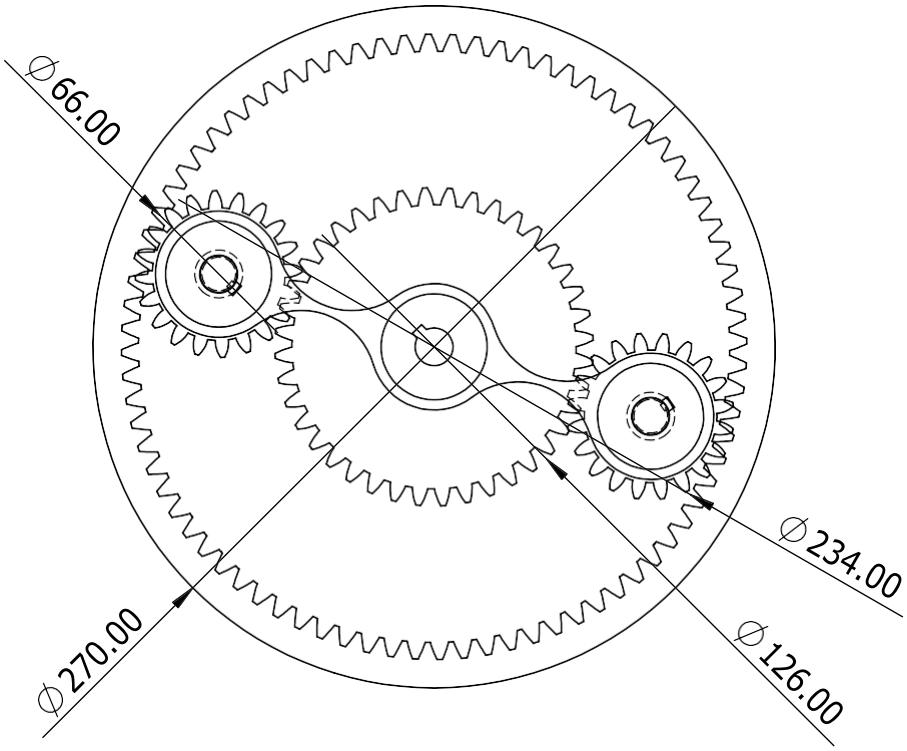
UNVERSTE Dr YAHYA FARES MEDEA		
	Corp principal du carter	N:1
		Ech: 1:15
	AFFROUN WAIL NADJIB	

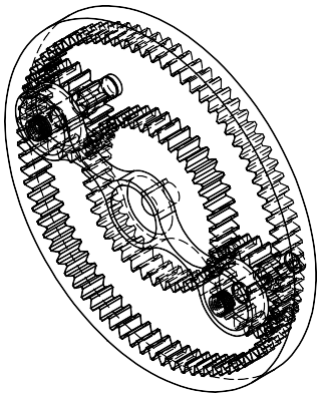


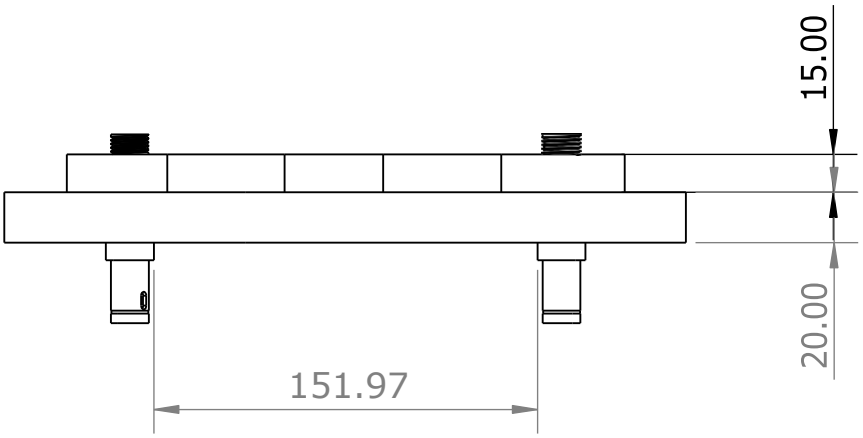




UNVERSTE Dr YAHYA FARES MEDEA		
	Charnière	**N: 20**
		Ech: 1:1
	AFFROUN WAIL NADJIB	





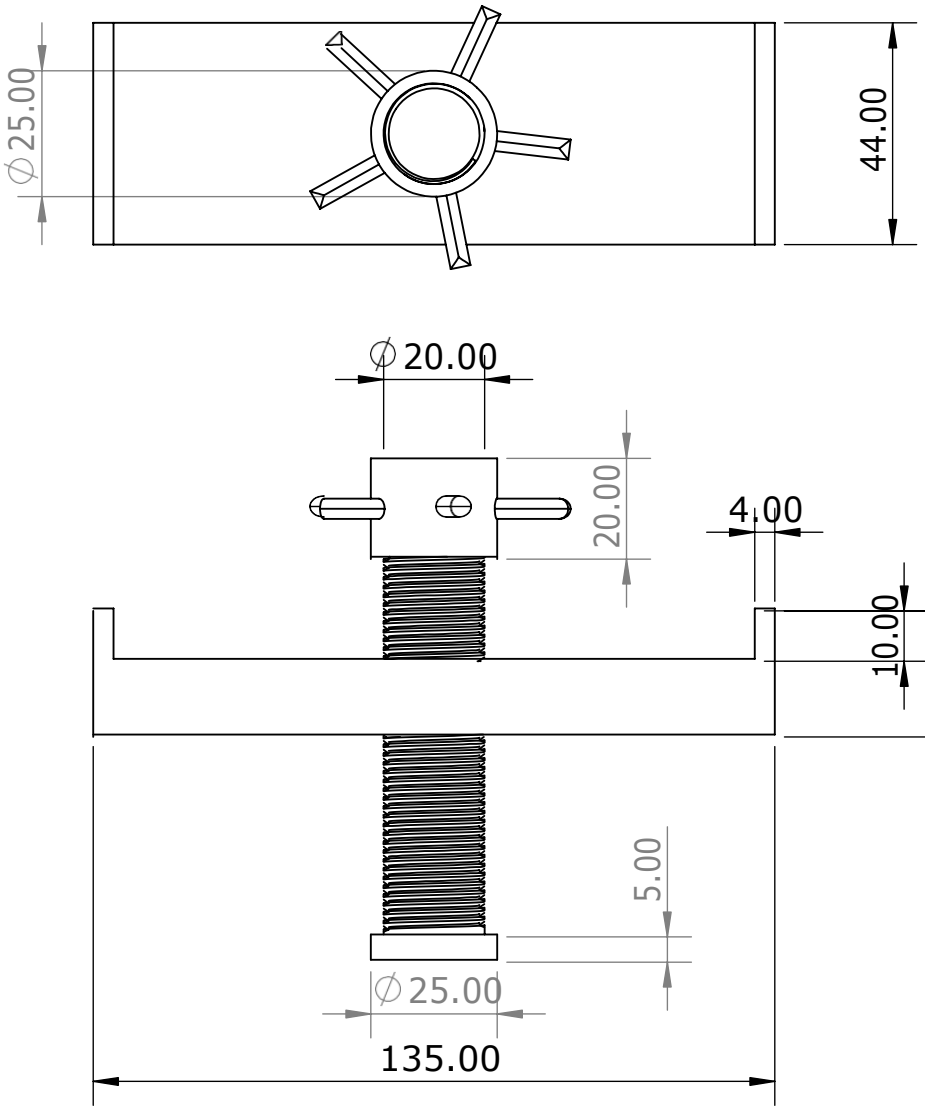


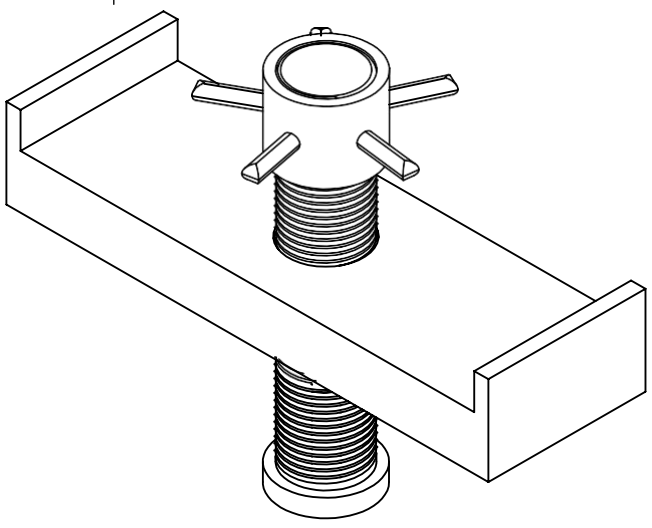
UNVERSTE Dr YAHYA FARES MEDEA

Engrenages AN planétaire

Ech: 1:3

AFFROUN WAIL NADJIB



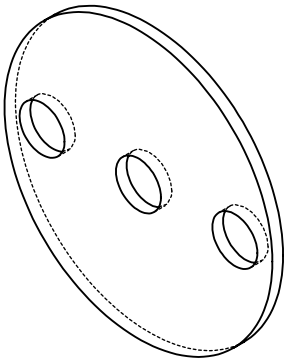


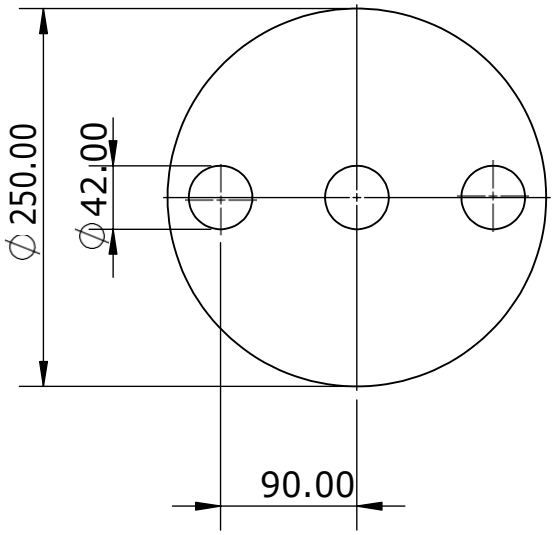
UNVERSTE Dr YAHYA FARES MEDEA

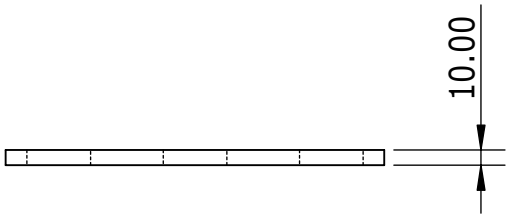
POIGNEE DU COUVERCL

Ech: 1:1.5

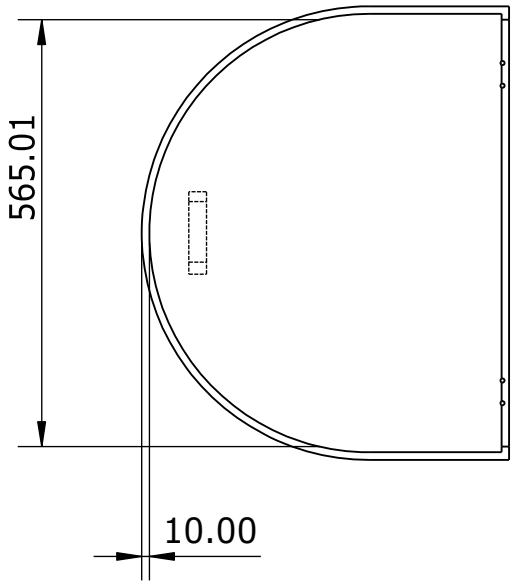
AFFROUN WAIL NADJIB

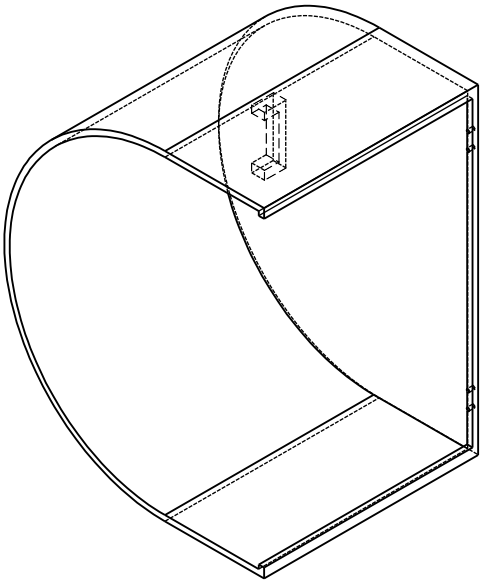


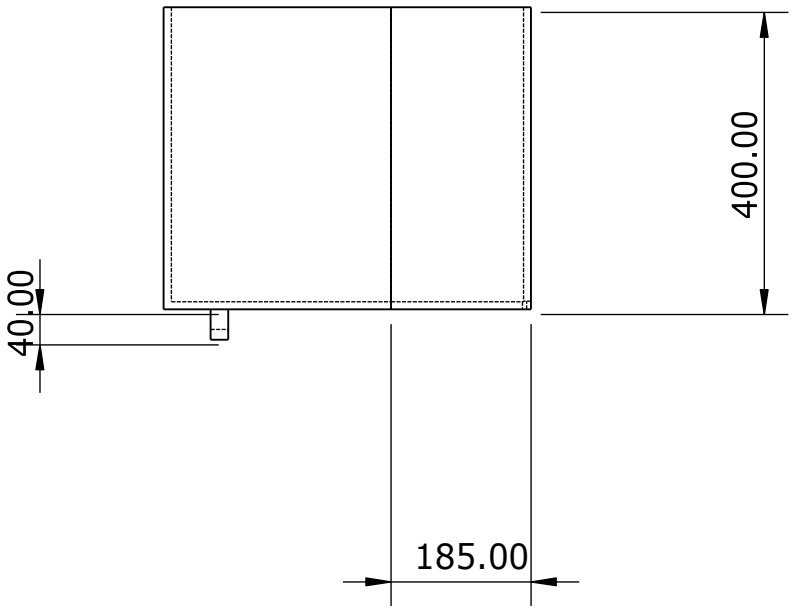




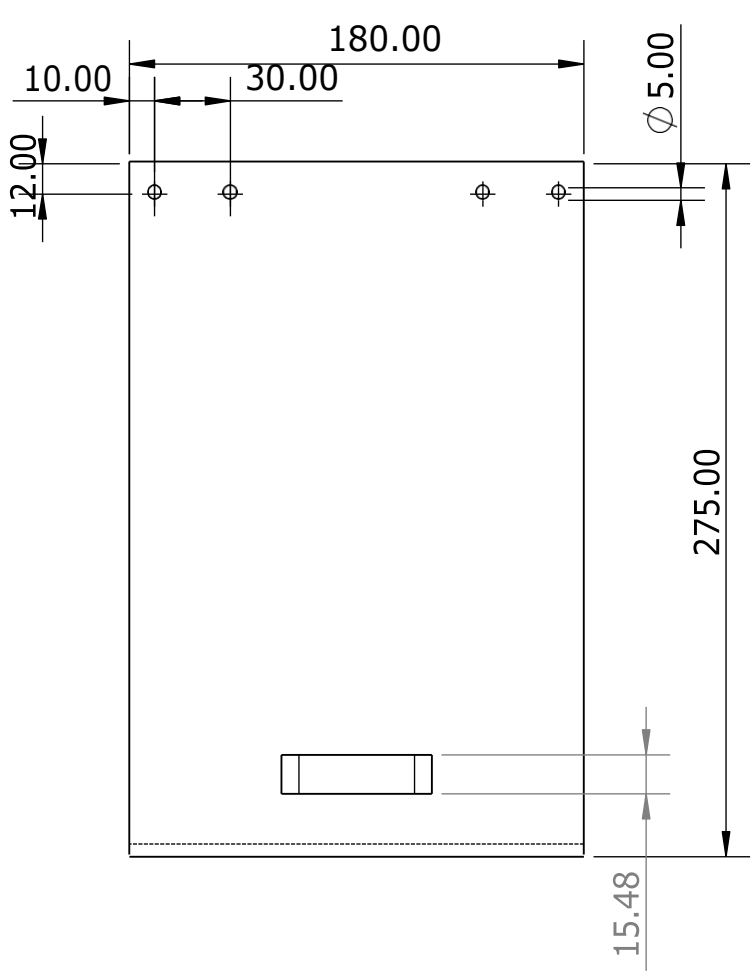
UNVERSTE Dr YAHYA FARES MEDEA		
	broyeur planétaire	N:13
		Ech: 1:5
	AFFROUN WAIL NADJIB	

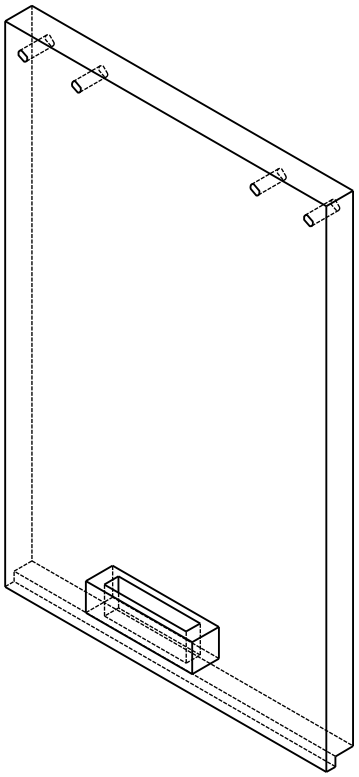


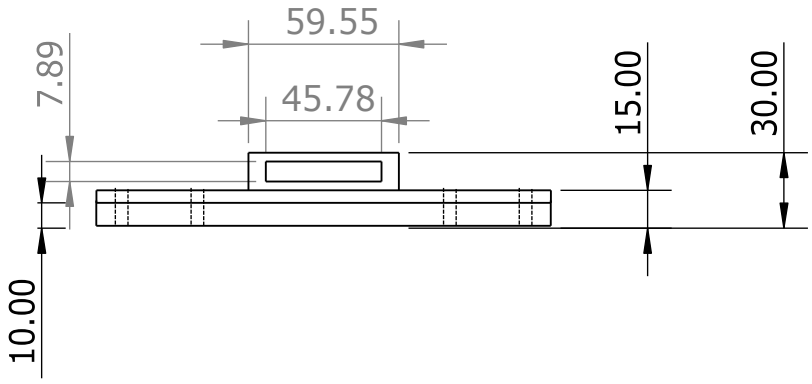




UNVERSTE Dr YAHYA FARES MEDEA		
	Couvercle du Carter	N:22
		Ech: 1:10
	AFFROUN WAIL NADJIB	







UNVERSTE Dr YAHYA FARES MEDEA		
	Fond du Carter	N:32
		Ech: 1:3
	AFFROUN WAIL NADJIB	