

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche**  
**Scientifique**

**École Nationale Polytechnique d'Alger**



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Mécanique

Mémoire de Projet de Fin d'Études

En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Génie mécanique

---

## Etude et conception d'un broyeur planétaire

---

**Présenté par :**

- Zineddine BERRAHAL

**soutenu le :**

04/07/2023

**Devant le jury :**

<b>Président</b>	M. Djamel SAIDI	MC-B	/	ENP
<b>Promoteur</b>	M. Mohamed El Mahdi ZEBAR	MC-B	/	ENP
<b>Examineur</b>	M. Hamid SEDJAL	MA-A	/	ENP

**ENP 2023**



**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche**  
**Scientifique**

**École Nationale Polytechnique d'Alger**



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Mécanique

Mémoire de Projet de Fin d'Études

En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Génie Mécanique

---

**Etude et conception d'un broyeur planétaire**

---

**Présenté par :**

- Zineddine BERRAHAL

**soutenu le :**

-04/07/2023

**Devant le jury :**

<b>Président</b>	M. Djamel SAIDI	MC-B	/	ENP
<b>Promoteur</b>	M. Mohamed El Mahdi ZEBAR	MC-B	/	ENP
<b>Examineur</b>	M. Hamid SEDJAL	MA-A	/	ENP

**ENP 2023**

## ملخص

تركز هذه الأطروحة على تصميم كسارة كوكبية للتخليق الميكانيكي والطحن الميكانيكي، باستخدام برنامج التصميم بمساعدة الكمبيوتر.

الكسارة الكوكبية هي أداة أساسية لتقليل حجم المواد في مختلف مجالات الاستخدام، مثل البحث. يعمل عن طريق وضع مواد طحن في جرار مع كرات طحن.

تتكون الدراسة التي أجريت من مقاس كامل لجميع أجزاء الكسارة، بناءً على الكسارات الموجودة. الهدف هو تصميم كسارة كوكبية فعالة ووظيفية من خلال تكييف ممارسات التصميم الجيدة المثبتة بالفعل.

**الكلمات المفتاحية:** التمثيل الميكانيكي، الحجم، آلية الكواكب، صوليد ووركس

## Abstract:

This thesis focuses on the design of a planetary mill for mechanochemical synthesis and mechanical milling, using the computer-aided design (CAD) software SOLIDWORKS. The planetary mill is a crucial tool for reducing the size of materials in various fields, such as research. It operates by placing the materials to be milled in jars with grinding balls.

The study conducted involves a comprehensive dimensioning of all components of the mill, drawing inspiration from existing mills. The objective is to design an efficient and functional planetary mill by adapting proven design best practices.

The aim of this work is to achieve a reliable and high-performing planetary mill specifically tailored for mechanochemical synthesis and mechanical milling, meeting the specific requirements of these applications.

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

## Résumé :

Ce mémoire se concentre sur la conception d'un broyeur planétaire destiné à la mécanosynthèse et au broyage mécanique, en utilisant le logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) SOLIDWORKS.

Le broyeur planétaire est un outil essentiel pour réduire la taille des matériaux dans divers domaines d'utilisation, tels que la recherche. Il fonctionne en plaçant les matériaux à broyer dans des jarres avec des billes de broyage.

L'étude réalisée consiste en un dimensionnement complet de tous les organes du broyeur, en s'inspirant de broyeurs existants. L'objectif est de concevoir un broyeur planétaire efficace et fonctionnel en adaptant les bonnes pratiques de conception déjà éprouvées.

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

# *Dédicace*

*Je tiens à dédier ce mémoire de fin d'études à :*

## **Mes parents**

Dont le soutien indéfectible et les encouragements constants ont été essentiels tout au long de mon parcours académique. Leur amour inconditionnel et leurs sacrifices ont été une source d'inspiration et de motivation pour atteindre mes objectifs.

## **Ma famille**

Leur soutien inconditionnel et leur fierté indéfectible. Leurs présences constantes m'ont donné la force nécessaire pour surmonter les obstacles.

## **Ma copine**

Qui a été mon pilier pendant cette période intense d'études. Son soutien et sa compréhension ont été une source de réconfort et de motivation lorsque j'en avais le plus besoin. Son encouragement constant m'a permis de persévérer et d'accomplir ce travail avec succès.

## **Mes amis**

Tous mes amis, en particulier au groupe Getz, qui ont été mes compagnons de route tout au long de cette aventure. Leurs encouragements, leur soutien et leurs moments de détente ont été indispensables pour garder un équilibre entre mes études et ma vie sociale

**ZINEDDINE**

# *Remerciement*

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire de master et qui m'ont soutenu tout au long de ce parcours académique.

Tout d'abord, je souhaite remercier mon encadrant, Monsieur **Mohammed El Mahdi ZEBAR**, pour son soutien, sa patience, sa disponibilité et son encouragement ont été essentiels pour m'aider à surmonter les défis rencontrés au cours de cette recherche.

Je tiens également à remercier les membres du jury pour leur temps, leur attention et leurs commentaires constructifs qui ont permis d'améliorer la qualité de mon travail.

Mes sincères remerciements vont à mes professeurs et à l'ensemble du personnel de l'école pour leur enseignement et leur soutien tout au long de mes études.

Je suis profondément reconnaissant envers Mme **MAHFOUD Mouna** pour son aide remarquable ses précieux conseils, son expertise et sa disponibilité, ainsi que ma collègue **BELHASSANI Lamia** pour ses conseils précieux.

Enfin, j'exprime ma gratitude envers ma famille, mes amis et mes collègues pour leur soutien, leur compréhension et leur encouragement durant mon parcours académique. Les moments partagés avec eux ont été essentiels pour maintenir ma motivation et mon énergie. Leur amitié, leur aide et leur soutien ont été précieux pour ma réussite.

Ce mémoire est dédié à toutes ces personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à sa réalisation et à mon épanouissement personnel et académique.

## Liste des tableaux

<b>N°</b>	<b>Intitulé</b>	<b>Page</b>
<b>2-1</b>	Caractéristique des différents des types de broyeurs	<b>40</b>
<b>3-1</b>	Schéma cinématique du broyeur planétaire	<b>47</b>
<b>3-2</b>	Caractéristique du moteur	<b>48</b>
<b>3-3</b>	Valeurs du coefficient de service ks	<b>50</b>
<b>3-4</b>	Dimensions principales courroies crantée (NF ISO 5294 et 5296)	<b>53</b>
<b>3-5</b>	Coefficient correcteur $K_b$ et largeur b en fonction de type de courroie	<b>55</b>
<b>3-6</b>	Récapitulatif des paramètres de conception	<b>57</b>
<b>3-7</b>	Nombre de dents de la roue planétaire en fonction de la couronne.	<b>60</b>
<b>3-8</b>	Caractéristique d'un engrenage droit	<b>63</b>
<b>3-9</b>	Dimensions principales pour quelques variantes de jarres.	<b>63</b>
<b>3-10</b>	Les propriétés physiques du matériau choisi	<b>64</b>
<b>3-11</b>	Volumes et poids des jarres	<b>64</b>
<b>3-12</b>	Caractéristiques du roulement choisi	<b>76</b>
<b>3-13</b>	Les propriétés physiques du matériau choisi	<b>79</b>

## Liste des figures

N°	Intitulé	Page
1-1	L'arrangement de matériaux nanostructures à deux dimensions	16
1-2	Classification des nanostructures selon leur dimensionnalité	17
1-3	Schéma d'un atomiseur à l'eau	18
1-4	Atomisation par gaz	19
1-5	Principe d'électrolyse	21
2-1	Phénomène de fragmentation lors du broyage.	30
2-2	Différentes étapes d'agglomération au cours du broyage	30
2-3	Principe du broyage mécanique : formation d'agrégats par chocs mécaniques	31
2-4	Contrainte = $f(\text{déformation})$ .	32
2-5	Mode de fragmentation	33
2-6	Echelle de dureté de Mohs	34
2-7	Broyeur attriteur	37
2-8	Broyeur vibrant 1D	38
2-9	Broyeur vibrant 3D	28
2-10	Schéma général d'un broyeur planétaire et description du mouvement des billes et des particules	39
3-1	Schéma cinématique d'engrenages	43
3-2	Train épicycloïdal simple	43
3-3	Schéma cinématique (roue planétaire bloqué)	44
3-4	Schéma cinématique (PS bloqué)	45
3-5	Schéma cinématique (couronne bloquée)	45
3-6	Schéma cinématique transmission poulie-corroie	46
3-7	Schéma cinématique broyeur planétaire	47
3-8	Schéma poulie-corroie cranté	49
3-9	Gamme puissances transmissibles des courroies crantées.	51
3-10	Nombre des dents des poulie	52
3-11	Puissance de base des courroies crantées.	54
3-12	Représentation des efforts appliqués sur l'arbre	66
3-13	Valeurs du coefficient de sécurité $s$	67
3-14	Composants d'un roulement à billes	72
3-15	Roulements rigides à billes	73
3-16	Roulements à billes à contact oblique	74
3-17	Roulements à rotules sur billes et sur rouleaux sphériques	74
3-18	Roulements à rouleaux cylindriques et à rouleaux coniques	75
3-19	Roulements à aiguilles à épaulement avec ou sans bague intérieure	76



<b>4-1</b>	Carter du broyeur	<b>82</b>
<b>4-2</b>	Poulie crantée	<b>83</b>
<b>4-3</b>	Train épicycloïdal	<b>83</b>
<b>4-4</b>	Bol de broyage	<b>84</b>
<b>4-5</b>	Broyeur planétaire	<b>84</b>
<b>4-6</b>	Déplacement total cas torsion	<b>86</b>
<b>4-7</b>	Contrainte équivalente (von-Mises)	<b>87</b>
<b>4-8</b>	Déformation élastique équivalente cas torsion	<b>87</b>
<b>4-9</b>	Déplacement total cas flexion	<b>88</b>
<b>4-10</b>	Contrainte équivalente (von-Mises) cas flexion	<b>88</b>
<b>4-11</b>	Déformation élastique équivalente cas flexion	<b>89</b>
<b>4-12</b>	Déplacement total cas compression	<b>89</b>
<b>4-13</b>	Contrainte équivalente (von-Mises) cas compression	<b>90</b>
<b>4-14</b>	Déformation élastique équivalente cas flexion	<b>90</b>

# Sommaire :

Liste des tableaux

Liste des figures

Sommaire

Introduction générale ..... 12

## Chapitre01 : Généralités sur les matériaux nanostructurés

Introduction.....	15
1. Nanomatériaux .....	15
2. Classification.....	16
3. Technique d'elaboration des nanomateriaux .....	17
3.1 La voie physique.....	17
3.1.1 L'Atomisation .....	18
3.1.2 L'Atomisation par l'eau.....	18
3.1.3 L'Atomisation par gaz.....	19
3.1.4 Méthode électrolytique .....	19
3.1.5 Le procédé d'hydrogène dissous .....	20
3.2 La voie chimique .....	20
3.2.1 Electrolyse .....	21
3.2.2 Décomposition thermique.....	21
3.3 Les procédés mécaniques .....	22
3.3.1 Le procédé Marco-Mesh.....	22
3.3.2 Le procédé cold stream .....	22
3.3.3 La voie mécanique .....	22
3.3.4 Le broyage mécanique et la mécano-synthèse.....	23
4 L'application des matériaux nanostructures :.....	24
Conclusion.....	26

## Chapitre 02 : Caractéristiques et fonctionnement des broyeurs

1. Principe du broyage mécanique .....	28
1.1 Le champ de contraintes .....	28
1.2 Energie.....	28
1.3 Vitesse de déformation .....	28
1.3.1 Réduction des dimensions du matériau .....	28
1.3.1 Les types de fragmentations.....	29
2. Les paramètres impliquent dans le broyage mécaniques.....	29
2.1. Les paramètres contrôlables.....	29
2.2. Les paramètres difficilement contrôlables.....	29
3. Phénomène de fragmentation lors du broyage .....	29
4. Mécanismes de formation.....	31
4.1. Stade primaire :.....	31
4.2. Stade intermédiaire :.....	31

4.3.	Stade final.....	31
4.4.	Stade complet .....	32
5.	Physique de la fracture .....	32
5.1.	Définition .....	32
5.2.	Point de rupture : .....	32
6.	Modes de fragmentation et types de broyeurs utilisés.....	33
7.	Caractéristiques des matériaux a broyer .....	34
7.1.	La dureté.....	34
7.2.	L'abrasivité.....	34
7.2.	La désintégration .....	35
7.3.	Le clivage .....	35
7.4.	L'adhésivité .....	35
7.5.	La forme.....	35
7.6.	La distribution de taille .....	35
8.	Types de mélanges des matériaux soumis au broyage.....	36
9.	Les broyeurs .....	36
9.1.	Définition.....	36
9.2.	Types des broyeurs .....	36
9.2.1	Broyeur de type attriteur .....	37
9.2.2	Broyeur vibrant.....	37
9.2.3	Broyeur planétaire .....	39
	Conclusion.....	40

## **Chapitre 03 : Dimensionnements**

	Introduction.....	42
1.	Etude cinématique .....	42
1.1.	Représentation schématique.....	42
1.1.1	Engrenage.....	42
1.1.2	Train épicycloïdal simple .....	43
1.1.3	Poulie-courroie .....	46
1.2.	Schéma cinématique du broyeur planétaire.....	47
1.3.	Explication du mécanisme .....	47
2.	Dimensionnement des éléments du broyeur planétaire .....	48
2.1.	Choix du moteur .....	48
2.1.1	Caractéristique du moteur choisi.....	48
2.2.	Choix du système poulie-courroie :.....	49
2.2.1	Puissance effective .....	50
2.2.2	Choix de la section de la courroie .....	51
2.3.	Calcul de la courroie :.....	52

2.3.1	Rapport de réduction .....	52
2.3.2	Nombre des dents .....	52
2.3.3	Diamètres des poulies .....	52
2.3.4	La vitesse linéaire .....	53
2.3.5	Puissance de base de la courroie $P_b$ .....	54
2.3.6	Calcul d'entraxe E.....	55
2.3.7	Fréquence de passage de la courroie .....	56
2.3.8	Angle d'enroulement.....	57
2.4.	Dimensionnement du train épicycloïdal .....	58
2.4.1	Calcul nombre des dents d'engrenage planétaire .....	58
2.4.2	Nombre des dents des roues satellites .....	60
2.4.3	Calcul du module m .....	61
2.4.4	Détermination des diamètres primitifs .....	62
2.4.5	Calcul des éléments de taillage des engrenages .....	62
2.5.	Choix des jarres : .....	63
2.5.1	Dimensions des jarres.....	63
2.5.2	Matériau des jarres.....	64
2.5.3	Volume et poids des jarres .....	64
2.6.	Dimensionnement d'arbre :.....	65
2.6.1	La tension dans la courroie .....	65
2.6.2	Les réactions dans A et B .....	66
2.6.3	Le coefficient de sécurité .....	66
2.6.4	Moment fléchissant.....	67
2.6.5	Le moment de torsion.....	68
2.6.6	Choix du matériau de l'arbre .....	68
2.6.7	Calcul du diamètre de l'arbre à la flexion .....	68
2.6.8	Calcul du diamètre de l'arbre à la torsion.....	69
2.6.9	Calcul du diamètre de l'arbre à la compression.....	70
2.6.10	Vérification du diamètre par critère tersca et von mises.....	70
2.7.	Dimensionnement des roulements : .....	71
2.7.1	Type de roulements.....	72
2.7.2	Choix des roulements .....	75
2.7.3	Calcul de la durée de vie du roulement .....	76
2.8.	Les billes .....	78
2.8.1	Les performances des billes dans le broyeur planétaire.....	78
2.8.2	Choix des billes .....	79

## Chapitre 04 : Conception et simulation numérique

Introduction.....	81
1. Les logiciels utilisés pour la conception et la modélisation .....	81
2. Modélisation géométrique .....	82
2.1 Conception du carter du broyeur .....	82
2.2 Conception des poulies .....	83
2.3 Conception du train épicycloïdal.....	83
2.4 Bole de broyage.....	84
2.5 Assemblage du broyeur .....	84
3. Simulation numérique .....	84

<b>3.1</b>	<b>Méthodologie d'analyse basée sur la théorie des éléments finis .....</b>	<b>85</b>
3.1.1	Choix de la géométrie et du maillage .....	85
3.1.2	La définition du modèle mathématique .....	85
3.1.3	Résolution du problème discrétisé .....	85
3.1.4	Analyse et post-traitement des résultats .....	85
<b>3.2</b>	<b>Simulation de l'arbre .....</b>	<b>86</b>
3.2.1	L'arbre en torsion.....	86
3.2.2	L'arbre en flexion .....	87
3.2.3	L'arbre en compression.....	89
	<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>93</b>
	<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>95</b>
	<b>Annexe .....</b>	<b>99</b>

## **Introduction générale**

La métallurgie des poudres est une technique ancienne qui a été développée par les potiers et les céramistes. Elle est devenue une science dans les années 1930 lorsque les phénomènes observés ont commencé à être compris. Cette compréhension est importante car la métallurgie des poudres est utilisée dans la production de céramiques, de métaux, de pièces mécaniques, de filtres et de combustibles nucléaires.

La métallurgie des poudres est différente des autres techniques car elle n'implique jamais la fusion totale du matériau. Elle est utile pour produire des métaux ou alliages avec des propriétés spéciales ou pour fabriquer des petites pièces mécaniques identiques de manière économique. Elle permet également d'obtenir des pièces à la forme désirée avec peu ou pas de finition nécessaire.

Les chercheurs en sciences des matériaux cherchent à trouver de nouvelles structures qui peuvent améliorer les performances des matériaux existants. Les nanomatériaux sont devenus populaires car ils permettent de modifier et de contrôler de nombreuses propriétés en réduisant la taille des matériaux à quelques nanomètres. Les nanomatériaux ont des applications prometteuses dans de nombreux domaines, tels que le magnétisme, la mécanique, la catalyse et l'optique.

L'engouement pour les nanomatériaux s'explique aussi comme conséquence naturelle de la miniaturisation continue des dispositifs de certaines industries notamment la microélectronique.

Les matériaux nanostructurés sont des solides où un paramètre varie sur une échelle de quelques nanomètres. Ils peuvent se présenter sous différentes formes et ont des propriétés physiques très différentes de celles des matériaux microcristallins ou « massifs ». En raison de l'effet de confinement, ces matériaux recèlent une proportion atomique importante dans les surfaces, les interfaces et les joints de grains, ce qui les rend fondamentaux.

De nombreuses méthodes peuvent être utilisées pour produire de matériaux nanostructurés, sol-gel, évaporation-condensation, jets atomiques, dépôt de plasma, processus de convections, broyage haute énergie (Mécanosynthèse...).

Notre recherche porte sur la conception et le dimensionnement d'un modèle de broyeur planétaire pour les métaux, pouvant être utilisé dans différents domaines tels que la pharmacie, la métallurgie, la chimie, etc. Le modèle sera renforcé par une étude complète du

Broyeur, incluant une analyse cinématique de tous les composants mécaniques, ainsi qu'une étude de résistance utilisant la RDM et des simulations numériques sur le modèle CAO.

# **Chapitre01 : Généralités sur les matériaux nanostructurés**



# Chapitre 01 : Généralités sur les matériaux nanostructurés

---

## Introduction

Au cours des deux dernières décennies, il y a eu un développement rapide de nombreuses recherches sur la synthèse et les applications technologiques des matériaux nanostructurés. Cette attention accrue est due à la découverte que ces matériaux présentent des propriétés physiques différentes de celles des solides de tailles conventionnelles, ce qui a été démontré par diverses méthodes expérimentales.

Dans ce premier chapitre, notre objectif est de définir les différentes catégories de matériaux nanostructurés et de présenter leurs méthodes d'élaboration correspondantes. Nous mettrons particulièrement l'accent sur la microstructure des poudres à nanograins obtenues par broyage haute énergie, ainsi que sur quelques domaines d'application spécifiques.

## 1. Nanomatériaux

Les propriétés des nanomatériaux sont principalement influencées par la taille nanométrique des cristallites, qui peut atteindre jusqu'à 100 nm, ainsi que par la présence d'une fraction d'atomes située dans une zone interfaciale avec un arrangement désordonné appelé joint de grains (**Figure 1.1**).

Par exemple, dans un matériau dense, la forte proportion de joints de grains entraîne des modifications significatives des propriétés mécaniques et électriques, telles qu'une augmentation de 2 à 3 fois de l'allongement à la rupture, de la dureté et de la résistivité.

Dans le domaine du magnétisme, les propriétés magnétiques sont liées à des interactions à plus longue distance, telles que le couplage d'échange (10 à 100 nm dans les matériaux doux) ou les interactions dipolaires. Il existe notamment une transition de phase magnétique qui se produit lorsque la taille des grains est inférieure à la longueur d'échange.

L'anisotropie magnéto-cristalline se trouve moyennée dans l'espace et disparaît si les cristaux sont orientés aléatoirement modèle d'anisotropie aléatoire (Random Anisotropy Model).

# Chapitre 01 : Généralités sur les matériaux nanostructurés

---

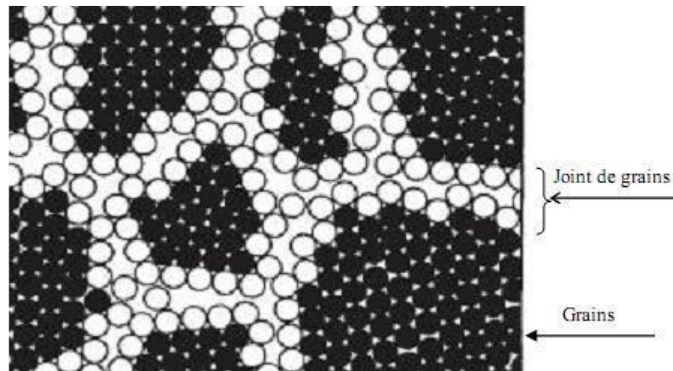


Figure1.1 : L'arrangement de matériaux nanostructures à deux dimensions

Les nanomatériaux peuvent être produits en introduisant divers défauts tels que des lacunes, des interstices, des joints de grains, des dislocations, etc. Dans le but de fabriquer ces nanostructures et nanomatériaux, différentes technologies ont été étudiées et développées.

## 2. Classification

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

### 2.1. Les matériaux de dimension 0 :

Font référence à des structures composées de grains nanométriques dispersés de manière aléatoire ou organisée dans une matrice. Un exemple courant de ces structures est observé dans les cristaux colloïdaux utilisés en optique, ainsi que dans les fluides magnétiques.

### 2.2. Les matériaux de dimension 1 :

Se présentent sous la forme de nanofils ou de nanotubes.

### 2.3. Les matériaux de dimension 2 :

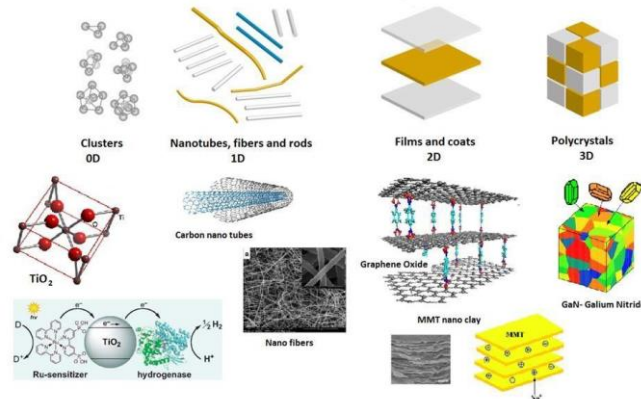
Elaborés en forme de couche ultrafine par dépôts d'agrégats ou d'atomes.

### 2.4. Les matériaux de dimension 3 :

Se présentent sous une forme compacte et sont composés de grains mono ou polyphasés.

# Chapitre 01 : Généralités sur les matériaux nanostructurés

Figure 1.2 : Classification des nanostructures selon leur dimensionnalité



## 3. Technique d'élaboration des nanomatériaux

L'élaboration des matériaux nanostructurés est largement employée dans l'industrie et la recherche, avec pour principaux objectifs la réduction de la taille des particules, le mélange de poudres et la modification de la forme des particules, ainsi que l'amélioration de leurs propriétés par rapport aux matériaux massifs.

Au cours des dernières années, plusieurs méthodes d'élaboration ont été développées pour atteindre ces objectifs.

### 3.1 La voie physique

L'obtention de nanoparticules peut être réalisée en utilisant la phase vapeur provenant d'un matériau source chauffé ou soumis à un bombardement. Dans la plupart des cas, la vapeur du matériau solide souhaité est refroidie par des collisions avec un gaz neutre, ce qui permet de collecter le matériau sur une paroi froide. Une autre méthode pour obtenir des nanopoudres consiste à exposer des poudres de taille millimétrique à des micro-ondes. Les couches minces d'épaisseur nanométrique peuvent également être produites par dépôt physique en phase vapeur (PVD - Physical Vapor Deposition). En ce qui concerne les nanotubes de carbone, ils peuvent être obtenus par des techniques telles que l'ablation laser, la décharge plasma ou la décomposition catalytique.

# Chapitre 01 : Généralités sur les matériaux nanostructurés

## 3.1.1 L'Atomisation

L'atomisation est un procédé couramment utilisé pour la production de poudres. Il consiste à pulvériser un jet de métal ou d'alliage fondu à l'aide d'un jet de gaz ou d'eau sous pression. Ce procédé présente plusieurs avantages, notamment la capacité à obtenir des poudres de haute pureté et, dans le cas de l'atomisation au gaz, des poudres de forme sphérique. La centrifugation d'un jet de métal liquide sous vide est une autre méthode utilisée pour disperser les gouttelettes qui se refroidissent pendant leur trajectoire. Ce processus permet également d'obtenir des particules de forme sphérique.

## 3.1.2 L'atomisation par l'eau

(La Figure 1.3) présente un schéma d'un atomiseur à l'eau. Dans ce procédé, des jets d'eau haute pression sont dirigés vers le filet de métal en fusion, ce qui provoque la fragmentation du film de métal liquide en fines gouttelettes qui se solidifient rapidement par la suite. Un système d'atomisation à l'eau comprend différentes composantes essentielles, notamment l'équipement de fusion, le système de pressurisation de l'eau, les buses d'atomisation, la chambre d'atomisation et le système de collecte et de séchage de la poudre produite. Selon le métal ou l'alliage à atomiser, la fusion peut être réalisée par induction à l'air, sous gaz inerte ou sous vide. Des fours de fusion à arc électrique ou à gaz sont également parfois utilisés.

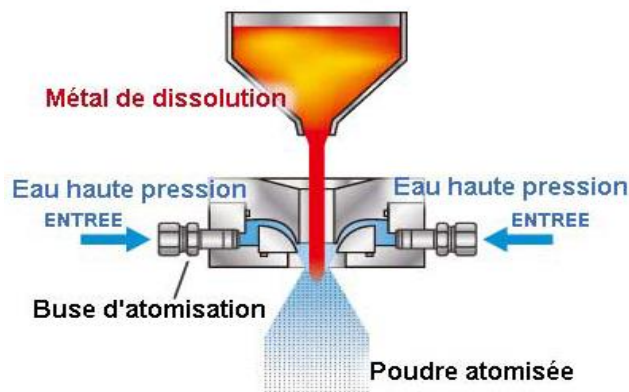


Figure 1.3 : Schéma d'un atomiseur à l'eau

# Chapitre 01 : Généralités sur les matériaux nanostructurés

## 3.1.3 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).

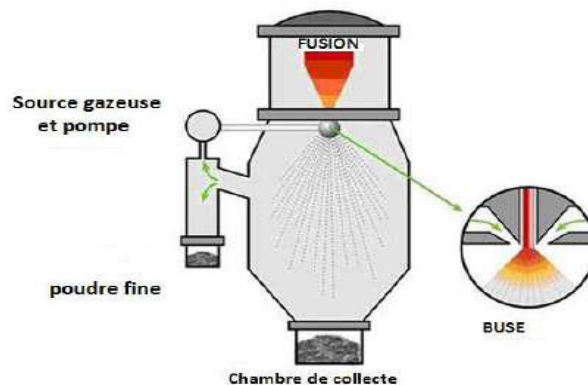


Figure 1.4 : Atomisation par gaz

## 3.1.4 Méthode électrolytique

Dans cette méthode, le métal à pulvériser est utilisé comme anode (positif), tandis que le métal sur lequel la poudre doit être déposée sert de cathode (négatif). Les deux métaux sont immergés dans un électrolyte. Lorsque l'alimentation en courant est fournie, le métal de l'anode se dépose sur la cathode sous forme d'une fine couche. Ensuite, la poudre métallique est séparée. L'électrolyte est une solution saline contenant le métal à pulvériser. Par exemple, une solution de sulfate de cuivre peut être utilisée comme électrolyte pour produire de la poudre de cuivre. Cette poudre de cuivre se dépose sur une plaque d'aluminium utilisée comme cathode.

# Chapitre 01 : Généralités sur les matériaux nanostructurés

---

Cette méthode est également utilisée pour la production de poudre de zinc, d'étain, de nickel, de cadmium, d'antimoine, d'argent, de plomb et de béryllium.

## 3.1.5 Le procédé d'hydrogène dissous

Ce procédé implique la dissolution d'une quantité d'hydrogène dans le métal liquide, suivi par la versée de ce métal liquide dans une chambre sous vide (Figure 4.3). Grâce au vide ambiant dans la chambre d'atomisation, le métal liquide subit une explosion due à la précipitation de l'hydrogène dissous. Cette explosion disperse le métal liquide en fines gouttelettes qui se solidifient rapidement dans l'atmosphère neutre de la chambre. La taille des particules produites par ce procédé ne peut être contrôlée. Cependant, la forme des particules peut être soit sphérique, soit sous forme de flocons, en fonction de la taille de la chambre sous vide utilisée.

## 3.2 La voie chimique

Plusieurs techniques de fabrication sont couramment utilisées dans l'industrie pour produire des matériaux nanostructurés. Parmi ces techniques, on retrouve les réactions en phase vapeur et les réactions en milieu liquide.

Les réactions en phase vapeur impliquent la vaporisation des matériaux précurseurs, qui sont ensuite introduits dans un réacteur appelé CVD (Chemical Vapor Deposition). Dans ce réacteur, les molécules de précurseurs sont adsorbées à la surface d'un substrat maintenu à une température appropriée. Lorsque les molécules de précurseurs réagissent entre elles ou avec d'autres espèces présentes dans le réacteur, elles se déposent sur le substrat pour former les nanostructures désirées.

Les réactions en milieu liquide sont effectuées à partir d'une solution aqueuse ou organique contenant les réactants nécessaires. Ces réactions permettent la synthèse de nanoparticules par précipitation. Les conditions physico-chimiques de la solution sont modifiées pour induire une transformation chimique ou une modification de phase, conduisant à la formation des nanoparticules. Ces techniques offrent un contrôle précis sur la taille et la forme des nanoparticules produites.

En somme, ces procédés de fabrication permettent d'obtenir de la poudre nanostructurée par le biais de réactions chimiques ou de transformations de phase. Chaque technique présente ses avantages et ses limitations, et leur choix dépend des caractéristiques spécifiques des matériaux recherchés et des applications envisagées.

# Chapitre 01 : Généralités sur les matériaux nanostructurés

## 3.2.1 Electrolyse :

Les méthodes chimiques sont largement utilisées pour la production de nombreux métaux. Parmi ces méthodes, la réduction d'un composé, généralement un oxyde mais parfois un sulfure ou un chlorure, est la plus couramment employée. Cette réduction est réalisée à l'aide d'un agent chimique, sous forme de gaz, de liquide ou de solide, qui divise le composé en métal sous forme de fines particules, tandis qu'un sous-produit est généré et peut être éliminé. Lorsque le composé métallique initial est un solide, la taille des particules métalliques obtenues dépend en grande partie de la morphologie du composé d'origine. Si le sous-produit de la réduction est gazeux, il peut être éliminé directement par le gaz porteur ou à l'aide d'un système de vide spécifique.

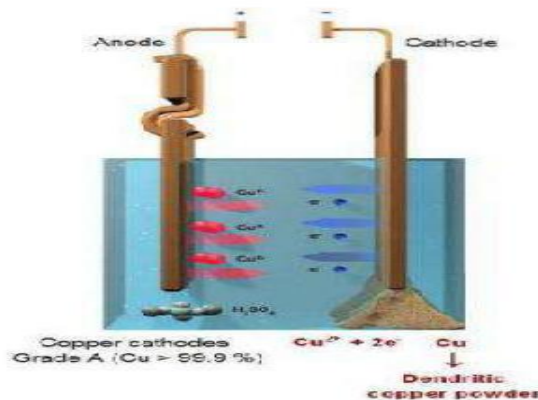


Figure 1.5 : Principe d'électrolyse

## 3.2.2 Décomposition thermique

Dans ce procédé de production de poudre, le métal se condense à partir de sa phase vapeur pour former des particules solides. Par exemple, le cadmium et le zinc sont couramment produits commercialement de cette manière. La poudre obtenue présente une forme sphérique avec de petites particules d'un diamètre d'environ  $5 \times 10^{-8}$  m.

De même, la pyrolyse gazeuse est largement utilisée pour produire des poudres de nickel et de fer. Dans ce cas, les carbonyles de nickel et de fer, qui sont des composés gazeux, se décomposent thermiquement pour donner naissance à des particules métalliques. Le refroidissement de ces particules dans des conditions précisément contrôlées conduit à la formation de poudres élémentaires. La poudre de fer obtenue à partir du fer carbonyle présente généralement une forme

## Chapitre 01 : Généralités sur les matériaux nanostructurés

---

sphérique avec un diamètre moyen de particule de l'ordre de 10  $\mu\text{m}$ . En revanche, la poudre de nickel obtenue à partir du carbonyle de nickel présente une forme irrégulière et poreuse. Les principales impuretés présentes dans ces deux poudres sont le carbone, l'azote et l'oxygène.

### 3.3 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 :

#### 3.3.1 Le procédé Marco-Mesh

Aux États-Unis, General Motors a mis au point un procédé de broyage des copeaux d'usinage d'acier ou de fonte malléable. Ce procédé utilise des broyeurs à marteaux pour obtenir des poudres de granulométrie relativement grossière, généralement de 0,2 à 0,7 mm. Ces poudres peuvent être utilisées pour la fabrication de pièces de grandes dimensions de deux manières principales : par compactage à froid suivi de frittage, ou par forgeage à chaud des poudres, où les poudres sont formées en pièces directement pendant le frittage.

#### 3.3.2 Le procédé cold stream

Dans cette méthode, le matériau à pulvériser est propulsé par un jet de gaz à grande vitesse et projeté sur une cible fixe. 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. L'effet de refroidissement important causé par la détente adiabatique des gaz à la sortie de la buse contribue à la fragilisation des particules. Ce procédé est réalisé à une température nettement inférieure à la température ambiante. Il est couramment utilisé pour pulvériser des matériaux durs, abrasifs et coûteux tels que le carbure de tungstène, les alliages de tungstène, le molybdène, le béryllium, et bien d'autres.

#### 3.3.3 La voie mécanique

La mécanosynthèse est une méthode qui permet de synthétiser des matériaux structurés à l'échelle nanométrique à température ambiante. Cette approche est particulièrement adaptée pour la production de matériaux qui seraient difficiles, voire impossibles à obtenir par des méthodes conventionnelles telles que la fusion et la solidification. La mécanosynthèse a été développée dans



# Chapitre 01 : Généralités sur les matériaux nanostructurés

---

les années 60 par John Benjamin, notamment pour créer des dispersions d'oxydes tels que ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) dans des alliages de nickel, afin d'améliorer leurs propriétés mécaniques. Cette méthode offre de nouvelles possibilités pour la conception et la fabrication de matériaux avancés à l'échelle nanométrique

Deux terminologies sont employées pour définir le broyage à haute énergie : on parle de

- mécanosynthèse (mechanical alloying en anglais), quand les poudres initiales ont une composition différente de celle(s) d'arrivée.
- Mechanical milling , dans le cas contraire.

### 3.3.4 Le broyage mécanique et la mécano-synthèse :

- 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.

- La mécano-synthèse :

Une technique de synthèse qui utilise le broyage mécanique pour mélanger des poudres de différents métaux, alliages ou composites, afin de provoquer des réactions chimiques entre eux grâce à une haute énergie appliquée. Cette méthode permet de convertir l'énergie mécanique en énergie chimique. Pendant le processus, les particules subissent des fractures et des soudures répétées, ce qui favorise la diffusion des éléments à l'échelle atomique et la formation de nouvelles phases. Cela conduit à une homogénéisation du mélange. Toutefois, la mécano-synthèse nécessite généralement un temps de traitement plus long que le broyage mécanique classique.

# Chapitre 01 : Généralités sur les matériaux nanostructurés

---

- Les éléments nécessaires pour l'élaboration des matériaux par mécano synthèse :
  - Des poudres élémentaires ou pré alliées constituant le produit à élaborer.
  - Un moyen de choc : des billes ou des barreaux suivant la technique adopté.
  - Un type de mouvement permettant des chocs successifs.

## 4 L'application des matériaux nanostructures :

Dans le domaine des nanomatériaux pour les applications aérospatiales, plusieurs défis techniques sont identifiés et font l'objet de recherches intensives. Deux domaines spécifiques de recherche sont particulièrement pertinents : les polymères renforcés de nanotubes de carbone et les matériaux produits par déformation plastique sévère (SPD).

Les polymères renforcés de nanotubes de carbone sont étudiés en raison de leur potentiel à améliorer les propriétés mécaniques des matériaux composites utilisés dans l'aérospatiale. Les nanotubes de carbone, en raison de leur résistance et de leurs propriétés uniques, peuvent renforcer les polymères et les rendre plus rigides, plus résistants et plus légers. La recherche se concentre sur la fabrication de composites polymères/nanotubes de carbone avec une dispersion homogène des nanotubes et une adhérence forte entre les phases, afin d'obtenir des performances optimales.

Les matériaux produits par déformation plastique sévère (SPD) sont également d'intérêt pour l'aérospatiale. Le SPD est une méthode de traitement des matériaux qui permet de produire des microstructures à grains ultrafins ou nanocristallines, ce qui confère aux matériaux des propriétés mécaniques améliorées, telles qu'une résistance accrue et une meilleure ductilité. Les chercheurs étudient les techniques de SPD pour les alliages métalliques utilisés dans l'industrie aérospatiale, afin de produire des matériaux plus légers, plus résistants et plus durables.

- **Cellule et composants** : Les nanomatériaux peuvent améliorer les propriétés de presque tous les matériaux utilisés dans la construction d'aéronefs.
- **Métaux** : Lorsque la taille des grains des métaux diminue, leurs propriétés mécaniques s'améliorent, conformément à **la relation Hall-Petch**. Les matériaux nanocristallins, qui ont de petits grains à l'échelle nanométrique, présentent une plus grande **limite d'élasticité**, une résistance accrue et une dureté supérieure par rapport aux matériaux conventionnels. Ils peuvent également avoir une **durée de vie en fatigue** considérablement augmentée, pouvant aller jusqu'à 200 à 300% par rapport aux matériaux traditionnels, grâce à la

## Chapitre 01 : Généralités sur les matériaux nanostructurés

---

réduction de la taille des grains qui limite la propagation des fissures de fatigue. En résumé, les nanomatériaux offrent des performances mécaniques améliorées et une meilleure résistance à la déformation et à la fatigue, Les métaux nanostructurés, en particulier les alliages d'aluminium et de titane, peuvent améliorer les propriétés mécaniques et améliorer la résistance à la corrosion.

- **Moteurs** : Dans l'industrie aéronautique, les moteurs continuent d'être alimentés par des hydrocarbures. Malgré les améliorations aérodynamiques, la réduction de poids et l'adoption de moteurs plus économes en carburant, le coût du carburant reste une part importante des coûts d'exploitation des avions. Pour améliorer l'efficacité des moteurs d'avion, il est essentiel de développer de nouveaux matériaux capables de supporter des températures de fonctionnement plus élevées, de réduire le poids des moteurs et d'augmenter les contraintes de fonctionnement du rotor. Ces matériaux jouent un rôle clé dans l'amélioration des performances des moteurs en permettant une meilleure gestion de la chaleur, une réduction de poids et une augmentation des pressions de fonctionnement.
- **L'application de matériaux nanométriques** à haute température aux aéronefs moteurs peut entraîner une augmentation du rapport poussée/poids pouvant aller jusqu'à 50% et une économie de carburant de 25% pour les moteurs conventionnels.
- **Les nanomatériaux sont utilisés** comme revêtements sur les aubes des moteurs d'avion. Des études sont en cours pour ajuster les propriétés de ces revêtements au niveau moléculaire, afin de les faire adhérer de manière plus solide à la surface de la lame métallique et de permettre aux moteurs de fonctionner à des températures plus élevées. Cette recherche vise à améliorer la performance et l'efficacité des moteurs en optimisant les propriétés des revêtements nanométriques appliqués aux aubes.
- **Protection thermique et contrôle** : La protection thermique est d'une importance capitale dans les conditions extrêmes de l'espace. En améliorant les systèmes de protection thermique pour les engins spatiaux réutilisables, il serait possible de réduire les coûts du transport spatial et d'augmenter la flexibilité et la sécurité des missions dans les voyages spatiaux habités. Les matériaux céramiques et les composites à base de fibres sont particulièrement importants dans la conception des systèmes de protection thermique. Ces matériaux sont utilisés pour les couches de protection ainsi que pour les composants tels

## Chapitre 01 : Généralités sur les matériaux nanostructurés

---

que les buses, les chambres de combustion des moteurs de fusée et les boucliers thermiques des systèmes de rentrée spatiale.

- **Des feuilles de substrat en céramique** oxydent pour des couches de réflecteur (par exemple internes isolation multi-écrans, développée pour le planeur orbital HERMES sur la base d'une procédure sol gel)
- **Formation d'une matrice céramique** à partir d'oligo- et de polymères silico-organiques précurseurs pour structures complexes.

### Conclusion

Après avoir exploré les différentes étapes impliquées dans le traitement et la réintroduction des poudres métallurgiques et des nanomatériaux dans le processus de fabrication, il est clair que le broyage joue un rôle indispensable dans ces domaines. Dans le chapitre III, une étude approfondie est consacrée à l'examen d'un broyeur spécifiquement conçu pour ces matériaux, mettant en évidence son importance dans le processus de transformation. De plus, le chapitre II offre une vue d'ensemble détaillée sur le broyage des poudres métallurgiques, en présentant les différentes méthodes de broyage ainsi que les types de broyeurs utilisés. Ces informations fournissent une base solide pour comprendre les principes fondamentaux et les aspects pratiques du broyage des poudres métallurgiques et des nanomatériaux, ouvrant ainsi la voie à des avancées significatives dans le domaine de la métallurgie et de la nanotechnologie.

## **Chapitre 02 : Caractéristiques et fonctionnement des broyeurs**

## **Chapitre 02 : Caractéristiques et fonctionnement des broyeurs**

### **1. Principe du broyage mécanique**

Le broyage mécanique est une méthode efficace pour mélanger des poudres d'éléments purs ou combinés à une échelle atomique. Contrairement au broyage classique, qui est utilisé depuis des temps anciens pour simplement réduire les matériaux en poudre, le broyage à haute énergie est une technique qui permet d'obtenir des matériaux sous forme de poudres nanométriques, qu'elles soient monophasées ou polyphasées. Cette transformation est réalisée en appliquant une série de chocs mécaniques sur les particules à l'intérieur d'une enceinte.

La réduction de la matière en petits fragments ou en poudre est obtenue grâce au processus de broyage. Les mécanismes impliqués dans ce processus sont encore loin d'être complètement compris. Afin d'expliquer la fracture des particules soumises à des forces mécaniques, nous utilisons la théorie de la fracture mécanique. Les modes de fragmentation classiques consistent à soumettre le solide à fragmenter à une contrainte créée par des forces de contact. Le champ de contrainte résultant est généralement anisotrope et dépend de paramètres intrinsèques au matériau, tels que le nombre et la direction des forces appliquées, ainsi que la vitesse de déformation. Lors de la conception des équipements, il est important de prendre en compte les paramètres suivants :

#### **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.

#### **1.2.Energie**

L'énergie nécessaire pour fracturer le matériau est fournie par le champ des contraintes. La rupture d'une fissure demande une quantité supplémentaire d'énergie, car elle consomme de l'énergie. L'énergie requise pour la propagation d'une fissure est proportionnelle à la section transversale du grain, tandis que l'énergie stockée est proportionnelle au volume.

#### **1.3.Vitesse de déformation :**

Elle conditionne le comportement du matériau.

##### **1.3.1. Réduction des dimensions du matériau :**

L'énergie nécessaire n'est pas illimitée et souvent elle requiert des étapes successives impliquant l'utilisation de différents types d'appareils travaillant en série.

## Chapitre 02 : Caractéristiques et fonctionnement des broyeurs

### 1.3.2. Les types de fragmentations

Généralement, on distingue trois types de fragmentation :

- La fragmentation grossière : Particules de l'ordre de **mm**
- La fragmentation fine : Broyeur à fragmentation fine (**1000 à 10 $\mu$ m**)
- La fragmentation ultrafine : la taille du particule ultrafine est comprises entre **5et10 $\mu$ m**

## 2. Les paramètres impliquent dans le broyage mécaniques

Le broyage à haute énergie est un processus complexe qui implique un ensemble de paramètres interdépendants, dont la maîtrise complète reste encore à atteindre, mais qui ont une influence considérable sur les propriétés du produit final obtenu. Ces paramètres peuvent être regroupés en deux catégories distinctes :

### 2.1. Les paramètres contrôlables

- Les type de broyeurs
- Le rapport masse billes/masse poudre
- L'intensité du broyage
- Le degré de remplissage
- Le temp de broyage

### 2.2. Les paramètres difficilement contrôlables

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

## 3. Phénomène de fragmentation lors du broyage

Chaque type de fragmentation nécessite un équipement spécifique et implique des mécanismes de fragmentation particuliers. Cette technique consiste à broyer simultanément deux matériaux, **A** et **B**. Initialement, il se produit une fragmentation des particules des différents constituants (**voir Figure 2.1**) jusqu'à atteindre une taille limite. Dans ce processus, l'un des constituants se fragmente plus rapidement, en l'occurrence le constituant **B**. Par conséquent, **B** atteint sa taille limite de fragmentation avant **A**.

## Chapitre 02 : Caractéristiques et fonctionnement des broyeurs

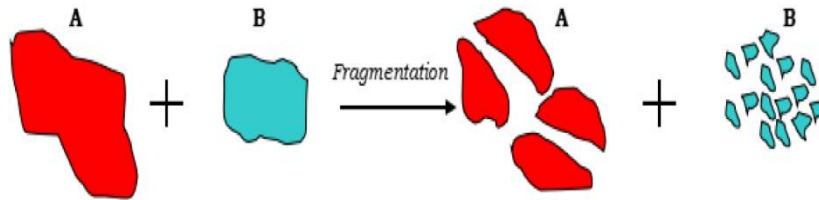


Figure 2.1 : Phénomène de fragmentation lors du broyage.

Les fines particules du constituant **B** vont avoir tendance, en raison des forces inter-particulaires, à se coller sur les particules plus grosses. Plus le broyage continu, plus le phénomène ne s'amplifie. Différents stades d'agglomération vont être rencontrés : la simple soudure entre deux particules ou plus, puis le stade d'enrobage des particules et enfin le stade d'agglomération des particules entre elles. Le type de phénomène observé dépendra entre autres de la durée de l'opération et de l'affinité des produits. La (Figure 2.2) présente l'évolution des différents stades d'agglomération au cours du broyage.

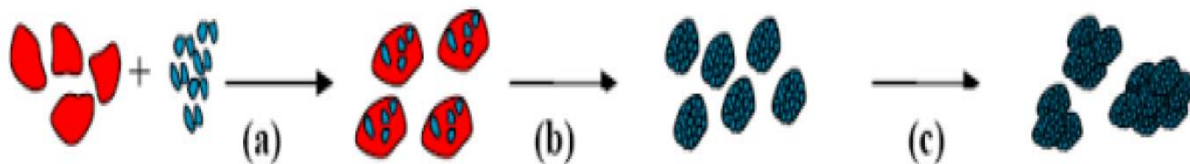


Figure 2.2 Différentes étapes d'agglomération au cours du broyage

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).



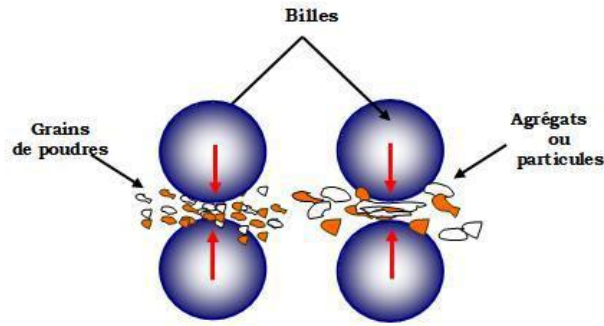


Figure 2.3 : Principe du broyage mécanique : formation d'agrégats par chocs mécaniques

### 4. Mécanismes de formation

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

#### 4.1. Stade primaire :

Au cours des premières heures de broyage, des lamelles alternées des éléments initiaux peuvent être observées. La taille des particules peut varier de quelques microns à **100  $\mu\text{m}$** . Les éléments de départ peuvent être identifiés dans le composé formé en raison de la prédominance du phénomène de fracture.

#### 4.2. Stade intermédiaire :

À mesure que le temps de broyage s'allonge, la compétition entre les phénomènes de fracture et de soudage devient plus prononcée, ce qui entraîne un affinement des particules de poudre. Les éléments solutés commencent à se dissoudre dans la matrice.

L'augmentation de la densité de défauts dans le réseau cristallin et de la température locale favorise la formation de régions de solution solide.

#### 4.3. Stade final

À ce stade, la microstructure des particules semble relativement homogène à l'échelle macroscopique, sans présence de structures lamellaires. Une homogénéité de la composition chimique de toutes les particules peut être atteinte, ce qui conduit à la formation d'un alliage ayant une composition proche du mélange initial. De plus, la dureté des particules de poudre atteint un état de saturation, c'est-à-dire qu'elle cesse d'augmenter significativement.

## Chapitre 02 : Caractéristiques et fonctionnement des broyeurs

### 4.4. Stade complet

Les particules de poudre formées durant ce stade présentent une structure métastable extrêmement déformée et la composition de l'alliage est similaire à celle du mélange de départ.

## 5. Physique de la fracture

### 5.1. Définition

Lorsqu'un solide est soumis à une contrainte croissante, il subit des déformations qui peuvent éventuellement conduire à sa fragmentation. Dans des conditions idéales, la courbe qui représente la relation entre la déformation et la contrainte (**Figure 2.4**) permet de distinguer deux principaux domaines :

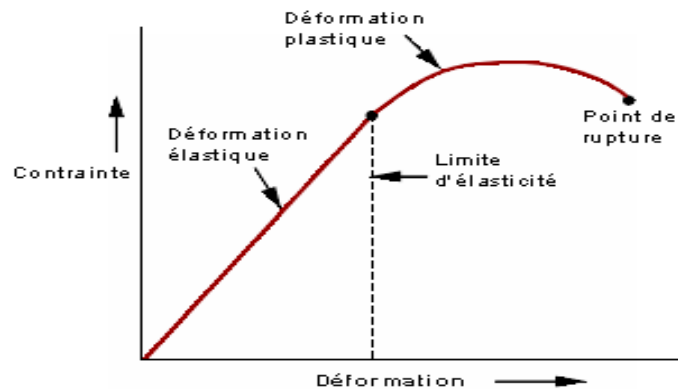


Figure 2.4: Contrainte =  $f$ (déformation).

Dans la première région, la déformation du solide est proportionnelle à la contrainte appliquée. C'est dans cette région que l'on peut déterminer le module d'Young (E). Les déformations qui se produisent ici sont élastiques, ce qui signifie qu'elles peuvent être réversibles. En d'autres termes, lorsque la contrainte est relâchée, le solide retrouve sa forme initiale.

Lorsque la contrainte est augmentée au-delà d'un point appelé limite d'élasticité, on pénètre dans une zone de plasticité où les déformations deviennent irréversibles. Ce domaine de plasticité se termine par un point de rupture, où le matériau se fracture une fois ce point dépassé.

### 5.2. Point de rupture :

- Si le **point de rupture** est très proche du point de limite d'élasticité, la rupture est dite **fragile**, elle est alors brutale et se propage à grande vitesse suivant des surfaces de cohésion minimale.

## Chapitre 02 : Caractéristiques et fonctionnement des broyeurs

Lorsque le **point de rupture** est situé après un large domaine de plasticité, la rupture est dite **ductile**, elle est progressive et nécessite le maintien de la contrainte jusqu'à la séparation des fragments. Les courbes déformation-contrainte, permettent de classer les matériaux en trois grandes catégories :

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

### 6. Mode de fragmentation et types de broyeur utilisés

Suivant le type de broyeur utilisé, les contraintes infligées au produit à broyer (**Figure 2.5**) sont de nature différente :

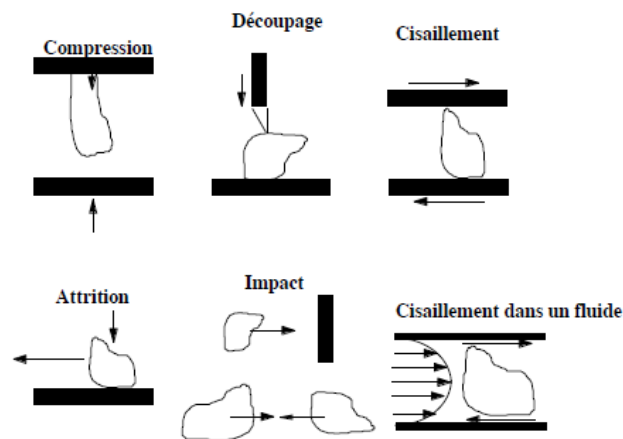


Figure 2.5 : Mode de fragmentation

- La compression ou l'écrasement sont souvent utilisés notamment dans les industries alimentaires où l'on retrouve fréquemment des **broyeurs à cylindres lisses ou cannelés**.
- Les **broyeurs à impacts** permettent d'atteindre différents ordres de grandeur en termes de tailles, allant du broyage grossier avec les broyeurs à marteaux au broyage ultra fin avec les broyeurs à jets d'air en passant par le broyage fin avec les broyeurs à broches.
- Le **broyage par attrition** est mis en œuvre dans les broyeurs à colloïdes ou broyeurs à disques.

## Chapitre 02 : Caractéristiques et fonctionnement des broyeurs

- Le **découpage et le cisaillement** qui permettent éventuellement l'obtention de produit de dimension finie (**coupteaux**) sur des matières qui peuvent présenter une certaine élasticité.

### 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.

#### 7.1. La dureté

La dureté d'un matériau est une mesure de sa résistance à la pénétration. Un pénétrateur de forme définie est appliqué sur la surface du matériau à tester avec une force connue pendant une durée spécifique. Plus l'empreinte laissée est petite, plus le matériau est considéré comme dur. Bien que la dureté ne soit pas une propriété facile à définir, les tests de dureté sont largement utilisés en raison de leur simplicité et de leur caractère non destructif. Les résultats fournissent une indication synthétique des propriétés mécaniques du matériau testé. La dureté est traditionnellement représentée sur l'échelle de **Mohs (Figure 2.6)**. Il convient de noter que dans les industries minières, les matériaux ont généralement une dureté **maximale de 4** sur cette échelle.

1 Talk	friable sous l'ongle
2 Gypse	rayable avec l'ongle
3 Calcite	rayable avec une pièce cuivrée
4 Fluorite	rayable au couteau
5 Apatite	rayable au couteau
6 Orthose	rayable à la lime, par le sable
7 Quartz	qui raye une vitre
8 Topaze	rayable par le carbure de Tungstène
9 Corindon	rayable au carbure de silicium
10 Diamant	rayable par un autre diamant

Figure 2.6 : Echelle de dureté de Mohs

#### 7.2. L'abrasivité

Cette propriété est étroitement liée à celle mentionnée précédemment : il s'agit de la capacité d'un matériau à causer de l'usure sur une surface. Cette propriété revêt une grande importance

## **Chapitre 02 : Caractéristiques et fonctionnement des broyeurs**

---

économique, car elle influence l'usure du broyeur par le matériau à broyer ainsi que la contamination du produit résultant de cette usure.

### **7.2. La désintégration**

Résultant d'un apport énergétique suffisamment intense, le broyage engendre une contrainte qui dépasse largement le point de rupture. Cela entraîne la formation de particules de petite taille par rapport à la particule d'origine, et la distribution de taille de ces fragments est très étendue.

### **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.

### **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.

### **7.5. La forme**

La forme et la structure des particules jouent un rôle crucial dans les processus de broyage. En effet, les propriétés d'utilisation des particules peuvent être étroitement liées à leur forme. Par conséquent, il est essentiel de sélectionner le type de broyeur qui offre le mode d'action approprié pour obtenir la forme souhaitée des particules.

### **7.6. La distribution de taille**

La distribution de taille des particules à broyer est un facteur crucial lors du choix d'un broyeur. Si le matériau à broyer présente une large gamme de tailles de particules, il peut être nécessaire de prévoir plusieurs étapes de fragmentation. Il est également rarement recommandé de chercher à broyer jusqu'aux limites maximales d'une machine donnée, car un broyage excessif peut entraîner la ré-agglomération des particules. Il est donc important de trouver un équilibre optimal entre le degré de broyage requis et les capacités de la machine utilisée.

### 8. Types de mélanges des matériaux soumis au broyage

En Sous l'effet continu des impacts des billes, la structure des particules est affinée, mais leur taille reste inchangée. Cela entraîne une diminution de l'espacement entre les couches et une augmentation du nombre de couches à l'intérieur de chaque particule. On peut distinguer trois types de mélanges de départ qui ont été décrits :

- Système **ductile – ductile**
- Système **ductile - fragile**
- Système **fragile-fragile**

### 9. Les broyeurs

#### 9.1.Définition

Un broyeur est un équipement utilisé pour réduire la taille, fragmenter ou pulvériser différents types de matériaux. Il est principalement utilisé dans des domaines tels que l'industrie, l'agriculture, l'environnement et le recyclage. Les broyeurs sont conçus pour traiter une variété de matériaux, tels que des déchets industriels, des déchets ménagers, des matériaux de construction, des plastiques, des métaux, des minéraux, des produits chimiques, des aliments, etc.

Les broyeurs sont constitués généralement en deux parties suivante :

- **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 contient un circuit de commande (tableau de commande), et un circuit de puissance (moteur électrique ou thermique).

#### 9.2.Types des broyeurs

Les types de broyeurs qui nous intéressent sont ceux utilisés dans l'industrie pour réduire la taille des particules et homogénéiser les poudres. Ces broyeurs sont généralement des outils importants dans le processus de fabrication de divers matériaux. Les particules d'alliage pré-allié ou d'éléments purs sont broyées à l'aide de différents types de broyeurs. Les broyeurs se composent généralement d'une ou plusieurs jarres contenant des billes ou des barres qui agissent sur les matériaux sous

## Chapitre 02 : Caractéristiques et fonctionnement des broyeurs

forme de poudre. Les jarres et les billes (ou barres) sont généralement fabriquées dans des matériaux résistants à l'usure pour éviter la contamination. Le broyage est généralement effectué sous atmosphère contrôlée (argon, azote, etc.) dans différents types de broyeurs classés en fonction de la manière dont ils agissent sur la jarre et/ou les billes. Pour la production de poudres par mécanosynthèse, les principaux types de broyeurs utilisés sont le broyeur attriteur, le broyeur planétaire et le broyeur vibratoire.

### 9.2.1. Broyeur de type attriteur

Un broyeur attriteur est un type spécifique de broyeur utilisé pour le broyage et la dispersion de matériaux solides dans un liquide. Il est également connu sous le nom de broyeur à billes ou de broyeur à boulets agité. Le broyeur attriteur est principalement utilisé dans les industries de la peinture, de l'encre, de la céramique, de la chimie et des revêtements.

Le fonctionnement d'un broyeur attriteur implique la rotation d'un tambour ou d'une cuve contenant des billes en acier ou en céramique. Le matériau solide et le liquide sont introduits dans le tambour, puis les billes agitent et broient le matériau à mesure que le tambour tourne. Cette action de broyage permet de réduire la taille des particules du matériau solide et de favoriser la dispersion homogène dans le liquide.

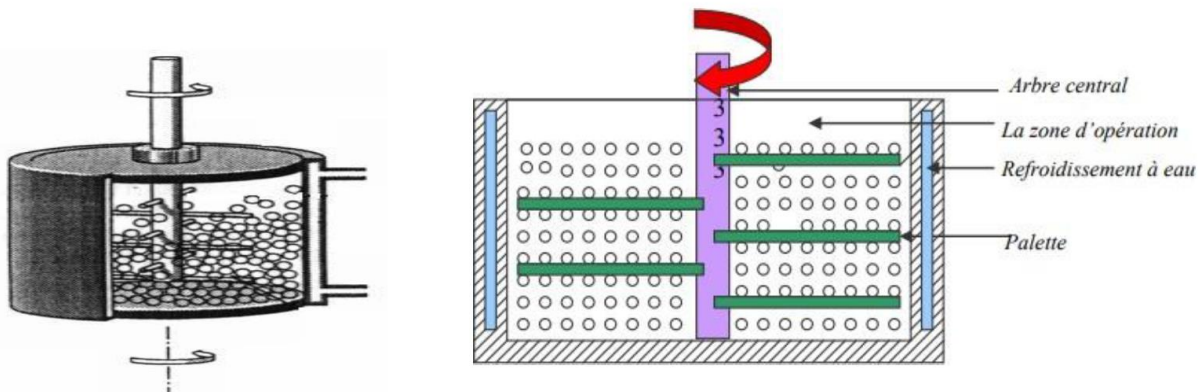


Figure 2.7. Broyeur attriteur.

### 9.2.2. Broyeur vibrant

Ce type de broyeur se divise en 2 sous-types

- Broyeur vibrant 1D :

Le broyeur vibrant vertical se distingue par une durée moyenne de broyage d'environ 24 heures. Sa particularité réside dans l'utilisation d'une seule bille, dont le diamètre varie entre 2 et 7 cm,

## Chapitre 02 : Caractéristiques et fonctionnement des broyeurs

qui frappe la poudre de manière verticale. Cette action est rendue possible grâce aux oscillations verticales générées par un électroaimant situé à la base du broyeur. Parmi les différents types de broyeurs utilisés pour le broyage, le broyeur vibrant est celui qui génère la plus grande quantité d'énergie.

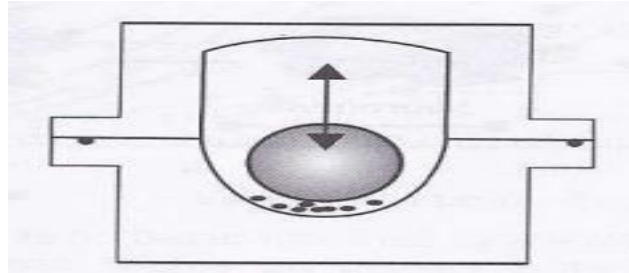


Figure 2.8 : broyeur vibrant 1D

- Broyeur vibrant 3D :

Ce broyeur repose sur le principe de vibrations à haute fréquence, généralement autour de 20 Hz, appliquées à une jarre contenant des poudres et des billes, dans trois directions orthogonales.

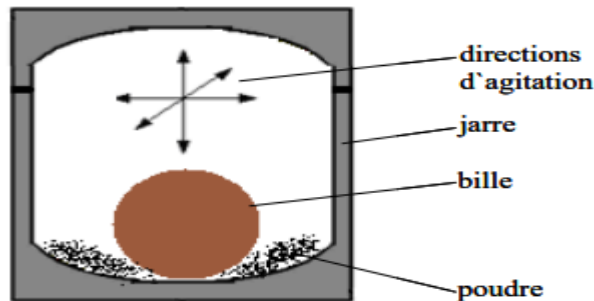


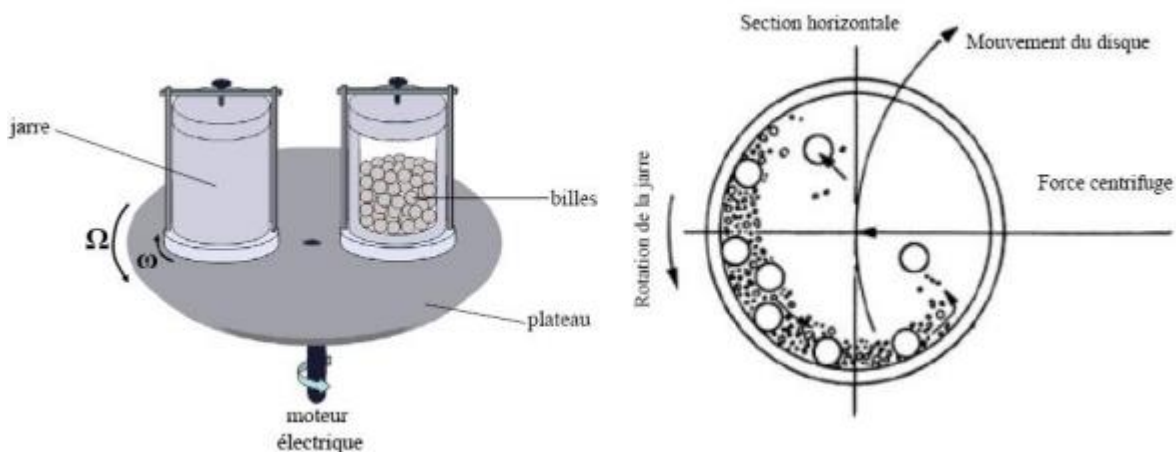
Figure 2.9 : Broyeur vibrant 3D



## Chapitre 02 : Caractéristiques et fonctionnement des broyeurs

### 9.2.3. Broyeur planétaire

Le broyeur planétaire se compose d'un disque sur lequel les jarres sont fixées. Le disque tourne dans une direction opposée à celle des jarres. Un schéma illustrant ce type de broyeur est présenté dans la (Figure 8.4). Dans le broyeur planétaire, des billes de différents diamètres sont placées avec la poudre dans une enceinte inerte, solidaire d'un disque qui tourne en sens opposé. Le broyage s'effectue soit par des chocs, soit par des frottements. À l'exception d'un chauffage externe, la température moyenne de la cuve se situe entre 50°C et 120°C, selon la vitesse des billes ; l'élévation locale de la température varie de 60°C à 300°C. Pour éviter une élévation de température excessive, le broyage est généralement effectué en plusieurs cycles, entrecoupés de périodes de repos. L'état stationnaire est atteint après 24 à 100 heures de broyage, selon les matériaux à broyer. Ce type de broyeur a été utilisé dans notre étude de recherche.



**Figure 2.10 :** Schéma général d'un broyeur planétaire et description du mouvement des billes et des particules

Les broyeurs planétaires ont une capacité typique d'environ 102 g de poudre par jarre. Ils fournissent une énergie bien plus importante que les attriteurs, ce qui en fait des broyeurs à haute énergie. Pour étudier les paramètres essentiels du broyage, tels que la fréquence, l'énergie et la puissance de l'impact, il est nécessaire de maintenir une indépendance entre la vitesse du plateau et la vitesse des satellites. Cela permet d'ajuster et de contrôler efficacement les 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

## Chapitre 02 : Caractéristiques et fonctionnement des broyeurs

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).

	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

Tableau 2.1 : Caractéristique des différents des types de broyeurs

### Conclusion

En fin de compte, les broyeurs, quel que soit leur type ou leur taille, sont des machines mécaniquement spectaculaires dont la fonction va au-delà. Leur simplicité d'utilisation est également remarquable, car ils fragmentent les solides en soumettant ces derniers à une contrainte générée par des forces de cisaillement. Ainsi, les broyeurs nous permettent de réduire le volume des matériaux à broyer et de faciliter leur transport.

# **Chapitre 03 : Dimensionnements**

## Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons le dimensionnement des éléments clés d'un broyeur planétaire. Le dimensionnement précis de ces pièces est essentiel pour assurer le bon fonctionnement et les performances optimales de l'équipement. En analysant les contraintes et les forces auxquelles ces pièces sont soumises, ainsi que les propriétés des matériaux utilisés, le système d'entraînement, la transmission... Cette approche de dimensionnement rigoureuse permettra de concevoir des broyeurs planétaires robustes et efficaces, adaptés aux exigences de diverses applications industrielles et scientifiques.

### 1. Etude cinématique

L'étude cinématique d'un broyeur planétaire permet de comprendre les mécanismes de broyage et d'optimiser la conception du broyeur pour obtenir des performances de broyage maximales. Elle constitue une étape essentielle dans le développement et l'amélioration des broyeurs planétaires utilisés dans divers domaines industriels et scientifiques.

#### 1.1. Représentation schématique

##### 1.1.1. Engrenage

L'engrenage est une méthode de transmission de puissance qui utilise deux roues dentées ou plus, avec une entrée et une sortie. Il existe plusieurs types d'engrenages, chacun adapté à des applications spécifiques en fonction des besoins de transmission de puissance, de la vitesse et du rapport de réduction recherchés et mouvements cherché a obtenu.

- **Avantages**
  - Efficacité de transmission élevée
  - Capacité à transmettre des charges élevées
- **Inconvénients**
  - Bruit et vibrations
  - Maintenance et usure

		Type de dentures*			
		Droite	Hélicoïdale	Chevron	Spirale
Roue à denture extérieure					
Roue à denture intérieure					
Roue conique		<b>Exemples d'application</b> 			
Secteur denté					
Vis sans fin					
Crémaillère					

Figure 3.1 : schéma cinématique d'engrenages

### 1.1.2. Train épicycloïdal simple

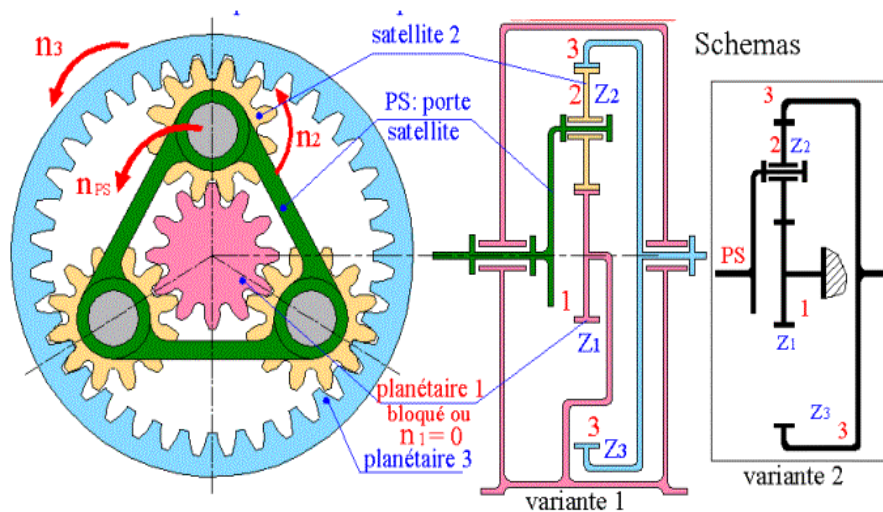
Le train épicycloïdal est un type spécifique d'engrenage qui présente des caractéristiques particulières, Il a la particularité d'avoir deux degrés de mobilité, il faut fixer les vitesses de deux éléments pour connaître celle du troisième, Il est composé d'une : une couronne, une roue planétaire, les roues satellites et le porte satellites.



Figure 3.2 : train épicycloïdal simple

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

Figure3.3 : schéma cinématique (roue planétaire bloqué)



- **Porte satellite bloqué :** En cas de blocage du porte-satellite, le système fonctionne comme un train conventionnel doté d'un engrenage interne, avec une roue d'inversion (satellite) insérée entre eux.

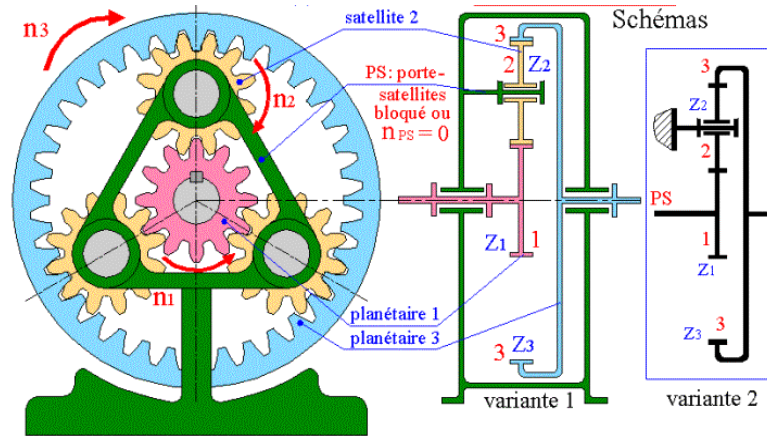


Figure 3.4 : schéma cinématique (PS bloqué)

- **Couronne bloqué :** Il s'agit de la configuration la plus courante. En bloquant la couronne, deux rotations sont possibles : celle de la roue planétaire autour de son propre axe, ainsi que celle du porte-satellite autour du même axe.

En utilisant cette configuration, nous obtenons le mouvement nécessaire pour notre broyeur planétaire. En fixant les jarres aux satellites, nous obtenons deux autres mouvements possibles pour les jarres. Le premier est une rotation par rapport à leur propre axe, tandis que le deuxième est une rotation par rapport à l'axe de la roue planétaire, mais dans le sens inverse de la première rotation.

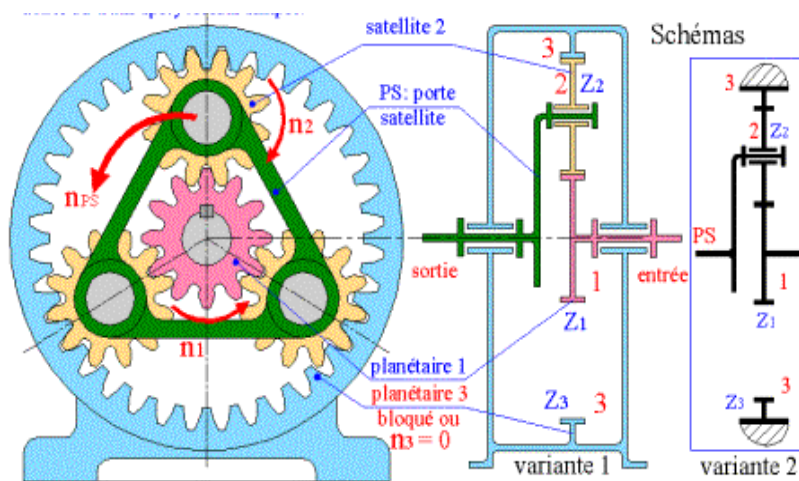


Figure 3.5 : schéma cinématique (couronne bloquée)

## 1.1.3. Poulie-courroie

Les courroies jouent un rôle essentiel dans la transmission de puissance entre deux arbres éloignés, l'un étant le moteur et l'autre le récepteur. Leur flexibilité permet un fonctionnement silencieux, un montage et un entretien faciles, ainsi qu'un amortissement des chocs, des vibrations et des à-coups. De plus, l'utilisation de courroies présente l'avantage de frais d'installation relativement faibles.

Cependant, il est important de noter que le rapport de transmission entre les deux arbres n'est pas constant en raison du glissement fonctionnel entre les courroies et les poulies. Ce glissement peut entraîner une légère variation du rapport de transmission, ce qui peut avoir un impact sur la précision de la transmission de puissance. Il est donc nécessaire de prendre en compte cette caractéristique lors de la conception et de l'utilisation des systèmes de transmission par courroie.

- **Avantages**

- 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 :

- **Inconvénients**

- Glissement et perte de puissance : En raison de la nature flexible des courroies, il peut y avoir un certain glissement entre les poulies et les courroies (On peut résoudre ce problème en utilisant une courroie crantée).
- Limites de charge et de puissance : Les systèmes de transmission par poulie et courroie ont généralement des limites de charge et de puissance inférieures par rapport aux transmissions par engrenages.

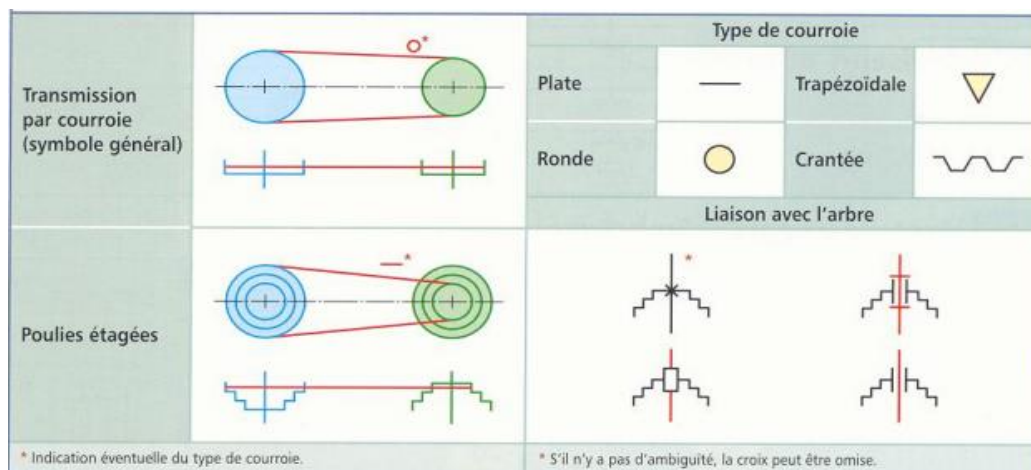


Figure 3.6 : schéma cinématique transmission poulie-courroie



**1.2. Schéma cinématique du broyeur planétaire**

Le modèle cinématique du broyeur est constitué de plusieurs sous-schémas cinématiques pour chaque élément, qui sont ensuite assemblés pour former le schéma complet du broyeur. Ceci permet de visualiser les différentes pièces de manière simplifiée.

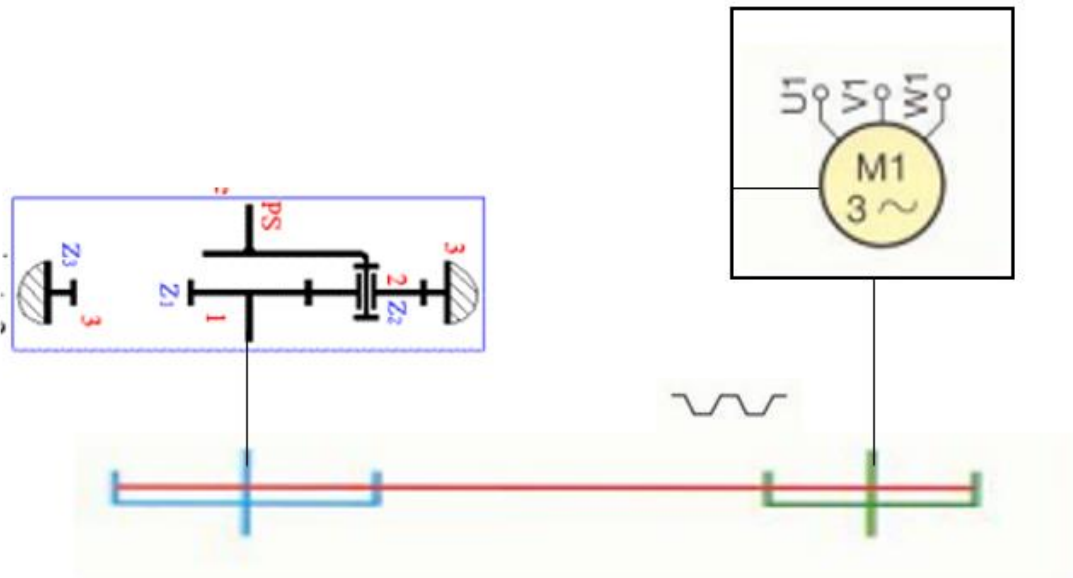


Figure 3.7: schéma cinématique broyeur planétaire

Tableau 3.1 : schéma cinématique du broyeur planétaire

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

**1.3. Explication du mécanisme**

Le fonctionnement du broyeur repose sur plusieurs éléments qui interagissent pour produire le mouvement nécessaire. Tout commence avec le moteur électrique, qui représente la source d'énergie. Ce moteur est alimenté et tourne à une vitesse élevée. Sa rotation est transmise à une petite poulie, qui est conçue pour tourner à la même vitesse que le moteur.

La petite poulie, à son tour, entraîne une grande poulie située à proximité. Cependant, la grande poulie est de taille supérieure à la petite poulie, ce qui a pour effet de réduire la vitesse de rotation. Cela signifie que la grande poulie tourne plus lentement mais avec un couple plus élevé. Ainsi, l'énergie du moteur est efficacement transférée à la grande poulie.

La rotation de la grande poulie est ensuite transmise à un arbre d'engrenage épicycloïdal. Cet arbre est conçu pour transmettre le mouvement de rotation à d'autres composants du broyeur. L'un de ces composants est la roue planétaire.

Lorsque le disque planétaire tourne, il entraîne également les roues satellites. Les satellites ont la particularité d'effectuer deux types de rotations distinctes. Tout d'abord, ils tournent par rapport à l'axe de rotation du planétaire, ce qui leur permet de suivre la trajectoire circulaire du disque. Ensuite, les satellites effectuent une rotation supplémentaire autour de leur propre axe, mais dans le sens opposé à la première rotation.

Ces rotations des satellites créent une force centrifuge à l'intérieur des jarres fixées aux satellites. Cette force centrifuge est générée par l'action de rotation des satellites et a pour effet de provoquer le mouvement des billes contenues dans les jarres. Ainsi, les billes sont mises en mouvement, ce qui permet le broyage et l'homogénéisation des matériaux présents dans les jarres.

## **2. Dimensionnement des éléments du broyeur planétaire**

### **2.1. Choix du moteur**

#### **2.1.1. Caractéristique du moteur choisi.**

Dans notre cas, en cas de réalisation de cette machine, nous avons effectué des recherches dans les catalogues des fabricants de moteurs en Algérie. Parmi ces catalogues, nous avons identifié le moteur (890-120-1064-0071 B3) chez ENEL, basé sur les critères de couple et de vitesse, avec les caractéristique suivant :

**Tableau 3.2: caractéristique du moteur**

Puissance nominale	$P = 2.2kW$
Vitesse de rotation	$N = 1500tr/min$
Vitesse de rotation nominale	$N_n = 1405tr/min$
Couple nominale	$C_n = 15Nm$
Diamètre d'arbre	$28k_6$

## 2.2. Choix du système poulie-courroie :

Comme mentionné précédemment, l'un des problèmes courants des courroies de transmission est le glissement. Le glissement se produit lorsque la courroie ne parvient pas à maintenir une adhérence solide avec les poulies ou les engrenages, ce qui peut entraîner une perte de puissance, une incohérence dans la transmission de la force et des problèmes de synchronisation.

Pour résoudre ce problème, une solution couramment utilisée est l'utilisation de courroies crantées. Les courroies crantées, également appelées courroies synchrones, sont dotées de dents le long de leur surface interne. Ces dents s'engrènent avec des poulies correspondantes qui possèdent également des dents, ce qui permet de créer une connexion solide et sans glissement entre la courroie et la poulie.

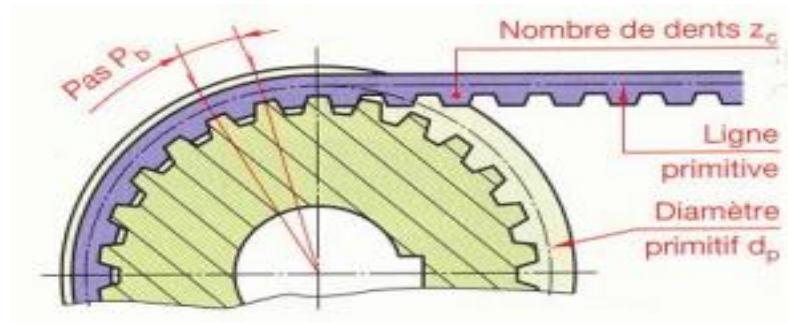


Figure 3.8 : schéma poulie-courroie cranté

## 2.2.1. Puissance effective :

D'après nos calculs précédents, nous avons obtenu les résultats suivants :

- Puissance du moteur :  $2.2kW$
- Vitesse de rotation de l'arbre du moteur :  $1500tr/min$
- Vitesse de rotation de l'arbre récepteur :  $1000tr/min$

Alors :

$$P_{eff} = k_s \times P_n$$

Avec :

$P_n$  est la puissance nominale du moteur

$k_s$  Est le coefficient de service

Le coefficient  $k_s$  est un coefficient qui dépend des conditions de fonctionnement du notre courroies, le tableau suivant nous donne les valeur a l'aide des critère qu'on peut les poser :

**Tableau 3.3 : Valeurs du coefficient de service ks**

Couple	Conditions de fonctionnement								
	8 heures/jour			16 heures/jour			24 heures/jour		
	uniforme	variable	très variable	uniforme	variable	très variable	uniforme	variable	très variable
Moteur électrique usuel ( $C_d = C_n \leq 2$ )	1	1,12	1,25	1,12	1,25	1,40	1,18	1,32	1,50
Démarrages ou inversions de sens fréquents	1,12	1,25	1,40	1,25	1,40	1,60	1,32	1,40	1,70
Moteur électrique à couple de démarrage élevé Moteur diesel à 1 ou 2 cylindres	1,18	1,32	1,50	1,32	1,50	1,70	1,40	1,60	1,80
Inversions de sens ou démarrages fréquents à fort couple de démarrage	1,32	1,50	1,70	1,50	1,70	1,90	1,60	1,80	2

- **Type de moteur** : on a un moteur électrique usuel
- **La temp de fonctionnement** : Selon les expériences menées sur ce modèle de broyeur, le temps de broyage pour une seule expérience peut varier entre 24h et 100h. Pour cette raison, nous prenons le temps de broyage moyen de 24h/jour.
- **La nature de 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.

Alors le coefficient de service :

$$k_s = 1.32$$

On obtient :

$$P_{eff} = 2.2 \times 1.32 = 2.904kW$$

### 2.2.2. Choix de la section de la courroie :

Le choix de la section appropriée pour la courroie est un élément important dans la conception du système de transmission. Pour cela, nous avons utilisé l'abaque fourni, qui prend en compte à la fois la puissance effective que nous avons calculée et la vitesse de rotation du moteur, qui est identique à celle de la poulie motrice.

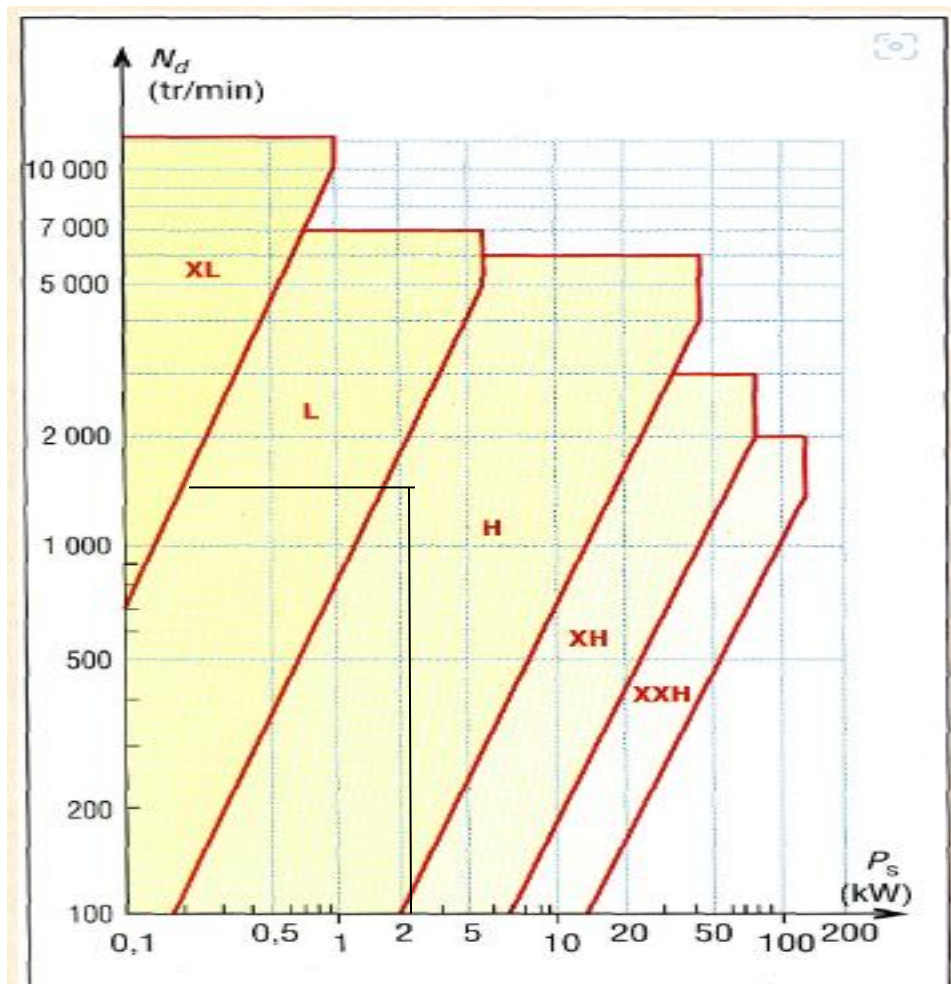


Figure 3.9 : gammes puissances transmissibles des courroies crantées.

En utilisant ces informations, nous avons déterminé que la courroie de type H était la section la plus adaptée pour notre application. La section H est conçue pour gérer des charges plus élevées et des vitesses de rotation plus élevées, ce qui correspond parfaitement à nos besoins.

## 2.3. Calcul de la courroie :

### 2.3.1. Rapport de réduction

On le calcule à l'aide de cette relation :

$$R = \frac{N_D}{N_d} = \frac{Z_d}{Z_D} = \frac{d_p}{D_p} \quad (3.1).[14]$$

Avec Z le nombre des dents de chaque poulie.

$$R = \frac{1500}{1000} = \frac{3}{2}$$

### 2.3.2. Nombre des dents :

Pour courroie de type H le tableau ci-dessous nous donne les valeurs à choisir :

**Nous avons choisi  $Z_d = 22$  pour la poulie motrice, alors et à l'aide de rapport de réduction on obtient :**

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

**Figure3.10 : nombre des dents des poulies**

$$Z_D = Z_d \times R$$

$$Z_D = 33$$

### 2.3.3. Diamètres des poulies :

Le diamètre est connu par la relation suivante :

$$\pi \times D = p \times Z_D \quad (3.2)$$

Avec

$p$  : 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. Comme nous avons choisi le type H de courroie, nous nous référons au tableau ci-dessous qui fournit les valeurs nécessaires. Ce tableau est utilisé comme guide pour sélectionner la poulie crantée appropriée en fonction du type de courroie et des spécifications requises.

**Tableau3.4 : dimensions principales courroies crantée (NF ISO 5294 et 5296)**

type	pas $p$		h mm	$\alpha$ deg.	largeur courroie mm	nombre de dents $Z_c$ longueur primitive courroie $L_p = p \cdot Z_c$	2a mm
	mm	pouces (")					
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  $p = 12.7mm$

On le remplace dans l'équation (3.2) :

$$D = 133.4mm \parallel d = 88.93mm$$

### 2.3.4. La vitesse linéaire :

- Pour la poulie motrice

$$V_1 = \frac{N_d \times p \times Z_d}{60} = 6.98m/s \quad (3.3)$$

- Pour la poulie réceptrice :

$$V_2 = \frac{N_D \times p \times Z_D}{60} = 6.95 \text{ m/s} \quad (3.4)$$

### 2.3.5. Puissance de base de la courroie $P_b$

La puissance de base d'une courroie crantée est la capacité maximale de la courroie à transmettre de la puissance sans glisser ou se détériorer. C'est la puissance maximale que la courroie peut supporter dans des conditions de fonctionnement normales, en maintenant une adhérence positive avec les poulies et en transmettant la force de manière fiable.

Pour calculer cette puissance, nous pouvons utiliser le graphe dans la (figure 3.11). Dans notre cas, nous utilisons la courbe correspondant au type de courroie H. nous effectuons une interpolation linéaire pour obtenir la valeur de puissance souhaitée. En utilisant cette approche, nous pouvons sélectionner la puissance appropriée pour notre application, en garantissant un fonctionnement efficace et fiable du système de transmission.

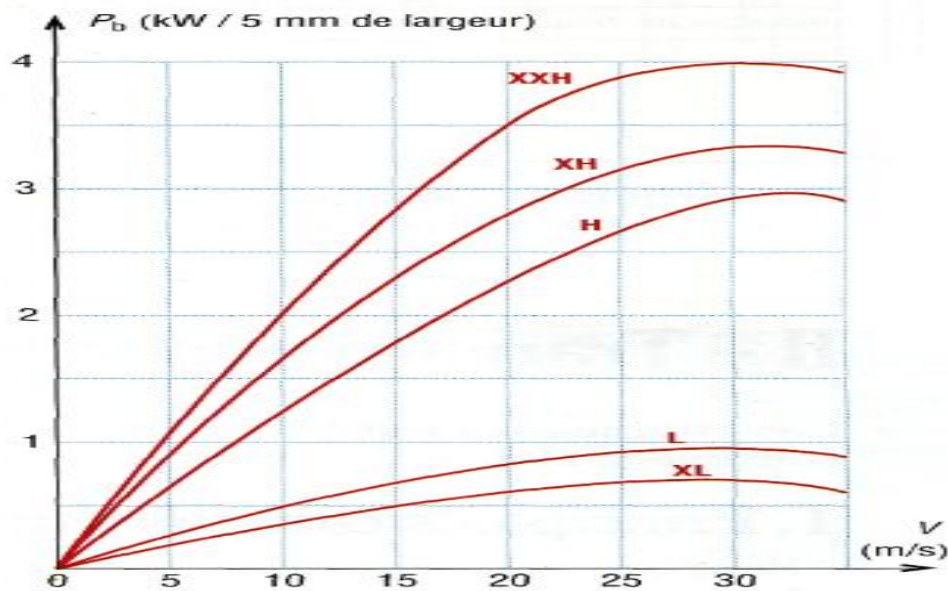


Figure 3.11 : puissance de base des courroies crantées.

$$V_0 = \frac{5m}{s} \Rightarrow P_{b_0} = 0.62 \text{ kW/5mm}$$

$$V_1 = \frac{10m}{s} \Rightarrow P_{b_1} = 1.2 \text{ kW/5mm}$$

À l'aide de ces Valeur on obtient :

$$P_b = 0.8462 \text{ kW/5mm}$$

De tableau ci-dessous on peut obtient la valeur de la largeur de la courroie :



**Tableau 3.5 : coefficient correcteur  $K_b$  et largeur  $b$  en fonction de type de courroie**

$K_b$	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

Pour la courroie de type H, il existe deux valeurs de référence :  $b$  et  $k_b$ . Nous sélectionnons la valeur minimale entre les deux et la multiplions par la puissance de base. Ensuite, nous vérifions si cette valeur satisfait les conditions requises  $P_{adm} \geq P_{eff}$ . Si la condition est satisfaite, nous conservons la valeur sélectionnée. Sinon, nous passons à la valeur suivante dans le tableau ou les références disponibles. Cette approche nous permet de choisir la valeur de la largeur appropriée en fonction des spécifications et des exigences de notre système de transmission, garantissant ainsi un fonctionnement optimal et sûr.

$$P_{adm} = P_b \times k_b = 3.05kW \quad (3.5)[14]$$

Alors :

$$P_{adm} > P_{eff}$$

Alors la condition est satisfaite et :

$$k_b = 3.6 \parallel b = 19.1mm$$

### 2.3.6. Calcul d'entraxe E :

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

$$E \geq \frac{D_p + d_p}{2} + d_p = 200.1mm \text{ si } 1 \leq \frac{D_p}{d_p} \leq 3 \quad (3.6)$$

$$E \geq D_p \text{ si } \frac{D_p}{d_p} > 3$$

Et comme mentionné précédemment dans 3.3.1 que  $R=1.5$  ce qui satisfait la 1ere condition et E doit être supérieur a  $\frac{D_p + d_p}{2}$  :

Passant maintenant à calculer de l'entraxe :

Le calcul de l'entraxe repose sur la résolution d'une équation quadratique. Nous fixons la valeur de  $Z_c$  à chaque itération et calculons l'entraxe correspondant. Ensuite, nous vérifions si cet entraxe satisfait la condition précédente. En d'autres termes, nous cherchons une valeur de l'entraxe qui, une fois calculée, répond aux exigences spécifiques de notre système. Cela implique de résoudre l'équation quadratique à chaque étape et de trouver la valeur appropriée pour assurer un bon fonctionnement et une performance optimale du système de transmission.

$$2E^2 + \left( \frac{(Z_d + Z_D)p}{2} - 4p \times Z_c \right) E + \left( \frac{p \times (Z_D - Z_d)}{2\pi} \right)^2 = 0 \quad (3.7)$$

Les valeurs normalisé du  $Z_c$  sont dans le tableau (3.4)

Pour :

$Z_c = 84$  On obtient  $E = 358.08mm$

$$E > 200.1$$

La conditions sur l'entraxe est satisfaite.

### 2.3.7. Fréquence de passage de la courroie

$$fr = \frac{V}{L_p}$$

Avec

- $V$  la vitesse linéaire
- $L_p$  La longueur primitive de la courroie

$$L_p = p \times Z_c \quad (3.8)$$

$$L_p = 1066.8mm$$

Alors on obtient

$$fr = 6.54Hz$$

Pour cette valeur de fréquence on peut choisir matériau synthétique : **polyuréthane**  
matériau synthétique :  $f_r$  peut atteindre 8Hz

### 2.3.8. Angle d'enroulement

L'angle d'enroulement d'une poulie fait référence à l'angle formé entre la courroie et la surface de la poulie lorsqu'elle est en contact. Cet angle est important car il détermine la zone de contact entre la courroie et la poulie.

- Angle d'enroulement de la petite poulie

$$\theta_a = \pi - 2 \sin^{-1} \left( \frac{D_p - d_p}{2E} \right) \quad (3.9)[33]$$

$$\theta_a = 2.26rad$$

- Angle d'enroulement de la grande poulie

$$\theta_D = \pi + 2 \sin^{-1} \left( \frac{D_p - d_p}{2E} \right)$$

$$\theta_D = 2.89rad$$

Tableau 3.6 : Récapitulatif des paramètres de conception

Le module	$a = 0.686mm$
Hauteur de courroie	$h = 4.3mm$
Hauteur de la dents	$r = \frac{h}{2} - a = 1.464mm$
Largeur au sommet de dent	$\frac{p}{2} - 2r \times \tan \left( \frac{\alpha}{2} \right) = 5.2843mm$
Diamètre de pied de la petite poulie	$d_p - h = 84.63mm$
Diamètre de pied de la grande poulie	$D_p - h = 129.1mm$
Diamètre extérieur de la petite poulie	$d_p - 2a = 86.186mm$
Diamètre extérieur de la grande poulie	$D_p - 2a = 130.66mm$

## 2.4. Dimensionnement du train épicycloïdal

Dans un broyeur planétaire, l'élément le plus crucial est l'engrenage planétaire. Il permet au broyeur planétaire d'obtenir le mouvement unique des jarres, et il joue également un rôle essentiel dans la réduction de la vitesse. Pour cela, il est nécessaire de dimensionner l'engrenage de manière à obtenir le rapport de vitesse souhaité. Les principales caractéristiques de cet ensemble sont le nombre de dents et le module  $m$ , qui sont calculés à partir des relations de Lewis. Les relations de Lewis sont des équations mathématiques utilisées pour déterminer la géométrie et les caractéristiques de résistance d'un engrenage, en prenant en compte des paramètres tels que le couple de transmission et les contraintes de contact.

### 2.4.1. Calcul nombre des dents d'engrenage planétaire

- La formule de Lewis :

$$\frac{n_1 - n_{ps}}{n_3 - n_{ps}} = (-1)^y \frac{Z_3}{Z_1} = (-1)^y \frac{\omega_1 - \omega_{ps}}{\omega_3 - \omega_{ps}} \quad (3.10)[21]$$

Selon la référence 2.1.2, afin d'obtenir le mouvement requis, il est nécessaire de bloquer la couronne dans le broyeur planétaire, ce qui se traduit par une vitesse angulaire  $\omega_3$  égale à zéro. En substituant cette condition dans l'équation (1), nous obtenons la formule de Lewis de la manière suivante.

- La formule de Lewis simplifiée

- Mode 1

L'entrée se fait par le soleil  $\omega_1$ .

La sortie par le porte-satellites  $\omega_{ps}$ .

$$r = \frac{\omega_{sortie}}{\omega_{entrée}} = \frac{\omega_{ps}}{\omega_1} = -\frac{Z_1}{Z_1 + Z_3} \quad (3.11)$$

- Mode 2 :

L'entrée se fait par le porte-satellites  $\omega_{ps}$ .

La sortie par le soleil  $\omega_1$ .

$$r = \frac{\omega_{sortie}}{\omega_{entrée}} = \frac{\omega_1}{\omega_{ps}} = -\frac{Z_1 + Z_3}{Z_1} \quad (3.12)$$

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

Pour pouvoir calculer les différentes dents de l'engrenage, il est en effet nécessaire de fixer le nombre de dents de la couronne. Une fois le nombre de dents de la couronne déterminé, on peut ensuite utiliser l'équation (3.11) pour calculer le nombre de dents des engrenages planétaires. L'équation (3.11) fournit une relation mathématique permettant de déterminer le nombre de dents des engrenages planétaires en fonction du nombre de dents de la couronne et du rapport de transmission souhaité. Cela permet d'obtenir les valeurs appropriées pour les dents de l'engrenage planétaire dans le broyeur planétaire.

En utilisant l'équation (3.11), il est possible de former une fonction  $f(Z_1)$  qui dépend du nombre de dents de la couronne. En faisant varier le nombre de dents de la couronne à chaque itération, on peut rechercher le meilleur rapport de transmission. En ajustant le nombre de dents de la couronne, on peut optimiser le rapport de transmission pour obtenir la meilleure performance possible dans le broyeur planétaire. En utilisant une approche itérative, cette méthode permet de trouver le nombre optimal de dents pour la couronne afin d'obtenir le rapport de transmission souhaité.

$$f(Z_1) = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_3} \quad (3.13)$$

Dans notre méthode, le rapport de transmission maximal que nous pouvons obtenir est de  $r=0.4$ . Nous ajusterons le nombre de dents de la couronne de manière itérative pour atteindre ce rapport de transmission spécifique.

Une fois que nous avons atteint le rapport de transmission maximal de  $r=0.4$ , nous considérons que nous avons trouvé la configuration optimale pour notre application.

Dans le cas où le rapport de transmission est constant (0.4), nous avons le choix entre deux configurations possibles : (60 ; 40) ou (90 ; 60). Cependant, pour des raisons de conception ou d'autres critères spécifiques, nous pouvons préférer la deuxième configuration (90 ; 60) qui offre une esthétique ou d'autres avantages particuliers. Notre choix final dépendra des contraintes et des préférences propres à notre application, tout en maintenant le rapport de transmission souhaité.

Tableau 3.7 : Nombre de dents de la roue planétaire en fonction de la couronne.

Nombre de dents de la couronne	La fonction $f(Z_1)$	Nombre de dents d'engrenage planétaire
60	$\frac{Z_1}{Z_1 + 60}$	40
70	$\frac{Z_1}{Z_1 + 70}$	46.66
80	$\frac{Z_1}{Z_1 + 80}$	53.33
90	$\frac{Z_1}{Z_1 + 90}$	60

### 2.4.2. Nombre des dents des roues satellites :

En effet, lorsque les roues 1, 2 et 3 engrènent ensemble dans un système d'engrenage, il existe une relation liant les diamètres primitifs de ces roues. Cette relation est basée sur le principe fondamental de l'engrenage, qui stipule que le rapport de vitesse entre deux engrenages en contact est égal au rapport de leurs diamètres primitifs.

$$D_3 = D_1 + 2D_2$$

À partir de cette relation, nous pouvons conclure que

$$Z_3 = Z_1 + 2Z_2 \tag{3.14}$$

Alors :

$$Z_2 = \frac{Z_3 - Z_1}{2} = 15$$

### 2.4.3. Calcul du module m :

Le module normalisé peut être calculer à l'aide de la formule suivante, Dans cette expression le module est fonction de la puissance à transmettre

$$m_n \geq 2.34 \sqrt{\frac{F_t}{k \times \sigma_{adm}}} \quad (3.15)[2]$$

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

$$F_t = \frac{2P}{\omega \times m_n \times Z} \quad (3.16)$$

On remplace (3.16) dans (3.15) on obtient :

$$m_n^{1.5} \geq 2.34 \sqrt{\frac{2P}{k \times \sigma_{adm} \times \omega \times Z}} \quad (3.17)$$

La résistance pratique du matériau, symbolisée par  $\sigma_{adm}$ , est un paramètre important à prendre en compte. Dans notre cas spécifique, nous avons choisi d'utiliser le matériau **C45E** qui présente une résistance à l'extension ( $Re$ ) de 650 MPa. En fixant le coefficient de sécurité  $s$  à 3, nous pouvons ainsi calculer la valeur de la résistance pratique  $\sigma_{adm}$  de manière adéquate.

$$\sigma_{adm} = \frac{Re}{s} = 216.66 MPa \quad (3.18)$$

Alors le module :

- Pour la roue planétaire :

$$m_n \geq \sqrt[1.5]{2.34 \times \sqrt{\frac{2 \times 2.2 \times 10^3}{12 \times 216.66 \times \frac{\pi \times 1000}{30} \times 60 \times 10^{-3}}}} = 1.14$$

On prend

$$m_n = 2$$

Pour les roues satellites :

$$m_n \geq \sqrt[1.5]{2.34 \times \sqrt{\frac{2 \times 2.2 \times 10^3}{12 \times 216.66 \times \frac{\pi \times 400}{30} \times 15 \times 10^{-3}}} = 2.54$$

On choisit alors le module normalisé à partir de la série principale tel que :

$$m_n = 3$$

### 2.4.4. Détermination des diamètres primitifs :

À partir du nombre de dents de chaque élément et du module, il est possible de déduire le diamètre selon la relation suivante :

$$d = m_n Z \tag{3.19}$$

- Diamètre de la couronne :

$$d_c = 3 \times 90 = 270mm$$

- Diamètre de la roue planétaire :

$$d_p = 3 \times 60 = 180mm$$

- Diamètre des roues satellites

$$d_s = 3 \times 15 = 45mm$$

### 2.4.5. 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 3.8 : caractéristique d'un engrenage droit**

Désignation	Symbole	Formule	Unité	Couronne	Planétaire	Satellites
Nombre de dents	$Z$	Willis		90	60	15
Diamètre primitif	$D$	$D = m_n \times Z$	mm	270	180	45
Diamètre de tête	$D_a$	$D_a = D + 2$	mm	272	182	47
Diamètre de pied	$D_f$	$D_f = D - 2.5$	mm	267.5	177.5	42.5
Diamètre du cercle de base	$D_b$	$D_b = D \cos(\alpha)$	mm	261.4	174.27	43.57
Saillie	$h_a$	$h_a = m_n$	mm	3	3	3
Creux	$h_a$	$h_a = 1.25m$	mm	1.25	1.25	1.25
Hauteur de dent	$h$	$h = 2.25mm$	mm	2.25	2.25	2.25
Pas	$p$	$p = \pi m_n$	mm	9.42	9.42	9.42
Largeur de denture	$b$	$b = km_n$	mm	30	30	30

## 2.5. Choix des jarres :

Les jarres sont les récipients dans lesquels se produit le phénomène de broyage. Elles jouent un rôle crucial dans le processus de broyage. Afin d'améliorer notre broyeur, nous envisageons d'ajouter différentes variantes de jarres. La différence entre ces variantes réside dans leur volume respectif. Il est essentiel de prendre cette décision dès maintenant afin de pouvoir dimensionner correctement l'arbre dans la prochaine section du processus de conception.

### 2.5.1. Dimensions des jarres :

Le volume des jarres est un paramètre crucial dans notre application. Pour identifier les différentes variantes, nous nous sommes basés sur des broyeurs déjà existants. En étudiant ces broyeurs, nous avons pu observer différentes capacités de jarres utilisées et les performances correspondantes.

**Tableau 3.9 : 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

**2.5.2. Matériau des jarres :**

Dans cette section, nous avons sélectionné le matériau pour les jarres, car il s'agit d'un paramètre très important pour éviter toute casse ou fissure. Après une évaluation minutieuse, nous avons choisi d'utiliser l'acier inoxydable de type AISI 304. Ce matériau présente une excellente résistance à la corrosion et une bonne résistance mécanique, ce qui le rend adapté à notre application. En optant pour l'AISI 304, nous nous assurons que les jarres sont durables, fiables et résistantes aux conditions de broyage auxquelles elles seront soumises.

**Tableau3.10 : Les propriétés physiques du matériau choisi**

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

**2.5.3. 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

**2.5.4. Conclusion**

Ces variantes présentent des volumes et des poids différents. Pour notre cas, nous devons choisir une variante avec laquelle nous pouvons travailler. Par conséquent, nous optons pour la

deuxième variante qui offre un volume total de 1 litre réparti entre les deux jarres, tout en minimisant le poids.

## 2.6. Dimensionnement d'arbre :

Cet arbre joue un rôle essentiel dans la transmission du mouvement de rotation entre la poulie réceptrice et la roue planétaire. Afin de procéder à sa dimensionnement, il convient d'examiner les charges auxquelles il est soumis.

Dans notre cas, l'arbre est soumis à trois types de sollicitations : la flexion, la torsion et la compression. Pour dimensionner adéquatement l'arbre et garantir sa résistance aux trois types de sollicitations, nous allons calculer le diamètre requis pour chacune d'entre elles. Ensuite, nous sélectionnerons le diamètre le plus grand parmi ces calculs afin de nous assurer que l'arbre puisse résister aux trois types de sollicitations de manière appropriée. Cette approche permettra de garantir la résistance et la fiabilité de l'arbre face à ces différentes contraintes mécaniques.

- Cahier de charge :
  - Puissance délivrée sur l'arbre :  $P = 2.2kW$
  - Vitesse de rotation de l'arbre :  $N = 1000tr/min$

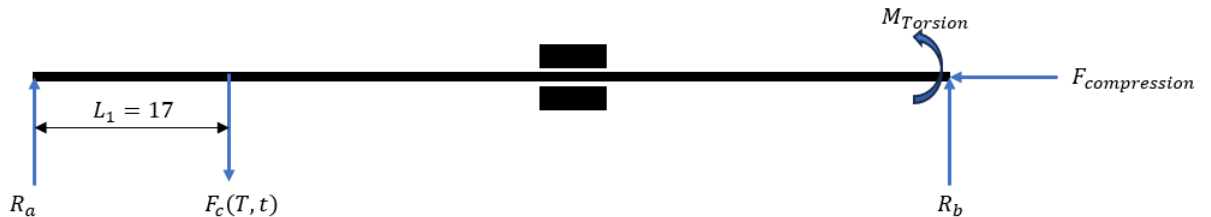


Figure 3.12: Représentation des efforts appliqués sur l'arbre

### 2.6.1. La Tension dans la courroie :

$$F_c = T \cos\left(\frac{\theta_d}{2}\right) - t \cos\left(\frac{\theta_d}{2}\right) \quad (3.20)[35]$$

Pour calculer  $F_c$  on doit calculer T et t on premier :

- La puissance transmise par une courroie peut être calculée à l'aide de la formule suivante

$$P = (T - t) \times V \quad (3.21)[35]$$

La tension de la courroie dépend de la charge et des caractéristiques de la courroie, tandis que la vitesse de la courroie est la vitesse linéaire à laquelle la courroie se déplace.

- Une autre équation, connue sous le nom d'équation d'Euler, permet d'établir la relation entre les deux tensions d'une courroie en fonction de l'angle d'enroulement tel que.

$$\frac{T}{t} = e^{f\theta_d} \quad (3.22)[35]$$

Pour calculer cette force maintenant on doit résoudre ce système de 2 variables a 2 équations on trouve :

$$T = \frac{P \times e^{f\theta_d}}{V \times (e^{f\theta_d} - 1)} = 485.77N \quad (3.23)[35]$$

Et

$$t = \frac{T}{e^{0.5 \times 2.26}} = 156.92N \quad (3.24)$$

En utilisant la formule (3.12) pour calculer  $F_c$  on trouve :

$$F_c = 140.31N$$

### 2.6.2. Les réaction dans A et B :

A : Les paliers à roulement et B : La roue planétaire subisse une réaction en réponse à la force exercée par la courroie.

Tel que :

- $R_a = 118.63N$
- $R_b = 21.68N$

### 2.6.3. Le coefficient de sécurité :

Les coefficients de sécurité jouent un rôle essentiel dans le dimensionnement des dispositifs, car ils permettent de prendre en compte les charges potentiellement excessives. En effet, il est important de considérer la possibilité d'une utilisation inadaptée ou d'éventuelles situations exceptionnelles qui pourraient entraîner des contraintes supplémentaires.

Valeurs indicatives				
s	Charges exercées sur la structure	Contraintes dans la structure	Comportement du matériau	Observations
1 < s < 2	régulières et connues	connues	testé et connu	fonctionnement constant sans à-coups
2 < s < 3	régulières et assez bien connues	assez bien connues	testé et connu moyennement	fonctionnement usuel avec légers chocs et surcharges modérées
3 < s < 6	moyennement connues	moyennement connues	non testé	
	mal connues ou incertaines	mal connues ou incertaines	connu	

**Figure3.13 : Valeurs du coefficient de sécurité s**

Dans notre étude, nous avons choisi un coefficient de **sécurité de 2.5** pour assurer une marge de sécurité adéquate dans la conception du dispositif. Ce coefficient permet de tenir compte des charges potentiellement excessives et des conditions réelles d'utilisation, garantissant ainsi la résistance et la fiabilité du système.

### 2.6.4. Moment fléchissant :

Pour calculer le moment fléchissant maximal, il est nécessaire de commencer par établir le diagramme des efforts tranchants.

Avec :

- $T_1 = R_a = 118.63N$
- $T_2 = R_a - F_c = -21.88N$

$$T_y = -\frac{\partial M_f_z}{\partial x} \quad (3.25)$$

Et le moment des fléchissant :

- $M_1 = R_a x$
- $M_2 = R_b x - F_c(x - 17)$

Et à l'aide de ces résultat on trouve que :

En considérant la valeur imposée de  $L = 50 \text{ mm}$ , nous obtenons que le moment de flexion maximal

$$Mf_{max} = 2.02 \times 10^3 N.mm$$

### 2.6.5. Le moment torsion :

Dans notre cas, le moment de torsion est le moment transmis par le moteur sur l'arbre, ce moment est calculé à partir de la relation suivante :

$$P = M_t \times \omega_d \quad (3.26)$$

De l'équation (3.18) on trouve :

$$M_t = \frac{P}{\omega_d} = \frac{30P}{\pi N_d} = 21 \times 10^3 N \cdot mm \quad (3.27)$$

### 2.6.6. Choix du matériau de l'arbre :

Pour notre arbre, nous avons sélectionné un acier de construction mécanique de la famille des aciers non alliés. Nous avons opté pour l'acier de type **A60**, qui désigne un acier ordinaire avec une résistance minimale à la rupture de **600 MPa**. Il est important de souligner que cette valeur indique la capacité de l'acier à résister aux forces de traction jusqu'à ce seuil spécifique sans se rompre.

De plus, il est essentiel de considérer la valeur **limite d'élasticité** de cet acier, qui est de **335 MPa**.

En choisissant cet acier A60, nous nous assurons d'avoir un matériau de construction solide et capable de résister aux charges et contraintes auxquelles notre arbre sera soumis dans notre application spécifique.

### 2.6.7. Calcul du diamètre de l'arbre à la flexion

L'arbre est soumis à une contrainte de flexion causée par la force de tension de la courroie  $F_c$ .

C'est possible de déterminer la contrainte maximale à la flexion par la relation suivante :

$$\sigma = \frac{M f_{max} \times r_{max}}{IG_0} \quad (3.28)$$

Avec :

$$IG_z = \frac{\pi \times d^4}{64} \quad (3.29)$$

On remplace (3.21) dans (3.20) on obtient :

$$\sigma = \frac{32Mf}{\pi \times d^3} \leq \frac{\sigma_e}{s} \quad (3.30)$$

Alors :

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32 \times Mf_{max}}{\pi \times \frac{\sigma_e}{s}}} = 8.10mm$$

On prend le diamètre a la flexion :

$$d = 10mm$$

**2.6.8. Calcul du diamètre de l'arbre à la torsion :**

Dans la section précédente, nous avons calculé le moment de torsion en fonction des spécifications définies dans le cahier des charges de notre étude. Ce moment de torsion est une donnée essentielle pour dimensionner le diamètre de l'arbre tel que :

$$M_t = 21 \times 10^3 N \cdot mm$$

En utilisant les mêmes données utilisées pour le calcul du diamètre de l'arbre à la flexion et en prenant en compte le moment de torsion calculé, nous allons procéder au calcul du diamètre de l'arbre spécifiquement pour la torsion.

Il est important de noter que la contrainte maximale à la torsion d'un matériau peut être calculée en utilisant la relation suivante :

$$\tau_{max} = \frac{M_t \times d_{max}}{2 \times I_G} \quad (3.31)$$

Avec :

- $I_G$  Moment quadratique polaire en  $mm^4$
- $r_{max}$  Est la rayon maximal de l'arbre

$$I_G = \frac{\pi \times d^4}{32} \quad (3.32)$$

On remplace (3.21) dans (3.20) on obtient la formule de rayon d'arbre comme suit :

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{16 \times M_t}{\pi \times 0.7 \times \frac{\sigma_e}{s}}} = 10.45mm$$

On prend pour diamètre :

$$d = 15mm \quad (3.33)$$

### 2.6.9. Calcul du diamètre de l'arbre à la compression :

La contrainte normale de compression est donnée par :

$$\sigma_c = \frac{4F_{compression}}{\pi d^2} \geq \sigma_e \quad (3.34)$$

Avec :  $\sigma_e = Re = 335MPa$

Alors on obtient :

$$d \geq \sqrt{\frac{4 \times (5.581 \times 2 + 2 \times 5.52 + 12.54) \times 9.81 \times 10^{-1}}{\pi \times 33.5}}$$

Alors puisque le diamètre le plus grand et celui de la traction, on doit le prendre comme un diamètre pour notre arbre

### 2.6.10. Vérification du diamètre par critère tersca et von mises

Dans notre étude, nous avons un arbre qui est soumis à la flexion et à la torsion, et nous pouvons négliger l'effet de la compression par rapport à ces deux contraintes. Afin de vérifier la dimension du diamètre de l'arbre que nous avons calculé, nous allons appliquer les critères de contrainte de Tresca et de von Mises.

- Contrainte normale de compression :  $\sigma_c = \frac{4 \times F_{comp}}{\pi \times d^2} = 1.83MPa$
- Contrainte normale de flexion :  $\sigma_f = \frac{32 \times Mf}{\pi \times d^3} = 21.19MPa$
- Contrainte tangentielle de torsion :  $\tau_t = \frac{16 \times M_t}{\pi \times d^3} = 31.7MPa$

**Le critère de Tresca** consiste à comparer la contrainte maximale de cisaillement admissible avec la contrainte de cisaillement résultant des charges de flexion et de torsion appliquées sur l'arbre. Si la contrainte de cisaillement calculée dépasse la limite admissible définie par le matériau, cela indiquerait une possible déformation ou rupture de l'arbre.



$$\sigma_e = \sqrt{(\sigma_t + \sigma_f)^2 + 4(\tau_t + \tau_f)^2} \quad (3.35)$$

$$\sigma_e = 67.45MPa < \frac{\sigma_e}{s} = MPa$$

**Le critère de von Mises**, également connu sous le nom de critère de déformation équivalente, tient compte de la contrainte de cisaillement et de la contrainte normale pour évaluer la déformation plastique du matériau. Si la déformation équivalente calculée dépasse la limite admissible, cela pourrait indiquer une possible déformation permanente ou rupture de l'arbre.

$$\sigma_e = \sqrt{(\sigma_t + \sigma_f)^2 + 3(\tau_t + \tau_f)^2} \quad (3.36)$$

$$\sigma_e = 59.54MPa < \frac{\sigma_e}{s} = 134MPa$$

Ces valeur doit être inferieur a  $\sigma_{adm}$  du matériau

On remarque que les 2 conditions sont satisfaites donc on peut prendre  **$d = 15mm$**

**Conclusion :**

Après avoir pris en compte tous les paramètres précédents, nous avons décidé d'opter pour un arbre d'un diamètre de 15 mm. En choisissant ce diamètre, nous nous assurons également de respecter les critères de résistance requis, avec un coefficient de sécurité d'environ 3. Cela nous permet d'avoir une marge de sécurité adéquate pour assurer la fiabilité et la durabilité de l'arbre dans son application spécifique.

**2.7. Dimensionnement des roulements :**

Les roulements sont des composants mécaniques utilisés pour permettre le mouvement de rotation des arbres et des moyeux. Ils sont largement utilisés dans le domaine de la construction mécanique et sont disponibles dans une variété de types, tels que les roulements à billes, à rouleaux cylindriques, à rouleaux coniques, à aiguilles, et les butées à billes. Ces roulements sont conçus pour être utilisés tels quels, sans nécessiter de modifications supplémentaires.

Un roulement est composé d'une bague intérieure qui se monte sur l'arbre, d'une extérieure qui se loge dans le moyeu (alésage ou logement), des éléments roulants (billes, cylindres,

cônes, aiguilles, etc...) et, généralement, d'une cage pour maintenir ces éléments roulants dans leur position relative.

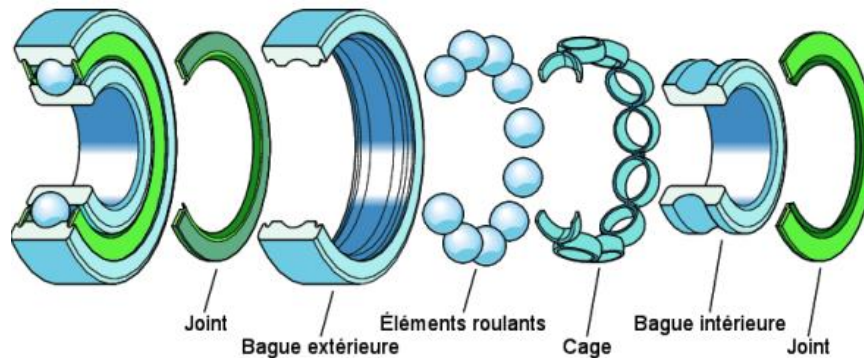


Figure 3.14 : Composants d'un roulement à billes

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.

### 2.7.1. 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.
- **Roulements rigides à billes**

Les roulements mentionnés sont conçus pour supporter des charges radiales de niveau moyen et des charges axiales relativement faibles. Ils offrent un angle de rotulage admissible de 2 à 16°.

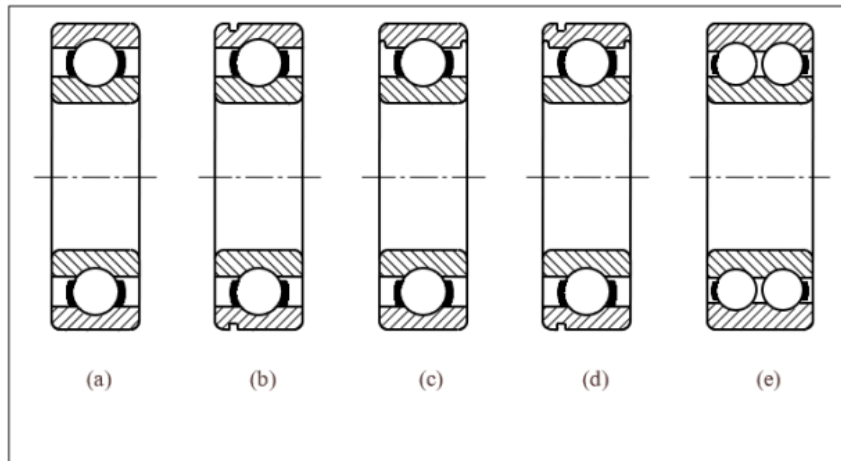


Figure 3.15 : Roulements rigides à billes

- a) À une rangée de billes (exécution de base)
- b) À une rangée de billes à rainure pour segment d'arrêt
- c) À une rangée de billes avec gorges de mise en place de joints ou de flasques (exécution de base)
- d) À une rangée de billes à gorges et à rainure pour segment d'arrêt
- e) À deux rangées de billes.

• **Roulements à contact oblique**

Les roulements mentionnés sont capables de supporter des charges radiales et axiales de niveau moyen. Ils présentent un angle de rotulage allant de 1 à 2°.

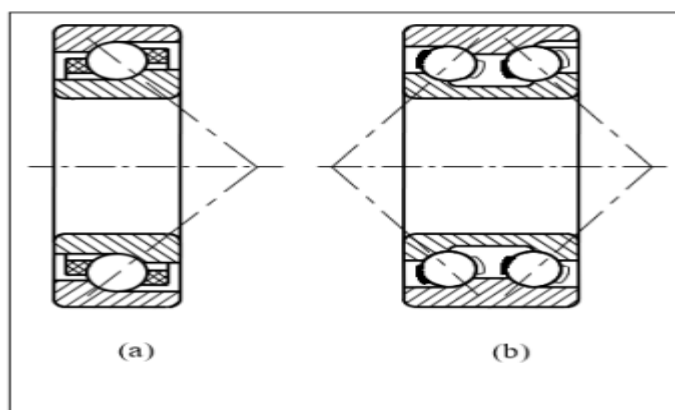
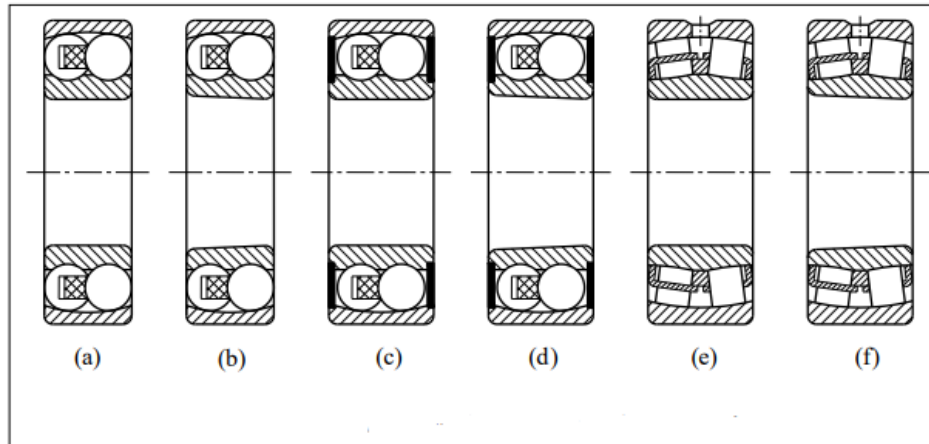


Figure 3.16 : roulements à billes à contact oblique

- **Roulements à rotule sur billes et sur rouleaux sphériques**

Ces roulements peuvent supporter des charges radiales et axiales. Les roulements à billes conviennent aux charges radiales moyennes et aux charges axiales faibles à moyennes suivant le type de roulement (faible pour (a) et (b), moyenne pour (c)). Lorsque la capacité de charge est insuffisante pour les rotules sur billes, on peut recourir aux roulements à rotules sur rouleaux sphériques. L'angle de rotulage est de 1,5 à 3.



**Figure 3.17 : Roulements à rotules sur billes et sur rouleaux sphériques**

- a) A deux rangées de billes à alésage cylindrique (exécution de base)
- b) A deux rangées de billes à alésage conique (exécution de base, conicité : 1/12)
- c) A deux rangées de billes avec joints à alésage cylindrique
- d) A deux rangées de billes avec joints à alésage conique (conicité : 1/12)
- e) A rouleaux sphériques à alésage cylindrique
- f) A rouleaux sphériques à alésage conique (conicité : 1/12)

- **Roulements à rouleaux cylindriques et à rouleaux coniques**

Les roulements à rouleaux cylindriques ne supportent que des charges purement radiales et exigent un alignement des bagues excellent (**rotulage : 2 à 4'**).

Les roulements à rouleaux coniques conviennent aux charges radiales et axiales importantes, mais ils exigent aussi un excellent alignement des bagues (**rotulage : 1 à 4'**).

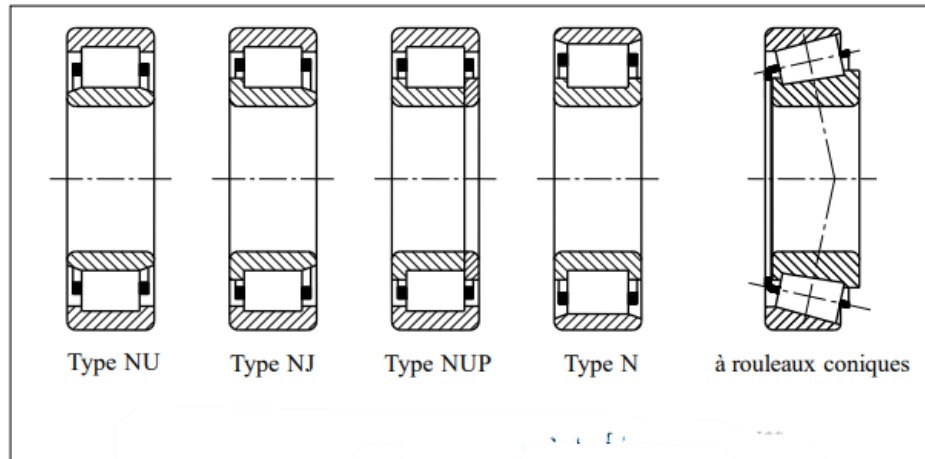


Figure 3.18: Roulements à rouleaux cylindriques et à rouleaux coniques

- **Roulements à aiguilles**

Ces roulements se caractérisent par des éléments roulants cylindriques ayant une longueur importante par rapport à leur diamètre. Les roulements sans bague intérieure sont utilisés lorsque les chemins de roulement nécessaires peuvent être traités par trempe et rectification sur l'arbre. En revanche, les roulements avec bague intérieure sont utilisés dans les assemblages où il est impossible ou trop coûteux de réaliser ces traitements sur l'arbre. Il est important de noter que ces roulements ne supportent que des charges radiales et ne tolèrent pratiquement aucun angle de rotulage.

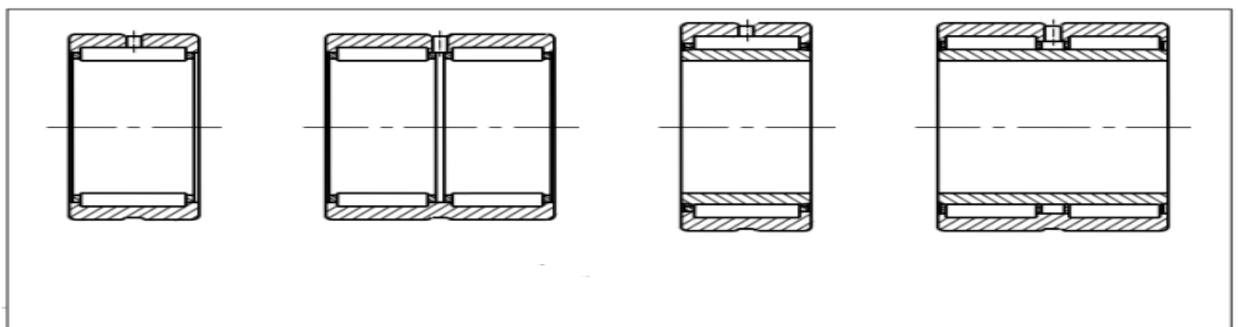


Figure 3.19: Roulements à aiguilles à épaulement avec ou sans bague intérieure

### 2.7.2. Choix des roulements

Le roulement que nous avons choisi de dimensionner a pour fonction de guider le mouvement de rotation inverse des jarres, en supportant principalement des charges radiales provenant du disque. Dans ce cas, il est essentiel de choisir un roulement capable de résister à ces charges radiales.

Les roulements rigides à billes sont particulièrement adaptés à cet usage, comme mentionné précédemment. Pour assurer un bon ajustement par serrage, nous optons pour un roulement de diamètre 15 mm, correspondant au diamètre de l'arbre qui est de **15 mm**. Cette combinaison garantira un couplage efficace et fiable entre l'arbre et le roulement.

Nous avons choisi le roulement de la désignation **61802** pour notre application. Ce roulement est de type ouvert et est protégé des deux côtés. Ses caractéristiques comprennent :

**Tableau3.12 : Caractéristiques du roulement choisi**

$d$ (mm)	$D$ (mm)	$B$ (mm)	Charge dynamique $C$ (KN)	Charge statique $C_0$ (KN)	Limite de fatigue $P_u$ (KN)
15	24	5	1.9	1.1	0.048

### 2.7.3. Calcul de la durée de vie du roulement

La durée de vie d'un roulement est principalement influencée par la charge dynamique équivalente, qui sera calculée ultérieurement, ainsi que par la charge dynamique de base du roulement. Cette charge dynamique de base est une caractéristique spécifique du roulement et est fournie dans le catalogue SKF selon tableau 12.

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60N} \times \left(\frac{C}{P}\right)^n \quad (3.37)[31]$$

➤ On prend :

$n = 3$  Parce que nous utilisons des roulements à billes

$P$  : Charge dynamique équivalente

La charge dynamique équivalente est calculée en fonction des charges radiales exercées sur les roues satellites. Ces charges peuvent être déterminées en utilisant les rayons et les vitesses appropriées.

Alors :

$$F_a = 0$$
$$F_r = 239.87N$$

Alors la charge dynamique équivalente est comme suite :

$$\begin{cases} P = F_r \text{ si } \frac{F_a}{F_r} \leq e \\ P = XF_r + YF_a \text{ si } \frac{F_a}{F_r} > e \end{cases}$$

Dans notre cas  $P = F_r$  dans tous les cas puisque  $F_a$  est nulle :

Alors :

$$P = 239.87N$$

➤ N la vitesse de rotation est calculer à l'aide de la formule suivant :

$$N = \frac{N_{planétaire}}{r}$$

Avec r est le rapport vitesse de révolution / vitesse de rotation.

$$r = \sqrt{\frac{D_{dis}}{D_j - D_b} - 1} = 1.52 \quad [14]$$

- $D_{dis}$  : diamètre du disque planétaire
- $D_j$  : diamètre intérieur des jarres.
- $D_b$  : diamètre des billes

Alors on trouve :

$$N = \frac{400}{1.52} = 263.16$$

• **Calcul de la durée de vie :**

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

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \times 158} \times \left( \frac{1900}{263.16} \right) = 39700.21 \text{ heures}$$

• **Coefficient de sécurité statique  $s_0$**

Il est donné par la relation suivant :

$$s_0 = \frac{C_0}{P_0} \quad (3.38)$$

Avec  $P_0$  Charge statique équivalente tel que :

$$P_0 = F_r = 239.87N \quad (3.39)$$

Alors on trouve :

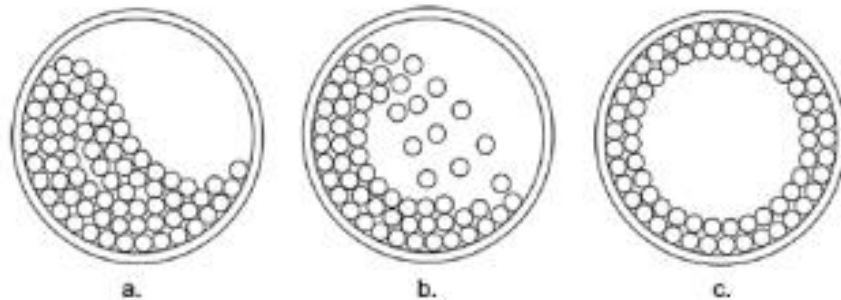
$$s_0 = \frac{1100}{239.87} = 4.59 > 2$$

## 2.8. Les billes

Les billes d'un broyeur planétaire sont des éléments essentiels du processus de broyage. Elles sont généralement fabriquées en acier durci ou en céramique et sont de petites sphères de taille uniforme. Ces billes sont chargées dans la chambre de broyage du broyeur et sont soumises à des forces de compression, d'impact et de frottement lorsqu'elles entrent en collision avec le matériau à broyer. Leur mouvement rotatif et leur énergie cinétique 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 du broyage pour assurer une performance optimale du broyeur planétaire.

### 2.8.1. Les performances des billes dans le broyeur planétaire :

L'énergie d'impact optimale peut être atteinte lorsque la dissipation d'énergie est réduite. Ainsi, le mouvement de la balle dans le flacon doit être caractérisé par un effet d'érosion, ce qui permettra à la balle de se détacher du mur et de bombarder les poudres avec une énergie d'intensité élevée, comme le montre la figure ci-dessous.



**Figure 3.20: le mouvement des billes dans une jarre**  
(a) en cascade, (b) en érosion, (c) en roulis.



### 2.8.2. Choix de billes :

Le choix des billes dans un broyeur planétaire est un aspect crucial pour garantir une efficacité et une performance optimales du processus de broyage. Plusieurs facteurs sont pris en compte lors de la sélection des billes appropriées.

Tout d'abord, le matériau des billes est important. Les billes choisis sont en acier 1020 (**AIISI C1020**)

Tableau 3.13 : Les propriétés physiques du matériau choisi

Densité	$7.77\text{ g/cm}^3$
Module de Young	$200\text{ GPa}$
Coefficient de Poisson	0.29

Ensuite, la taille des billes est également un paramètre crucial. Les billes sont disponibles dans une gamme de tailles différentes, allant de quelques micromètres à plusieurs millimètres. La taille des billes est sélectionnée en fonction de la taille des particules cibles souhaitée dans le produit final et de la capacité du broyeur planétaire à gérer différentes tailles de billes, Pour notre cas, nous choisirons un diamètre de  $14\text{ mm}$ .

Enfin, la charge en billes, c'est-à-dire la quantité de billes ajoutée dans la chambre de broyage, est également prise en compte. Une charge en billes appropriée assure un bon mélange et un mouvement efficace des billes pendant le processus de broyage, ce qui contribue à une fragmentation uniforme et efficace du matériau, Le nombre optimal de billes que nous avons choisi est de **5 à 12** billes par jarre.

### Conclusion :

Le roulement que nous avons choisi répond parfaitement aux conditions de travail de notre broyeur, avec une durée de vie élevée et un coefficient de sécurité important. Nous sommes donc confiants dans notre décision de sélectionner ce roulement pour notre application.

## **Chapitre 04 : Conception et simulation numérique**

**Introduction :**

La conception et la simulation sont des aspects essentiels de nombreux domaines, tels que l'ingénierie, l'informatique et les sciences. Elles permettent de développer des modèles virtuels qui représentent des systèmes réels, afin d'analyser leur comportement, de prédire leurs performances et d'optimiser leur conception.

La conception consiste à créer des modèles conceptuels et physiques d'un système, en utilisant des outils tels que des logiciels de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) ou des schémas. Elle englobe la phase de spécification des exigences, la création de prototypes virtuels et la conception détaillée du système.

La simulation, quant à elle, implique l'utilisation de ces modèles pour exécuter des expériences virtuelles et étudier le comportement du système dans différentes conditions. Les simulations peuvent être utilisées pour évaluer les performances, détecter les problèmes potentiels, optimiser les paramètres de conception et prendre des décisions éclairées.

Dans cette discussion, nous allons explorer plus en détail les principes, les méthodologies et les outils utilisés dans le domaine de la conception et de la simulation, ainsi que les avantages et les applications concrètes de ces techniques.

**1. Les logiciels utilisés pour la conception et la modélisation**

Dans le domaine de l'ingénierie, l'utilisation de logiciels de conception est essentielle. Ces outils nous permettent de visualiser le résultat de nos conceptions avant de les réaliser concrètement. Parmi les logiciels les plus couramment utilisés, on retrouve SolidWorks, Ansys, ABAQUS, etc. Ces logiciels sont capables de traiter des problèmes complexes en utilisant un grand nombre de variables, allant de mille à quelques centaines de milliers.

Cependant, avant de pouvoir utiliser efficacement ces programmes pour résoudre des problèmes réels, un travail préparatoire approfondi est nécessaire. La complexité de ces logiciels demande une approche méthodique pour obtenir des résultats précis et fiables.

Les logiciels d'ingénierie mécanique sont utilisés dans divers secteurs industriels. Ils sont particulièrement utiles pour la conception de machines industrielles, l'industrie automobile et la production de biens de consommation. Ces logiciels permettent aux ingénieurs de modéliser,

d'analyser et d'optimiser leurs conceptions avant de passer à la phase de fabrication. Cela permet de réduire les coûts, d'améliorer l'efficacité et d'anticiper d'éventuels problèmes avant qu'ils ne se manifestent dans la réalité.

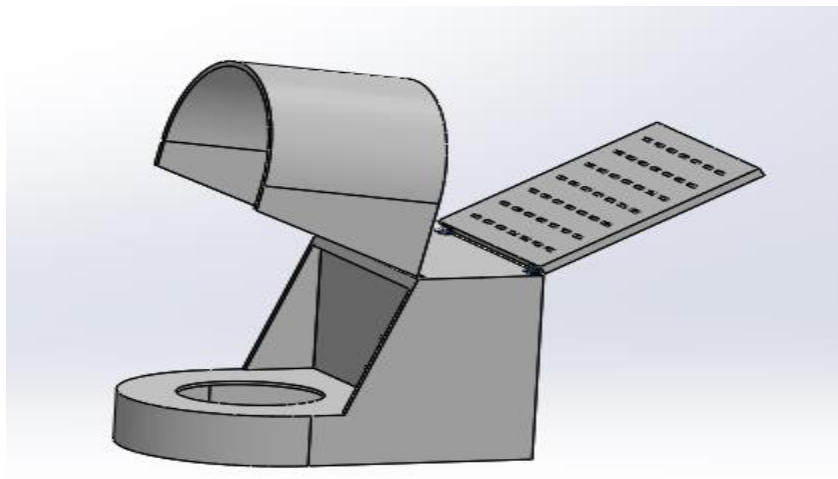
Dans notre travail, le logiciel principal utilisé pour la conception était SolidWorks. Parmi les fonctionnalités offertes par ces logiciels, on peut citer :

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

## **2. Modélisation géométrique**

### **2.1. Conception du carter du broyeur :**

Le boîtier du broyeur se compose des trois pièces principales suivantes : le corps du boîtier, la porte de maintenance du moteur et la porte d'accès aux bols de broyage.



**Figure 4.1 : carter du broyeur**

## 2.2. Conception des poulies :

Nous avons opté pour un système de poulie et courroie afin de réduire la vitesse et d'augmenter le couple et Pour assurer une transmission sans glissement et obtenir un rapport de vitesse optimal, nous avons choisi une courroie crantée.

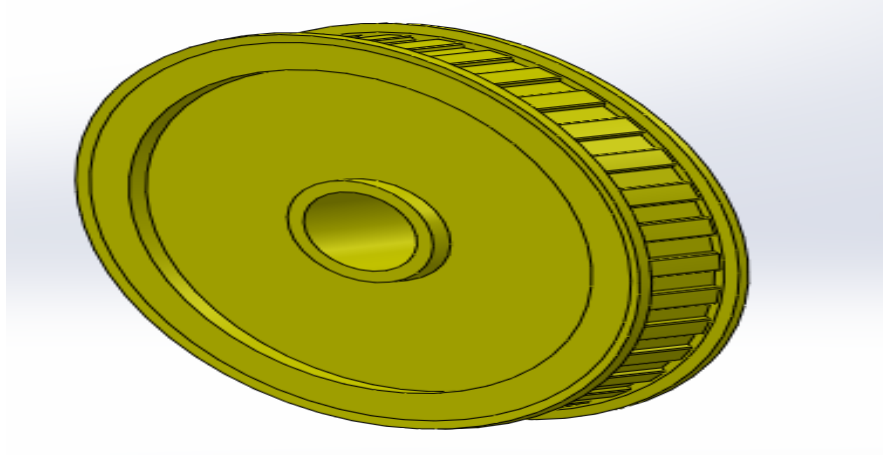


Figure 4.2 : poulie crantée

## 2.3. Conception du train épicycloïdal

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

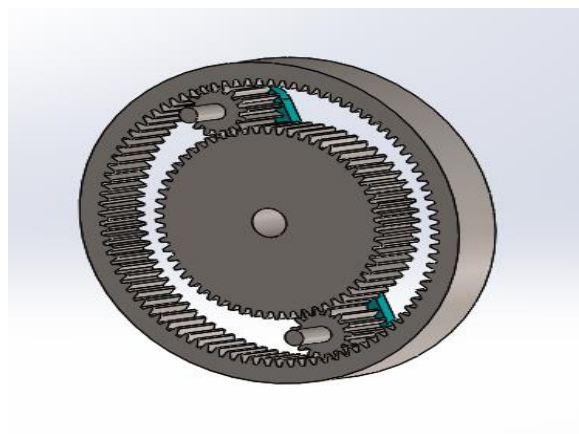
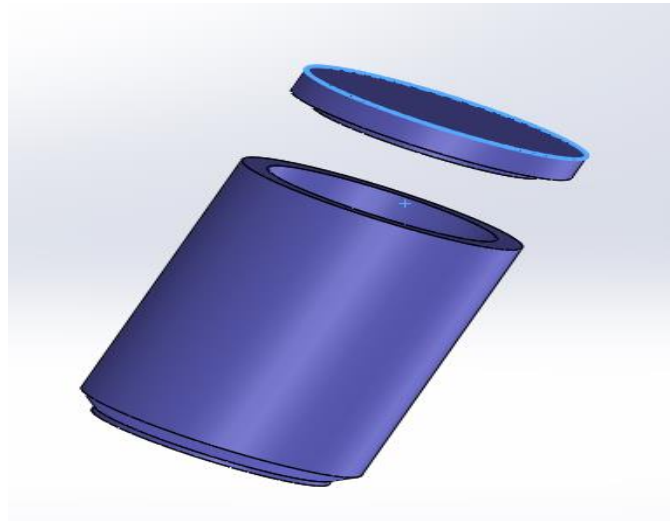


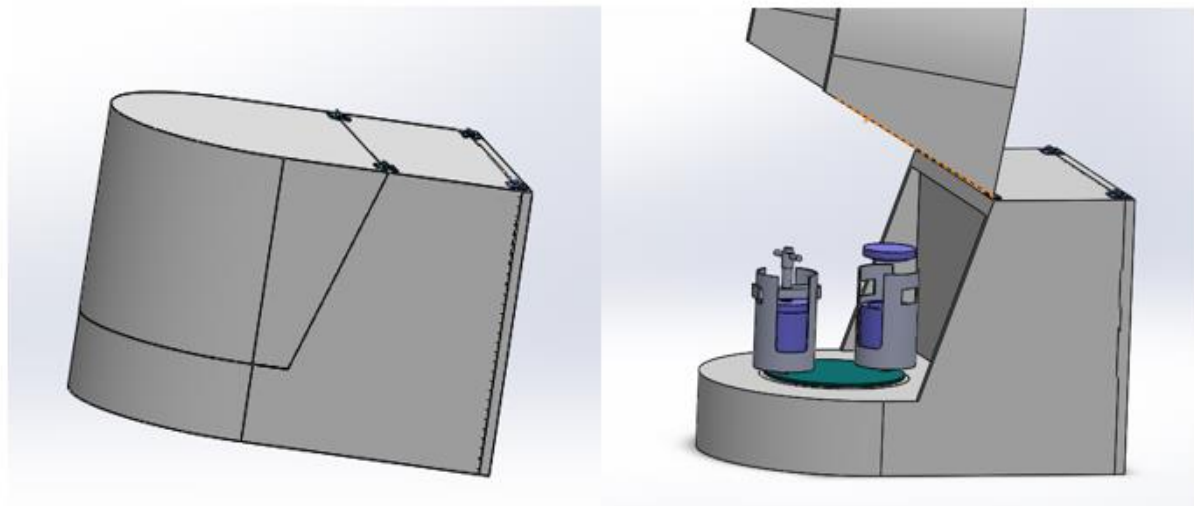
Figure 4.3 : train épicycloïdal

**2.4. Bole de broyage :**

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



**Figure 4.4 : bol de broyage**

**2.5. Assemblage du broyeur**

**Figure 4.5 : broyeur planétaire**

**3. Simulation numérique**

L'utilisation de la méthode des éléments finis en simulation numérique a révolutionné le domaine de l'ingénierie en permettant l'analyse et la prédiction du comportement des structures complexes. L'un des logiciels les plus populaires pour la simulation par éléments finis est ANSYS. ANSYS offre une vaste gamme de fonctionnalités avancées pour la modélisation, la résolution et la visualisation des problèmes d'ingénierie.

### **3.1 Méthodologie d'analyse basée sur la théorie des éléments finis**

#### **3.1.1. Choix de la géométrie et du maillage**

Lors de l'étape de choix de la géométrie et du maillage, nous procédons à la définition précise des points, des lignes, des surfaces et des volumes du modèle, ainsi qu'à leur discrétisation. Il est essentiel de noter que seuls les éléments de maillage de qualité peuvent être utilisés pour le post-traitement ultérieur des résultats.

#### **3.1.2. La définition du modèle mathématique**

Cette méthode implique la formulation des différents aspects du problème étudié, tels que la mécanique, la thermique, la thermomécanique ou encore le fluide. On doit également spécifier le type d'analyse à effectuer, qu'il s'agisse d'une analyse statique, transitoire ou dynamique. Le comportement du matériau doit être pris en compte, en déterminant s'il est élastique, isotrope, plastique, etc. Enfin, le choix du type d'éléments utilisés dans la modélisation est également essentiel, qu'il s'agisse de poutres, barres, coques, triangles, cubes, etc.

#### **3.1.3. Résolution du problème discrétisé :**

Une fois le problème discrétisé, la résolution consiste à calculer les matrices de rigidité et de masse pour chaque élément fini, puis à les assembler pour obtenir la matrice globale de la structure. Les conditions aux limites et les chargements sont ensuite appliqués, et le système d'équations résultant est résolu. Cette étape permet d'obtenir les résultats numériques des déformations, des contraintes, des températures ou d'autres paramètres d'intérêt, en utilisant des méthodes numériques telles que la méthode des éléments finis.

#### **3.1.4. Analyse et post-traitement des résultats :**

Une fois la résolution effectuée, l'analyse et le post-traitement des résultats sont réalisés. Cela implique l'examen des quantités locales telles que les déplacements, les contraintes, les déformations, etc., qui fournissent une compréhension détaillée du comportement du système

étudié. Les quantités globales, telles que la déformation maximale, l'énergie de déformation, etc., permettent d'obtenir des informations synthétiques sur les performances globales de la structure. Ces résultats sont essentiels pour évaluer la fiabilité du modèle, optimiser la conception, prendre des décisions éclairées et valider les performances du système analysé.

## 3.2. . Simulation de l'arbre :

### 3.2.1. L'arbre en torsion :

Dans notre situation, nous avons pris en compte le diamètre de torsion car c'est le plus grand. Nous avons effectué une simulation en torsion en utilisant une face fixe comme support et en appliquant un moment de torsion de 21 N.m sur l'autre extrémité. Nous avons utilisé un maillage triangulaire de 1 mm.

- **Déplacement total**

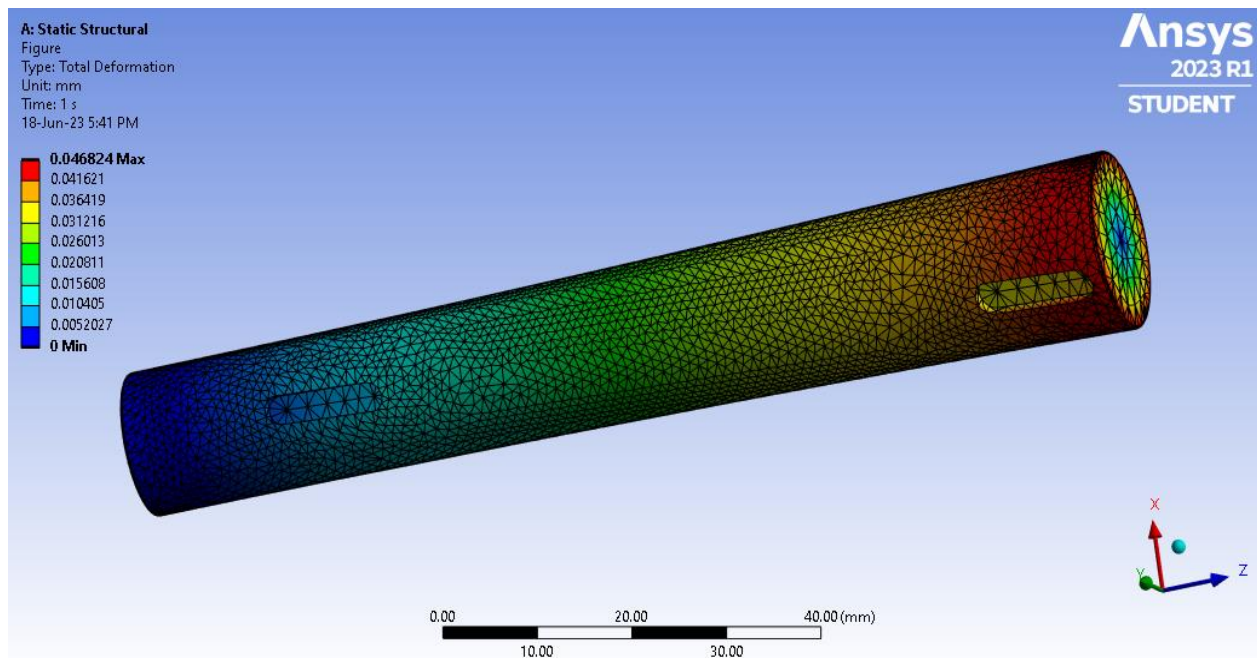


Figure 4.6 : déplacement total cas torsion

- **Contrainte**



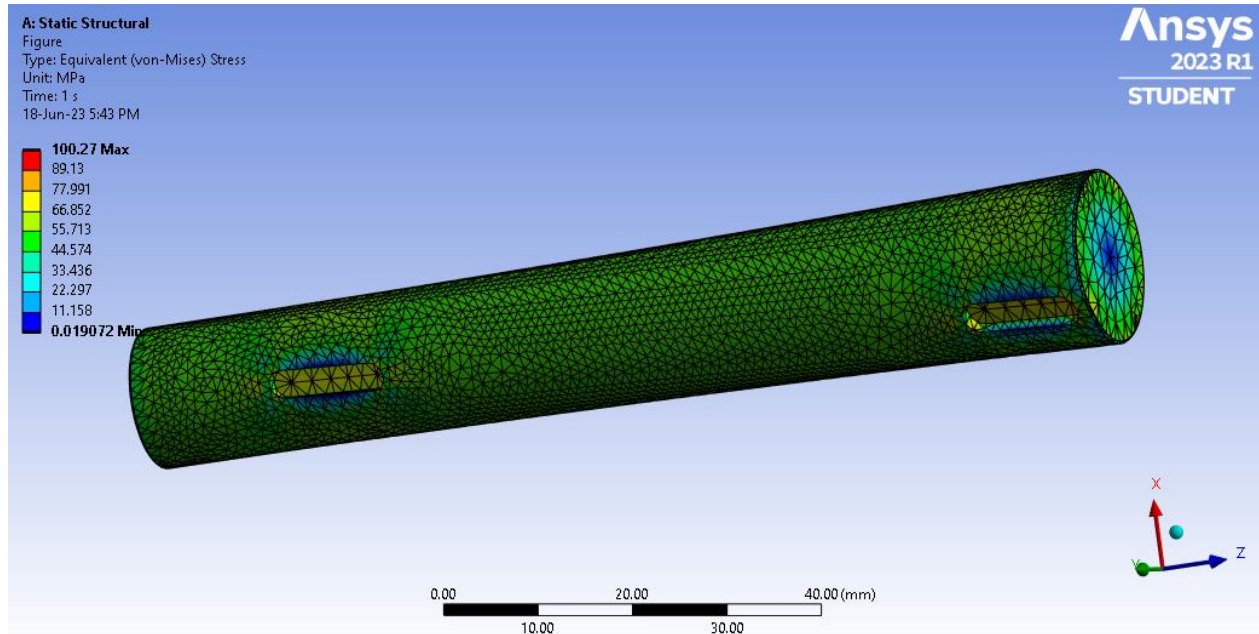


Figure 4.7 : Contrainte équivalente (von-Mises)

• Déformation

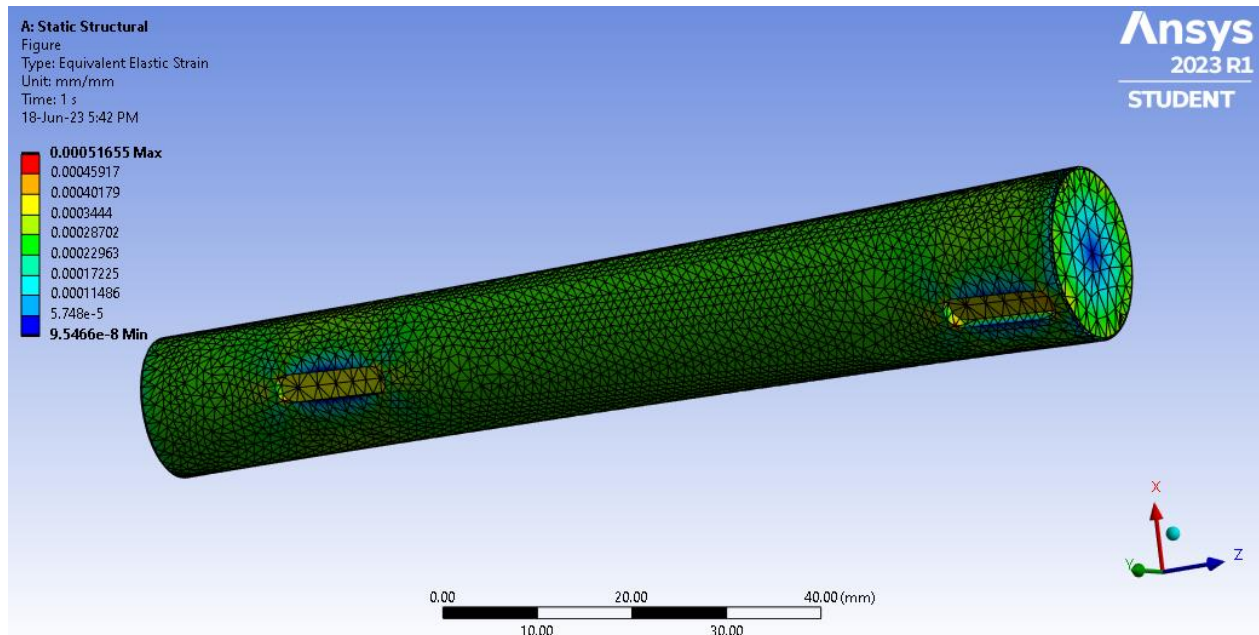


Figure 4.8 : Déformation élastique équivalente cas torsion

3.2.2. L'arbre en flexion :

Pour la flexion, nous adoptons la même approche que pour la torsion, mais les charges ainsi que les conditions limites seront différentes. L'arbre est soumis à la force  $F_c$  (force de la

courroie) et est supporté aux extrémités, avec un palier à roulement en bas et une roue planétaire en haut. Les conditions limites sont définies en fonction des déplacements de manière à ce que :

$$\begin{cases} U_x = 0 \\ U_y = Libre \\ U_z = 0 \end{cases}$$

- Déplacement total

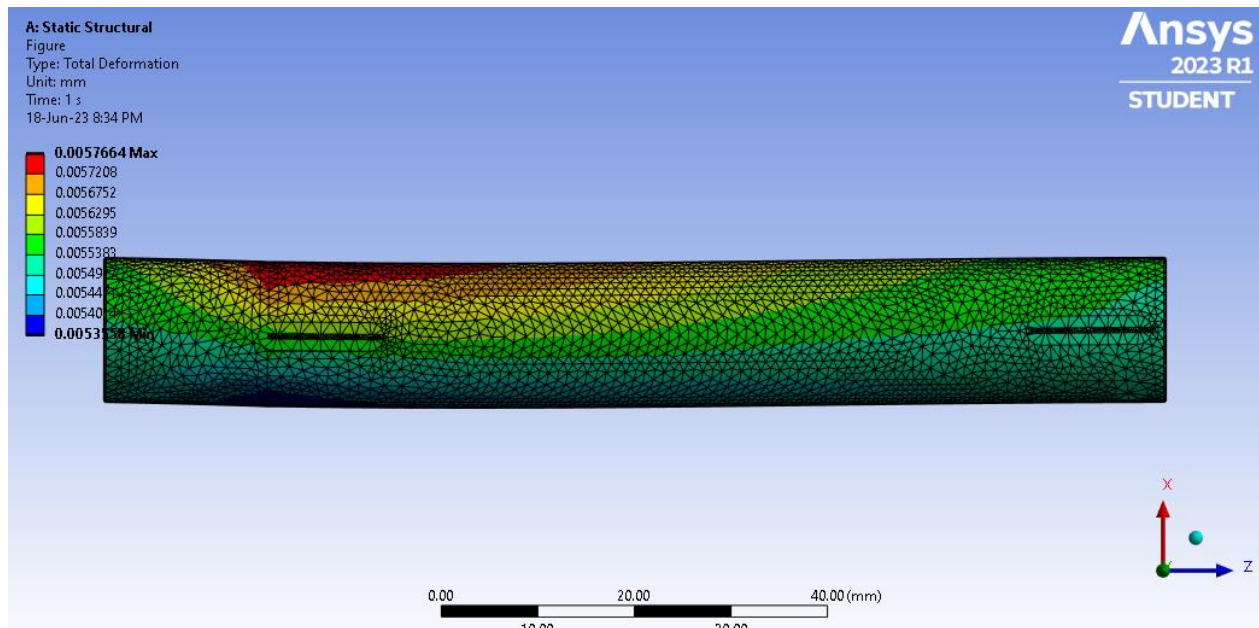


Figure 4.9 : Déplacement total cas flexion

- Contrainte

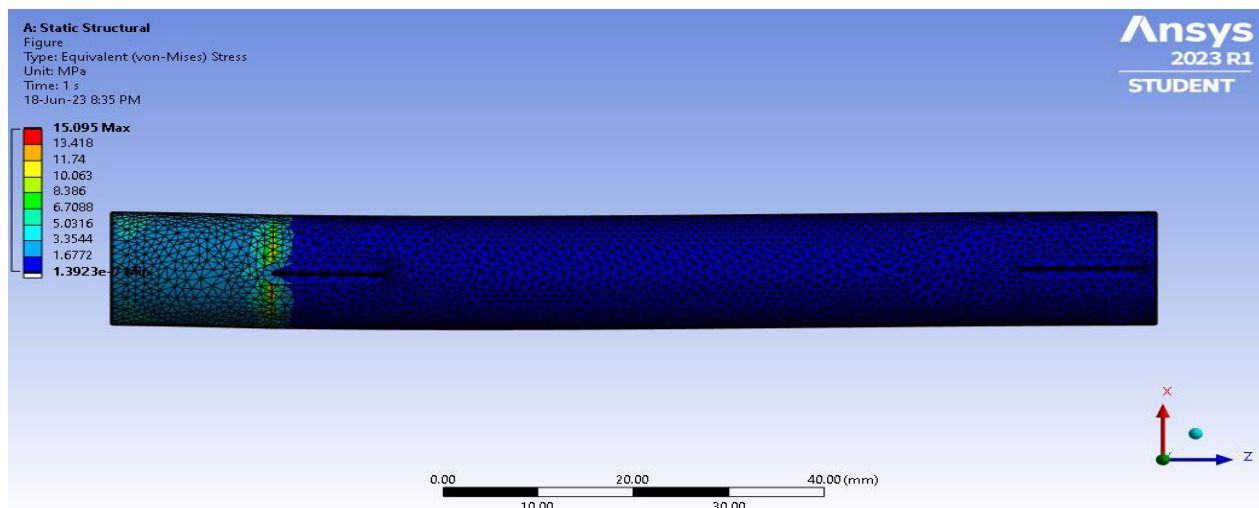


Figure 4.10 : Contrainte équivalente (von-Mises) cas flexion

- Déformation

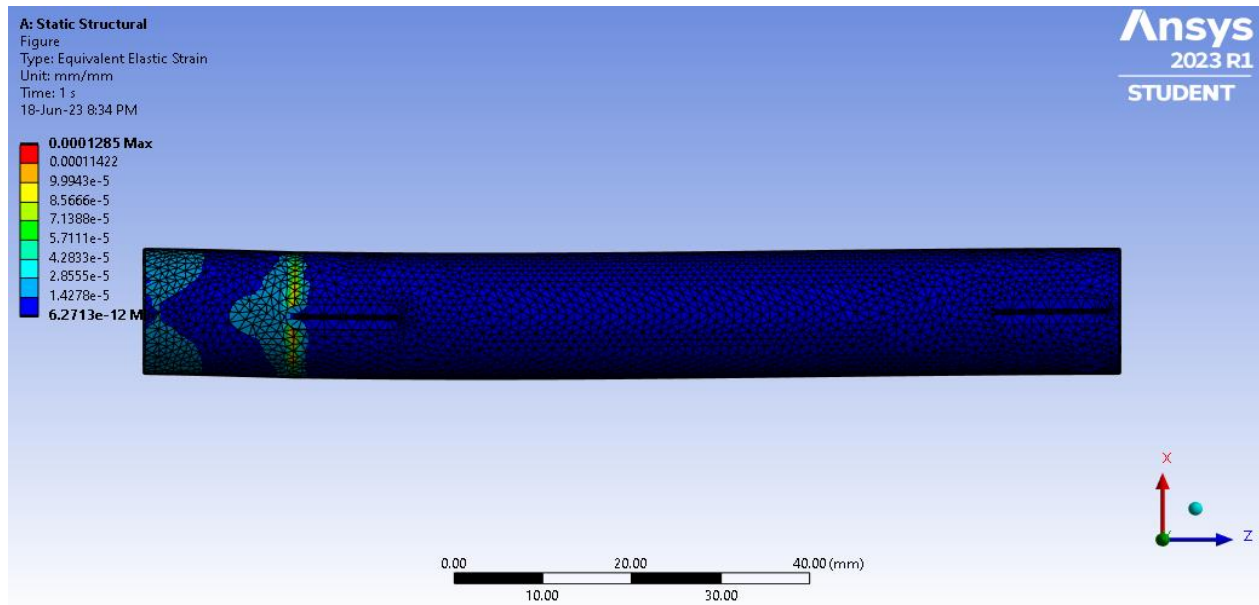


Figure 4.11 : Déformation élastique équivalente cas flexion

### 3.2.3. L'arbre en compression :

Lors de notre étude sur la compression, nous avons observé que la compression a une influence minime sur notre structure. Pour la simulation, nous avons fixé la surface inférieure et appliqué une force constante sur la partie supérieure, dans cette étude, nous avons utilisé le même maillage que celui des simulations précédentes.

- Déplacement total

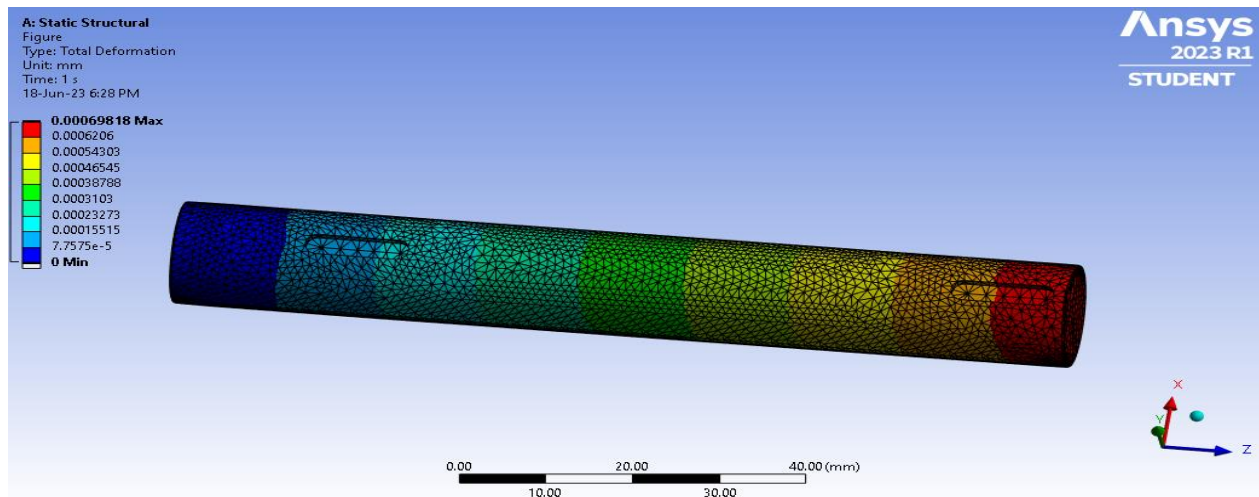


Figure 4.12 : déplacement total cas compression

- **Contrainte**

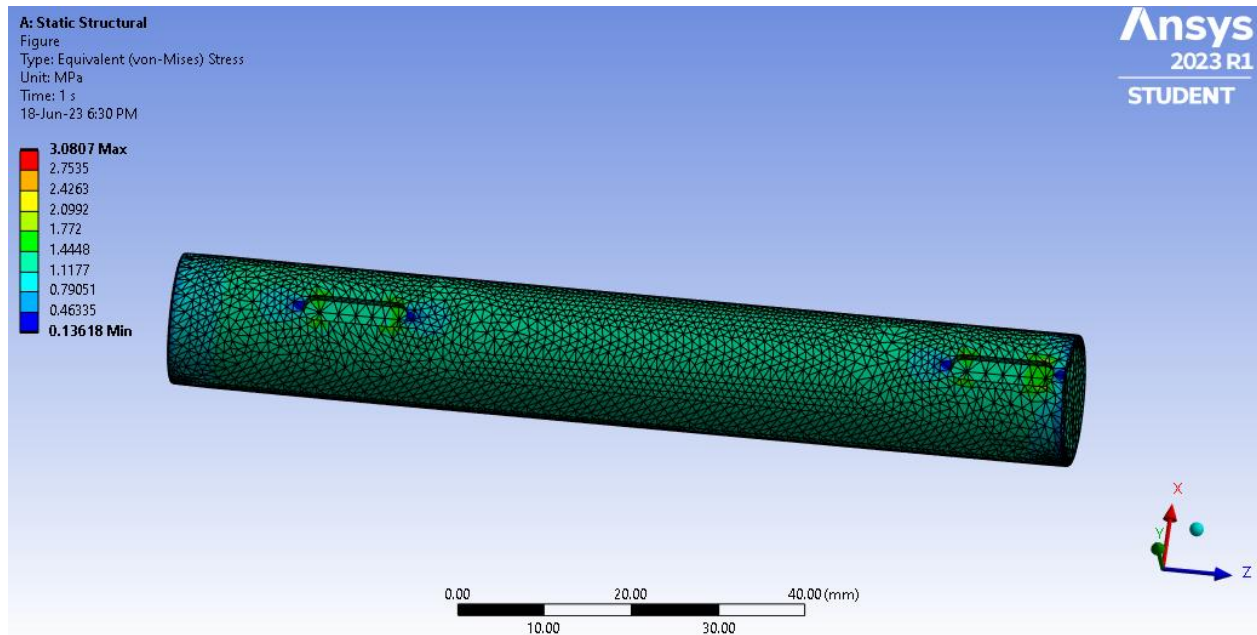


Figure 4.13 : Contrainte équivalente (von-Mises) cas compression

- **Déformation**

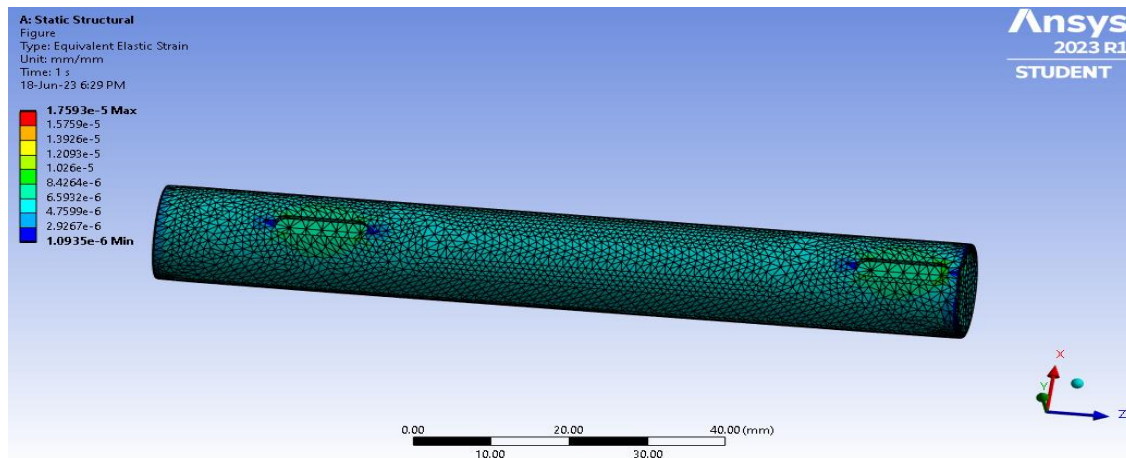


Figure 4.14 : Déformation élastique équivalente cas flexion

### Conclusion :

Les résultats des simulations numériques effectuées nous permettent de conclure de manière justifiée que le choix du matériau de l'arbre ainsi que le dimensionnement pour déterminer son diamètre sont appropriés.

## Conclusion Générale

## Conclusion Générale

---

Ce mémoire se concentre sur l'étude approfondie et la conception d'un broyeur planétaire. Notre objectif principal était de dimensionner le broyeur en accord avec un cahier des charges spécifique, définissant les critères et les performances attendus pour la machine.

Avant d'entrer dans les détails de la conception, nous avons présenté les généralités sur les broyeurs planétaires et expliqué les avantages qu'ils offrent par rapport aux autres types de broyeurs. Cette étape préliminaire nous a permis de mieux comprendre le fonctionnement et l'utilisation de ce type de broyeur, posant ainsi les bases de notre travail.

La phase de dimensionnement a été l'une des parties les plus délicates de notre étude, étant donné que ce type de broyeur n'avait jamais été réalisé auparavant. Cependant, grâce à notre persévérance et à notre rigueur, nous avons réussi à surmonter les difficultés en réalisant les dessins de définition de toutes les pièces nécessaires à la construction du broyeur.

Afin de garantir la résistance et la fiabilité de la machine, nous avons effectué une simulation pour évaluer la capacité de l'organe le plus sollicité à supporter les contraintes de fonctionnement. Cette étape nous a permis de valider nos choix de conception et d'optimiser les performances du broyeur.

Dans le souci de réaliser notre broyeur, nous avons pris en compte l'importance d'adapter notre choix de matériaux et d'éléments à acheter en fonction du marché algérien. Ainsi, nous avons ajusté notre conception pour répondre aux contraintes locales spécifiques. Cette approche nous a permis d'assurer la faisabilité concrète de la réalisation de la machine tout en facilitant les opérations de maintenance et de remplacement éventuel des pièces à l'avenir.

En conclusion, l'accomplissement de ce travail nous a offert une précieuse opportunité d'améliorer nos connaissances techniques dans le domaine du broyage. Nous avons acquis une expertise approfondie dans les principes et les mécanismes du broyage, ainsi que dans les différentes techniques et technologies utilisées. Ce travail a renforcé notre compréhension des défis et des opportunités liés au broyage.

## Références bibliographiques

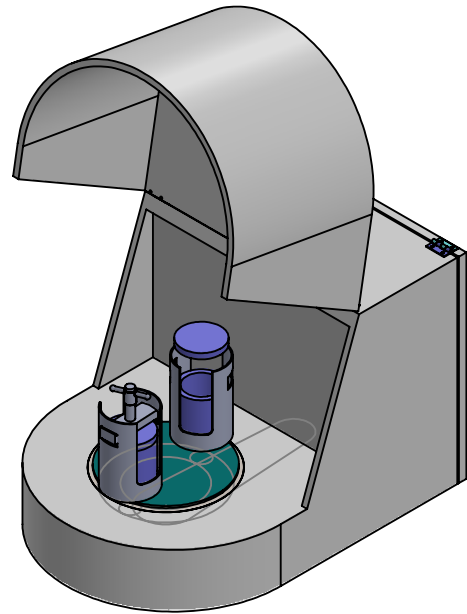
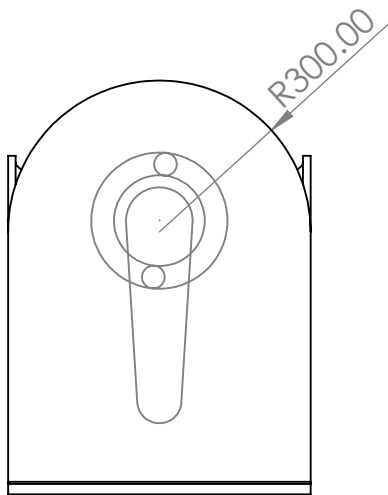
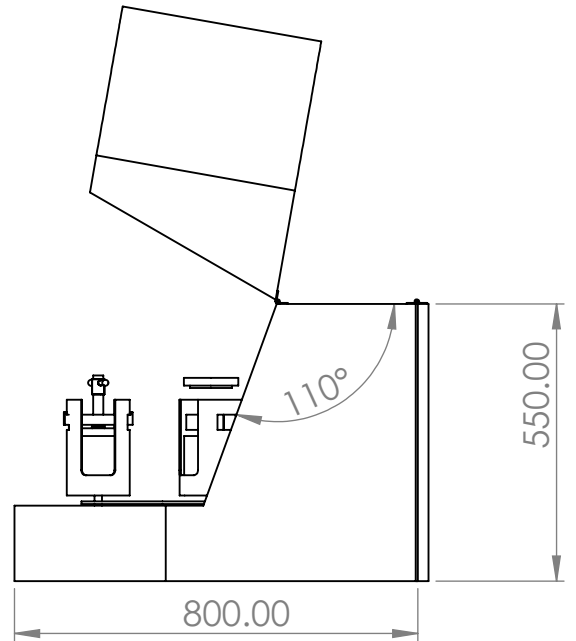
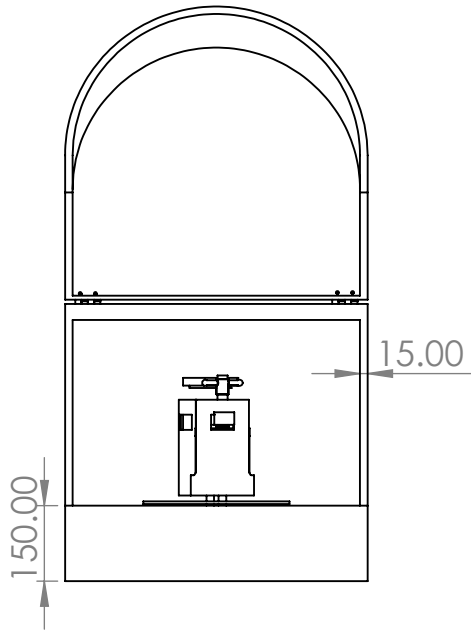
- [1]. CHEVALIER, André. **Guide du dessinateur industriel**. Édition Hachette Technique, France, 2003.
- [2]. HENRIOT, G. **Traité théorique et pratique des engrenages**. Dunod, Paris, ISBN-10. 204010934X, 1979.
- [3]. Robert L.Mott, Edward M.Vavrek, Jyhwen Wang. **Machine Elements in Mechanical Design**. sixth edition. ISBN 13: 978-0-13-444118-4.
- [4]. Robert L.Mott. **Machine Elements in Mechanical Design**. Fourth edition.
- [5]. A. I. Gusev, **Nanomaterials, Nanostructures, and Nanotechnologies** (in Russian) //Fizmatlit, Moscow (2007) pp 416.
- [6]. agroalimentaires. Jean-Pierre Melcion & Jean-Luc Ilari. Technologie des pulvérulents dans les IAA, Lavoisier, pp.375-406, 2003, Sciences & Techniques Agroalimentaires, 978 2743006211. Hal-00442390v2.
- [7]. Alain Chamayou, Jacques Fages. **Broyage dans les industries**.
- [8]. D. Ramasamy. **Analysis Of Alumina Particles Size and Shape Formation From Developed Planetary Ball Mill**. Materials Science and Engineering. 2020.
- [9]. E. Gaffet, G.L. CAËR. **Broyage Mécanique**.
- [10]. E. Gaffet, S. Begin-colin, O.Tillement, «**Nanomatériaux** », Innovation 128 S.A Paris (1998).
- [11]. E. Romilliat, Ph. Grosseau, B. Guilhot. **Etude de l'action des agents de mouture sur le broyage du clinker**. 4e colloque Science et technologie des poudres. 2004. T6-8 pp.66-71.
- [12]. Elodie Romilliat. **Etude des modes d'action d'agents de mouture sur le broyage du clinker**. Génie des procédés. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2006. France
- [13]. Gy, Kakuk. **Contributions to the modelling of the milling process in a planetary ball mill**. Advanced Materials Science. 2009.
- [14]. I.L.D Camargo, R.Erbereli, João Fiore Parreira Lovo, Carlos Alberto Fortulan, **Planetary Mill with Friction Wheels Transmission Aided by an Additional Degree of Freedom**. Machines. 2019.(formule )



- [15]. M. Broseghini, L. Gelisio, M. D’Incau, C.L. Azanza Ricardo, N.M. Pugno, P. Scardi. Modeling of the planetary ball-milling process: **The Case Study Of Ceramic Powders**. Journal of the European Ceramic Society. 2015.
- [16]. M. Broseghini, M. D’Incau, L. Gelisio et al., **Numerical and experimental investigations on new jar designs for high efficiency planetary ball milling**, journal de : Advanced Powder Technology.2020
- [17]. M. Broseghini, M. D’Incau, L. Gelisio, N.M. Pugno, P. Scardi. **Effect of jar shape on high-energy planetary ball milling efficiency: Simulations and experiments**, Materials and Design. 2017.
- [18]. Masayuki Oishi, Yoshihiro Kubota, Osamu Mochizuki. **Investigation of the Fragmentation Process of Clods in a Rod Mill Developed for Research Use**. World Journal of Mechanics, 2019, 9, 233-243.
- [19]. Meyer, R. ; « **Poudres Métalliques, Techniques de l’ingénieur** », Fasc. M862,2003.
- [20]. BENDRIS amar, FETTOUS karim. **Conception d’un broyeur a boulet pour laboratoire de recherche**. Université abderrahmane mira bejaia. 2019.
- [21]. Bogdan Viorel Neamțu. **Matériaux compacts magnétiques doux obtenus à l’état nanocristallin à partir de poudres d’alliages ni-fe-x issues de mécanosynthèse**. Physique. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2010. Français. Fftel-00531.
- [22]. BOUGUERNIZEN houssam eddin. **Etude cinématique et dimensionnement d’un broyeur mecanique pour mecanosynthese**. Université saad dahlab de. Blida. 2013.
- [23]. CHENNINE Dalil, BOUAFAI Boualem. **Etude et conception et réalisation d’un broyeur pour le recyclage des déchets plastiques**. UNIVERSITE Abderrahmane MIRA. BEJAIA. 2018.
- [24]. Eid Abdelbaki Ahmed GOUDA. **Transmission planétaire magnetique etude, optimisation et realisation**. Université Henri Poincaré, Nancy I. 2011
- [25]. Etienne LACROIX. **Modélisation cfd et caractérisation de la dynamique de l’écoulement et du mélange dans un mélangeur planétaire sans lamelle**. École de technologie supérieure université du québec. 2010.
- [26]. MAHFOUD Mouna. **Dimensionnement et conception d’un broyeur à lames pour le recyclage du plastique**. Ecole Nationale Polytechnique. Alger. 2020.
- [27]. MOUSSAOUI Amar, LAIB Mehanni. **Etude et dimensionnement d’un broyeur pour olive**. Université A/Mira de Bejaia. 2021.

- [28]. BELKACEMI, Yacine. Cours de Résistance des Matériaux (RDM I).
- [29]. BOUAZIZ, Mohamed. Cours de Construction Mécanique I. Chap. 3.1  
Transmission par courroies.
- [30]. BOUAZIZ, Mohamed. Cours de Construction Mécanique II. Chapitre 2  
Ensembles à engrenages 2 Trains épicycloïdaux.
- [31]. BOUAZIZ, Mohamed. Cours de Construction Mécanique III. Chapitre 3\_ Les  
roulements.
  
- [32]. [http://www.zpag.net/Tecnologies\\_Industrielles/transmission\\_courroies.htm](http://www.zpag.net/Tecnologies_Industrielles/transmission_courroies.htm)
- [33]. <https://www.rohloff.de/en/experience/technology-in-detail/planetary-gear-system>
- [34]. <https://www.toutcalculer.com/mecanique/train-epicycloidal.php#conditions>
- [35]. <https://www.cours-et-exercices.com/2016/05/cours-de-courroies-transmission-de.html>

# Annexe



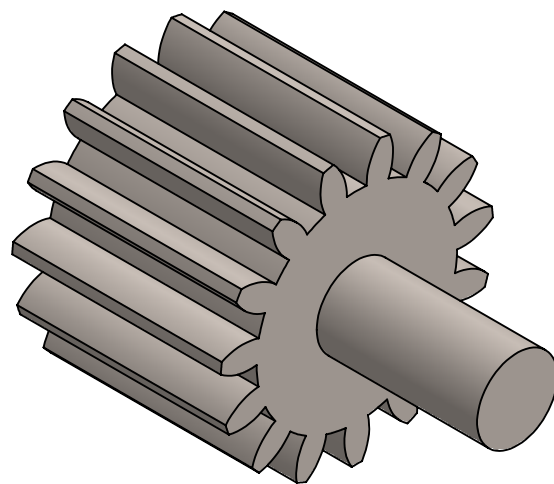
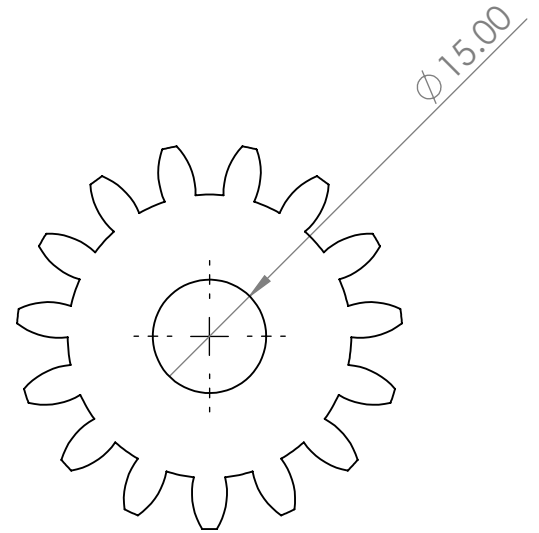
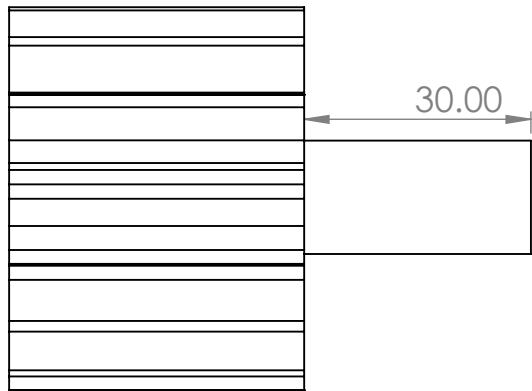
## Ecole Nationale Polytechnique

Echelle 1:15	Matière	
Etudiant	BERRAHAL	Zineddine
Promoteur	ZEBAR	Mohamed

## Broyeur Planétaire

Département  
Génie Mécanique

Date : 14/06/2023



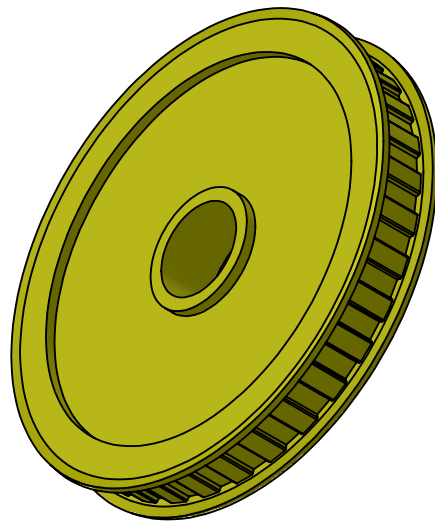
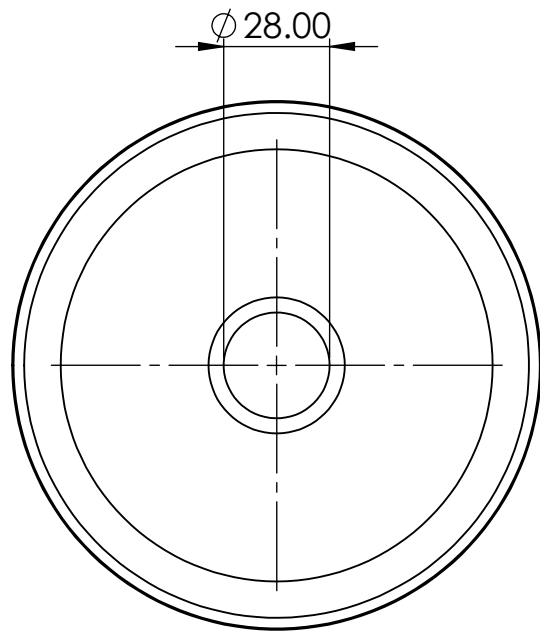
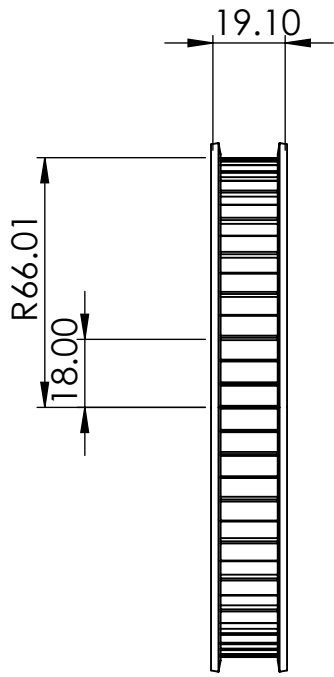
## Ecole Nationale Polytechnique

Echelle 1:1	Matière C45E	
Etudiant	BERRAHAL	Zineddine
Promoteur	ZEBAR	Mohamed

## La roue satellite

Département  
Génie Mécanique

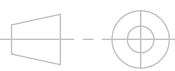
Date : 14/06/2023



## Ecole Nationale Polytechnique

Echelle  
1:2

Matière  
fonte ft20



Etudiant

BERRAHAL

Zineddine

## La Poulie Réceptrice

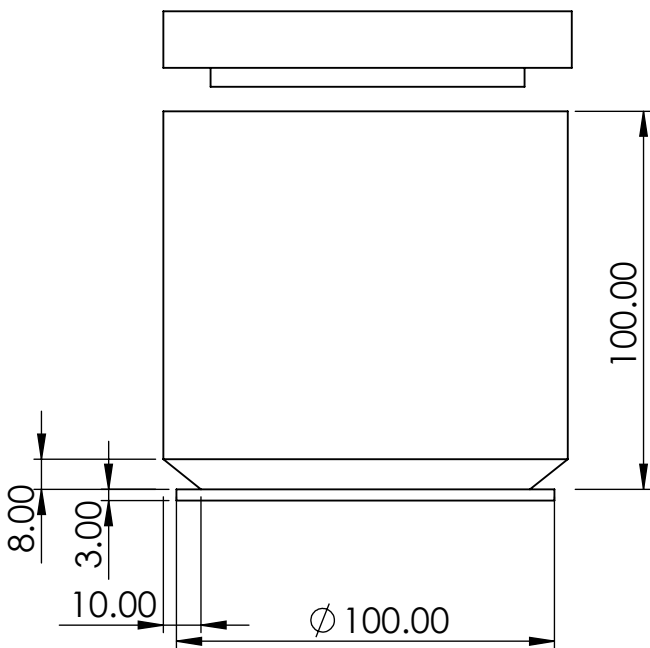
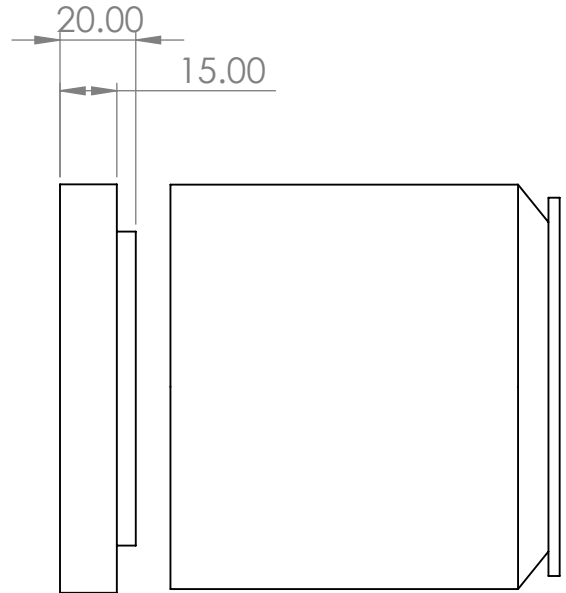
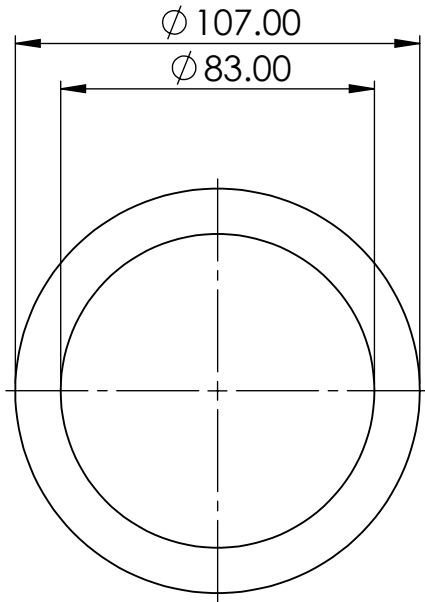
Département  
Génie Mécanique

Promoteur

ZEBAR

Mohamed

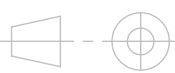
Date : 14/06/2023



## Ecole Nationale Polytechnique

Echelle  
1:2

Matière  
AISI 304



Etudiant

BERRAHAL

Zineddine

# La Jarre

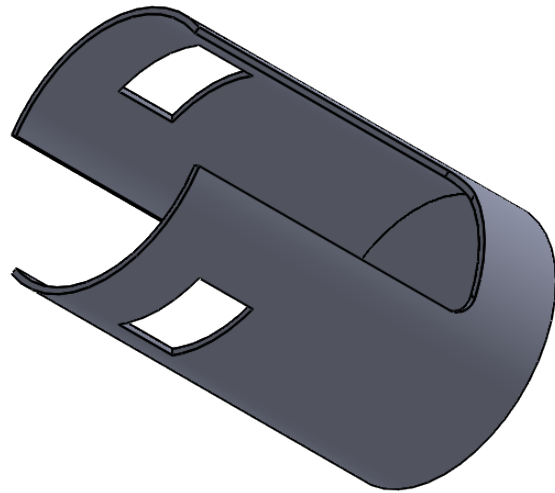
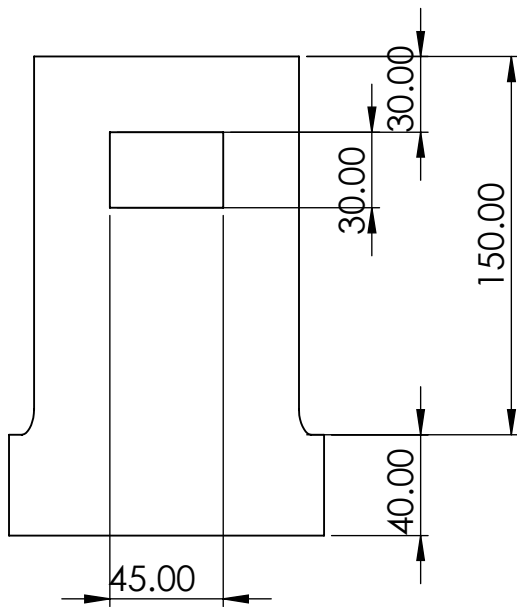
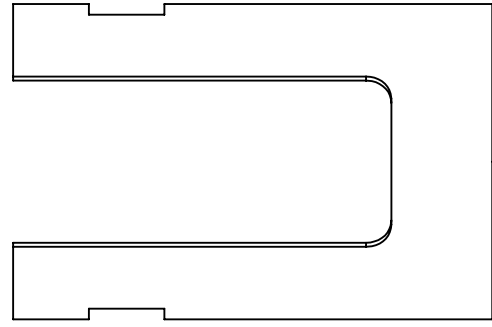
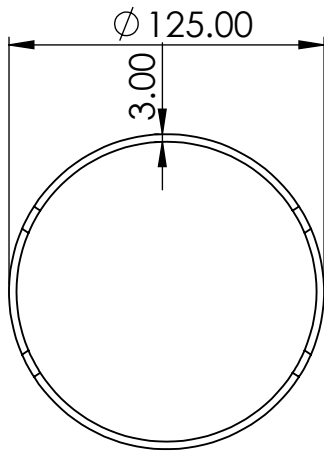
Département  
Génie Mécanique

Promoteur

ZEBAR

Mohamed

Date : 14/06/2023



## Ecole Nationale Polytechnique

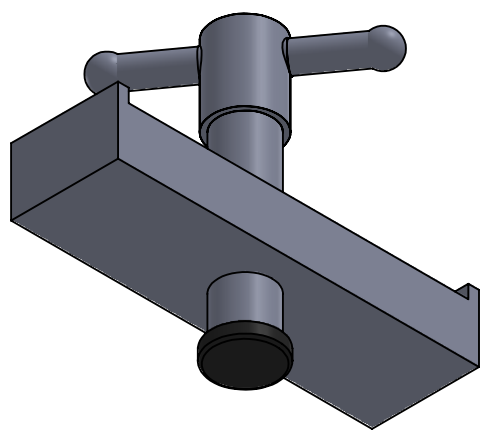
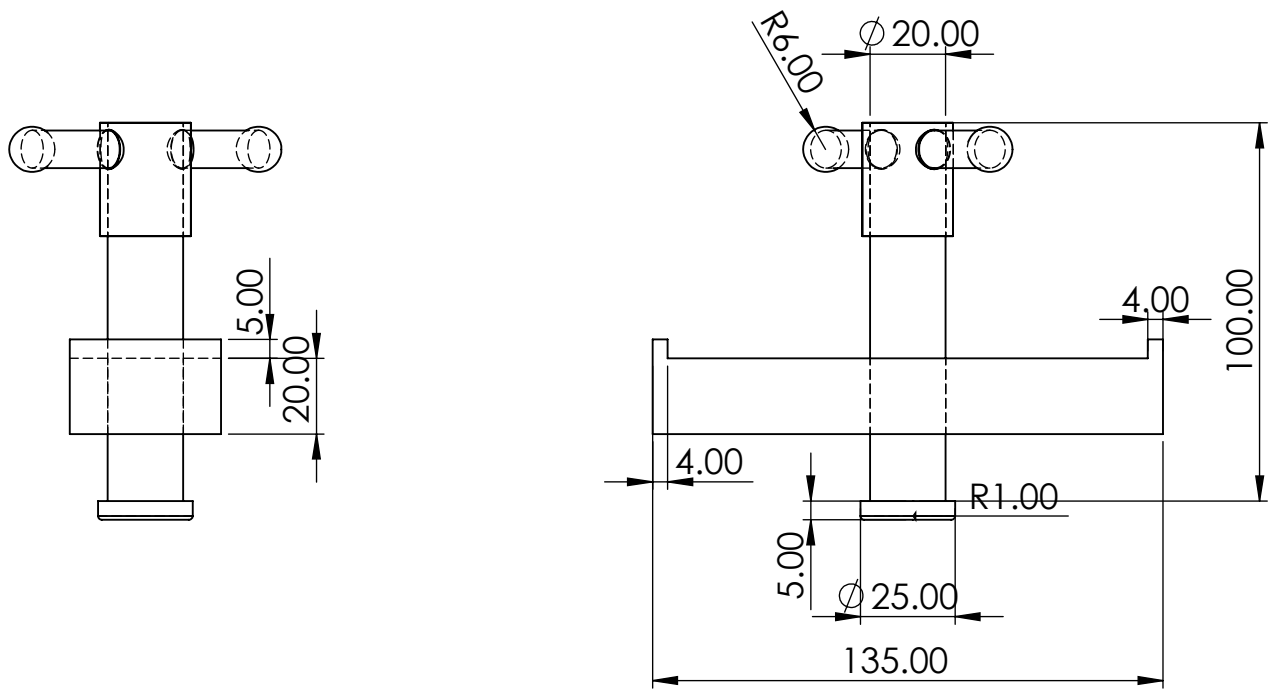
Echelle	Matière	
1:3		
Etudiant	BERRAHAL	Zineddine
Promoteur	ZEBAR	Mohamed

## Support Des Jarres

Département  
Génie Mécanique

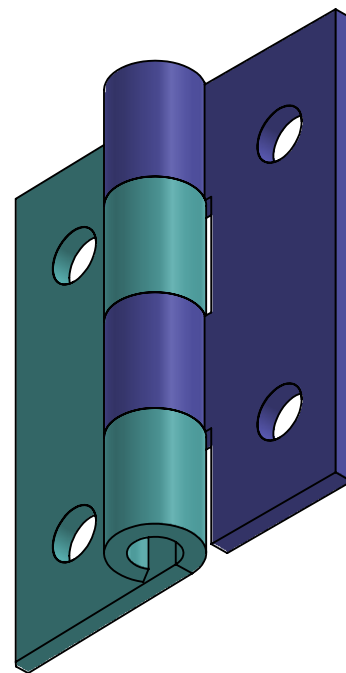
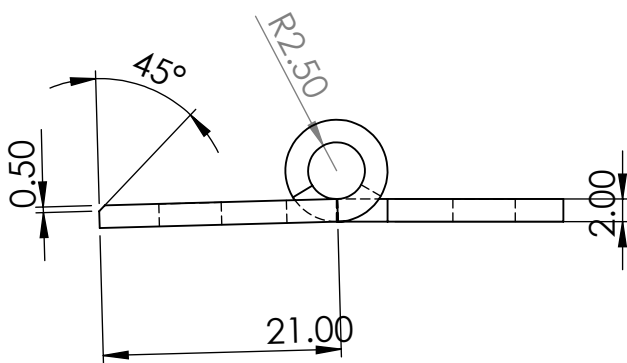
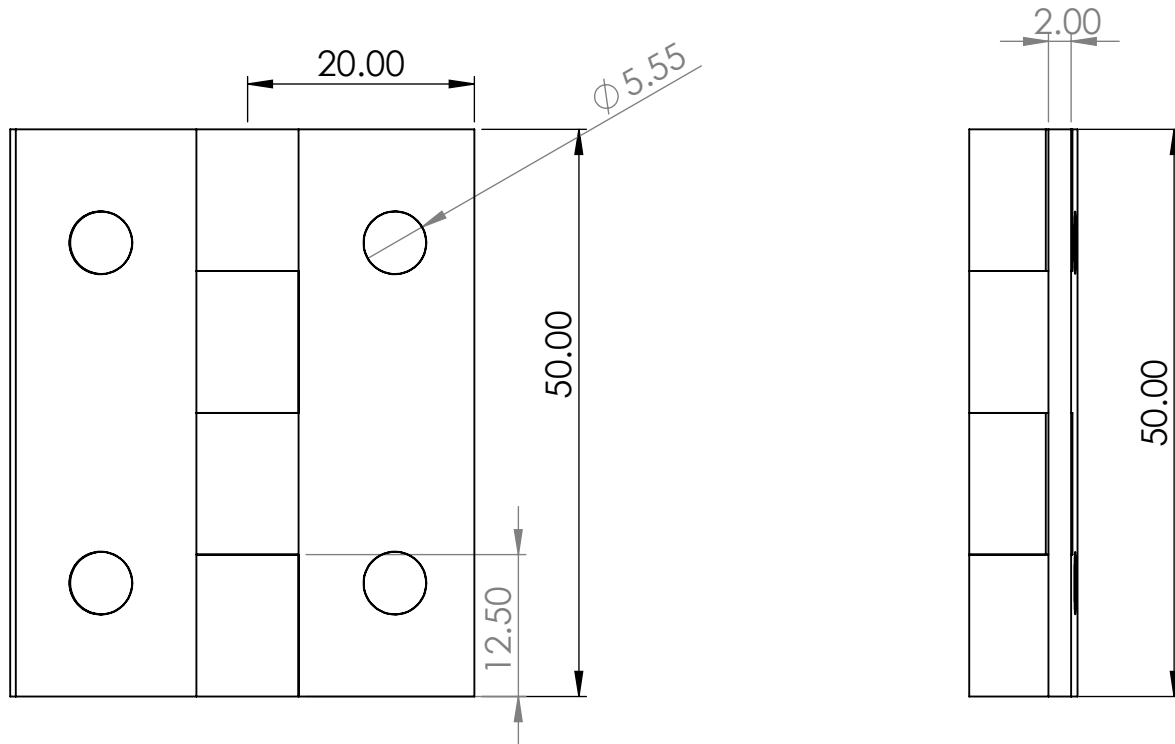
Date : 14/06/2023





**Ecole Nationale Polytechnique**

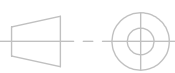
Echelle 1:2	Matière AISI 304		<b>Système de Serrage</b>	Département Génie Mécanique
Etudiant BERRAHAL	Zineddine	Date : 14/06/2023		
Promoteur ZEBAR	Mohamed			



## Ecole Nationale Polytechnique

Echelle  
1.5:1

Matière  
A60



Etudiant

BERRAHAL

Zineddine

## Charnière

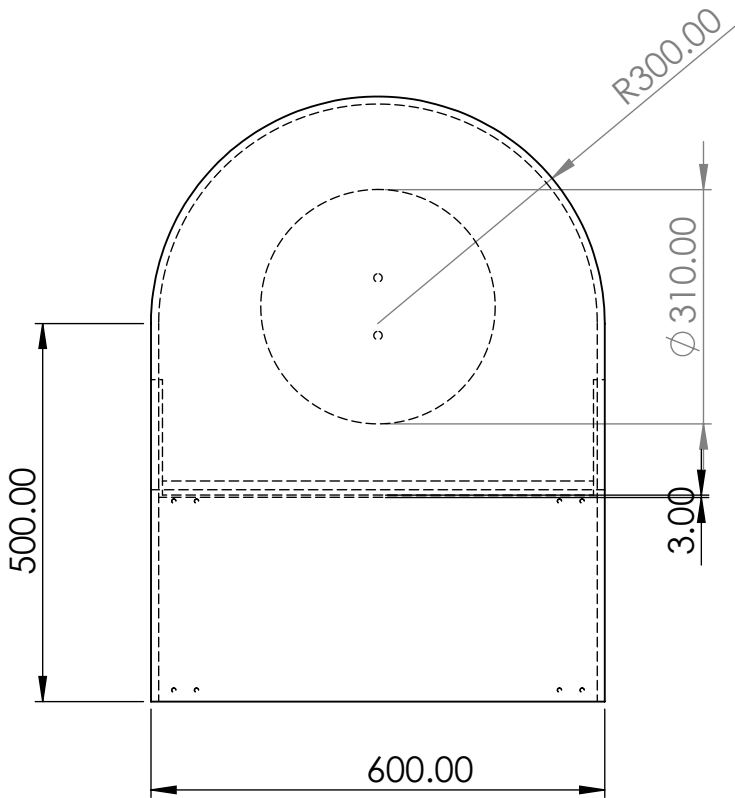
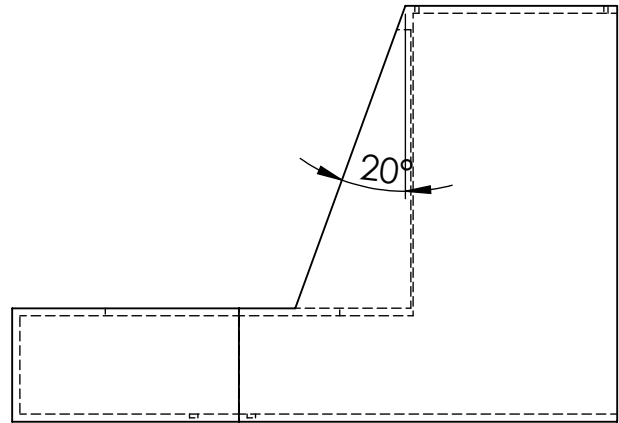
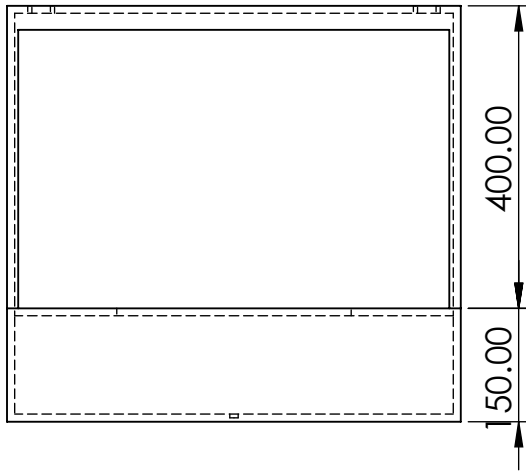
Promoteur

ZEBAR

Mohamed

Département  
Génie Mécanique

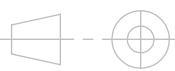
Date : 14/06/2023



## Ecole Nationale Polytechnique

Echelle  
1:10

Matière  
A60



Etudiant

BERRAHAL

Zineddine

**Corp principal du carter**

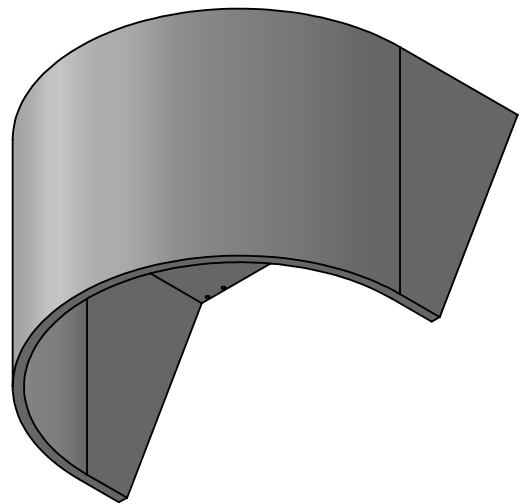
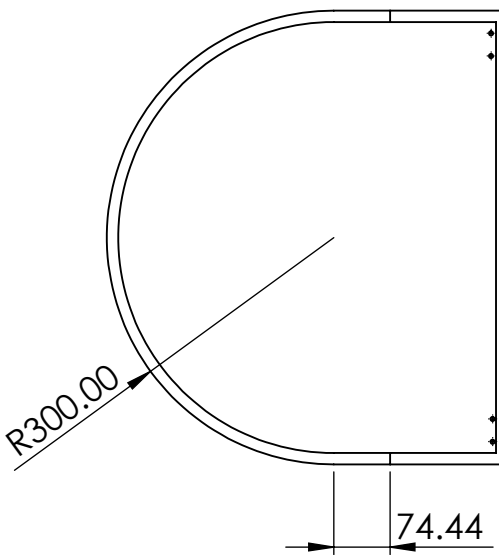
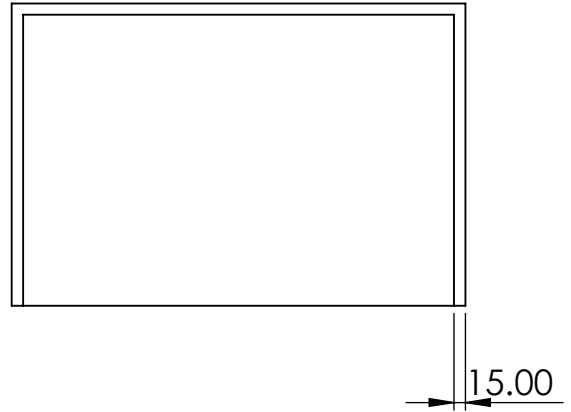
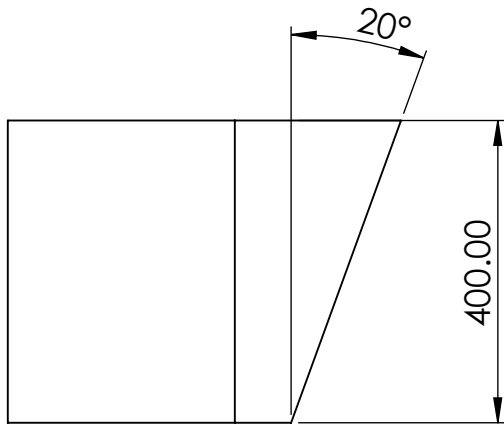
Département  
Génie Mécanique

Promoteur

ZEBAR

Mohamed

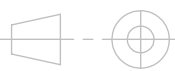
Date : 14/06/2023



## Ecole Nationale Polytechnique

Echelle  
1:10

Matière  
A60



Etudiant

BERRAHAL

Zineddine

## Couvercle du Carter

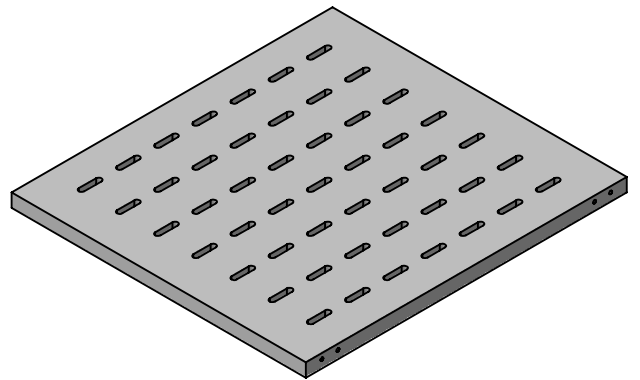
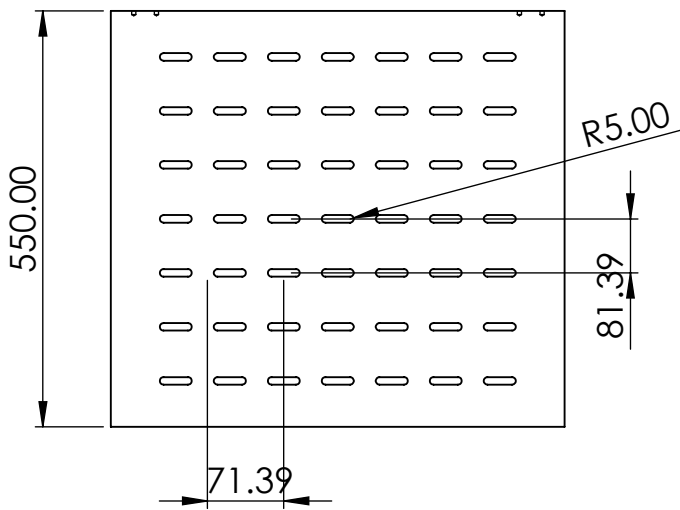
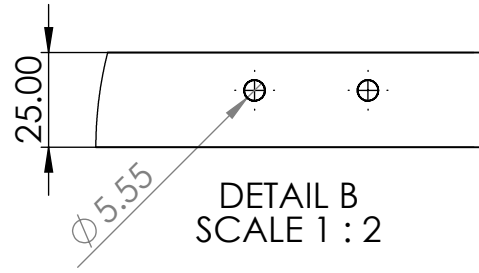
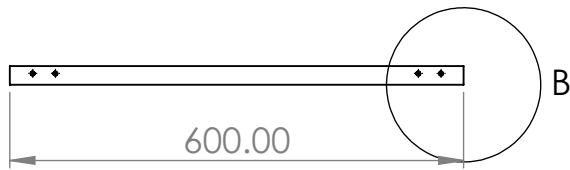
Département  
Génie Mécanique

Promoteur

ZEBAR

Mohamed

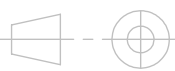
Date : 14/06/2023



## Ecole Nationale Polytechnique

Echelle  
1:10

Matière  
A60



Etudiant

BERRAHAL

Zineddine

## Fond du Carter

Département  
Génie Mécanique

Promoteur

ZEBAR

Mohamed

Date : 14/06/2023