

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR**  
**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA**  
**FACULTÉ DE LA TECHNOLOGIE**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE**



**MEMOIRE**

**PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER**

**FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE**

**SPÉCIALITÉ : FABRICATION MÉCANIQUE ET PRODUCTIVE**

**Thème**

---

---

***Etude et conception et réalisation d'un broyeur pour le recyclage des déchets plastiques***

---

---

**PROPOSÉ PAR : HAMRI. OKBA**

**RÉALISÉ PAR :**

**CHENNINE Dalil**

**BOUAFAI Boualem**

**EXAMINÉ PAR :**

**M<sup>R</sup> HEDDAR**

**M<sup>M</sup> ADJEUDI**

**ANNÉE UNIVERSITAIRE 2017-2018**

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*À la mémoire de mes grands parents*

*Aux plus belles personnes sur terre que Dieu a créé : **mes parents** :*

- ***Ma mère** : la source de patience, générosité et de tendresse, qui a été non seulement une maman mais même une source d'encouragement.*
- ***Mon père** : qui lui aussi a contribué dans mon parcours, il s'est toujours montré présent pour nous orienter et nous donner ses précieux conseils.*

*Tous les remerciements ne pourront être efficaces pour montrer ma gratitude vers eux. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde gratitude.*

*À mes grands frères, Yacine et Saïd*

*À ma sœur, lilia*

*À toute ma famille.*

*A ma petite ami zaza*

*À tous mes amis et collègues*

*À tous les étudiants de la promotion 2017/2018*

***Option : Fabrication Mécanique et Productique***

*À tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer*

***BOUAFIA Boualem***

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*À ceux qui n'ont jamais cessé de m'encourager et de me soutenir, à ceux qui leur amour m'a donné la volonté d'aller toujours de l'avant,*

*À mes chers parents qui sont décédés*

*À mon oncle Smail et sa femme Luoiza*

*À mon cher grand frère Mouloud*

*À mes chers sœurs Nacira, Zahoua, Salema*

*À toute ma famille.*

*À tous mes amis et collègues*

*À tous les étudiants de la promotion 20017/2018*

***Option : Fabrication Mécanique et Productique***

*À tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer*

***CHENNINE Dalil***

# *Remerciements*

*Nous remercions avant tout notre dieu le tout puissant de nous avoir donné la foi, la Volonté et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Nous remercions notre promoteur Mr OKBA HAMRI, pour nous avoir assuré l'encadrement et d'avoir consacré le temps nécessaire pour la réalisation de ce mémoire.*

*Nous remercions également les membres du jury d'avoir accepté de juger notre Travail.*

*Nous remercions également tous les enseignants qui ont participé à notre Formation.*

*Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

*Merci à vous tous...*

# Sommaire

---

INTRODUCTION GENERALE .....	1
-----------------------------	---

## Chapitre I: généralité sur les matières plastique et les broyeurs

I.1	INTRODUCTION .....	3
I.2	GENERALITE SUR LES MATIERES PLASTIQUE.....	3
I.2.1	Définition .....	3
I.2.2	Caractéristiques .....	4
I.2.3	Les types de plastique.....	4
I.3	GENERALITES SUR LES BROYEURS.....	5
I.3.1	Définition d'un broyeur .....	5
I.3.2	Caractéristiques principales d'un broyeur .....	5
I.3.3	Le broyage .....	6
I.3.4	Les différents types de broyeurs .....	6
I.3.5	Broyeur à fragmentation grossière .....	7
I.3.6	Broyeur à couteaux .....	7
I.3.7	Broyeur pour le papier .....	7
I.3.8	Broyeur pour le verre .....	7
I.3.9	Broyeur à fragmentation fine (1000 à 10µm) .....	8
I.3.10	Broyeur à marteaux.....	8
I.3.11	Broyeur à fragmentation ultrafine : .....	8
I.3.12	Broyeurs à billes : .....	9
I.4	CONCLUSION .....	9

## Chapitre II : Choix et sélection d'un broyeur

INTRODUCTION.....	11	
II.1	CHOIX D'UN BROEUR.....	11
II.1.1	Critères de choix.....	11
II.1.1.1	Broyage de matière dure.....	12
II.1.1.2	Broyage de bois et dérivé.....	12
II.1.1.3	Broyeur d'emballage .....	13
II.1.1.4	Broyage de céréales .....	13
II.1.1.5	Broyage du plastique et matériaux fibreux .....	14
II.2	DIFFERENTS ELEMENTS D'UN BROEUR POUR LE PLASTIQUE.....	17
II.3	LES DIFFERENTES OPERATIONS DANS UN BROEUR POUR LE PLASTIQUE.....	18
II.4	SELON LES CARACTERISTIQUES TECHNIQUES.....	19
II.5	SELON LA FIABILITE ET LA DISPONIBILITE .....	20
II.6	INTERET DU CHOIX.....	20
CONCLUSION :	.....	20

# Sommaire

---

## Chapitre III : Dimensionnement

Introduction .....	22
Cahier de charge.....	22
III.1 Etude cinématique .....	22
III.1.1 Schéma cinématique .....	22
III.1.2 Choix du moteur.....	23
III.1.3 Calcul de la force de coupe $F_C$ du plastique .....	23
III.2 Calcul de RDM des éléments sollicités dans le broyeur.....	25
III.2.1 Dimensionnement de l'arbre qui port les lames .....	25
III.2.1.1 Calcul des réactions des paliers .....	25
III.2.1.2 Calcul des efforts tranchants.....	26
III.2.1.3 Calcul des moments fléchissant .....	27
III.2.1.4 Calcul du diamètre de l'arbre à la flexion.....	28
III.2.1.5 Calcul du diamètre de l'arbre à la torsion.....	30
III.2.1.6 Vérification aux sollicitations composées .....	31
III.2.2 Dimensionnement des lames .....	32
III.3 Réducteur .....	33
III.3.1 Principe de fonctionnement des réducteurs.....	33
III.3.2 Transmission par poulies et courroies.....	34
III.3.3 Les différents types de courroies et poulies .....	35
III.3.3.1 Courroies plates.....	35
III.3.3.2 Courroies trapézoïdales .....	36
III.3.3.3 Courroies crantées (ou synchrones) .....	36
III.3.4 Calcul des courroies et poulies.....	37
III.3.5 Transmission par engrenage .....	42
III.3.5.1 Classification des engrenages .....	42
III.3.5.2 Types d'engrenages .....	44
III.3.5.3 Calcul des engrenages .....	46
III.3.6 Roulement .....	47
III.3.6.1 Les avantages et les inconvénients .....	47
III.3.6.2 Choix du roulement.....	47
III.3.6.3 Caractéristique du roulement à billes.....	48
III.3.6.4 Désignation du roulement.....	48
III.3.6.5 Durée de vie du roulement.....	48
III.3.7 Clavette.....	49

# Sommaire

---

## Chapitre IV : Modélisation Géométrique et numérique

IV.1	Généralités.....	53
IV.1.1	Introduction.....	53
IV.1.2	Définition de la CAO.....	53
IV.1.3	Les avantages et les inconvénients de la CAO.....	53
IV.1.4	Logiciel utilisée.....	53
IV.1.5	Les différentes utilisations de SolidWorks .....	54
IV.2	Modélisation géométrique.....	54
IV.2.1	Modélisation Géométrique de l'arbre .....	54
IV.2.2	Lame.....	55
IV.2.3	Assemblage des éléments du broyeur.....	55
IV.2.4	Montage des arbres sur les supports de roulement.....	56
IV.2.5	Montage des engrenages.....	56
IV.2.6	Assemblage fini du broyeur.....	57
IV.3	Modélisation numérique.....	58
IV.3.1	Introduction aux éléments finis.....	58
IV.3.2	Le maillage.....	59
IV.3.3	Différents types de maillage.....	59
IV. 3.3.1	Maillage linéaire.....	59
IV. 3.3.2	Maillage surfacique.....	59
IV. 3.3.3	Maillage volumique.....	59
IV.3.4	Génération d'un maillage.....	59
IV.3.5	Maillage des pièces du broyage.....	59
IV.4	Application des conditions aux limites.....	60
IV.5	Vérification des résultats des lames.....	61
IV. 6.1	Simulation à l'état statique.....	61
IV. 6.1.1	Analyse statique de lame.....	61
IV. 6.1.2	Analyse statique de l'arbre on flexion.....	63
IV. 6.1.3	analyse statique de l'arbre en torsion.....	64
	Conclusion.....	66

### Chapitre 1

#### Liste des figures :

<b>Figure 1</b> : schéma des différents modes de broyage.....	6
<b>Figure 2</b> : broyeur a couteaux .....	7
<b>Figure (3)</b> : Broyeurs à marteaux .....	8
<b>Figure (4)</b> : broyeur à bille .....	9

### Chapitre 2

#### Liste des figures :

<b>Figure (5)</b> : Broyeurs de matière dure.....	12
<b>Figure (6)</b> : Broyeur pour le bois.....	13
<b>Figure (7)</b> : broyeur pour carton.....	13
<b>Figure (8)</b> : Broyeur a deux cylindres.....	14
<b>Figure (9)</b> : Déchiqueteur mono rotor à grille de calibrage.....	14
<b>Figure (10)</b> : Déchiqueteur mono rotor a grille de calibrage.....	15
<b>Figure (11)</b> : Déchiqueteur à cisaille rotative avec 3 axes à grille de calibrage...	15
<b>Figure (12)</b> : Lacérateur à 4 axes.....	16
<b>Figure(13)</b> : Les différents éléments d'un broyeur plastique.....	17
<b>Figure (14)</b> : A, B, C, D : présentation des différentes phases du broyage d'un bidon plastique .....	19

#### Liste des tableaux :

<b>Tableau 1</b> : Les différents éléments d'un broyeur plastique .....	17
---	----

### Chapitre 3

#### Liste des figures :

<b>Figure (15)</b> : Schéma cinématique .....	22
<b>Figure (16)</b> : Représentation des efforts appliqués sur l'arbre.....	25
<b>Figure(17)</b> : Digramme des efforts tranchant.....	27
<b>Figure(18)</b> : diagramme des moments fléchissant.....	28
<b>Figure(19)</b> : Principe d'une transmission par poulie courroie.....	34
<b>Figure(20)</b> : Inverseurs.....	35
<b>Figure(21)</b> : Courroie plate.....	35
<b>Figure(22)</b> : Exemples d'application des courroies trapézoïdales.....	36
<b>Figure(23)</b> : Exemple de transmission par courroie crantée.....	37
<b>Figure(24)</b> : caractéristique des courroies .....	38
<b>Figure(25)</b> : Engrenages à axe concourants.....	43

## Liste des tableaux & figures

---

<b>Figure (26):</b> Engrenages à axe parallèles.....	43
<b>Figure (27) :</b> Engrenages à axe orthogonaux44	
<b>Figure (28) :</b> Transmission par engrenage à denture droite.....	44
<b>Figure (29) :</b> Transmission par engrenage cylindrique à dentures hélicoïdales...	45
<b>Figure (30) :</b> Transmission par engrenage conique.....	45
<b>Figure (31):</b> Transmission par roue et vis sans fin.....	46
<b>Figure (32) :</b> roulement à billes : cas d'un arbre tournant.....	48
<b>Figure 33 :</b> Clavette rectangulaire.....	50

### Liste des tableaux et graphes :

<b>Tableau 2:</b> les éléments de la chaine cinématique.....	23
<b>Graphe (1) :</b> gamme des puissances transmissibles par type de courroie.....	38
<b>Tableau 3 :</b> Puissance de base en KW des courroies trapézoïdal classique.....	40
<b>Graphe 2 :</b> longueur primitive .....	41
<b>Graphe 3 :</b> angle d'enroulement.....	41
<b>Tableau 4 :</b> caractéristique d'un engrenage droit.....	47
<b>Tableau 5 :</b> caractéristique du roulement rigide à billes.....	48

## Chapitre 4

<b>Figure (34) :</b> Modèle CAO de l'arbre.....	54
<b>Figure (35) :</b> Modèle CAO de lame.....	55
<b>Figure (36) :</b> positionnements des lames sur l'arbre.....	55
<b>Figure (37) :</b> montage des arbres sur le support par l'intermédiaire de roulements.....	56
<b>Figure(38) :</b> montage des engrenages sur les arbres.....	57
<b>Figure (39) :</b> assemblage du broyeur.....	57
<b>Figure (40) :</b> Le maillage des pièces du broyage.....	60
<b>Figure (41) :</b> déplacement et les efforts imposés (lame).....	60
<b>Figure (42) :</b> graphe de contrainte de Von Mises (lame).....	61
<b>Figure (43) :</b> graphe de déplacements de la lame.....	62
<b>Figure (44) :</b> graphe de déformations de la lame.....	62
<b>Figure (45) :</b> graphe de contrainte de Von Mises (arbre soumis à la flexion)...	63
<b>Figure (46) :</b> graphe de déplacements (arbre soumis à la flexion).....	63
<b>Figure (47):</b> graphe de Déformations (arbre soumis à la flexion).....	64
<b>Figure (48) :</b> graphe de contrainte de Von Mises (arbre soumis à la torsion)...	64
<b>Figure (49) :</b> graphe de déplacements (arbre soumis à la torsion).....	65
<b>Figure (50) :</b> graphe de Déformations (arbre soumis à la torsion).....	65

# **Introduction**

## **générale**

# Introduction générale

---

## **Introduction générale :**

Les plastiques apparaissent aujourd'hui comme de véritables 'matériaux miracles' l'essor constant de la production d'articles en plastique partout dans le monde tient directement aux qualités intrinsèques de tels objets. Par conséquent le plastique est la matière la plus utilisée par de nombreuses branches de l'industrie, et son utilisation ne s'arrête pas à la conservation des éléments alimentaire, mais va plus loin. Il est en concurrence avec les matériaux traditionnels pour l'emballage et aussi participe à la construction de l'électroménager et l'industrie automobile. Il est souvent utilisé dans la fabrication de bouteilles d'eau et grâce à sa légèreté il réduit la quantité de matière requise comparativement au verre et au métal en terme de poids et il requière moins d'énergie pour être transporté, le plastique domine notre vie il fait partie de notre vie quotidienne au point qu'on ne peut pas ouvrir les yeux sans le voir.

Malgré ses précieuses utilités le plastique devient de plus en plus inquiétante car une fois utilisé il génère des déchets volumineux par rapport à leur poids et leur dissémination dans la nature est durable et peut durer des siècles.

Afin de diminuer ses négatives conséquences il est temps de passer au recyclage.

Le recyclage du plastique est une activité qui permet de ramener les déchets de ce dernier à un état utilisable pour la fabrication de nouveaux produits ce qui permet d'économiser de 50% à 60% de l'énergie qui serait nécessaire pour fabriquer les mêmes produits à partir de matière première, de plus le recyclage est devenu dans certains pays l'une des priorités sur le plan économique et même sociale vu sa rentabilité et sa créatrice des postes d'emploi.

Dans nos jours, il est préférable de récupérer les matières premières déjà utilisées que d'aller les chercher dans les sources, et c'est le cas du plastique que l'on récupère à travers le recyclage et ce procédé commence obligatoirement par un broyeur de plastique.

# Chapitre I

Généralités sur les matières plastique  
et les broyeurs

## I.1 Introduction

De nos jours l'industrie est devenue un domaine très vaste et compris le domaine du génie mécanique, cela est dû aux plusieurs méthodes utilisées par le concepteur dont le but est de réaliser des produits fiables et d'optimiser le temps et le coût de fabrication.

Parmi ses méthodes, on trouve la modélisation et la simulation par la méthode des éléments finis qui a pour objectif de transmettre les bases techniques et méthodologiques utiles à la réalisation et faire face à des problèmes concrets de mécanique des solides et structures.

En Algérie, les broyeurs sont souvent utilisés dans des carrières minières et usines de carrelage. La majorité des machines de broyage sont importées de l'étranger.

## I.2 Généralité sur les matières plastiques :

### I.2.1 Définition :

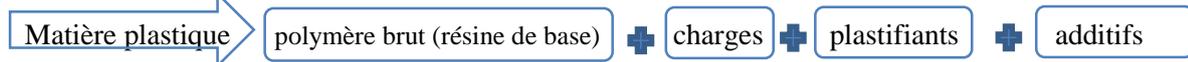
Le plastique, ou une matière plastique est une substance polymère contenant un grand nombre d'atomes (ou groupes) de carbone, oxygène, hydrogène ou azote. S'il existe une grande variété de plastiques, on peut les regrouper en deux catégories : les thermoplastiques et les thermodurcissables.

Une matière plastique est souvent obtenue par la transformation du pétrole ou du gaz naturel. Les thermoplastiques fondent sous l'effet de chaleur et se solidifient sous l'effet d'un refroidissement. Pour les thermodurcissables, la transformation est irréversible. Une fois formé, le plastique ne se déforme plus.

Les matières plastiques couvrent une gamme très étendue de matériaux polymères synthétiques ou artificiels. On peut observer aujourd'hui sur un même matériau des propriétés qui n'avaient jamais auparavant été réunies, par exemple la transparence et la résistance aux chocs.

Les textiles (fils et fibres) ainsi que les élastomères ne sont pas des matières plastiques proprement dites.

Généralement, les polymères industriels ne sont pas utilisés à l'état « pur », mais mélangés à des substances miscibles ou non dans la matrice polymère.

**Structure typique d'une formule :**

Il existe un grand nombre de matières plastiques ; certaines connaissent un grand succès commercial. Les plastiques se présentent sous de nombreuses formes : pièces moulées par injections, tubes, films, fibres, tissus, mastics, revêtements, etc. ils sont présents dans de nombreux secteurs, même dans les plus avancés de la technologie.

**I.2.2 Caractéristiques :**

La densité des matières plastiques est nettement plus faible que celle des métaux : de 0,83 à 2,15 avec 1,2 comme valeur moyenne. La densité d'un polymère est directement fonction du taux de cristallinité. Par ailleurs, la rigidité et la résistance mécanique augmentent avec ce taux.

- Température de transformation physique plus basse : couramment comprise entre 100°C et 300°C.
- Elasticité plus élevée (jusqu'à 80 % d'élongation à la rupture pour le PEHD).
- La thermo stabilité des polymères thermoplastiques est nettement inférieure à celle des métaux. Rares sont les plastiques résistants à plus de 250°C pendant de longues périodes dans l'air.
- Module d'élasticité plus faible (le module du PEBD est peu élevé : E-200 MPa ; à l'opposé, les aminoplastes présentent un module très élevé).
- Tenue (ou résistance) aux agents chimiques : en règle générale, les polymères résistent aux acides et aux bases [grande inertie chimique du PTFE et du PE.
- comportement viscoélastique. En effet, ils démontrent simultanément des propriétés élastiques et un caractère visqueux.
- La plupart des polymères thermoplastiques amorphes non chargés (et non colorés...) sont transparents.
- La conductivité thermique des polymères est environ cent fois plus faible que celle des métaux.

**I.2.3 Les types de plastique :**

➡ PETE ou PET: polyéthylène téréphtalate: utilisé habituellement pour les bouteilles d'eau minérale et de jus de fruits, les emballages.

➡ HDPE ou PEHD: polyéthylène haute densité : certaines bouteilles, flacons, et plus généralement emballages semi-rigides.

➡ V ou PVC: polychlorure de vinyle : utilise pour les canalisations, tubes, meubles de jardin, revêtements de sol, profiles pour fenêtre, volets, bouteilles de détergents, toiles cirées. Potentiellement dangereux pour l'usage alimentaire.

➡ LOPE ou PESD: polyéthylène basse densité : bâches, sacs poubelle, sachets, films, récipients souples.

➡ PP: polypropylène: utilisé dans l'industrie automobile (équipements, pare-chocs), jouets, et dans l'industrie alimentaire (emballages).

➡ PS: polystyrène: plaques d'isolation thermique pour le bâtiment, barquettes alimentaires (polystyrène expansé), couverts et gobelets jetables, boitiers de CD, emballages (mousses et films), jouets, ustensiles de cuisine, stylos, etc.

Potentiellement dangereux, notamment en cas de combustion (contient du styrène).

### I.3 Généralités sur les broyeurs :

#### I.3.1 Définition d'un broyeur :

Le broyeur est une machine utilisée pour le broyage des matériaux, soit faciles à traiter ou difficiles (le plastique, le papier, le ciment...etc.). Il représente dans l'industrie une solution pour l'abattement des frais de gestion des déchets en général. Le broyeur peut parfois être considéré comme un véritable moyen de production notamment dans les cas suivants :

- lorsque les déchets de fabrication sont réutilisés directement dans le cycle de production (matières plastiques) ;
- lors de la mise en place de processus de production utilisent comme matière première des déchets d'autres processus industriel (concept et recyclage).

#### I.3.2 Caractéristiques principales d'un broyeur :

Les caractéristiques principales d'un broyeur sont sa robustesse et sa fiabilité. Il doit être constitué par une unité de chargement qui est souvent une trémie. Cette partie remplit une fonction qui ne doit pas être négligée. En effet, elle doit placer la matière le mieux possible dans le groupe de broyage afin d'éviter tout problème au cours de la trituration.

L'action coupante d'un broyeur est assurée par une série d'éléments tranchants (couteaux, lames et bras coupants ...etc.) qui cassent la matière en se croisant. Les éléments principaux

d'un broyeur sont les arbres qui portent soit les couteaux ou les lames (les broyeurs pour la matière plastique) ou plus qui coupent nettement la matière. [1]

### I.3.3 Le broyage :

C'est-à-dire réduire la matière en petits fragments ou en poudre. Pour cela il faut la soumettre à des forces de contraintes supérieures à sa résistivité et on appelle ces action dans la RDM dépasser le domaine d'élasticité et critique de matière et la ramener à son domaine de rupture [2].

Dans la nature il existe quatre types d'actions principales qui nous permettent de solliciter une matière à savoir ; compression, traction, cisaillement, flexion ou la torsion .Mais aussi on peut la solliciter à une combinaison de ces actions [3] ;

- ✓ (a) : par compression ou par friction
- ✓ (b) : par cisaillement
- ✓ (c) : par choc contre une paroi
- ✓ (d) : par collision entre les éléments à broyer

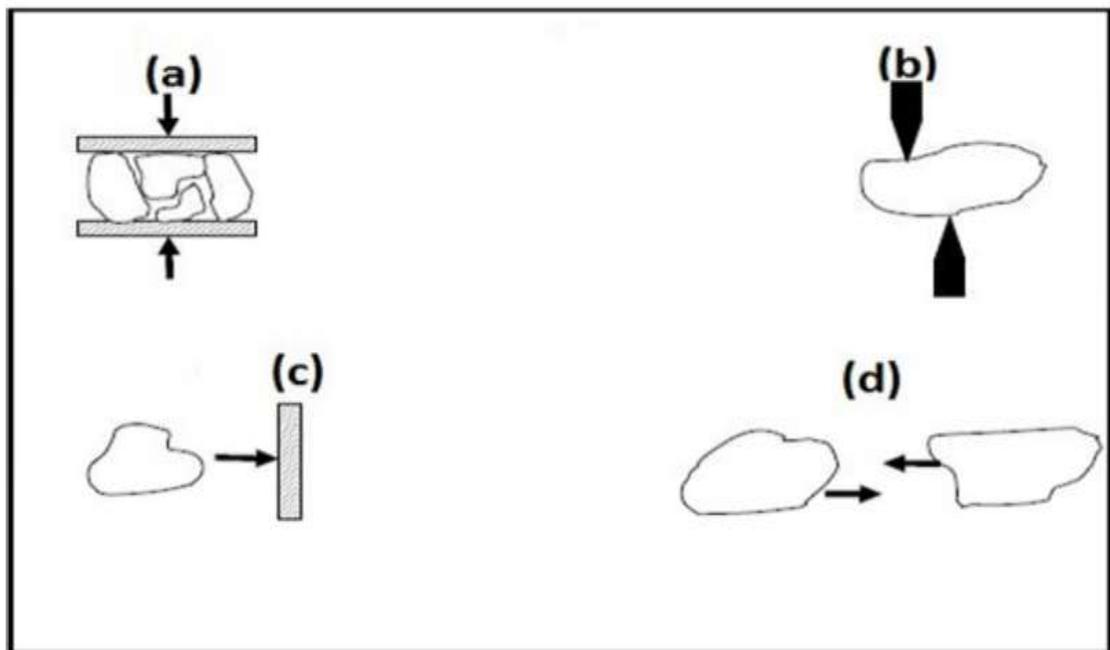


Figure 4 : schéma des différents modes de broyage

### I.3.4 Les différents types de broyeurs :

Dans l'industrie on peut rencontrer trois catégories de broyeurs, ils sont classés par leurs types de fragmentation, on peut notamment citer :

- Broyeur à fragmentation grossière (notre cas).
- Broyeur à fragmentation fine.
- Broyeur à fragmentation ultrafine.

### I.3.5 Broyeur à fragmentation grossière :

Dans ce domaine les forces mises-en en œuvre sont de type cisaillement, d'où on distingue plusieurs types de broyeurs pour la fragmentation des matériaux en particules grossières, à savoir ;

### I.3.6 Broyeur à couteaux :

Ils sont utilisés généralement pour broyer du plastique ou du papier. Le rotor porte les couteaux et le broyage se fait par cisaillement. Avec tous ces broyeurs on peut fixer la granulométrie.



Figure 5 : broyeur a couteaux

### I.3.7 Broyeur pour le papier :

L'action coupant du broyeur pour le papier est de réaliser par une série de lames mince tranchantes qui déchire le papier en petit morceaux.

### I.3.8 Broyeur pour le verre :

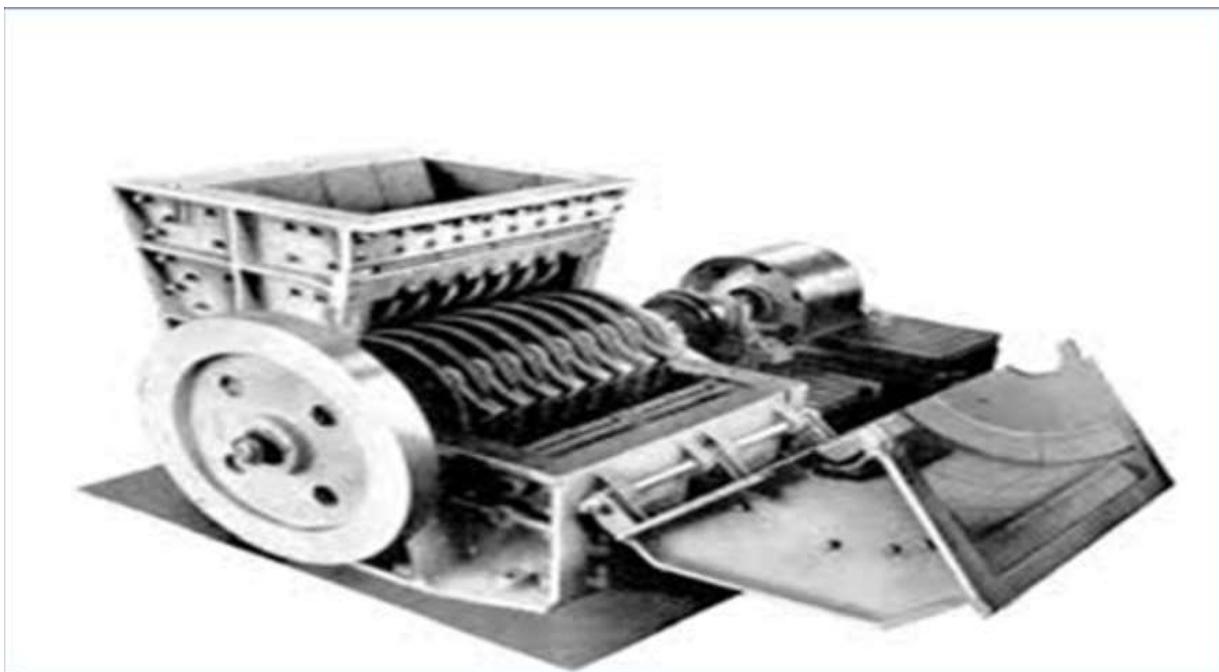
Ce type de broyeur utilise des bras sous forme des couteaux dans le but de casser les bouteilles de verre en petit morceaux.

**I.3.9 Broyeur à fragmentation fine (1000 à 10 $\mu$ m) :**

Les technologies ont été pratiquement restreintes à un seul mode d'action consistant à la mise en œuvre de forces d'impact (les particules sont comprimées entre les corps broyant ou projetées violemment contre une paroi qui peut être fixe ou bien les unes contre les autres. Dans ce cas-là on parlera d'auto broyage). On distingue plusieurs types [3] :

**I.3.10 Broyeur à marteaux :**

Le broyeur à marteaux est développé pour l'écrasement sec et humide des matériaux fragiles et mi-durs pour l'exploitation, du ciment, du charbon ...etc.



**Figure (3) :** Broyeurs à marteaux

**I.3.11 Broyeur à fragmentation ultrafine :**

Dans le domaine de l'ultrafine (particules de tailles comprises entre 5 et 10 $\mu$ m), les forces mises en œuvre sont de type compression, cisaillement et impact.

L'énergie théorique nécessaire pour la réduction ultrafine des grains est toujours inférieure à 1% de l'énergie réelle dépensée [3]. On peut citer :

### I.3.12 Broyeurs à billes :

Il est constitué d'une cuve mobile (en rotation autour d'un axe vertical ou horizontal). On introduit le produit à broyer dans la cuve et on introduit des billes ou des boulets). On introduit le produit à broyer dans la cuve (selon la taille voulue). Ces cuves et billes sont en acier inoxydable.

On fixe la vitesse d'avance et on assiste à une rotation du produit et des billes au même temps que la cuve. Il se crée des forces centrifuges et on peut voir la poudre collée contre les parois.

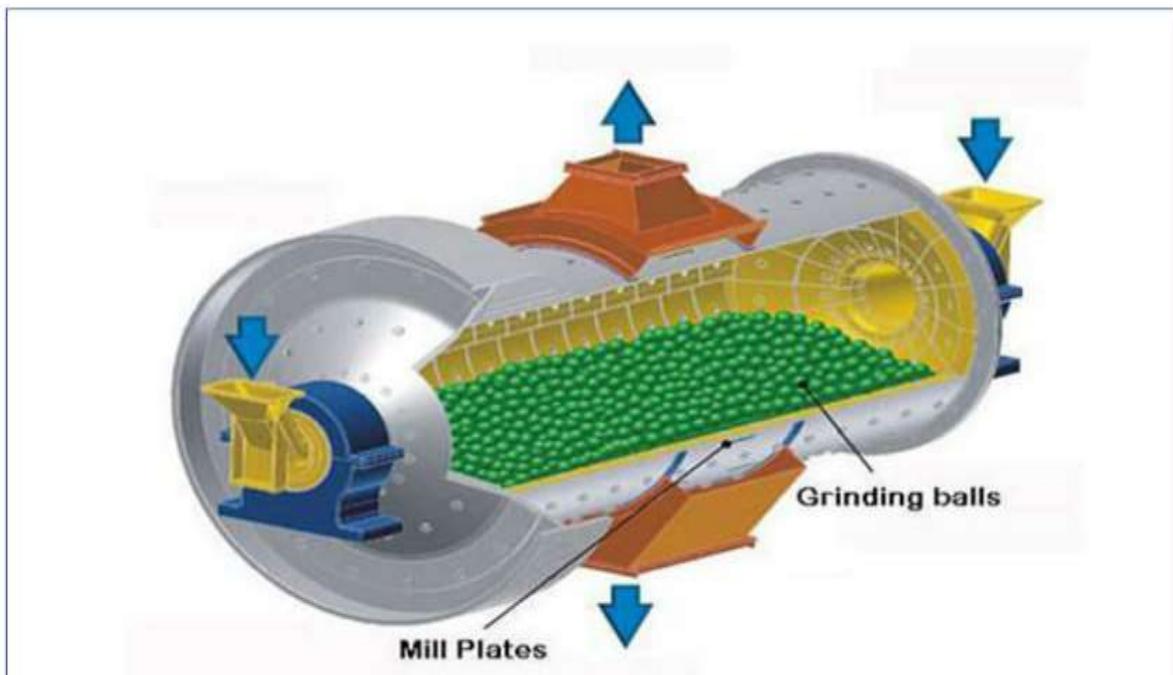


Figure (4) : broyeur à bille

### I.4 Conclusion :

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

# **Chapitre 2**

**Choix et sélection d'un broyeur**

## **Introduction :**

Dans ce chapitre nous allons illustrer les critères de choix d'un broyeur, qui est le mieux adapté pour un tel domaine ou un autre, et quels sont les paramètres qui nous permettent de choisir un broyeur et pas un autre.

## **II.1 Choix d'un broyeur :**

### **II.1.1 Critères de choix :**

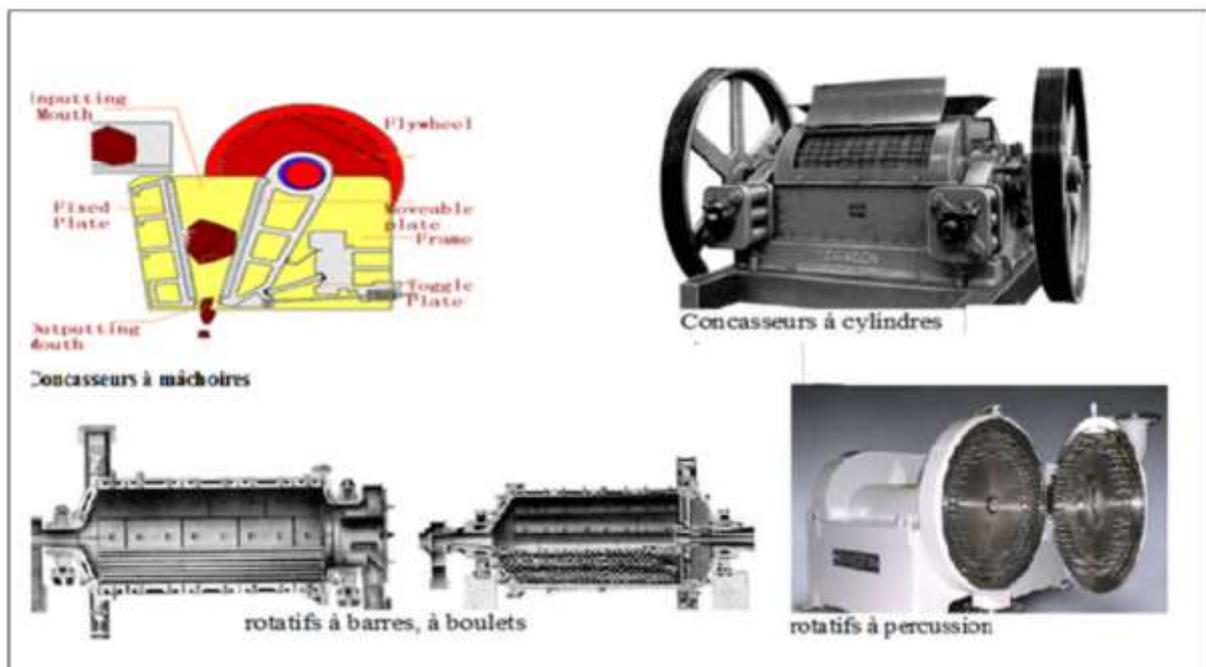
Bien qu'il existe de nombreux outils de broyage sur le marché, il est important de bien dimensionner et bien choisir son broyeur vu son prix élevé et la diversité de mode et techniques de broyage que propose chacun. Pour cela on distingue plusieurs critères et paramètres pour le choix d'un broyeur qui sont donnés selon la nature de la matière à broyer.

En général, pour choisir un broyeur il faut respecter les paramètres suivants :

- ✚ Paramètres intrinsèques aux matériaux : Il détermine son comportement lors de la déformation. Le champ de contraintes auquel on soumet le solide, joue sur les discontinuités pour l'amorçage et la propagation des fissures dont la distribution détermine la dimension, la forme des fragments et les nouvelles surfaces créés.
- ✚ Energie requise pour fracturer le matériau : Elle est dégagée par le champ des contraintes. L'énergie nécessaire à la rupture est de l'énergie supplémentaire car la propagation d'une fissure est consommatrice d'énergie. Elle est proportionnelle à la section du grain alors que l'énergie emmagasinée est proportionnelle au volume.
- ✚ Vitesse de déformation : Elle conditionne le comportement du matériau
- ✚ Réduction des dimensions du matériau : Elle n'est pas illimitée et nécessite la plupart du temps des stades successifs impliquant différents types d'appareils travaillant en série [6]. En effet la matière à broyer par ses caractères physico-chimiques offre un critère de choix très important pour un broyeur. La technologie appliquée varie selon la matière à traiter donc pour ces critères on peut rencontrer plusieurs types et on cite essentiellement les broyeurs ci-après :

### II.1.1.1 Broyage de matière dure :

Lorsqu' il s'agit d'un matériau dur tel que les matériaux de construction (roche gravier, céramique, granite...etc.) le broyeur qui est généralement utilisé pour ce genre de matériau est appelé concasseur. Nous avons le choix entre un broyeur avec mâchoires ou un autre à percussion, l'un utilisé pour les matériaux durs et abrasifs et l'autre pour les matériaux peu et non abrasifs respectivement. Pour répondre à d'autres besoins, nous avons les concasseurs giratoires, les perceurs et les concasseurs à cylindres ou à marteaux comme c'est le cas dans les cimenteries [6].



**Figure (5):** Broyeurs de matière dure.

### II.1.1.2 Broyage de bois et dérivé :

L'outil le plus adapté est le broyeur à couteaux, ce dernier est équipé à son extrémité de quoi couper la matière. Le broyage de déchets verts des souches de bois (diamètre maxi de 1.5m ) est effectué sous l'action de deux rotors de broyage à rotation lente tournant en sens inverse avec des outils agressifs.

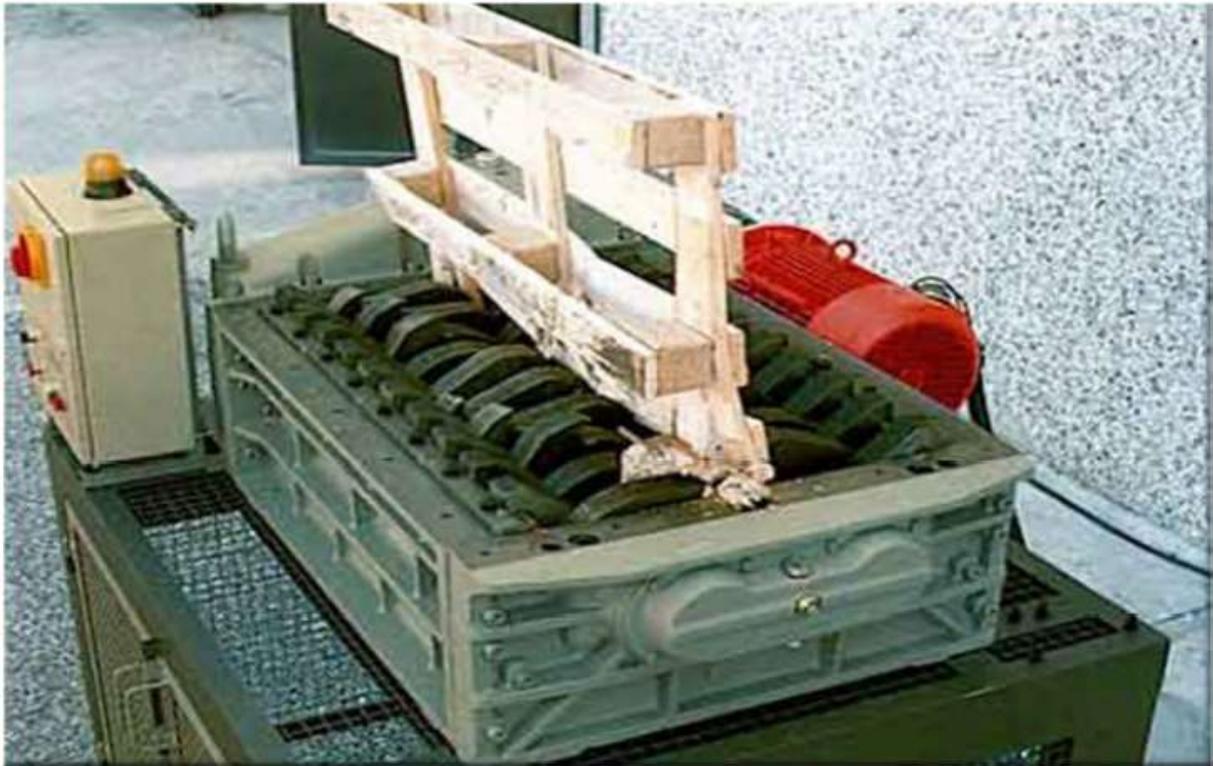


Figure (6): Broyeur pour le bois.

### II.1.1.3 Broyeur d'emballage :

Dans ce cas, la matière à broyer est souvent le papier, les cartons, le plastique mou...etc.et on utilise généralement des broyeurs type cisailleur. Ces broyeurs ont un arbre porte couteaux qui se croisent avec des couteaux fixes sur la carcasse et ensemble cisailent la matière.



Figure (7): broyeur pour carton.

### II.1.1.4 Broyage de céréales :

Pour les céréales l'action consacrée est soit la compression, les grains s'introduisent entre deux cylindres parfaitement ajustée pour assurer l'écrasement de cette matière. Soit un

broyeur à boulets ou on mélange les corps broyant et le produit à broyer (broyeur à billes agité) ce qu'on appelle un broyeur a mélange [4].



**Figure (8):** Broyeur a deux cylindres.

### **II.1.1.5 Broyage du plastique et matériaux fibreux :**

Pour ce type d'opération on dispose de divers moyens, ça fait l'objet de notre étude :

#### **A. Déchiqueteur mono rotor à grille de calibrage :**

Le Déchiqueteur mono rotor à grille de calibrage est conçu pour des applications de broyage nécessitant une maîtrise granulométrique des produits. Le déchiqueteur mono rotor est notamment utilisé dans les applications de déchiquetage de DIB (déchet industriel banal) bois purge plastique, câble électrique, destruction papier –mousse [4].



**Figure (9):** Déchiqueteur mono rotor à grille de calibrage

**B. Déchiqueteur à cisaille rotative avec 2 axes :**

La gamme de déchiqueteur industriel à cisaille rotatives 2 axes sans grille de calibrage est principalement conçue pour la réduction du volume des matières propres ou souillées en vue de leur préparation à des traitements secondaires ou réduction des coûts de transport. Son domaine d'application est extrêmement large, de simples emballages aux encombrants ménagers. [4]



**Figure (10):** Déchiqueteur mono rotor à grille de calibrage

**C. Déchiqueteur à cisaille rotative avec 3 axes à grille de calibrage :**

La gamme de déchiqueteurs industriels à cisailles rotatives 3 axes avec grille de calibrage est conçue pour des applications de broyage nécessitant des équipements extrêmement résistants avec maîtrise granulométrique des produits. Elle est également destinée, pour les petits modèles, au broyage d'archives et destruction de rebuts industriels propres ou souillés [4].



**Figure (11):** Déchiqueteur à cisaille rotative avec 3 axes à grille de calibrage.

**D. Lacérateur avec 4 axes :**

Cette série de broyeur est de 4 axes rotatifs qui portent des couteaux incliné en forme de (L) servant à déchiqueter les emballages en plastique encombrant comme les bidons et les DEEE (Déchets D'équipements Electrique et Electronique) [4].



**Figure (12):** Lacérateur à 4 axes

## II.2 Différents éléments d'un broyeur pour le plastique :



Figure(13) : Les différents éléments d'un broyeur plastique.

Numéro	Description
1	Trémie de chargement
2	Orifice de levage et de transport
3	Corps de la machine
4	Tableau électrique
5	Couvercle de la trémie
6	Moteur
7	Réducteur
8	Disque d'introduction
9	Groupes fraises
10	Grille
11	Base de la machine
12	Récipient avec goulot d'évacuation

Tableau 1: Les différents éléments d'un broyeur plastique.

Bien plus ; un broyeur peut être considéré comme un moyen de production si ses déchets sont introduits directement dans la chaîne de production. On considère (les déchets) comme matière première de la production (recyclage) [4].

**II.3 Les différentes opérations dans un broyeur pour le plastique :**

**Exemple :** broyeur à couteaux pour bidon de plastique.

**Phase 1 :**

L'élément à broyer vient s'appuyer sur le groupe de fraises. Pour le broyage il n'est pas nécessaire d'utiliser un poussoir quelconque.

**A****Phase 2 :**

Dès la mise en marche de la machine les disques introducteurs commencent « la saisie » du bidon, en forçant l'entrée dans le groupe de fraises.

**B****Phase 3 :**

La forme particulière des dents parvient à une action continue d'accrochage du matériau.

**C**

**Phase 4 :**

Les morceaux qui n'ont pas atteint la granulométrie souhaitée, sont renvoyés dans le circuit pour un broyage successif. A la fin, elle nous permet d'obtenir une finesse de broyage jusqu' à 12-14mm

**D**

**Figure (14) :** A, B, C, D : présentation des différentes phases du broyage d'un bidon plastique [5].

**II.4 Selon les caractéristiques techniques :**

Ce critère réunit la caractéristique physique du broyeur désiré ainsi que sa fiche technique qui englobe les critères suivants :

- La taille et gabarit de notre broyeur (dimensions)
- La puissance électrique du moteur
- La puissance mécanique sur les outils de broyages
- Vitesse de rotation
- Capacité de charge et le volume de trémie

**II.5 Selon la fiabilité et la disponibilité :**

Dès qu'on a déterminé la nature de la matière à broyer il est temps de sélectionner notre broyeur : selon sa disponibilité sur le marché, non seulement sa disponibilité comme machine mais aussi la disponibilité de ses pièces de rechanges et la facilité de maintenance. De plus notre broyeur doit avoir une bonne fiabilité avec un bon rendement et une longue durée de vie, ce qui nous donne deux critères qui ont une grande influence sur le choix d'un broyeur.

**II.6 Intérêt du choix :**

Faire toute une étude pour effectuer simplement un choix de broyeur, ce n'est pas une perte de temps, au contraire cette étude nous permet d'aller droit au but et de choisir un broyeur qui convienne à notre exigence et d'éviter les va et vient entre les différents marchés. En plus de ce gain de temps effectuer une bonne sélection dans le domaine de l'industrie signifie un gain économique car il ne faut pas dépenser de l'argent là où il ne faut pas, par conséquent procéder à une étude de choix est obligatoire.

**Conclusion :**

Vu les divers gains de l'étude de choix, que ce soit le gain de temps ou le gain économique faire une étude est indispensable, et afin d'effectuer une bonne sélection nous disposons de différents critères qui ont un rapport direct ou indirect avec la matière à broyer qu'on doit inspecter avant de faire un choix.

# Chapitre 3

## Dimensionnement

**Introduction :**

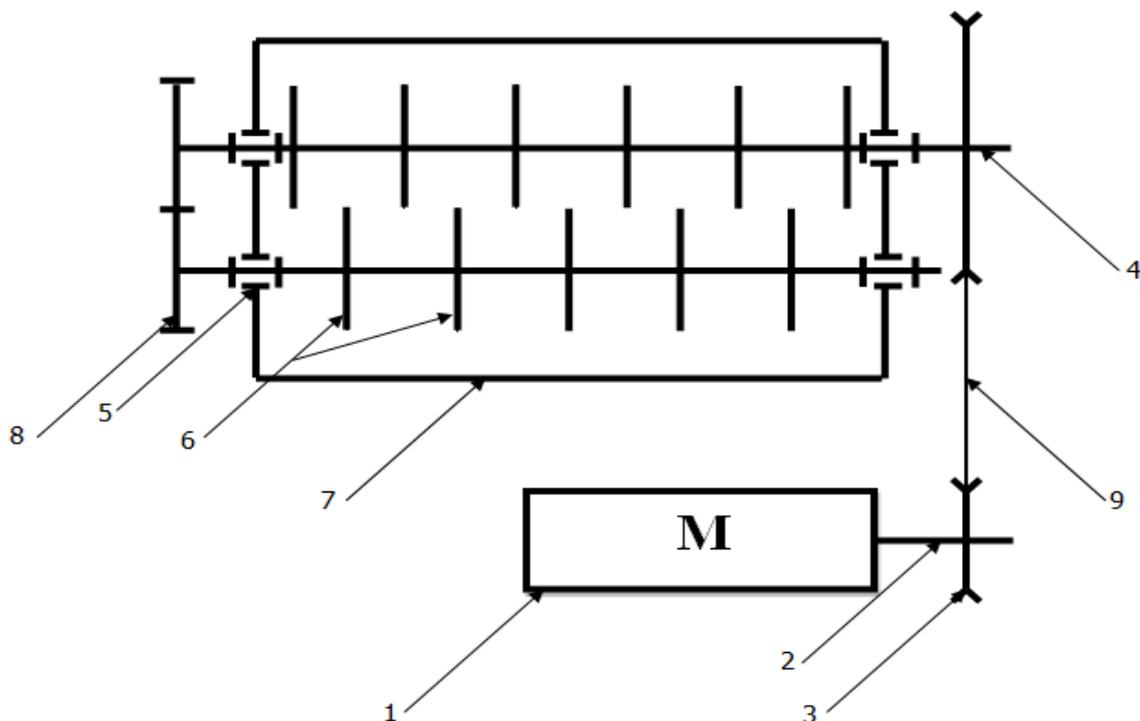
Ce chapitre est consacré à l'étude mécanique et cinématique d'un broyeur, ce dernier est destiné au broyage des bouteilles en plastiques. Nous avons choisi un broyeur dont le modèle est inspiré à partir des modèles existants sur le marché.

**Cahier de charge :**

- Puissance moteur  $P_m = 4\text{KW}$ .
- Vitesse de rotation donnée par le réducteur  $N = 500\text{ tr/min}$ .
- Longueur de l'arbre : 500mm.
- Diamètre de l'arbre : 40mm.

**III.1 Etude cinématique :****III.1.1 Schéma cinématique :**

Tout mécanisme est composé de plusieurs sous-ensembles reliés entre eux par une ou plusieurs liaisons et pour mieux comprendre il faut établir un schéma cinématique qui doit représenter le plus fidèlement possible les relations entre les différents groupes de pièces.



**Figure (15) : Schéma cinématique**

Désignation	Repéré	Nombre
Moteur électrique	1	1
Arber moteur	1	2
Poulie	2	3
Arber porte lames	1	4
Roulement	4	5
Lame	11	6
Carcasse	1	7
Engrenage	2	8
Courroie	1	9

**Tableau 2: les éléments de la chaîne cinématique**

La figure représente le schéma cinématique de la machine de broyage, elle est composée d'un :

- Moteur électrique fixé sur le châssis.
- Le mouvement d'arbre du moteur électrique est transmis à l'arbre qui port les lames par un réducteur de vitesse.
- Le mouvement de l'arbre (4) est transmis à la lame (6) à l'aide de cannelure sur l'arbre.
- Le mouvement de l'arbre(4) est transmis à l'arbre parallèle par deux roues dentées fixées sur chacun.

### III.1.2 Choix du moteur :

Le choix du moteur dépend essentiellement de la puissance à utiliser pendant le broyage.

### III.1.3 Calcul de la force de coupe $F_C$ du plastique :

Pour les données connues à partir du cahier de charge, nous allons calculer la force de coupe  $F_C$  Appliquée sur l'arbre pour couper le plastique.

Nous avons la formule de la puissance utile comme suit :

$$P = M_c \times \omega \dots\dots\dots(1)$$

$\omega$  : vitesse angulaire

Ou : P est la Puissance utile du moteur qui entraine le broyeur  $P_m= 40KW$ .

$M_c$ : est le couple moteur en (N\*m).

Nous avons la relation suivante :

$$M_c = F_c \times \frac{D}{2} \dots\dots\dots(2)$$

Où :  $F_c$  : est la force de coupe du plastique en N

$D$  : est le diamètre de l'arbre à couteaux

On remplace (2) dans (1) :

$$P = F_c \times \frac{D}{2} \times \omega$$

D'où l'on tire la force de coupe dans la formule suivante :

$$F_c = \frac{2P}{D \times \omega}$$

Avec :

$$\omega = \frac{2\pi N}{60}$$

Et : N est la vitesse de rotation de l'arbre en [tr/min]

AN :

$$F_c = \frac{2 \times 4000}{40 \times 10^{-3} \times 52.36}$$

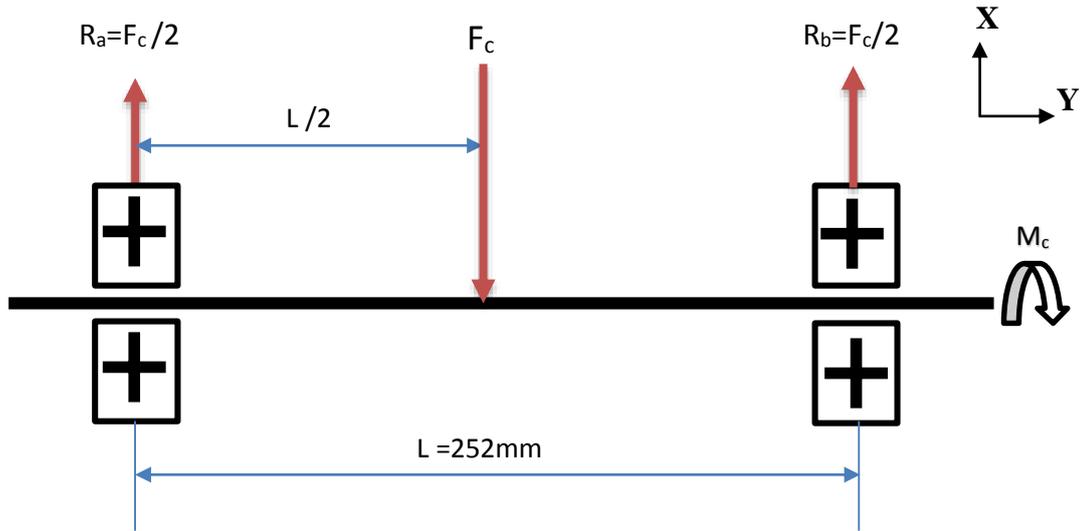


$F_c = 3819.71 \text{ N}$
---------------------------

**III.2 Calcul de RDM des éléments sollicités dans le broyeur :**

**III.2.1 Dimensionnement de l'arbre qui port les lames :**

**III.2.1.1 Calcul des réactions des paliers :**



**Figure (16) : Représentation des efforts appliqués sur l'arbre**

Par les principes fondamentaux de la statique

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum \vec{F}_{ext} = \vec{0} \\ \sum \vec{M}/A = \vec{0} \end{array} \right.$$

Avec :  $F_{ext}$  Forces extérieures exercées sur l'arbre.

M : moments exercés sur l'arbre.

Pour les forces en les projetant sur l'axe (Oy), et les moments par rapport au point (O) et on aura :

$$\left\{ \begin{array}{l} R_a - F_c + R_b = 0 \dots\dots\dots (1) \\ R_b \times L - F_c \times \frac{L}{2} = 0 \dots\dots\dots (2) \end{array} \right.$$

Avec :  $R_a$  et  $R_b$  : les Forces de réaction au niveau des appuis.

De (2) on a:

$$R_b = \frac{F_c \times \frac{L}{2}}{L} \Rightarrow R_b = \frac{F_c}{2}$$

AN:

$$R_b = \frac{3819.71}{2}$$

$$\Rightarrow \boxed{R_b = 1909.855 \text{ N}}$$

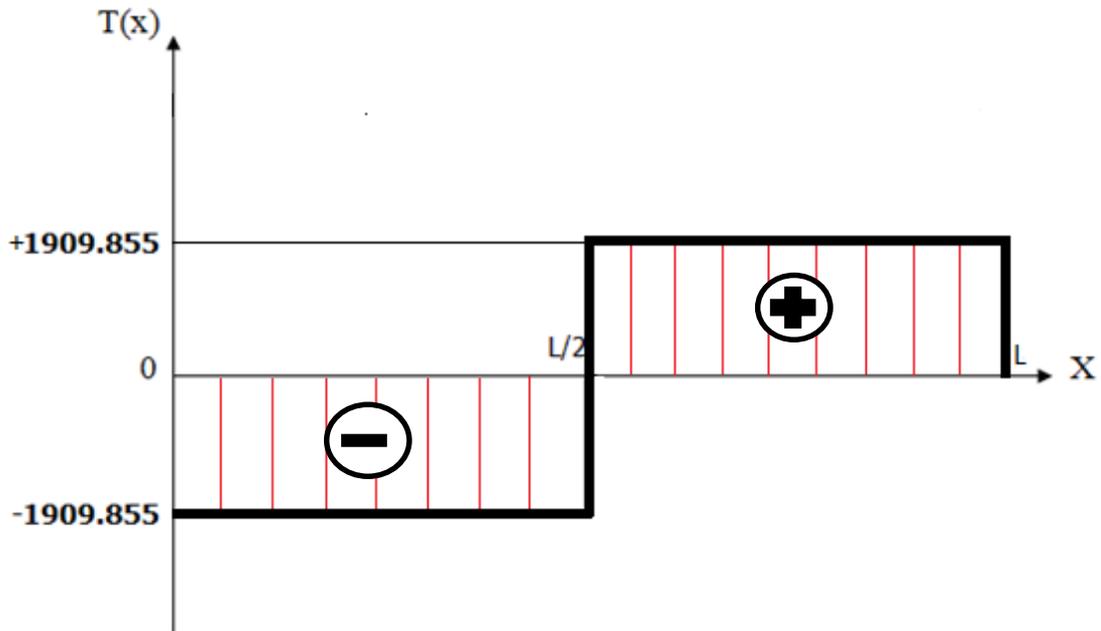
De (1) on a :

$$R_a = F_c - R_b$$

AN:

$$R_a = 3819.71 - 1909.855$$

$$\Rightarrow \boxed{R_a = 1909.855 \text{ N}}$$



Figure(17) : Digramme des efforts tranchant

### III.2.1.3 Calcul des moments fléchissant :

On a :

- **Tronçon (1)**  $0 < x < L/2$  :

$$\begin{aligned} R_a \times x + M(x) &= 0 \\ M(x) &= -R_a \times x \end{aligned}$$

AN :

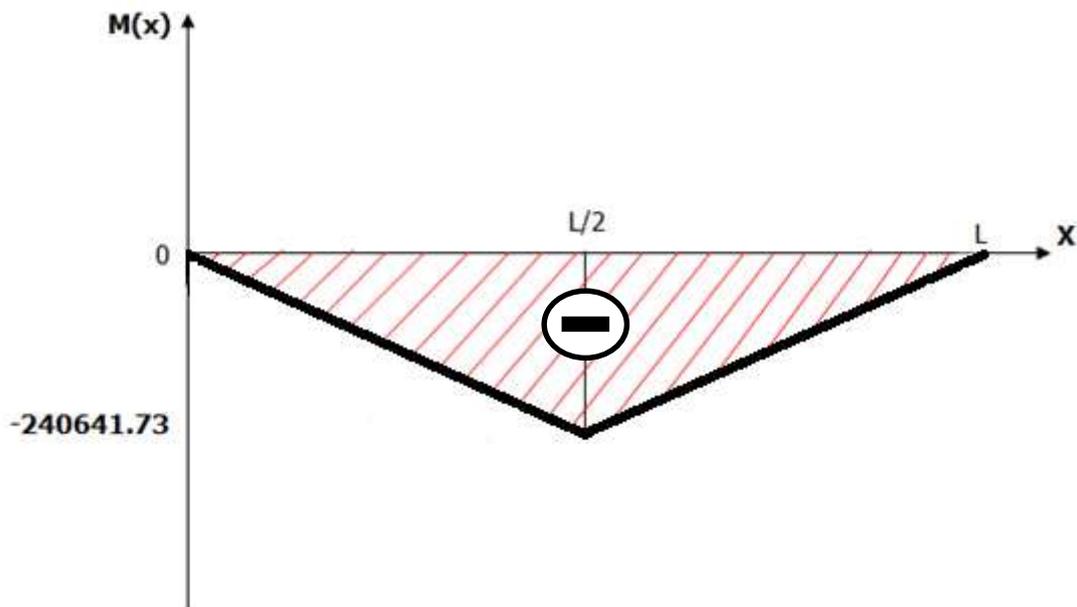
$$\left\{ \begin{array}{l} x = 0 : \quad M(0) = 0 \text{ N.mm} \\ x = \frac{L}{2} : \quad M\left(\frac{L}{2}\right) = -240641.73 \text{ N.mm} \end{array} \right.$$

- **Tronçon (2)**  $L/2 < x < L$  :

$$\begin{aligned} R_a \times x - F_c \times \left(x - \frac{L}{2}\right) + M(x) &= 0 \\ M(x) &= -R_a \times x + F_c \times \left(x - \frac{L}{2}\right) \end{aligned}$$

AN:

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{L}{2} : \quad M\left(\frac{L}{2}\right) = -240641.73 \text{ N.mm} \\ x = L : \quad M(L) = 0 \text{ N.mm} \end{array} \right.$$



**Figure(18)** : diagramme des moments fléchissant

A partir de la figure(18), on déduit  $M_{fmax} = 240641.73 \text{ N.mm}$

#### III.2.1.4 Calcul du diamètre de l'arbre à la flexion :

- **Matériaux utilisés pour l'arbre [7] :**

L'acier A60 : (A acier ordinaire et  $60 \text{ [daN/mm}^2\text{]}$  C'est la résistance minimale à la rupture). Selon la nouvelle désignation, cet acier est représenté par l'écriture S335(S pour acier d'usage général et 335 pour la valeur moyenne de sa limite d'élasticité soit 335 MPa).

➡ Famille des aciers non alliés

➡ Aciers d'usage courant ne devant subir aucun traitement thermique.

On a  $\sigma_p < R_e$  avec  $R_e = \sigma_e = 335 \text{ MPa}$  ( $R_e$  : Résistance d'élastique)

On prend un coefficient de sécurité  $s = 5$

Avec :

$$S = \sigma_e / \sigma_p$$

Où  $\sigma_p$  est la résistance pratique du matériau en MPA,

$\sigma_e$  est la résistance d'élasticité du matériau en MPA,

Et  $s$  est le coefficient de sécurité ( $s = 2.5$ ) pour notre étude.

D'où la relation devient :

$$\sigma_p = \sigma_e / s$$

$$\text{AN : } \sigma_p = 335/5$$

$$\Rightarrow \sigma_p = \mathbf{67 \text{ MPa}}$$

D'après la documentation technique (technique de l'ingénieur), la résistance au cisaillement est reliée à la résistance à la traction par la relation suivante :

$$\tau_e = 0.7 \times \sigma_e$$

$$\text{Ou } \tau_p = 0.7 \times \sigma_p$$

Où  $\sigma_p$  est la contrainte pratique à la traction en MPA,

Et  $\tau_p$  est la contrainte pratique au cisaillement en MPA.

Application numérique

$$\tau_p = 0.7 \times 67$$

$$\Rightarrow \boxed{\tau_p = 46.9 \text{ MPa}}$$

Nous avons l'arbre qui porte des couteaux soumis à la flexion, d'où nous allons calculer le diamètre de ce dernier qui peut résister à cet effort dans le cas le plus défavorable ou la force de coupe est appliquée au milieu de cet arbre.

On sait que la contrainte maximale à la flexion est donnée par la relation suivante :

$$\sigma = \frac{M_{f \max}}{I_{gz}/v} \leq \sigma_p$$

Où  $I_{gz}$  est le moment quadratique polaire en  $\text{mm}^4$ ,

Et  $v$  est le rayon de l'arbre (section circulaire,  $v = R$ ) en mm.

Nous avons un arbre plein, d'où le moment quadratique polaire est :

$$I_{gz} = \frac{\pi R^4}{4}$$

D'où on obtient :

$$R \geq \sqrt[3]{\frac{4 \times M_{f \max}}{\pi \times \sigma_p}}$$

AN:

$$R \geq \sqrt[3]{\frac{4 \times 240641.73}{\pi \times 67}} \Rightarrow R \geq 16.59 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \boxed{d \geq 33.18 \text{ mm}}$$

D'où on retient un diamètre de l'arbre à la flexion :

$$\boxed{d = 40 \text{ mm}}$$

### III.2.1.5 Calcul du diamètre de l'arbre à la torsion :

Premièrement nous allons calculer le moment de torsion de l'arbre qui porte les couteaux à partir des données qui se trouvent dans le cahier de charge, dans le but de calculer son diamètre qui peut résister à l'effort de torsion appliquée sur cet arbre.

Nous avons la relation suivante :

$$M_t = \frac{P}{\omega}$$

Où  $M_t$  est le moment de torsion de l'arbre en Nm.

AN:

$$M_t = \frac{4000}{52.36}$$

$$\boxed{M_t = 76.3942 \text{ Nm}}$$

Pour les mêmes données utilisées pour le calcul du diamètre de l'arbre à la flexion et après le calcul du moment de torsion nous allons calculer le diamètre de ce dernier à la torsion.

On sait que la contrainte maximale à la flexion est donnée par la relation suivante :

$$\tau_{\max} = \frac{M_t \times v}{I_0} \leq \tau_p$$

Où  $I_0$  est le moment quadratique polaire en mm<sup>4</sup>,

Et  $v$  est le rayon de l'arbre (section circulaire,  $v = R$ ) en mm

Avec :

$$I_0 = \frac{\pi \cdot R^4}{2}$$

Nous allons calculer le rayon de l'arbre à la torsion, d'où on obtient la relation finale suivante :

$$R \geq \sqrt[3]{\frac{2 \times M_t}{\pi \times \tau_p}}$$

AN:

$$R \geq \sqrt[3]{\frac{2 \times 76394.2}{\pi \times 46.9}}$$

$$\Rightarrow \boxed{R \geq 10.12 \text{ mm}}$$

D'où on retient un diamètre de l'arbre à la torsion :

$$\boxed{D \geq 20.24 \text{ mm}}$$

### III.2.1.6 Vérification aux sollicitations composées :

Nous avons un arbre qui est soumis à une sollicitation composée (flexion et torsion), dans ce cas nous allons calculer le diamètre idéal de cet arbre à partir du **critère de Rankine**.

La condition de résistance selon Rankine s'exprime par la relation suivante :

$$|\sigma_{\max}| \leq \sigma_p$$

Nous avons la relation de Rankine suivante :

$$|\sigma_{\max}| = \frac{1}{2} \times \left[ \frac{M_{ifz} + \sqrt{M_{ifz}^2 + M_{it}^2}}{I_{gz}/v} \right] \leq \sigma_p$$

- Où :
- $\sigma_{\max}$  est la contrainte maximale de flexion en Mpa,
  - $\sigma_p$  est la contrainte pratique de flexion en Mpa,
  - $M_{it}$  est le moment de torsion idéal ( $M_{it} = M_t$ ) en N.m,
  - $v$  est le rayon de l'arbre (section circulaire) en mm, avec :  $v = R$ ,
  - Et  $I_{gz}$  est le moment quadratique polaire en mm<sup>4</sup>.

Pour une section circulaire le moment quadratique polaire est :

$$I_{gz} = \frac{\pi R^4}{4}$$

D'où on obtient la relation suivante :

$$\sigma_p \geq 2 \times \left[ \frac{M_{ifz} + \sqrt{M_{ifz}^2 + M_{it}^2}}{\pi \times R^3} \right]$$

D'où l'on tire

$$R \geq \sqrt[3]{2 \times \left[ \frac{M_{ifz} + \sqrt{M_{ifz}^2 + M_{it}^2}}{\pi \times \sigma_p} \right]}$$

AN :

$$R \geq \sqrt[3]{2 \times \left[ \frac{240641.73 + \sqrt{(240641.73)^2 + (76394.2)^2}}{\pi \times 46.9} \right]}$$

$$R \geq 18.87 \text{ mm}$$

D'où le diamètre de l'arbre est

$$D \geq 37.69 \text{ mm}$$

- **Remarque :**

Après la vérification de la sollicitation composée nous allons prendre un arbre de diamètre est de 40mm (sans prendre les outils en considération) ce qui est sur le marché.

### III.2.2 Dimensionnement des lames :

- **Matériaux utilisés [8] :**

➡ Désignation : 42 Cr Mo 4

➡ Famille des aciers faiblement alliés

➡ 42 % de carbone -1% de chrome

- **Calcul de la longueur totale des lames :**

Nous allons calculer la longueur totale des lames pour un effort de coupe  $F_c$  concentré

Et pour cela nous avons les données suivantes :

$e$  : est l'épaisseur du plastique à couper ( $e=2\text{mm}$ )

$S$  : est la surface à la rupture du plastique à couper en  $\text{mm}^2$ .

$\sigma_r$  : est la résistance à la rupture du plastique  $\sigma_r=25\text{Mpa}$ . [8]

Le plastique à couper est sollicité au cisaillement, d'où on obtient les relations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau \leq F_c / S \\ S = L_{\text{lame}} \times e \end{array} \right.$$

Avec

$L_{\text{lame}}$  : est la longueur totale des lames.

$\tau$  : est la contrainte de rupture au cisaillement du plastique.

Selon la documentation technique (technique de l'ingénieur) la contrainte de rupture au cisaillement du plastique est reliée à la contrainte de rupture à la traction par la relation suivante :

$$\tau = 0.7 \times \sigma_r \quad [8]$$

Et on aura la relation suivante :

$$0.7 \times \sigma_r \leq \frac{F_c}{L_{\text{lame}} \times e}$$

A partir de cette relation, on tire la relation suivante

$$L_{\text{lame}} \geq \frac{F_c}{0.7 \times \sigma_r \times e} \Rightarrow L_{\text{lame}} \geq \frac{3819.71}{0.7 \times 25 \times 2} \Rightarrow L_{\text{lame}} \geq 109.13\text{mm}$$

On prendra :

$$L_n = 150\text{mm}$$

### III.3 Réducteur [8] :

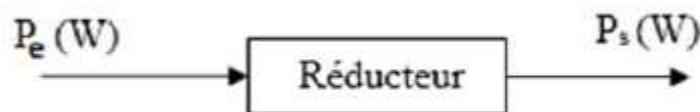
Un réducteur est un élément permettant de transmettre une puissance entre un moteur et une machine en réduisant la vitesse (c'est-à-dire avec un rapport de réduction inférieur à 1).

Cette transmission de puissance a pour but d'adapter les caractéristiques du moteur à celles de la machine tout en augmentant le couple de sortie. Les multiplicateurs de vitesse sont aussi des transmetteurs de puissance que nous ne traiterons pas dans cette étude.

Il existe différents types de réducteurs : mécaniques, hydrauliques, pneumatiques.

Parmi les réducteurs mécaniques, on rencontre, les systèmes poulies/courroies, les trains d'engrenage ordinaire (parallèle, conique, gauche) ou encore les trains épicycloïdaux (plan, sphérique).

#### III.3.1 Principe de fonctionnement des réducteurs :



La puissance d'entrée  $P_e$  se définit comme  $P_e = C_e \times \omega_e$

Avec  $C_e$  : le couple d'entrée (N.m) et  $\omega_e$  la vitesse angulaire d'entrée (rad/s).

La puissance de sortie  $P_s$  se définit comme  $P_s = C_s \times \omega_s$

Avec  $C_s$  : le couple de sortie (N.m) et  $\omega_s$  : la vitesse angulaire de sortie (rad/s).

Dans le cas d'un mouvement de rotation :

La loi entrée sortie d'un point de vue cinématique revient à établir le rapport entre les vitesses angulaires comme suit :

$$\omega_s / \omega_e = I$$

Avec  $I$  : rapport de réduction

### III.3.2 Transmission par poulies et courroies [9] :

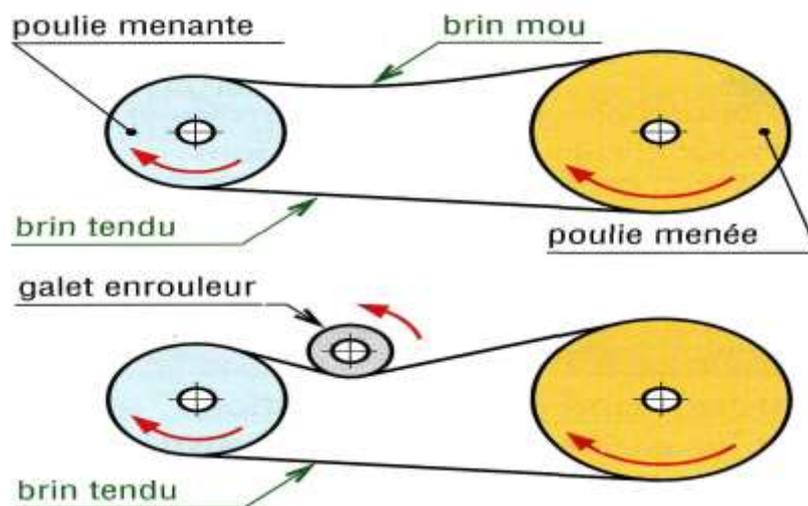
Les poulies et les courroies permettant de transmission d'un mouvement de rotation d'un arbre menant à un arbre mené relativement éloigner l'un de l'autre.

Silencieuses, elles sont surtout utilisées aux vitesses élevées avec de grands entraxes possibles entre poulies.

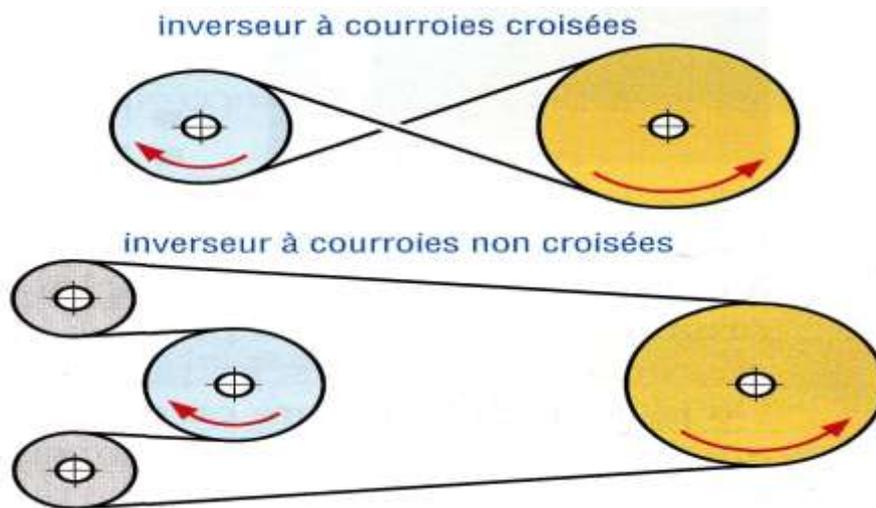
La tension initiale des courroies est indispensable pour garantir l'adhérence et assurer la transmission du mouvement.

Un système à entraxe réglable ou un dispositif annexe de tension (galet enrouleur, etc.) est souvent nécessaire pour régler la tension initiale et compenser l'allongement des courroies au cours du temps.

À l'exception des courroies crantées, en fonctionnement normal, il existe un léger glissement de la courroie sur les poulies amenant une imprécision du rapport de transmission ; celui-ci n'est pas exactement égal au rapport des diamètres des deux poulies.



**Figure(19) :** Principe d'une transmission par poulie courroie.



Figure(20): Inverseurs.

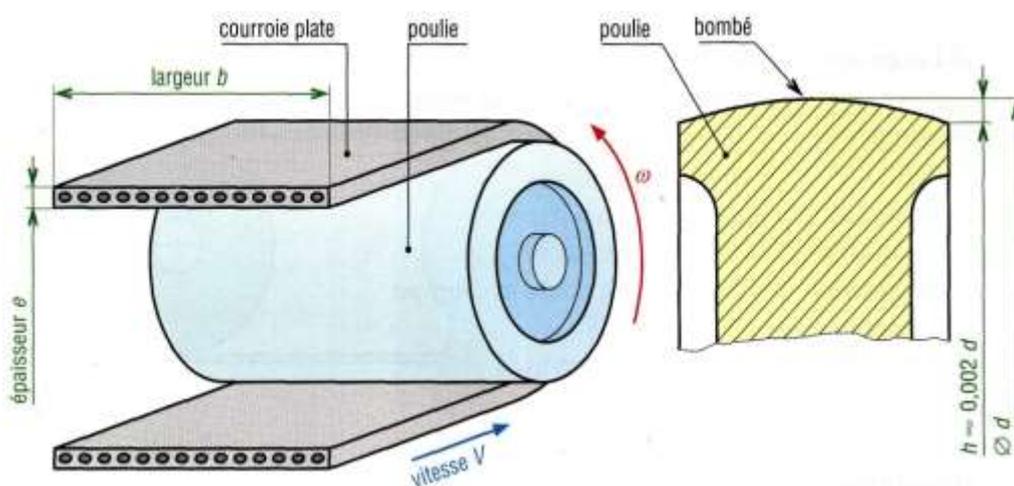
### III.3.3 Les différents types de courroies et poulies :

#### III.3.3.1 Courroies plates :

Très silencieuses, elles permettent de grands rapports de réduction et sont surtout utilisées aux grandes vitesses (80 à 100 m/s) sous de faibles couples.

Elles absorbent bien les vibrations torsionnelles, ce qui autorise les grands entraxes et les grandes longueurs. Elles ont un très bon rendement ( $\sim 98\%$ , comparable aux engrenages). Le bombé des poulies permet un meilleur guidage et une meilleure stabilité de la courroie et compense dans une certaine mesure un désalignement initial.

Matériaux : polyuréthane ( $< 25$  m/s), polyester, aramide revêtu silicone ( $< 80$  m/s).



Figure(21) : Courroie plate

### III.3.3.2 Courroies trapézoïdales :

Les courroies trapézoïdales sont les plus utilisées ; à tension égale elles transmettent une puissance plus élevée que les courroies plates (conséquence de la forme en V augmentant la pression de contact et par là l'effort transmissible).

Si une puissance élevée doit être transmise on peut utiliser plusieurs courroies en parallèles sur la même poulie (avec 1, 2, 3..., 10 gorges).

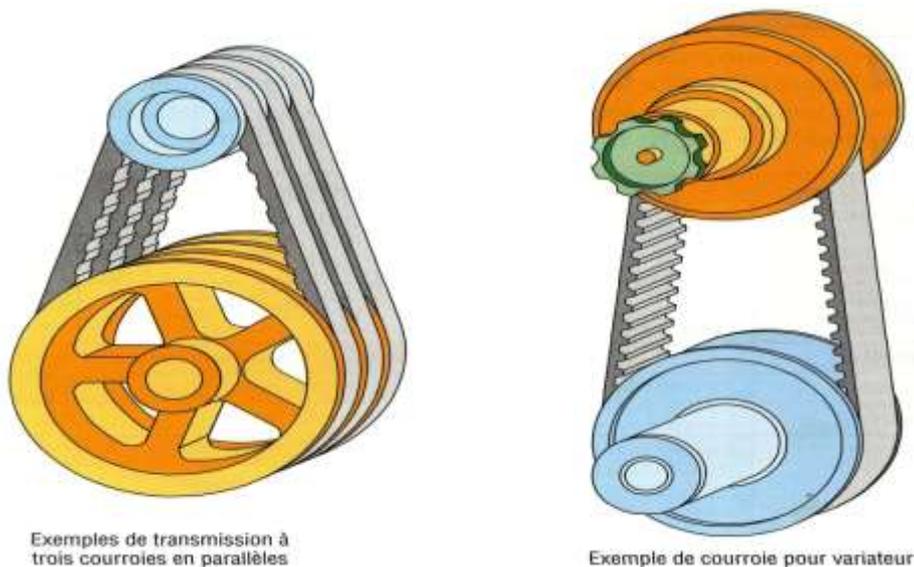
Le montage nécessite un bon alignement des poulies et un réglage de l'entraxe pour le montage et le démontage.

On obtient ainsi une forte adhérence par coincement de la courroie dans la gorge de la poulie environ trois fois plus une courroie plate dans un même matériau.

Il est, ainsi, possible de réduire l'arc d'enroulement d'avoir un entraxe relativement courts.

Matériaux : matériau composite chloroprène et fibres de verre et files d'acier.

Température d'utilisation : de  $-25\text{ C}^{\circ}$  à  $+85\text{ C}^{\circ}$

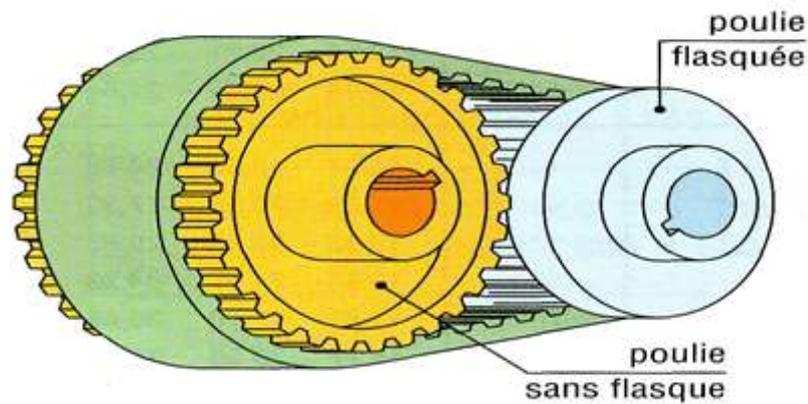


**Figure(22) :** Exemples d'application des courroies trapézoïdales.

### III.3.3.3 Courroies crantées (ou synchrones) :

On peut les considérer comme des courroies plates avec des dents. Elles fonctionnent par engrenement, sans glissement, comme le ferait une chaîne mais avec plus de souplesse.

Contrairement aux autres courroies, elles supportent bien les basses vitesses et exigent une tension initiale plus faible.



Figure(23) : Exemple de transmission par courroie crantée.

### III.3.4 Calcul des courroies et poulies [9] :

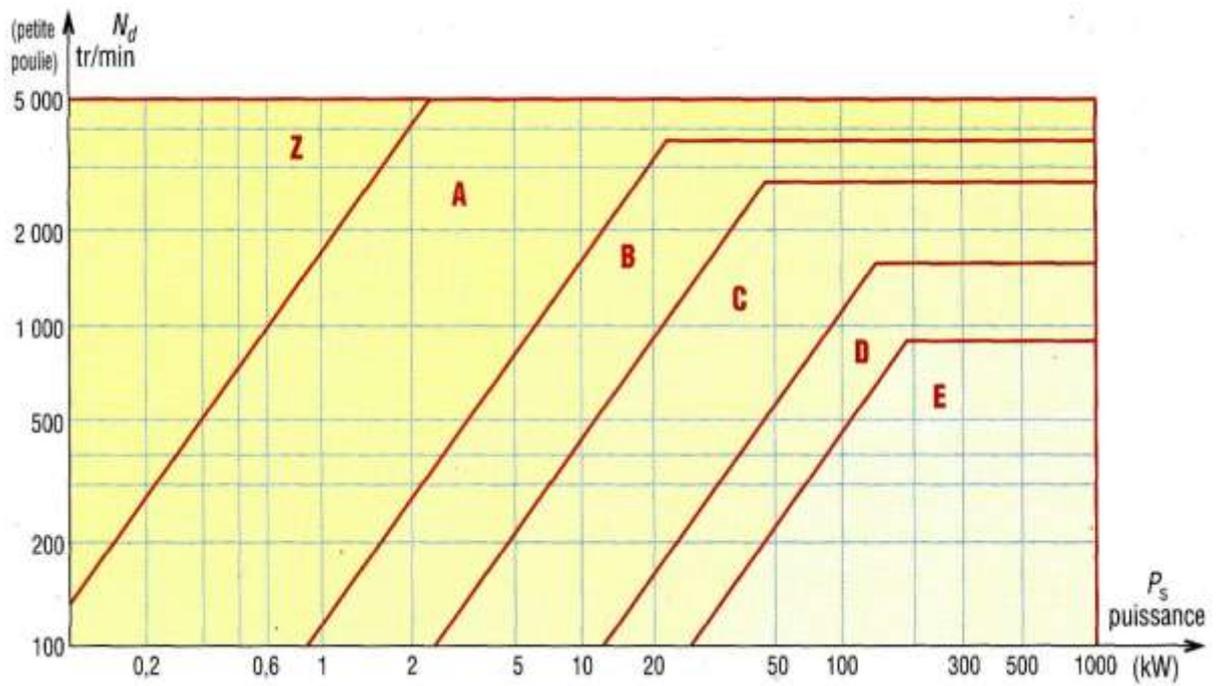
On a :

- $P = 4 \text{ KW}$
- $N_d = 2850 \text{ tr/min}$
- $N_D = 500 \text{ tr/min}$
- Durée du travail est de 6 à 15h

On adopte un  $K_s$  de 1.3 pour l'installation.

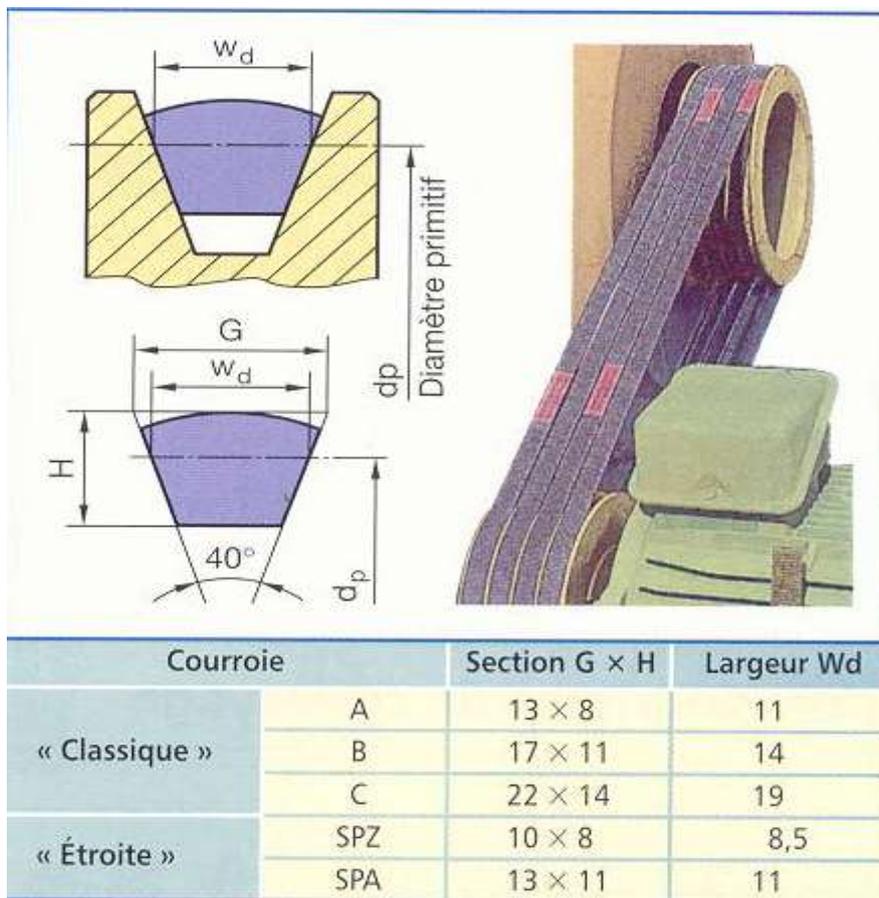
D'où  $P_s = P * K_s = 4 * 1.3 = 5.2 \text{ KW}$

Choix de section de la courroie à partir du graphe 1 :



**Graphe (1) :** gamme des puissances transmissibles par type de courroie [9]

Donc permet de sélectionner les courroies de type **A**



**Figure(24) :** caractéristique des courroies [9]

- **Diamètres primitifs :**

$d = 75$  mm est imposé pour la petite poulie.

Et pour la grande poulie on a :

Le rapport de transmission :

$$r = \frac{N_D}{N_d} = \frac{\omega_D}{\omega_d} = \frac{d}{D}$$

$$\frac{N_D}{N_d} = \frac{d}{D} \Rightarrow \frac{500}{2850} = \frac{75}{D}$$

$$\Rightarrow \boxed{D = 427.5 \text{ mm}}$$

- **Calcul de la vitesse de la courroie :**

Pour calculer cette vitesse on a la relation suivante :

$$v = \omega_d \times \frac{d}{2}$$

$$v = \frac{\pi \times N_d}{30} \times \frac{d}{2}$$

$$v = 11191.9 \text{ Mm/s}$$

$$\Rightarrow v = 11.1919 \text{ m/s}$$

$$\Rightarrow \boxed{v = 11 \text{ m/s}}$$

- **Calcul de longueur primitive courroie :**

On calcule d'abord l'entraxe (**a**) :

$$\text{On a } \frac{D}{d} = 5.7 > 3$$

$$\text{Donc } a \geq D \Rightarrow a \geq 427.5 \text{ mm}$$

$$a_{\min} = 427.5$$

$$\text{Limite supérieure : } \alpha < 3 \times (D + d) = 1507.5 = a_{\max}$$

$$\Rightarrow \boxed{a = 446}$$

$$L_p = 2 \times a + 1.57 \times (D + d) + \left[ \frac{(D - d)^2}{4 \times a} \right]$$

Avec **L<sub>p</sub>** la longueur primitive courroie

$$L_p = 2 \times 446 + 1.57 \times (427.5 + 75) + \left[ \frac{(427 - 75)^2}{4 \times 446} \right]$$

$$L_p = 1750\text{mm}$$

- Puissance de base de la courroie :

On a :

$$d = 75 \text{ mm}$$

$$v = 11\text{m/s}$$

4. Puissance de base $P_b$ en kW des courroies trapézoïdales classiques													
type courroie	diamètre primitif	vitesse linéaire $V$ de la courroie (m/s)					type courroie	diamètre primitif	vitesse linéaire $V$ de la courroie (m/s)				
		5	10	15	20	25			5	10	15	20	25
Z	50	0,45	0,72	0,85	-	-	C	180	3,92	6,10	7,33	8,32	-
	60	0,62	1,05	1,35	-	-		210	4,59	7,38	9,40	10,86	11,76
	70	0,73	1,29	1,70	1,94	-		240	4,99	8,31	10,82	12,75	14,14
	80	0,83	1,48	1,97	2,30	2,41		280	5,50	9,27	12,26	14,70	16,50
	90	0,90	1,61	2,18	2,58	2,76		320	5,83	9,96	13,34	16,10	18,29
	100	0,95	1,72	2,37	2,80	3,04		360	6,14	10,56	14,16	17,19	19,69
	110	1,00	1,82	2,48	2,99	3,27		430	6,55	11,25	15,32	18,68	21,43
A	85	1,25	2,04	2,66	3,01	-	D	290	8,92	13,44	15,95	16,80	-
	100	1,42	2,37	3,12	3,99	4,10		320	9,84	15,41	18,90	20,74	20,92
	115	1,55	2,64	3,52	4,21	4,73		360	10,94	17,50	22,07	24,96	26,19
	130	1,65	2,85	4,04	4,60	5,22		400	11,80	19,20	24,61	28,33	30,42
	150	1,75	3,03	4,10	4,80	5,72		460	12,78	21,18	27,55	32,29	34,37
	170	1,82	3,19	4,33	5,00	6,10		520	13,58	22,71	29,85	35,35	39,20
	190	1,87	3,30	4,54	5,55	6,39		580	14,16	23,96	31,64	37,76	42,80
B	120	2,11	3,23	4,23	4,80	-	E	440	10,97	18,85	24,69	28,33	29,44
	140	2,35	3,95	5,02	5,83	6,37		480	11,89	20,65	27,39	31,92	33,91
	160	2,57	4,03	5,61	6,63	7,37		520	12,62	22,15	29,63	34,95	37,68
	180	2,72	4,39	6,09	7,24	8,14		600	13,84	24,57	33,28	39,86	43,75
	200	2,81	4,81	6,42	7,71	8,75		700	14,94	27,26	36,66	44,28	49,35
	220	2,92	4,89	6,73	8,13	9,24		800	15,77	28,50	39,18	47,60	53,56
	250	3,01	5,06	6,89	8,64	8,85		950	16,82	30,40	42,00	51,40	59,13

Les puissances  $P_b$  indiquées sont des moyennes et peuvent varier sensiblement d'un fabricant à l'autre (consulter leurs catalogues pour des renseignements plus détaillés)

**Tableau 3 :** Puissance de base en KW des courroies trapézoïdal classique [10].

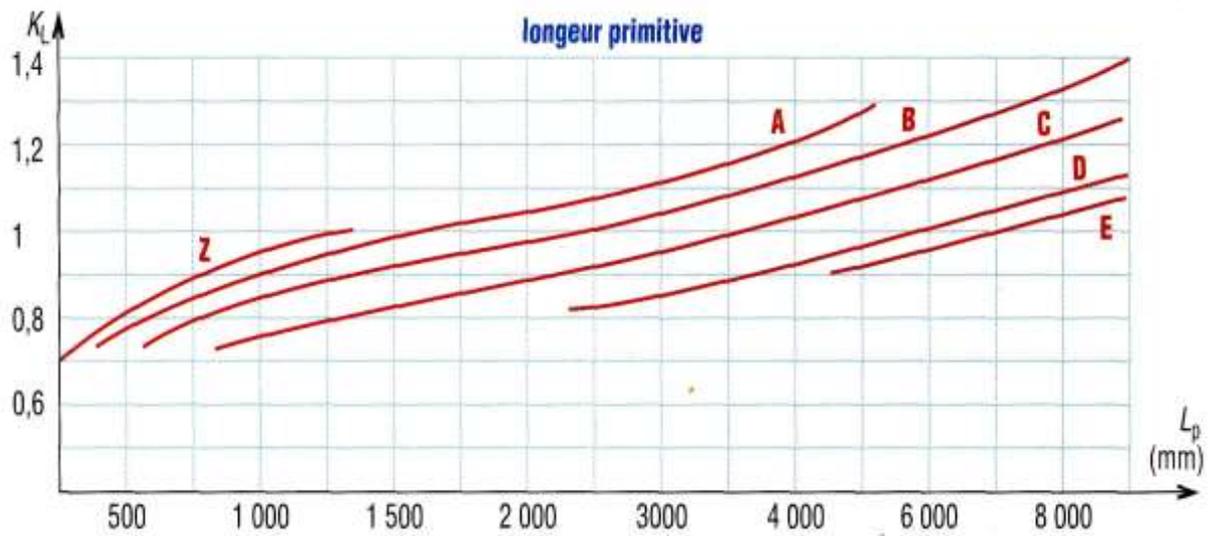
Et d'après le tableau 3 on a les valeurs suivent 2.66 et 2.04

On a obtenu par interpolation entre 2.66 et 2.04

$$P_b = 2.16 \text{ kW}$$

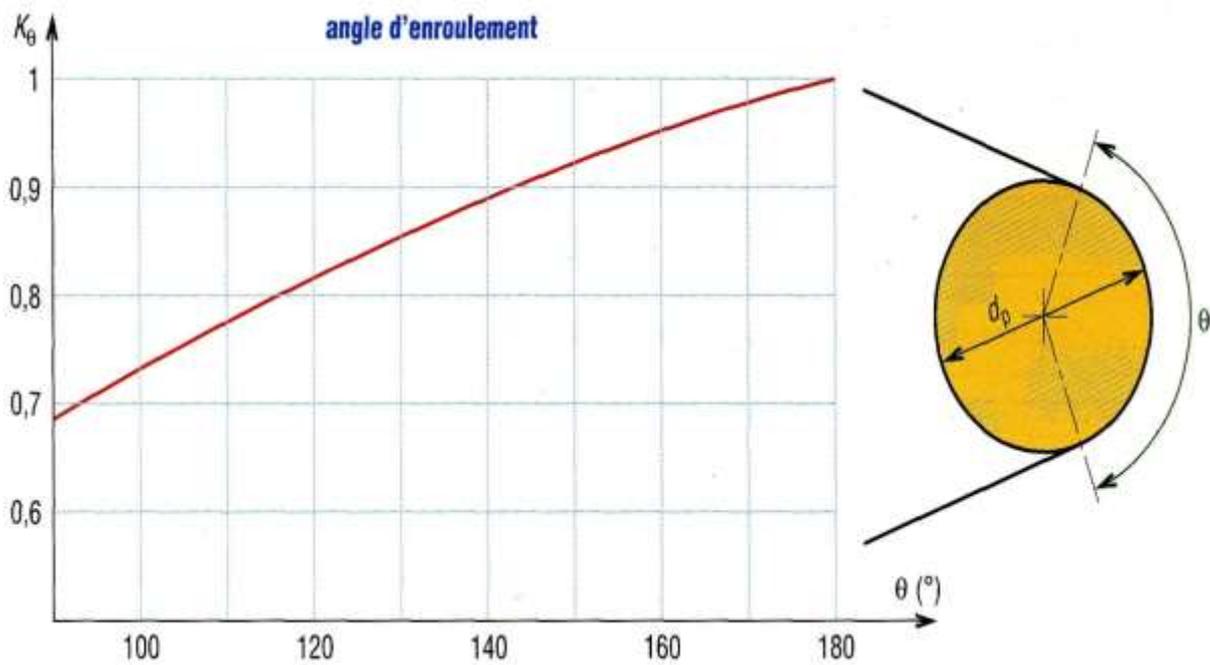
- **Puissance admissible de la courroie choisie :**

On sait que :  $P_a = P_b \cdot K_L \cdot K_\theta \cdot K_L$



**Graphe 2 : longueur primitive [9]**

$K_L \approx 1.01$  (graphe 2 avec  $L_p = 1750$ ) ;



**Graphe 3 : angle d'enroulement [9]**

$K_\theta \approx 0.88$  (graphe 3 avec  $\theta = 133.45^\circ$ )

$$\theta = 180^\circ - 2 \sin^{-1} \left[ \frac{(D-d)}{2 \times a} \right] \quad \text{AN : } \theta = 180^\circ - 2 \sin^{-1} \left[ \frac{(427-75)}{2 \times 446} \right]$$

$$P_a = 2.16 \times 1.01 \times 0.88 = 1.92 \text{ kW}$$

- **Nombre nécessaire de courroies :**

$$n_c = P_s / P_a$$

AN :

$$\boxed{5.2/1.92=2.7} \quad \longrightarrow \quad \text{soit 3 courroies}$$

### III.3.5 Transmission par engrenage :

L'engrenage est un mécanisme élémentaire constitué de deux roues dentées mobiles autour d'un axe de position relative invariable, et dont l'une entraîne l'autre par l'action de dents successivement en contact.

Ils sont classés en différentes catégories caractérisées par :

- position relative des axes des arbres d'entrée et de sortie.
- la forme extérieure des roues dentées.
- le type de denture.

Les engrenages ont pour fonction de transmettre la puissance, les deux vitesses (entrée et sortie) restant dans un rapport constant, c'est une transmission homocinétique.

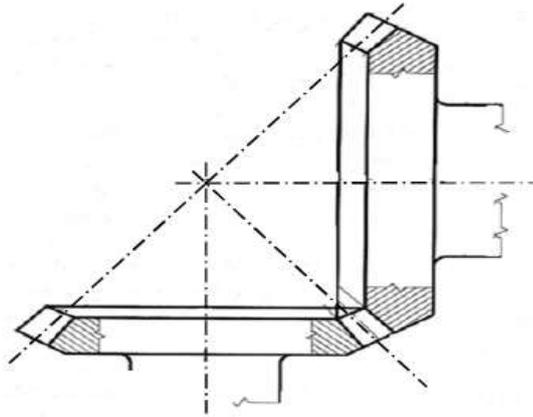
Les solutions concurrentes :

- Transmission par accouplement.
- Transmission par friction.
- Transmission par courroie.

#### III.3.5.1 Classification des engrenages :

- **Engrenages à axe concourants :**

Les axes des deux roues dentées sont Concourants.



Figure(25) : Engrenages à axe concourants

- **Engrenages à axe parallèles :**

Les axes des deux roues dentées sont parallèles.

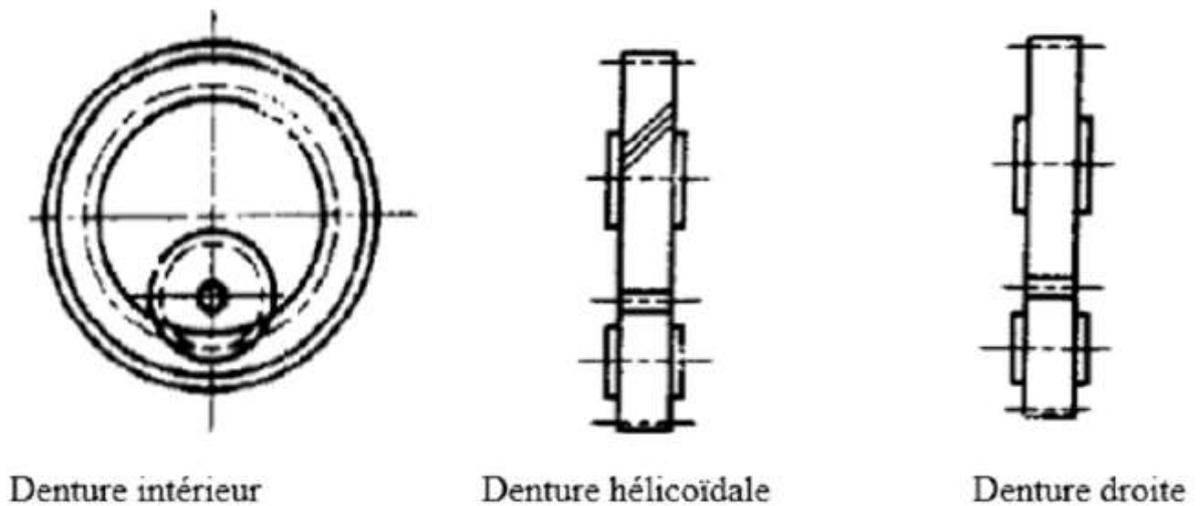


Figure (26): Engrenages à axe parallèles.

- **Engrenages à axe orthogonaux :**

Les axes des deux roues dentées ne sont pas dans le même plan.

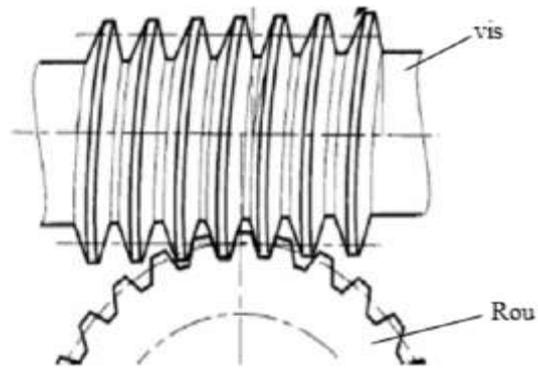


Figure (27) : Engrenages à axe orthogonaux

### III.3.5.2 Types d'engrenages :

- **Engrenage cylindrique à dentures droites :**

Les dents des deux roues de l'engrenage sont parallèles à l'axe de rotation des arbres.

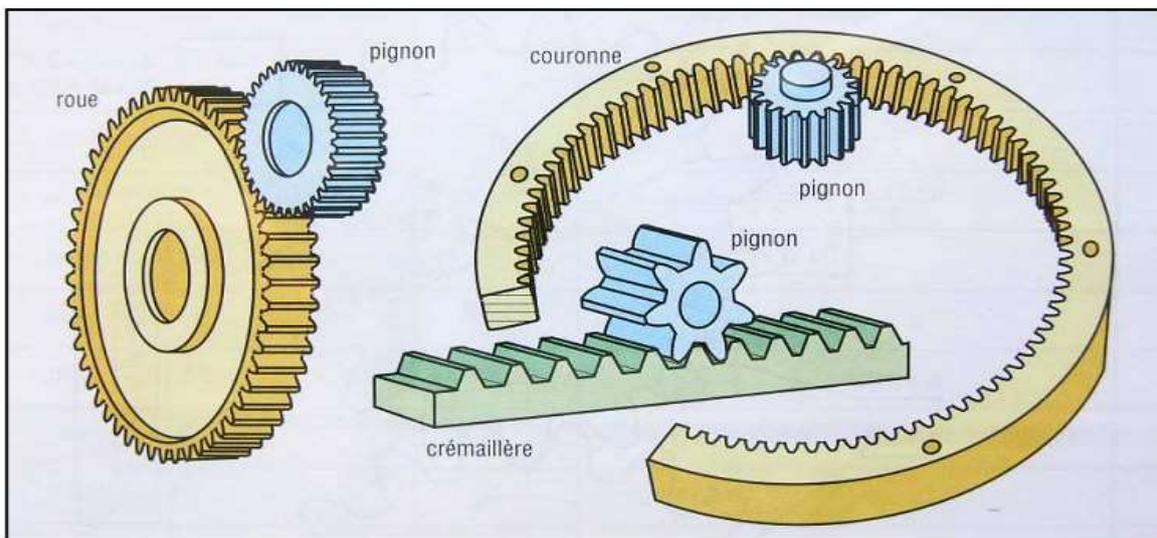
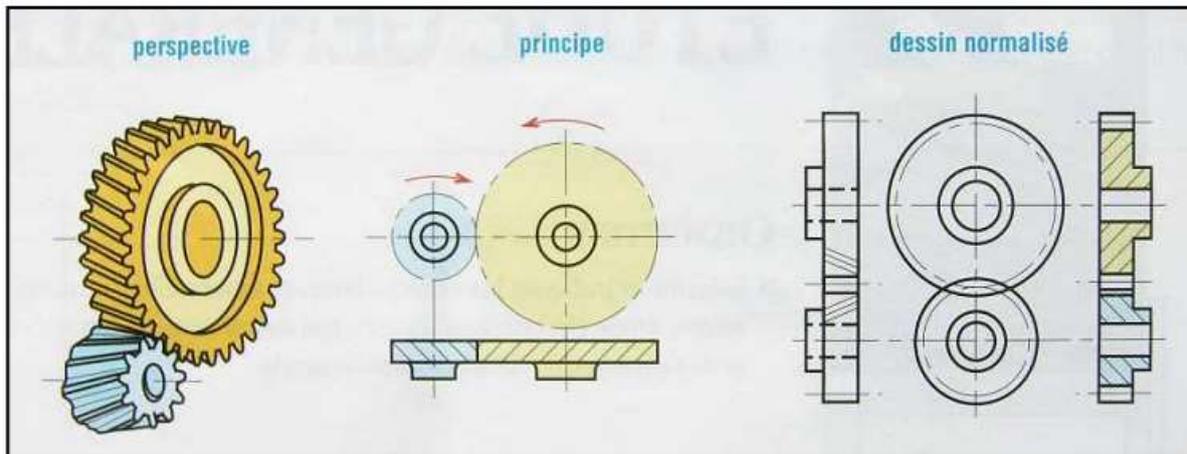


Figure (28) : Transmission par engrenage à denture droite.

- **Engrenages cylindriques à dentures hélicoïdales :**

Les dents des roues sont inclinées par rapport à l'axe de rotation des deux arbres, ils sont utilisés en transmission de puissance.



**Figure (29) :** Transmission par engrenage cylindrique à dentures hélicoïdales

- **Engrenages coniques**

Leurs dents sont taillées dans des surfaces coniques, ils sont utilisés pour transmettre le mouvement entre les arbres concourants, perpendiculaires ou non, la denture peut être droite mais aussi hélicoïdale, ou spirale et la denture peut être aussi hypoïde.



**Figure (30) :** Transmission par engrenage conique.

- **Roue à vis sans fin :**

L'une des roues ressemble à une vis et l'autre à une roue hélicoïdale, le sens de rotation de la roue dépend de celui de la vis mais aussi de l'inclinaison de la denture des filets à droite ou à gauche.

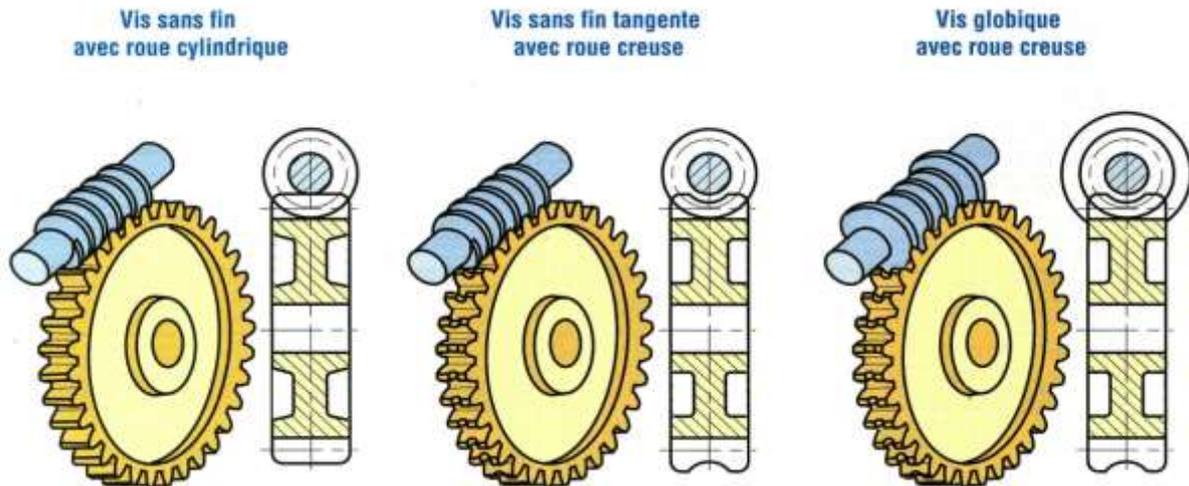


Figure (31): Transmission par roue et vis sans fin

**III.3.5.3 Calcul des engrenages :**

- **Calcul de rapport de transmission r :**

$$r = \frac{Z_1}{Z_2}$$

Avec :  $Z_1 = 30$  dents (nombre de dents du pignon.)  
 $Z_2 = 30$  dents (nombre de dents de la roue.)

AN :

$$r = \frac{30}{30}$$

$$r = 1$$

On a

$$r = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{d_1}{d_2} = 1$$

- **Calcul de module (m) [8] :**

$$m = 2.34 \times \sqrt{\frac{F_c}{K \times R_{pe}}}$$

M = 3.53 M normalisé

⇒

**m = 4mm**

Le coefficient de largeur de la dent étant :

⇒

**K = 10**

Module	m	4mm
Nombre de dent	$Z1=Z2$	30mm
Pas	$m*\pi$	12.56
Saillie	$ha=m$	4mm
Creux	$hf=1.25*m$	5mm
Hauteur de dent	$h=2.25m$	9mm
Diamètre primitif	$d=m*z$	120mm
Diamètre de tête	$da=d+2m$	128mm
Diamètre de pied	$Rf=d-2.5m$	110mm
Largeur de dent	$b=k*m$	10mm
Entraxe	$A = \frac{d1 + d2}{2}$	120mm

**Tableau 4** : caractéristique d'un engrenage droit

### III.3.6 Roulement :

Le guidage par palier lisse (coussinets) présente les inconvénients suivants : usure, échauffement, perte de puissance par frottement. Pour éviter ces inconvénients, une solution consiste à interposer des éléments roulants entre les pièces mobiles (arbre et alésage).

#### III.3.6.1 Les avantages et les inconvénients :

##### ➤ Les avantages

- La fabrication en grande série permet des prix de revient intéressants.
- Le roulement peut être changé facilement en cas d'usure.
- La valeur du jeu fonctionnel est garantie par le fabricant.

##### ➤ Inconvénient

- Obtention d'un jeu fonctionnel faible pour une bonne précision du guidage.

#### III.3.6.2 Choix du roulement [8]

Le Choix du roulement dépend de la nature des efforts supportés et des conditions d'utilisations, vitesse de rotation et durée de fonctionnement.

Nous avons choisie des roulements à une rangée de billes, à contact radial.

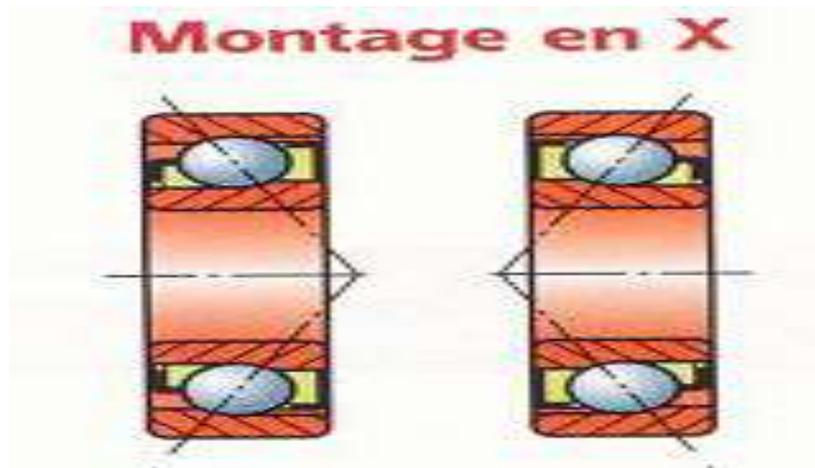


Figure (32) : roulement à billes : cas d'un arbre tournant

**III.3.6.3 Caractéristique du roulement à billes :**

Symboles : +++ Excellent    ++ Bon    + Satisfaisant  
 -Peu adapté    -- Inadapté

Type de roulement	Charge purement radiale	Charge purement Axiale	Charge Combinée	couple	Vitesse Elevée	Faible frottement
Roulement rigide à billes	+	+	+	-	+++	+++

Tableau 5 : caractéristique du roulement rigide à billes

**III.3.6.4 Désignation du roulement [10] :**

Roulement 30 BC 6

30 : diamètre intérieur du roulement.

BC : type de roulement rigide à billes.

6 : Série de base.

**III.3.6.5 Durée de vie du roulement [9] :**

La durée de vie d'un roulement est définie par le nombre de tours ou d'heures exigé, à une vitesse constante donnée, avant que le roulement ne montre les premiers signes de fatigue du matériau qui le compose.

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

Avec

**L10** = durée de vie nominale exprimée en millions de tours.

**C** : capacité de charge dynamique en daN.

**P** : charge radiale équivalente en daN.

**n** : 3 pour les roulements à billes.

$\frac{C}{P}$  : Le rapport de charge.

En heures de fonctionnement

Il est préférable d'exprimer la durée de vie nominale. **En heures de fonctionnement**

$$L_{10h} = \left(\frac{C}{P}\right) \times \left(\frac{10^6}{60 \times N}\right)$$

Avec :

L10h : durée de vie nominale en heures de fonctionnement,

N : vitesse de rotation en tr/mn.

$$L_{10h} = \left(\frac{19500}{381.971}\right) \times \left(\frac{10^6}{60 \times 500}\right)$$

<b><math>L_{10h} = 4434977.33h</math></b>
---

### III.3.7 Clavette [11] :

La clavette est utilisée entre un arbre et le moyeu de la machine (poulies, engrenage ...)

c'est un moyen commode et économique destiné pour tout montage qui tourne à basse

vitesse, lorsqu'on doit fréquemment monter ou démonter l'élément de l'arbre en générale, le montage à clavette est accompagné d'un passage léger (c'est à dire que l'alésage est légèrement inférieur au diamètre de l'arbre).

Pour éviter l'excentricité et le jeu de rotation, on distingue 3 types principaux de clavette :

- les clavette parallèle (carrées ou rectangulaires)
- les clavette inclinées (avec ou sans talon)
- les clavettes disque

La longueur de la clavette est alors ajustée pour satisfaire aux exigences de résistance des matériaux. Pour déterminer la résistance d'une clavette, on utilise l'hypothèse simplificatrice voulant que les forces soient distribuées uniformément sur les surfaces d'une clavette.

- **Calcul d'une clavette rectangulaire :**

Si la puissance à transmettre  $p$  est connue, on peut déduire le couple de torsion  $M_t$  en utilisant

La relation suivant :  $M_t = \frac{P}{\omega}$

$\omega$  : Vitesse de rotation rd/s

$p$  : Puissance à transmise tr/min

Donc :

$$M_t = 76394.2 \text{ Nmm}$$

Ce couple transmet une force  $F$  entre l'arbre et la clavette sachant que

$$M_t = F \times \frac{d}{2}$$

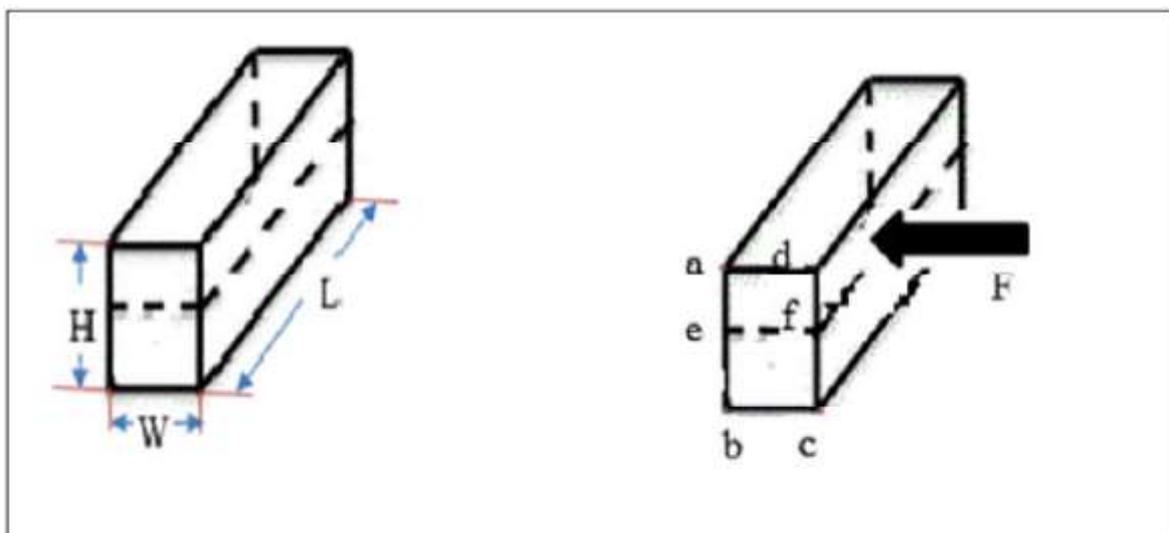
$$\Rightarrow F = M_t \times \frac{2}{d}$$

AN :

$$F = \frac{76394.2 \times 2}{40}$$

$$F = 3819.71 \text{ N}$$

Avec  $F$  et la force exercée sur la clavette, cette force  $F$  engendre des contraintes de compression (écrasement) sur les surfaces et des contraintes de cisaillement dans le plan.



**Figure 63 : Clavette rectangulaire**

Matériau acier A60

$$R_p = 600 \text{ N/mm}^2$$

En pratique, on choisit :

$$w = \frac{1}{4} \times d$$

$$\text{AN : } w = \frac{1}{4} \times 20$$

$$\boxed{w = 5 \text{ mm}}$$

Condition de résistance au cisaillement

$$\tau = \frac{2 \times M_t}{l \times w \times d} \leq R_{pg}$$

$$l \geq \frac{2 \times M_t}{w \times d \times R_{pg}} \Rightarrow l \geq \frac{2 \times 76394.2}{5 \times 20 \times 300}$$

$$\boxed{l \geq 5.09 \text{ mm}}$$

Condition de résistance à la compression :

$$\sigma_c = \frac{2 \times F}{l \times H} \leq R_p$$

Et comme :  $F = \frac{2M_t}{d}$  alors :

$$\frac{4M_t}{l \times h \times d} \leq R_p \Rightarrow h \geq \frac{4M_t}{l \times h \times R_p}$$

$$\text{AN : } h \geq \frac{4 \times 76394.2}{5.09 \times 20 \times 600}$$

$$\boxed{h \geq 5 \text{ mm}}$$

On a :

$$d = d + \frac{h}{2}$$

$$d = 20 + \frac{5}{2}$$

$\Rightarrow$

$$\boxed{d = 22.5 \text{ mm}}$$

Et donc le diamètre normalisé de l'arbre

$$\boxed{d = 25 \text{ mm}}$$

# Chapitre 4

**Modélisation Géométrique et numérique**

## IV.6 Généralités :

### IV.1.6 Introduction :

Le présent chapitre est considéré comme la partie principale de cette étude car elle est consacrée à donner une valeur au calcul que nous avons fait et obtenir un produit de meilleure précision en un moindre temps, ce qui confère une grande importance quant à l'utilisation des logiciels de CAO dans la conception des produits en général.

### IV.1.7 Définition de la CAO :

Nous pouvons définir la **Conception Assistée par Ordinateur (CAO)** par l'ensemble des outils logiciels et des techniques informatiques qui permettent d'assister les concepteurs lors de la conception et la mise au point d'un produit.

### IV.1.8 Les avantages et les inconvénients de la CAO :

- **Les avantages** : les principaux avantages cités par les utilisateurs sont :
  - Un processus de conception plus efficace ;
  - Meilleure précision ;
  - Réduction du temps de conception d'où la réduction du coût.
- **Les inconvénients** : il y a également quelques inconvénients comme :
  - Coût du matériel ;
  - Coût des formations

### IV.1.9 Logiciel utilisé :

Un programme en général de type industriel doit être capable de résoudre des problèmes variés de grandes tailles (de mille à quelques centaines de milliers de variables). Ces programmes complexes nécessitent un travail d'approche non négligeable avant d'espérer pouvoir traiter un problème réel de façon correcte. Citons à titre d'exemple quelques noms de logiciels : SOLID WORKS (COSMOS WORKS), KATIA, ABAQUS ...etc. les possibilités offertes par de tels programmes sont nombreuses :

- Analyse statique ou dynamique.
- prise en compte de lois de comportement complexe.
- prise en compte de phénomènes divers (élasticité, thermiques, ...).
- problèmes d'optimisation, ...etc.

L'utilisation de tels programmes nécessite une formation de base minimale.

**IV.1.10 Les différentes utilisations de SolidWorks :**

Ce logiciel est utilisé par des concepteurs, des ingénieurs, des étudiants et d'autres professionnels pour concevoir des pièces, des assemblages et des mises en plan complexes. De plus ils peuvent être utilisés dans plusieurs domaines, nous citons par exemple :

- Produits du design industriel ;
- Ouvrages de génie civil ;
- Ouvrages d'architecture ;

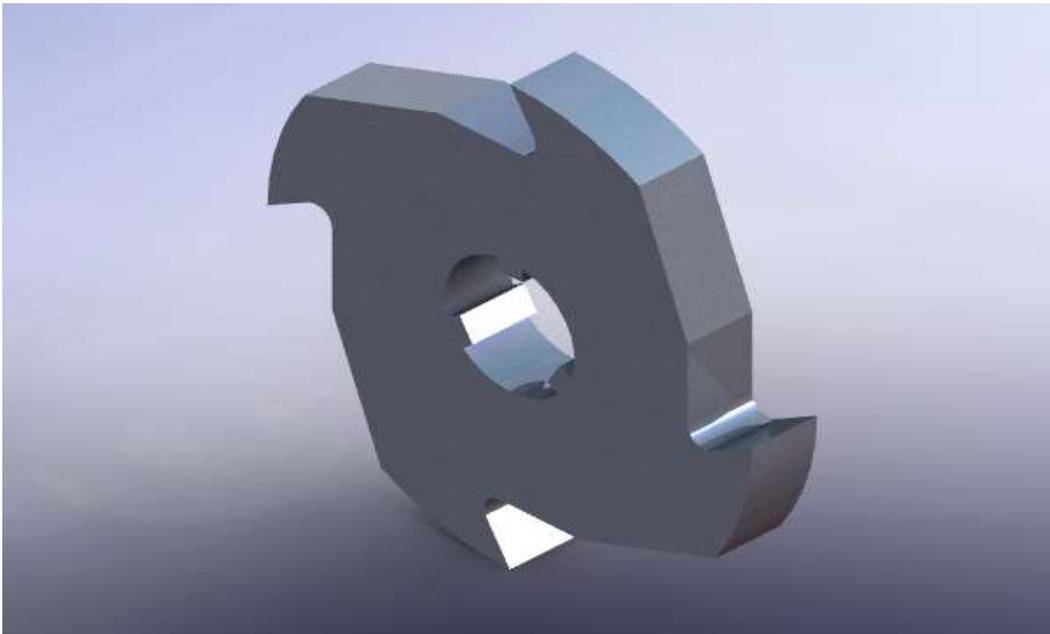
**IV.7 Modélisation géométrique :**

La modélisation géométrique des pièces du broyeur avec le logiciel SolidWorks passe par 3 étapes :

- Création des pièces en model de 2D (2 Dimensions) ;
- Création des pièces en model de 3D (3 Dimensions) ;
- Assemblage des pièces.

**IV.2.7 Modélisation Géométrique de l'arbre :**

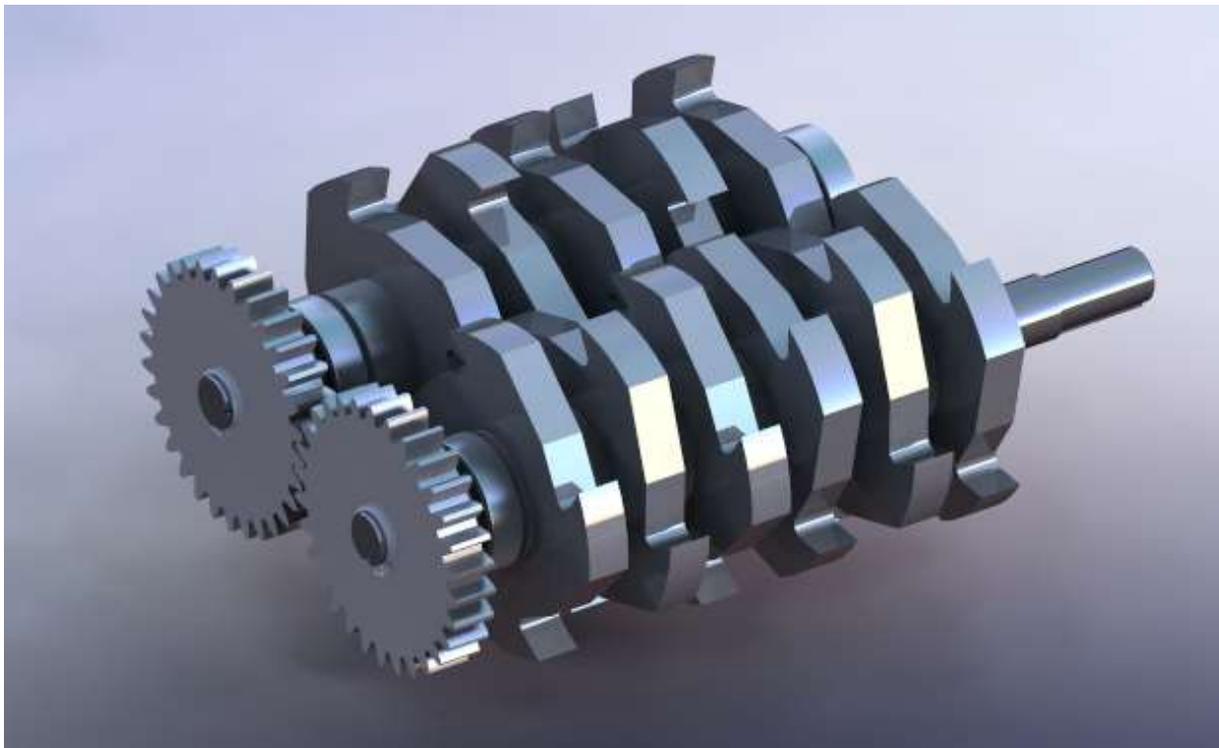
**Figure (34) :** Modèle CAO de l'arbre

**IV.2.8   Lame :**

**Figure (35) :** Modèle CAO de lame

**IV.2.9   Assemblage des éléments du broyeur :**

Dans notre conception chaque lame est décaler par rapport à l'autre, car elles ne doivent pas travailler en même temps c.-à-d. en alternance comme le montre la figure ci-dessous :

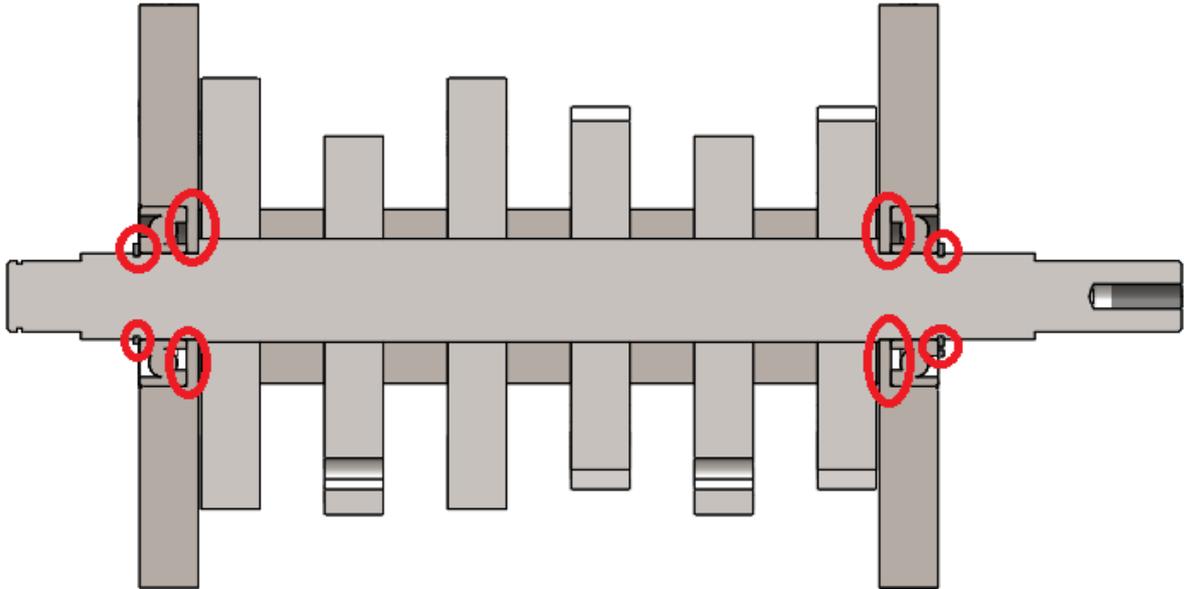


**Figure (36) :** positionnements des lames sur l'arbre

**IV.2.10 Montage des arbres sur les supports de roulement :**

C'est un montage en O comme on a opté pour la solution de blocage suivante :

- Epaulement sur l'arbre et un épaulement sur l'alésage du support de roulement.



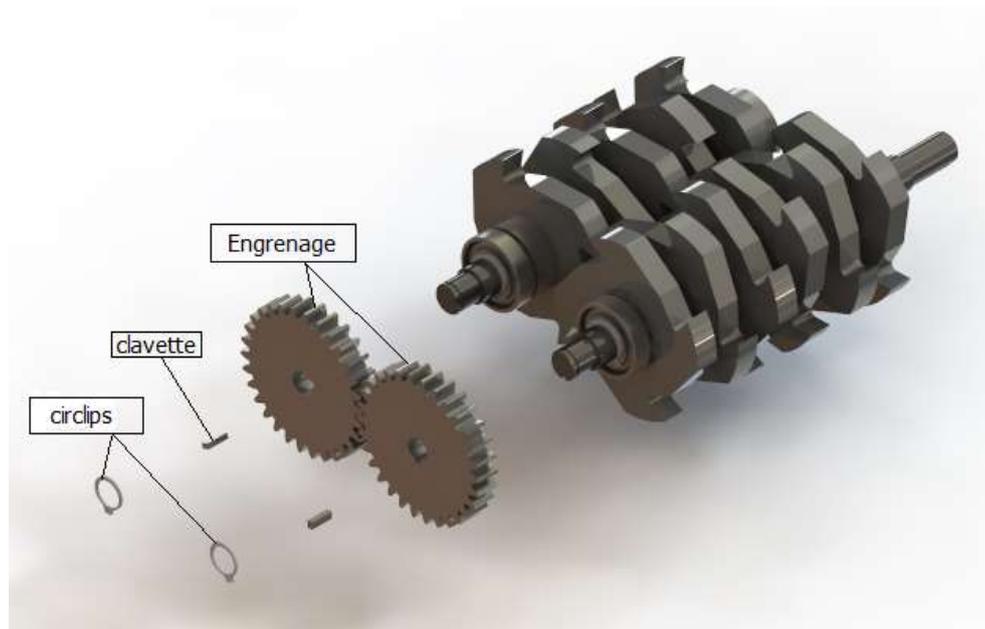
**Figure (37) :** montage des arbres sur le support par l'intermédiaire de roulements

**IV.2.11 Montage des engrenages :**

Comme la montre la figure ci-dessous :

Nous avons :

- Trois clavettes qui effectuent la liaison entre les engrenages et les arbres
- Trois vis avec des rondelles pour bloquer la translation des engrenages



**Figure(38) :** montage des engrenages sur les arbres

#### IV.2.12 Assemblage fini du broyeur :



**Figure (39) :** assemblage du broyeur

**IV.8 Modélisation numérique :****IV.3.6 Introduction aux éléments finis :**

La méthode des éléments finis fait partie des outils de mathématiques appliquées. Il s'agit de mettre en place à l'aide des principes hérités de la formulation vibrationnelle ou formulation faible, un algorithme discret mathématique permettant de rechercher une solution approchée d'une équation aux dérivées partielles (EDP) sur un domaine compact avec conditions aux bords et/ou dans l'intérieur du compact.

Il s'agit donc avant tout de la résolution approchée d'un problème, où, grâce à la formulation vibrationnelle, les solutions du problème vérifient des conditions d'existence plus faibles que celles des solutions du problème de départ et où une discrétisation permet de trouver une solution approchée.

Le but du calcul par éléments finis est la détermination des déplacements puis des contraintes dans la structure de manière à valider la conception. Nous utilisons la méthode des éléments finis dans notre étude pour déterminer le comportement de pièces sollicitées (arbre et lame) du broyeur, et nous avons choisis le logiciel de simulation numérique SolidWorks.

De façon générale, une résolution par éléments finis comporte trois étapes :

- Préparation des données ou Pré-processing (génération de données) : définir le problème ; les étapes majeures sont données ci-dessous
  - Définition des points clés (key points) /lignes/surfaces/volumes ;
  - Définir le type d'élément fini, ses propriétés géométriques et les propriétés physiques des matériaux ;
  - Maillage des lignes /surfaces/volume si cela est requis ;
  - Définition des matériaux.
- Traitement ou Processing : assigner les charges, contraintes (conditions aux limites) et résolution ; nous spécifions notamment la nature des charges (localisées et/ou distribuées), contraintes ou conditions aux limites (translation et rotation) et, finalement, on résout le système d'équations ;
- Post-processing (poste traitement) : visualisation et interprétation des résultats ; lors de cette étape, on peut examiner :
  - La liste des déplacements nodaux ;
  - Les forces et des moments au niveau des éléments ;
  - Tracé des Déformées.

**IV.3.7 Le maillage :**

La méthode des éléments finis repose sur un découpage de l'espace selon un maillage.

Il n'est pas non plus nécessaire que le maillage soit régulier et nous avons tendance à resserrer le maillage près des endroits d'intérêts (par exemple aux endroits où nous pensons que la solution va beaucoup varier), cependant il faut veiller à avoir des éléments faiblement distordus (se rapprocher d'un polygone régulier). Plus ce maillage est resserrée plus la solution que nous obtiendrons par la méthode des éléments finis sera précise et proche de la « vraie » solution de l'équation aux dérivées partielles.

**IV.3.8 Différents types de maillage :****IV. 3.3.4 Maillage linéaire :**

C'est généralement un élément à 2 degré de liberté (DDL) par nœuds (u, v, w), pour déterminer son énergie élastique.

**IV. 3.3.5 Maillage surfacique :**

C'est un élément bidimensionnel dans lequel on suppose que les contraintes sont uniformes dans l'épaisseur et qu'elles sont perpendiculaires au plan de l'élément). Il est utilisé pour modéliser des structures minces travaillant en membrane, c'est-à-dire sans rigidité de flexion.

**IV. 3.3.6 Maillage volumique :**

Dans cet élément, aucune hypothèse simplificatrice n'est posée sur les déformations et les contraintes. Il est par contre, nécessaire, pour calculer l'énergie élastique, de faire des hypothèses sur l'évolution du champ de déplacement à l'intérieur de l'élément.

**IV.3.9 Génération d'un maillage :**

Pour générer un maillage volumique, il faut tout d'abord créer un modèle géométrique ou importer directement un modèle géométrique issu d'un logiciel CAO comme SolidWorks. Pour SolidWorks nous avons choisi un maillage par défaut.

**IV.3.10 Maillage des pièces du broyage :**

Le maillage des pièces du broyage se fait comme le montre les figures suivantes :



Figure (40) : Le maillage des pièces du broyeur

#### IV.9 Application des conditions aux limites :

##### - Déplacement imposés

Les lames et l'arbre sont parmi les éléments les plus importants du broyeur, pour faire l'étude sur ses lames on élimine tous les degrés de libertés.

##### - Efforts imposés

Les sollicitations sont plus importantes en dynamique, les lames sont soumises à deux efforts :

- Effort axial : dû aux poids de lames et de la charge de la matière à broyer.
- Moment de torsion : dû à la rotation de lame.

La figure ci-dessous illustre le déplacement et les efforts imposés

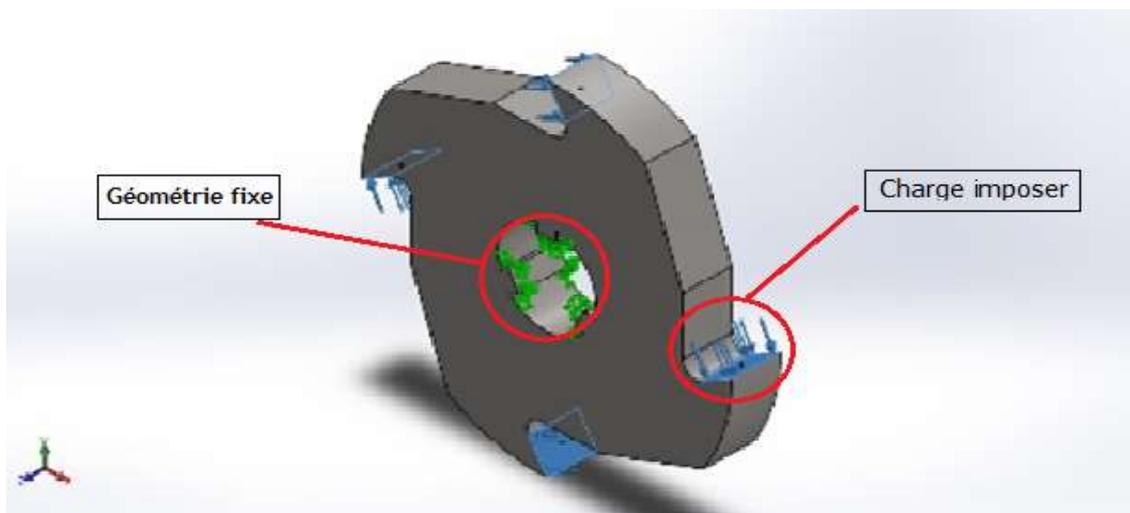


Figure (41) : déplacement et les efforts imposés (lame)

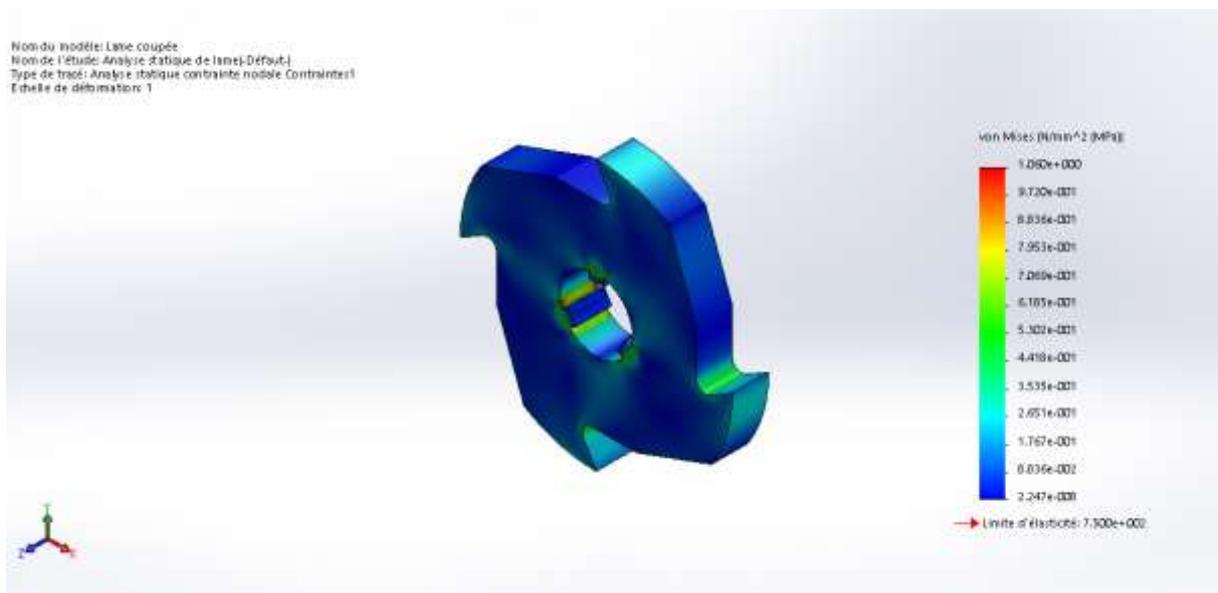
#### IV.10 Vérification des résultats des lames :

##### IV. 6.2 Simulation à l'état statique :

Il ne faut jamais se baser sur les décisions de conceptions uniquement sur les données présentées dans ce rapport. On utilise ces informations en conjonction avec des données expérimentales. Des tests réels sont indispensables pour valider le produit final. La simulation utilisée dans ce cas nous aide à réduire au maximum le nombre d'essais sur la pièce, mais pas en les supprimant totalement.

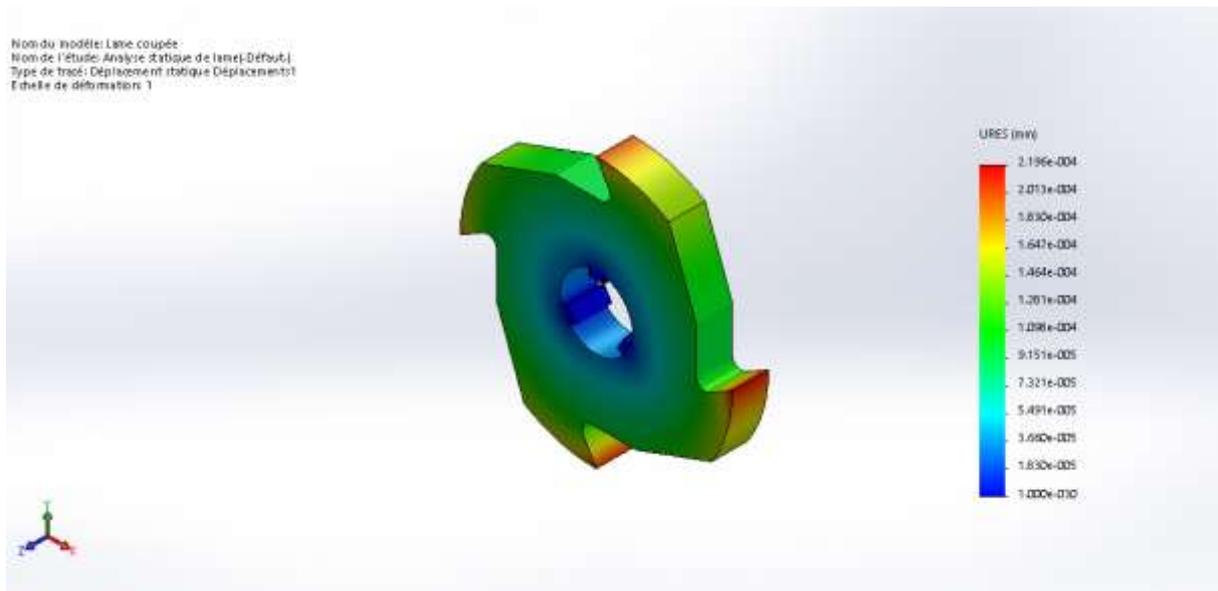
##### IV. 6.1.4 Analyse statique de lame :

Charge appliquée = 28 MPa sur une seule lame.



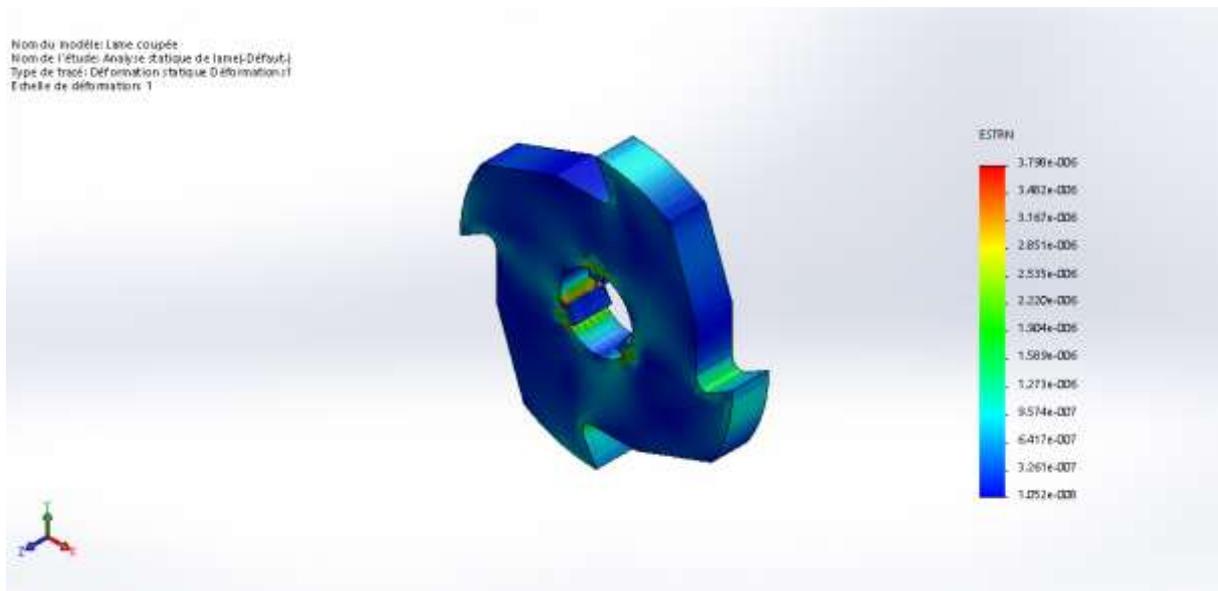
**Figure (42) :** graphe de contrainte de Von Mises (lame)

D'après la figure la lame est complètement en couleurs verte ce qui correspond, dans le diagramme de contrainte de Von Mises, à une fourchette de contrainte qui varie entre  $2.24694 \cdot 10^8$  (MPa) et 1.06036 (MPa), cela nous permet de constater que les sollicitations qui lui sont appliquées n'influent pas sur sa structure, cependant sa résistance dans le cas statique est vérifiée.



**Figure (43) :** graphe de déplacements de la lame

L'analyse de la figure nous montre que le déplacement maximum se situe sur la face supérieure de la lame ce qui est attendu puisque la charge imposé est une déformation maximale au bord de la face supérieure de la lame qui est de l'ordre de  $2.19625 \cdot 10^4$  mm



**Figure (44) :** graphe de déformations de la lame

La figure (43) justifie l'état de contrainte de la lame, tel que la variation de la déformation est comprise entre  $1.0516 \cdot 10^8$  et  $3.79789 \cdot 10^6$ , qui est une déformation aussi minime par rapport aux dimensions des différents éléments.

## IV. 6.1.5 Analyse statique de l'arbre on flexion :

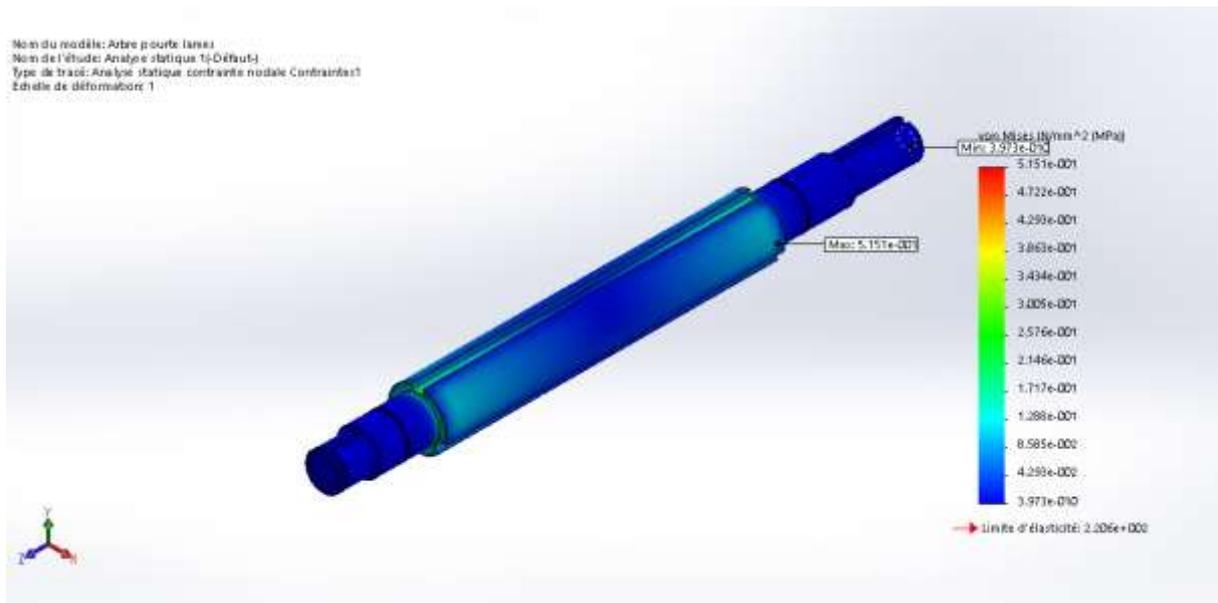


Figure (45) : graphe de contrainte de Von Mises (arbre soumis à la flexion)

D'après la figure (44) l'arbre est complètement en bleu ce qui correspond, dans le diagramme de contrainte de Von Mises, à une fourchette de contrainte qui varie entre  $3.97334 \times 10^{-10}$  et  $0.515128$  MPa, cela nous permet de constater que les sollicitations qui lui sont appliquées n'influent pas sur sa structure, cependant sa résistance dans le cas statique est vérifiée.

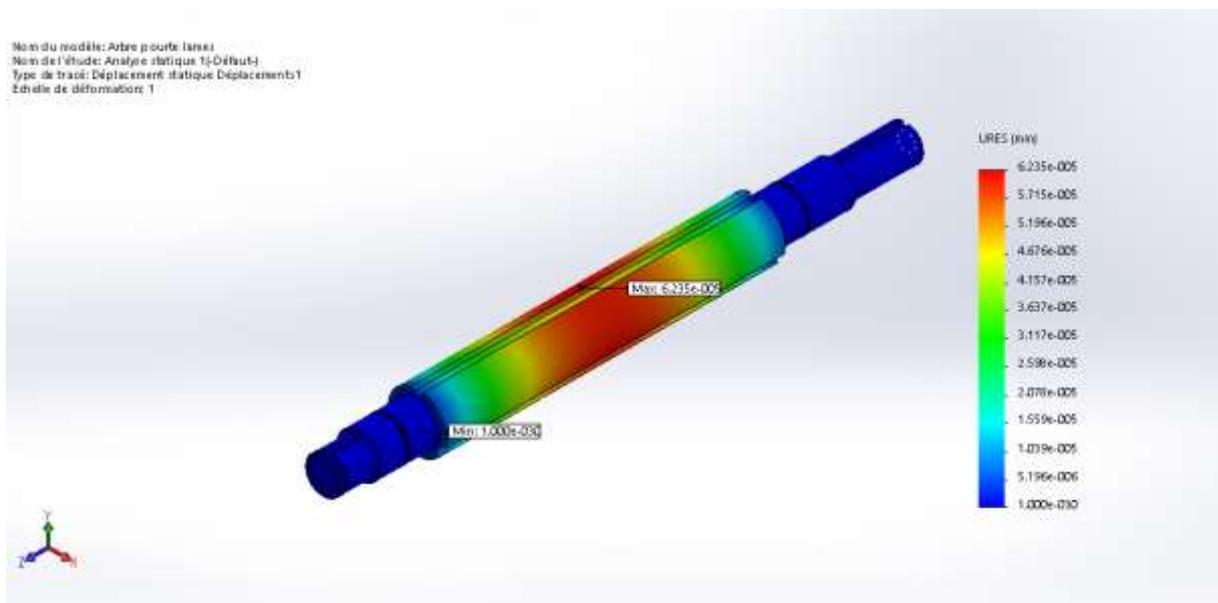


Figure (46) : graphe de déplacements (arbre soumis à la flexion)

L'analyse de la figure nous montre que le déplacement maximum se situe sur la face cylindrique de l'arbre ce qui est attendu puisque la charge imposée est une déformation maximale aux milieux de la face cylindrique (couleur rouge) de l'arbre qui est de l'ordre de  $6.23491 \times 10^{-5}$  .mm

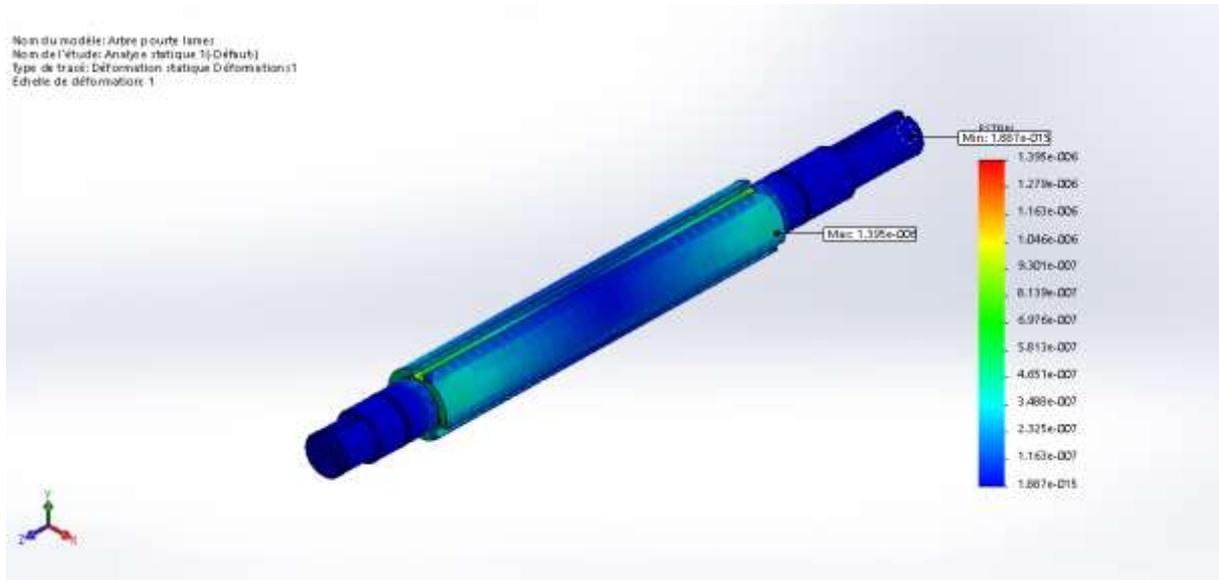


Figure (47): graphe de Déformations (arbre soumis à la flexion)

La figure (46) montre l'état de contrainte de l'arbre en flexion, tel que la variation de la déformation est comprise entre  $1.88655 \times 10^{-15}$  et  $1.39519 \times 10^{-6}$  , qui est une déformation aussi minime par rapport aux dimensions des différents éléments.

#### IV. 6.1.6 analyse statique de l'arbre en torsion :

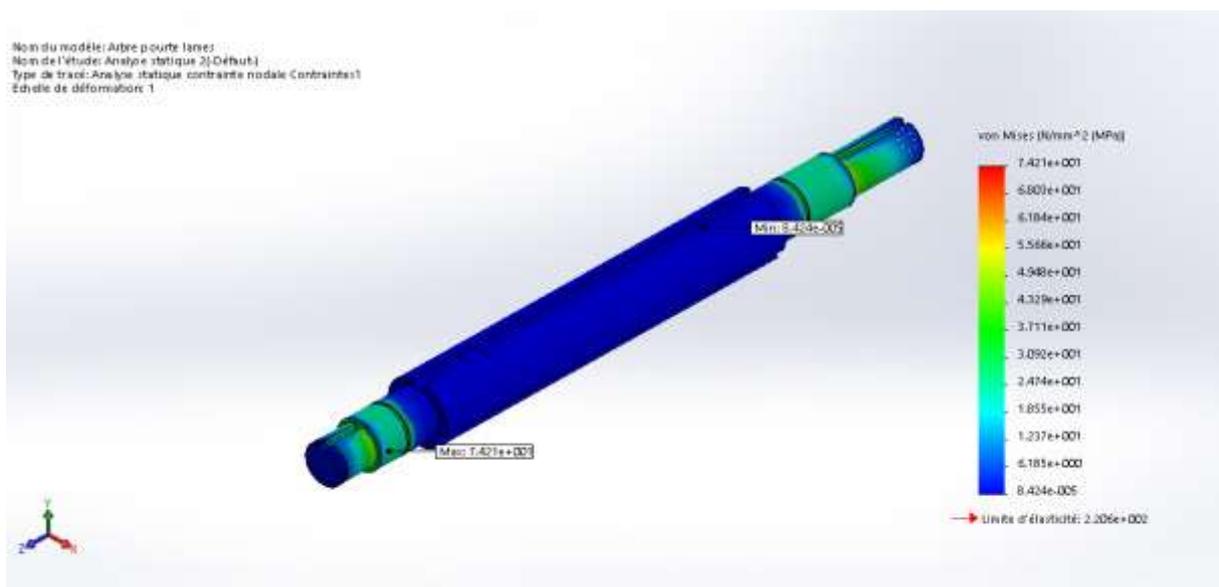


Figure (48) : graphe de contrainte de Von Mises (arbre soumis à la torsion)

La concentration des contraintes maximum est enregistré au niveau du contact entre l'arbre et l'engrenage du réducteur, elle est comprise entre  $8.42359 \times 10^{-5}$  et 74.2131 Mpa.

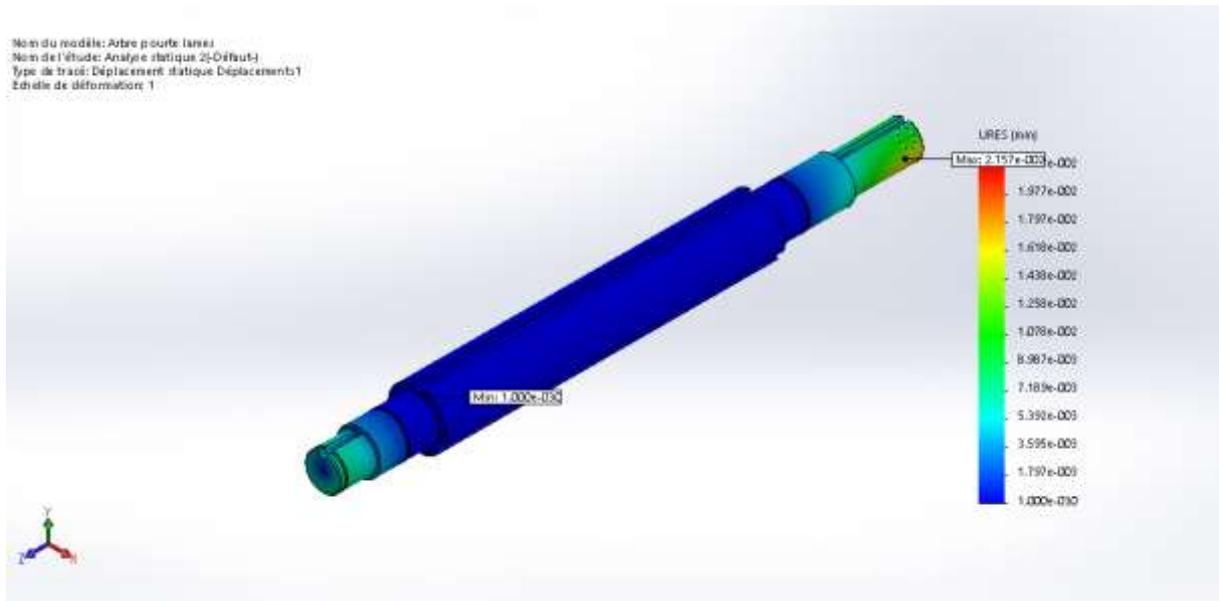


Figure (49) : graphe de déplacements (arbre soumis à la torsion)

L'analyse de la figure nous montre que le déplacement maximum se situe sur la face cylindrique de l'arbre ce qui est attendu puisque la charge impose et une déformation maximale au bord de la face cylindrique (couleur rouge) de l'arbre qui est de l'ordre de 0.0215677 Mm

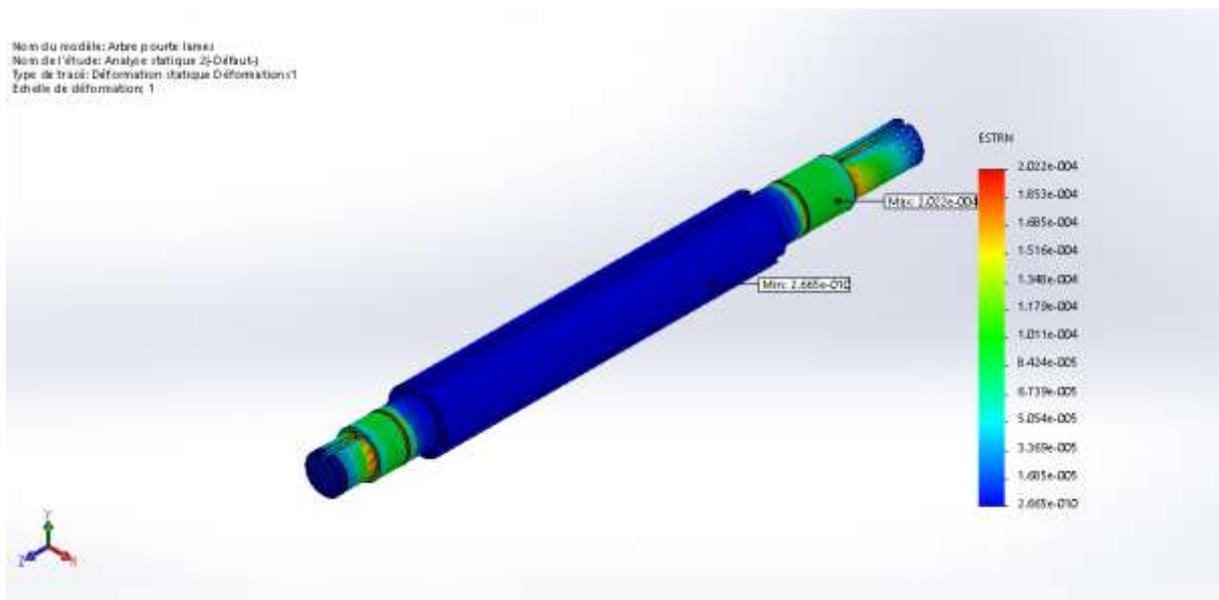


Figure (50) : graphe de Déformations (arbre soumis à la torsion)

La figure justifie l'état de contrainte de l'arbre, tel que la variation de la déformation est comprise entre  $2.66457 \cdot 10^{-10}$  et  $2.02164 \cdot 10^{-4}$ , qui est une déformation aussi minime par rapport aux dimensions des différents éléments.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, vu la difficulté de mailler l'assemblage de la machine (broyeur), on a opté pour la solution qui est de mailler les éléments les plus sollicités dans la structure (arbre, lames de broyage) un par un, par ailleurs les résultats ainsi trouvés confirment la résistance de ces éléments soumis aux différents efforts imposés.

# **Conclusion**

## **générale**

## Conclusion générale

Au cours de ce travail nous avons essayé de fournir un maximum d'informations sur les broyeurs de recyclage du plastique, qu'on a proposé comme solution pour la gestion des déchets en plastique, que ce soit dans le coté de son mécanisme, son dimensionnement et même du coté de sécuritaire. Ces informations peuvent être utilisées dans le cas d'une éventuelle étude de fabrication ou de réalisation.

On a remarqué d'après nos renseignements qu'en Algérie, les broyeurs sont souvent utilisés dans des carrières minerais et usine de carrelage, et que la majorité des machines de broyage sont importées de l'étranger.

Donc, on a commencé par mentionner quelques généralités sur les divers types de broyeurs qui existent dans le domaine industriel, et c'est à partir de là qu'on a défini pour le projet : la conception et l'étude de réalisation d'un broyeur de recyclage du plastique.

Il a fallu donc citer les diverses caractéristiques des broyeurs mais essentiellement le broyeur de recyclage du plastique. Pour ce dernier, la première partie a présenté quelques généralités sur ses caractéristiques incluant tous ses composants. A cette étape du travail on a donc commencé la partie de dimensionnement de chaque élément dont notre broyeur sera constitué. Le vrai travail dans ce projet a été partagé en deux parties par l'encadreur, la première partie dans laquelle on a effectué des calculs et le dimensionnement des éléments constituant le broyeur. Tandis que la deuxième s'est occupée des vérifications des résultats à l'aide du logiciel SolidWorks.

Enfin grâce à notre essai de concevoir ce broyeur, on a réussi à atteindre nos objectifs en offrant à une éventuelle équipe de fabrication toutes les données et les informations dont ils auront besoin pour fabriquer ce concept dans les délais.

[1] Mémoire de fin d'études, université de Bejaia, option électromécanique, thème : Etude et Réalisation d'un broyeur pour les bouteilles en plastique .Mr : BACHIRI SALIM et FERHANE ZAHIR .promotion (2011/2012).

[2] : Site internet [http : // www.herbold.com](http://www.herbold.com), consulté le 13 avril 2018.

[3] : Pierre Blazy, El-Aid Djdid, fragmentation –Technologie, technique de l'ingénieur, A5060, pp 5-11-19 (2007).

[4] : Site internet [http: // www.decoval.fr](http://www.decoval.fr), consulté le 15 avril 2018.

[5] : Mme ZAPATA-MASSOT Céline, THESE (synthèse de matériaux composites par Corroyage en voie séché caractérisation des propriétés physico-chimique et d'usage des matériaux), Institut national polytechnique de TOULOUSE (décembre 2004).

[6] : Mémoire de fin d'études, université de Bejaia, option électromécanique, thème : Amélioration des caractéristiques techniques d'un broyeur pour les bouteilles en plastique. Mr : HADDAD et TOUATI. Promotion (2012/2013).

[7] : Mémoire de fin d'études, Université de Bejaia, option matériaux, thème : effet du traitement de normalisations sur le comportement en dureté et résilience des aciers de construction mécanique A60. (2007/2008)

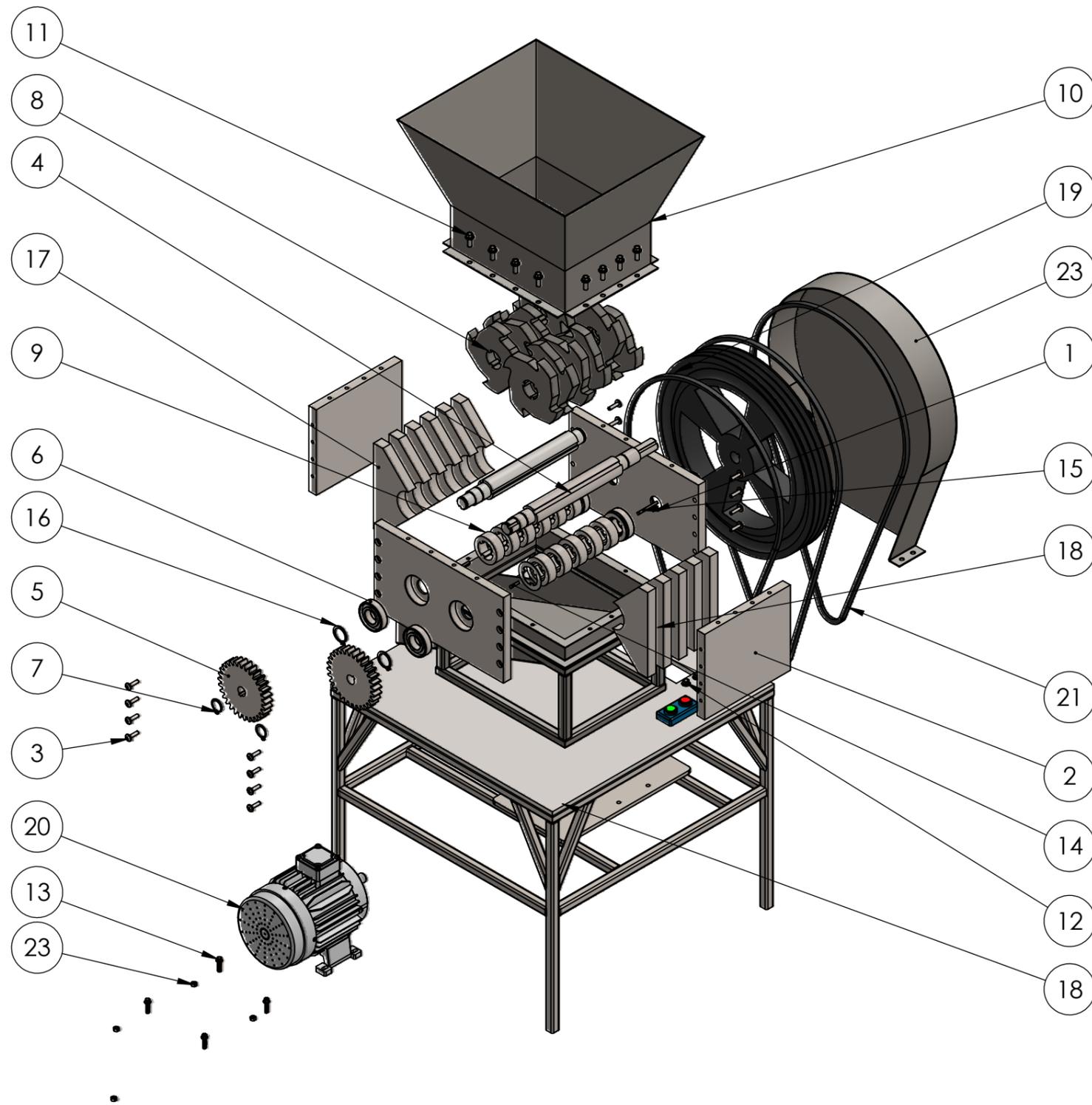
[8] : Chevalier : Guide du dessinateur industriel, édition AFNOR Paris (2004).

[9] : Site internet [http://www.zpag.net/technologies\\_industrielles](http://www.zpag.net/technologies_industrielles), consulté le 02 Mai 2018.

[10] : Guide du dessinateur industriel édition (1979).

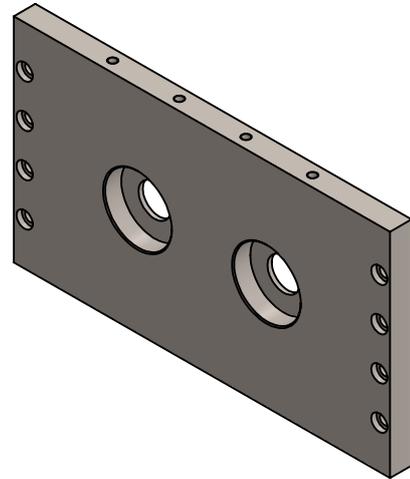
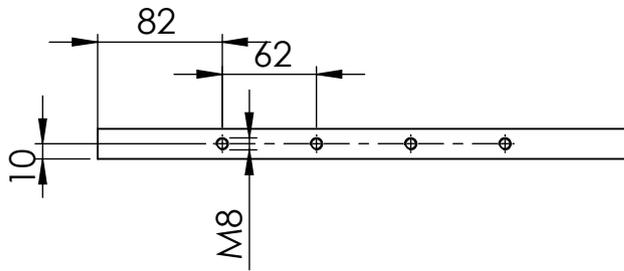
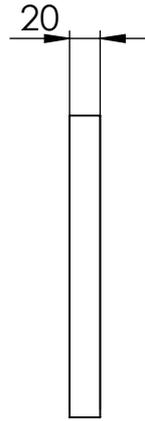
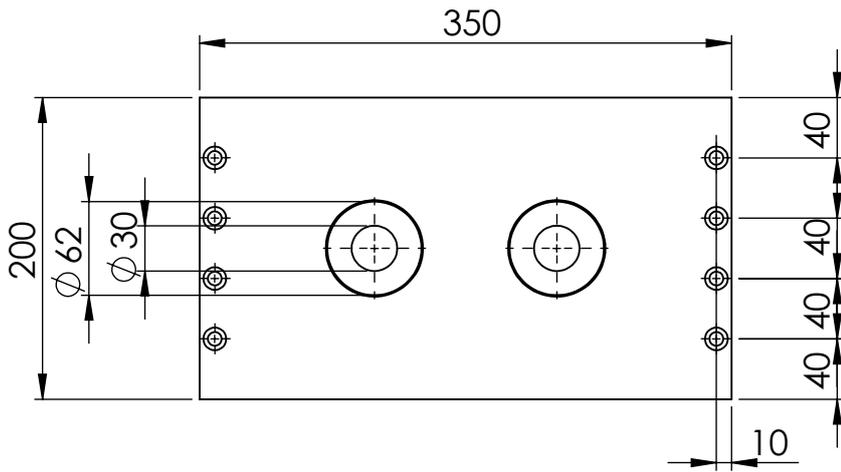
[11] : Mémoire de fin d'études, université de Bejaia, option Ingénierie Mécanique Assistée par Ordinateur, thème : Etude et conception d'une extrudeuse monovis pour thermoplastiques. Mr : OUZZANE Rafik et MAOUCHE Hicham.

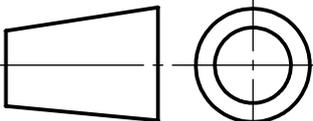
# **Annexe**

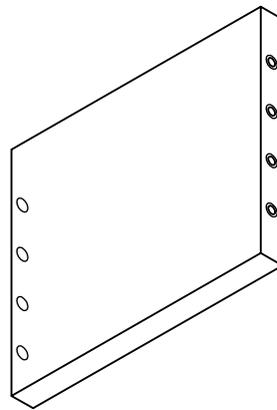
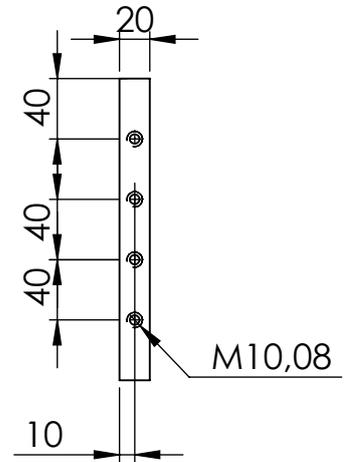
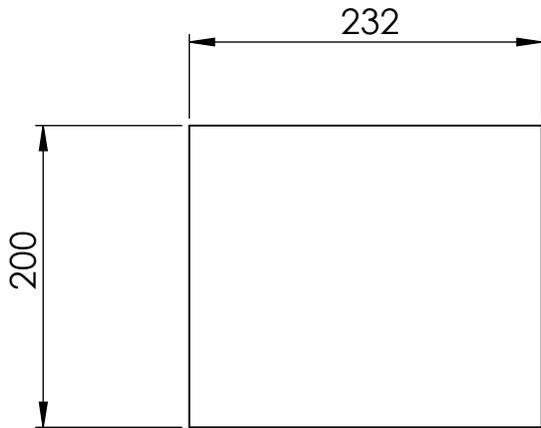


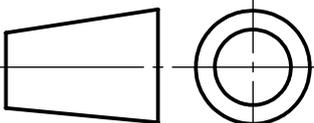
No. ARTICLE	NUMERO DE PIECE	DESCRIPTION	QTE
1	Pièce2		2
2	Pièce1		2
3	Screw DIN 968-ST6.3x25-F-H-N		16
4	Arbre		1
5	DIN - Spur gear 4M 30T 20PA 20FW ---S30A75H50L20S1		2
6	DIN 628 - 7206B - 12,SI,NC,12_68	BROYEUR	4
7	Circlips 24 x 1.75		2
8	Lame coupée		11
9	Bague de séparation		11
10	Tremé		1
11	B18.6.7M - M8 x 1.25 x 20 Indented HFMS --20N		16
12	B18.6.7M - M8 x 1.25 x 10 Indented HFMS --10N		4
13	B18.6.7M - M6 x 1.0 x 25 Indented HFMS --25S		4
14	Clavette de engrenage		2
15	Clavette de la poulie		1
16	Circlips 30 x 2		4
17	Contre lame		11
18	Chassis		1
19	poulie		1
20	Moteur triphasé	Moteur Asynchrone Triphasé	1
21	Courroie 1-1		3
22	Cache poulie		1
23	B18.2.4.1M - Hex nut, Style 1, M6 x 1 --D-S		5

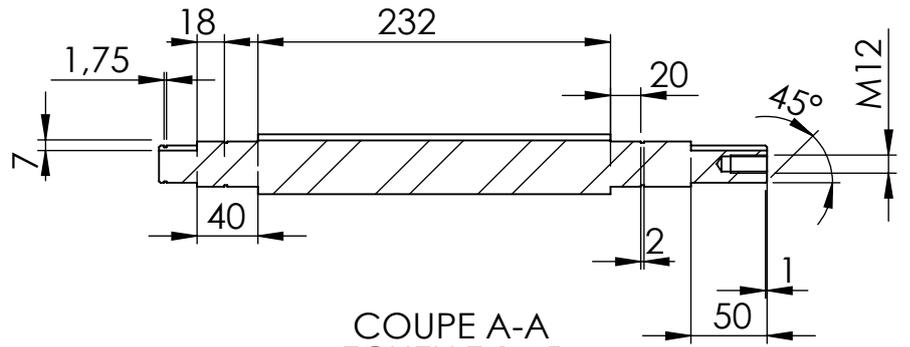
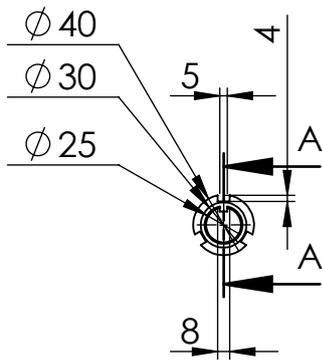
<b>UNIVERSITE A - MIRA BEJAIA</b>		<b>M2. FMP</b>
<b>Echelle 1:1</b>	<b>BROYEUR</b>	<b>LE14 /06/2018</b>
		<b>Assomblage</b>
<b>CHENNINE Dalil &amp; BOUAFIA Boualem</b>		<b>Mémoire</b>



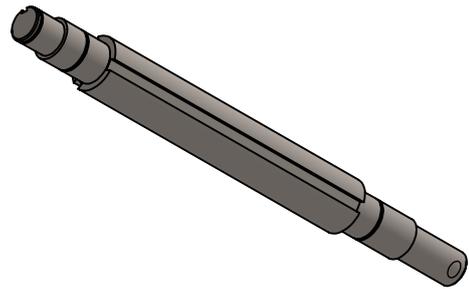
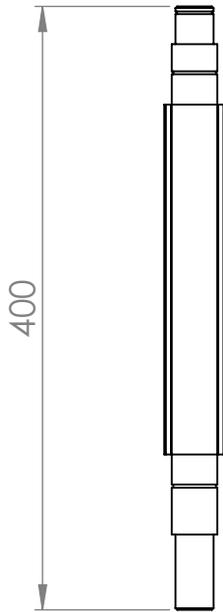
UNIVERSITE A - MIRA BEJAIA		M2 F M P
Echelle 1:5	PEICE	Le 16/06/2018
		Acier allié
CHENNINE Dalil & BOUAFIA Boualem		Pièce 1

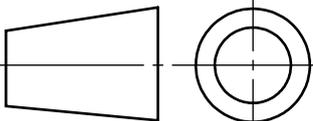


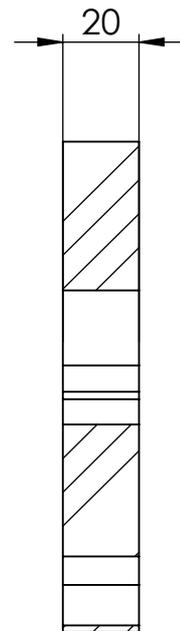
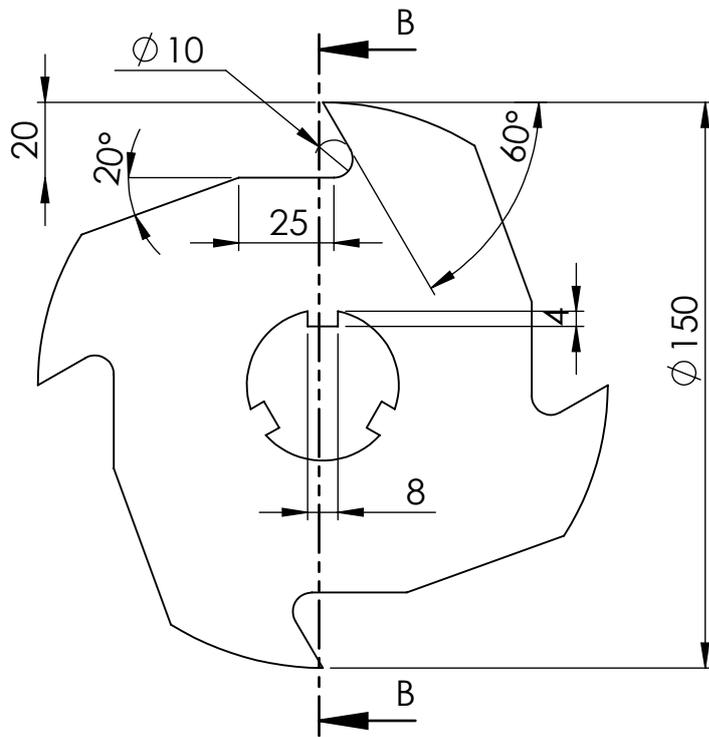
UNIVERSITE A - MIRA BEJAIA		M2 F M P
Echelle 1:5	PIECE 1	Le 16/06/2018
		Acier allié
CHENNINE Dalil & BOUAFIA Boualem		Pièce 2



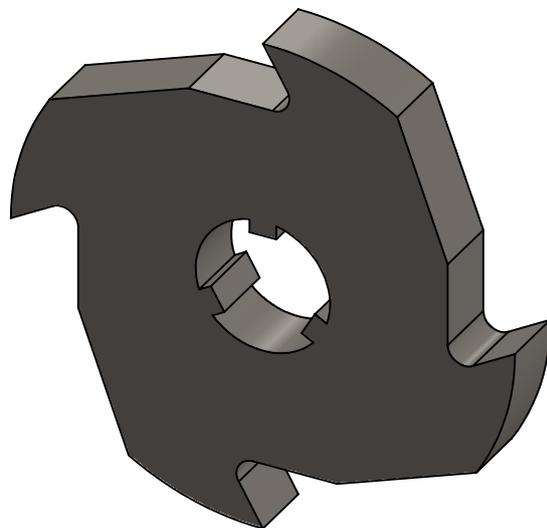
COUPE A-A  
EHELLE 1 : 5

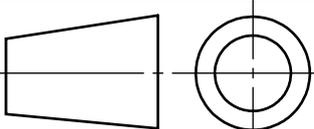


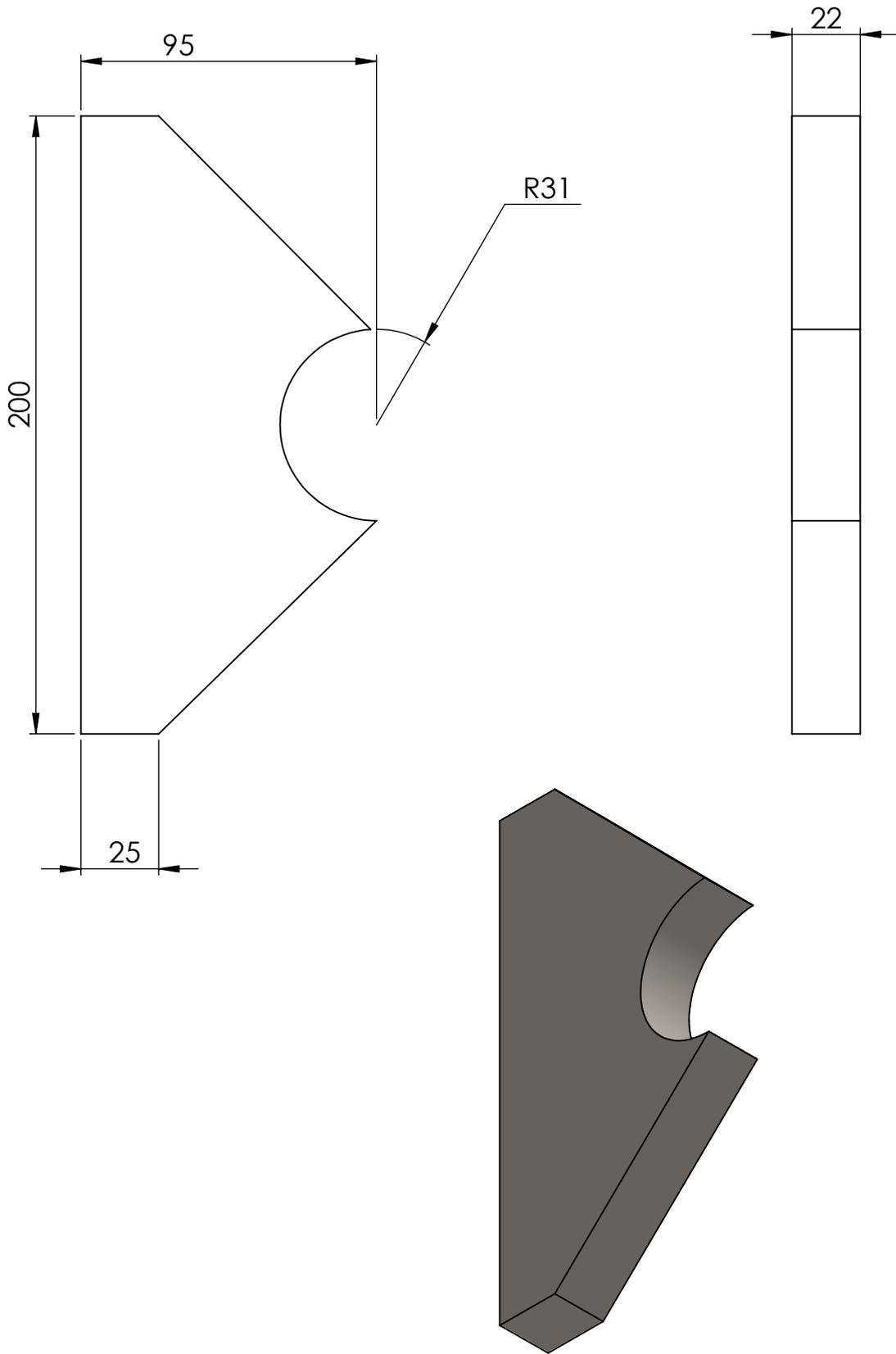
UNIVERSITE A - MIRA BEJAIA		M2 F M P
Echelle 1:5	Arbre	Le 16/06/2018
		A 60
CHENNINE Dalil et BOUAFIA Boualem		Pièce 4



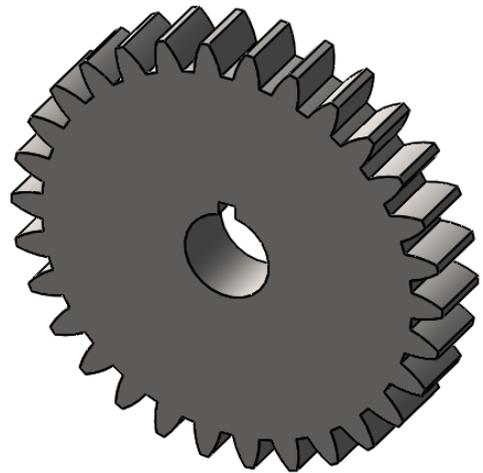
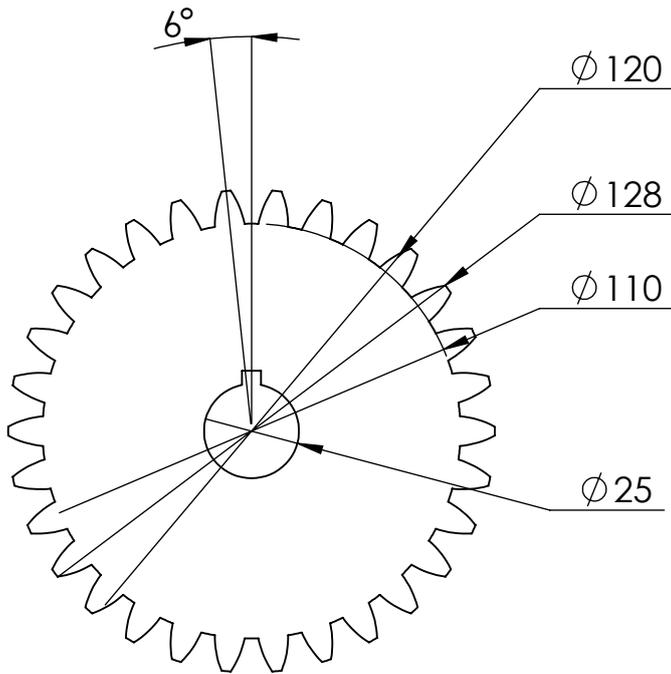
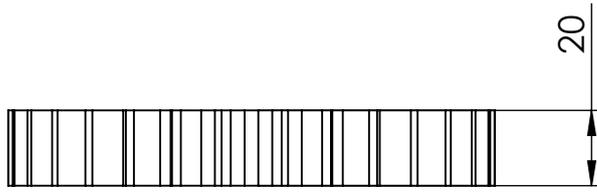
COUPE B-B  
ECHELLE 1 : 2

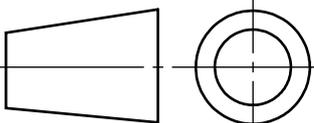


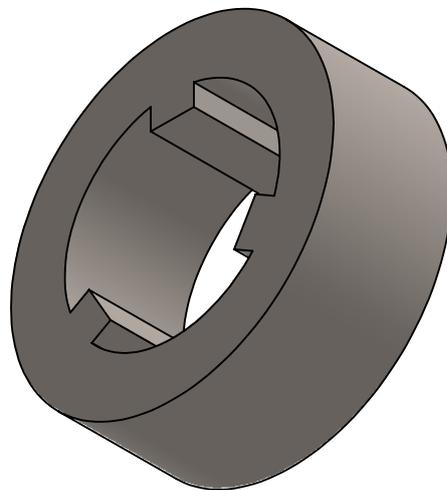
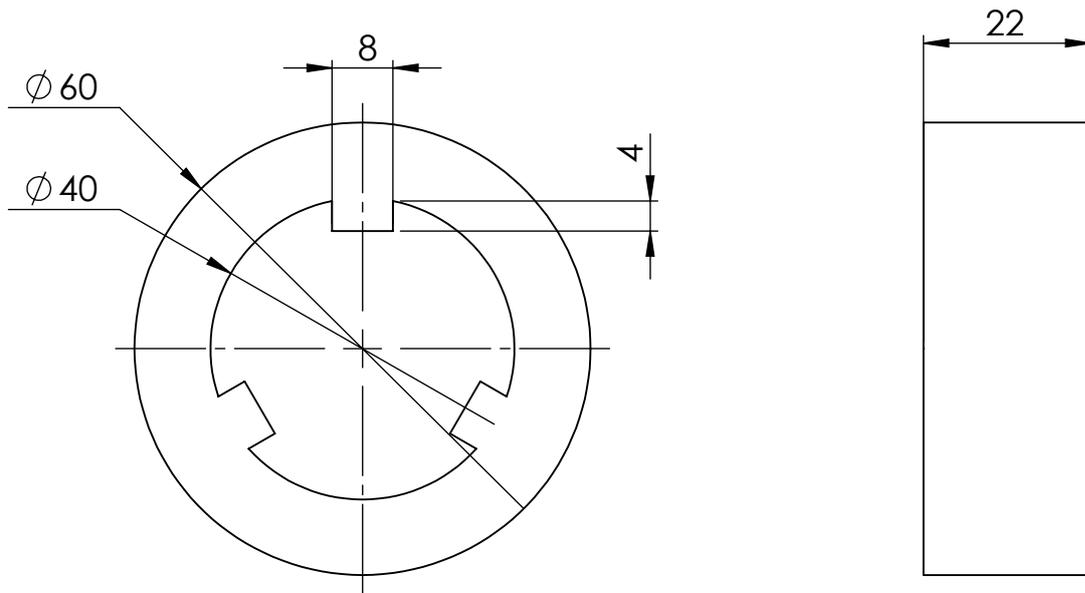
UNIVERSITE A - MIRA BEJAIA		M2 F.M.P
Echelle 1:2	LAME	Le 16/06/2018
		42 Cr Mo 4
CHENNINE Dalil & BOUAFIA Boualem		Pièce 8

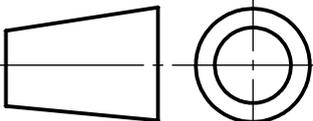


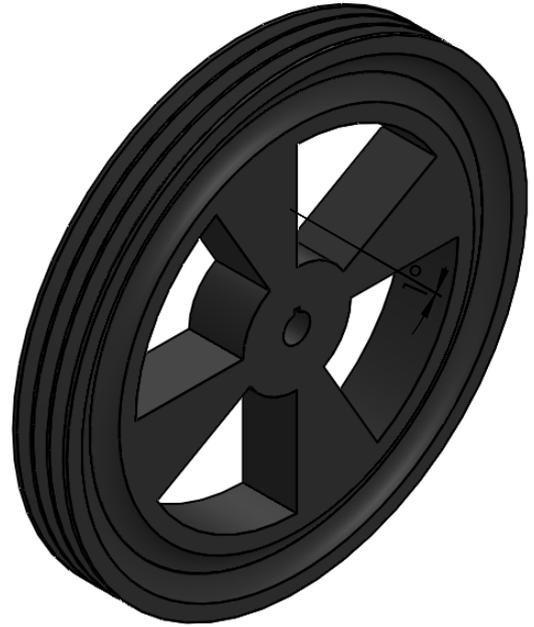
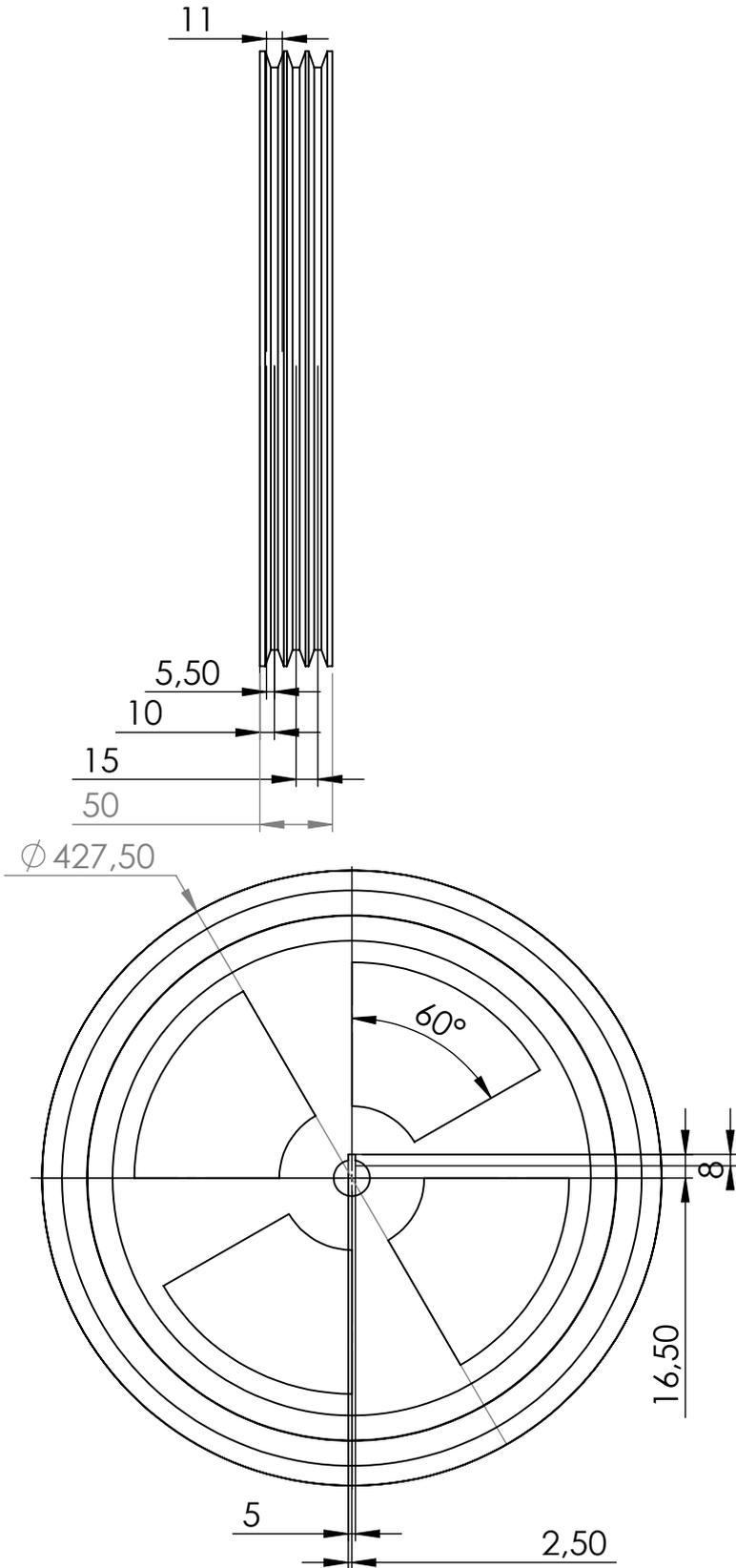
UNIVERSITE A - MIRA BEJAIA		M2 F M P
Echelle 1:2	Conter lame	Le 16/06/2018
		Acier allié
CHENNINE Dalil & BOUAFIA Boualem		Pièce 17

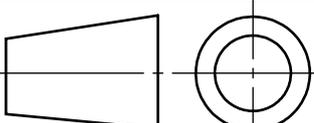


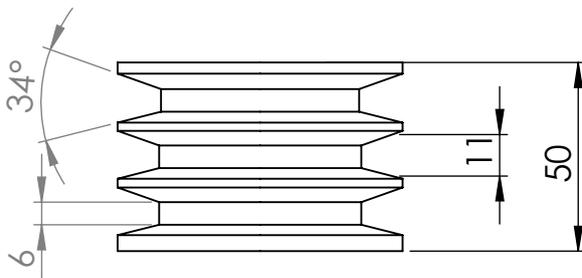
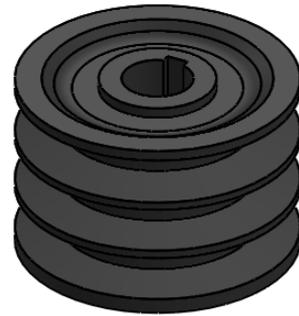
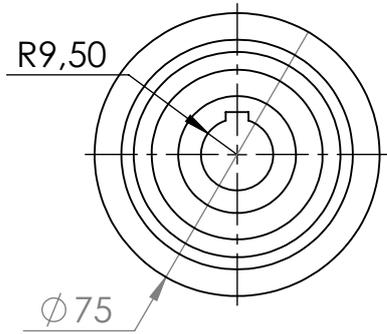
UNIVERSITE A - MIRA BEJAIA		M2 F M P
Echelle 1:2	Engrenage	Le 02/06/2018
		A 60
CHENNINE Dalil et BOUAFIA Boualem		Pièce 5

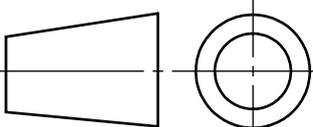


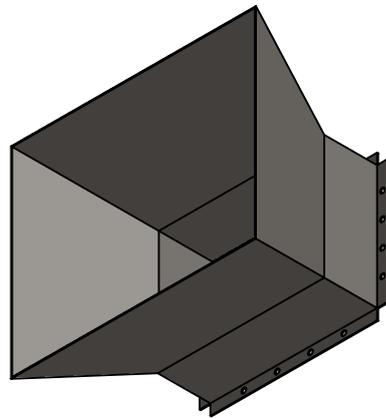
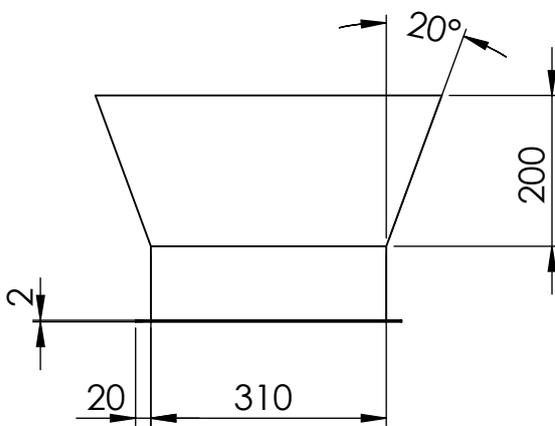
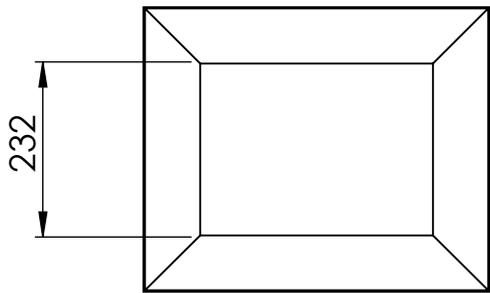
UNIVERSITE A - MIRA BEJAIA		M2 F M P
Echelle 1:1	Bague de séparation	Le 16/06/2018
		A 60
CHENNINE Dalil et BOUAFIA Boualem		Pièce 9



UNIVERSITE A - MIRA BEJAIA		M2 F M P
Echelle 1:5	<b>Poulie 2</b>	Le 02/06/2018
		fonte ft20
CHENNINE Dalil et BOUAFIA Boualem		Pièce 19

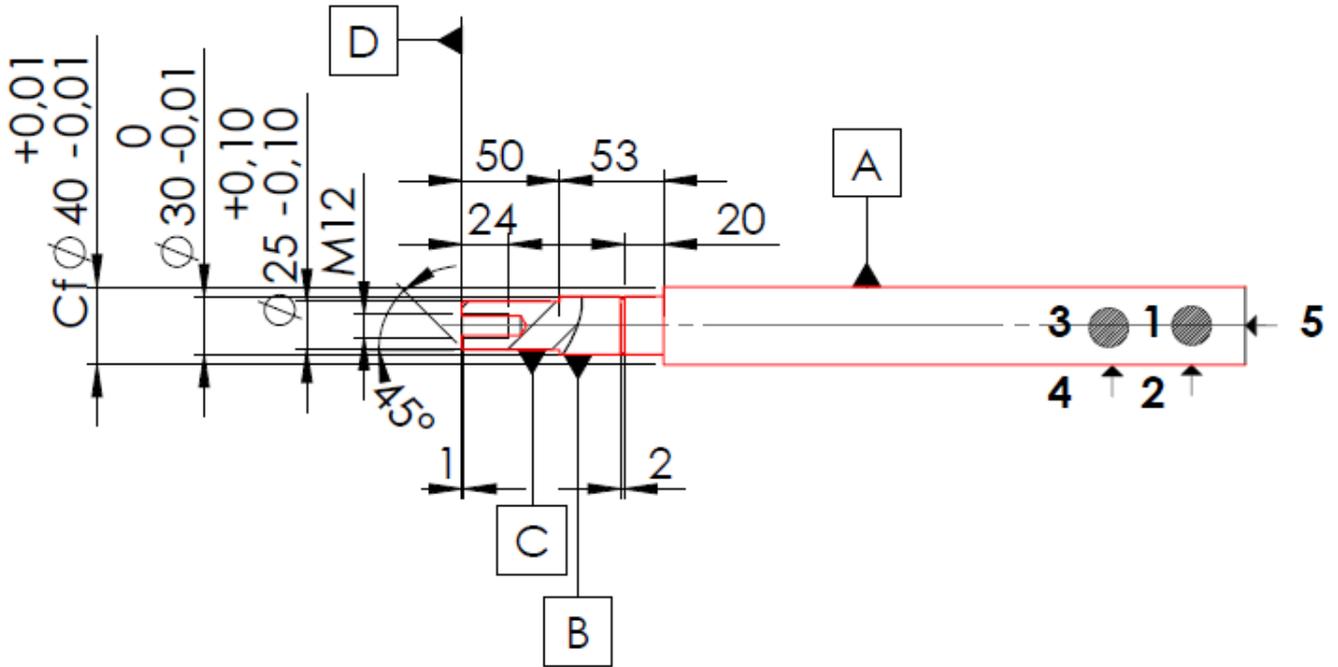


UNIVERSITE A - MIRA BEJAIA		M2 F M P
Echelle 1:2	POULIE 1	Le 02/06/2018
		Fonte FT 20
CHENNINE Dalil & BOUAFIA Boualem		Piece 19



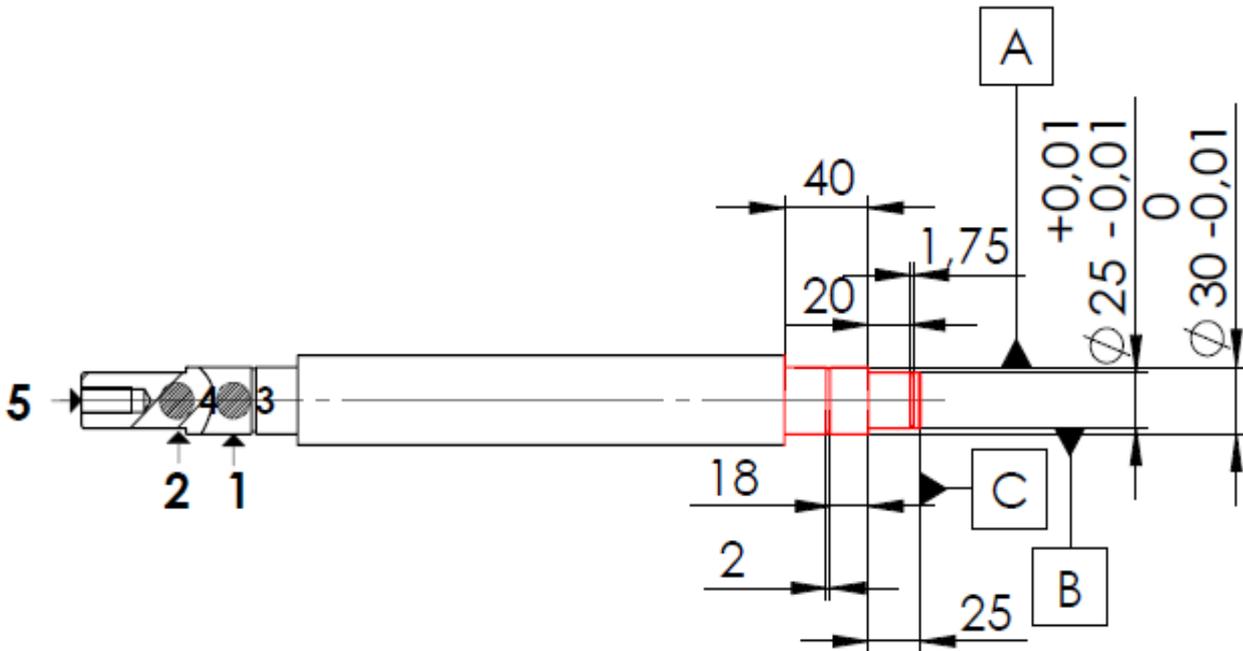
UNIVERSITE A - MIRA BEJAIA		M2 F M P
Echelle 1:10	Trémie	Le 16/06/2018
		Toile d'acier
CHENNINE Dalil & BOUAFIA Boualem		Pièce 10

PHASE		CONTRAT DE PHASE	BUREAU DE METHODE
N°	Désignation		
100	Tournage		
Ensemble:		Code pièce : 001	Brut: Ø 45 * 405 mm
Pièce : Centreur		Porte-pièce: mandrin 3 mors dure	Programme: /
Matière : A60 (E335)		Machine : Tour parallèle	Nom: arbre



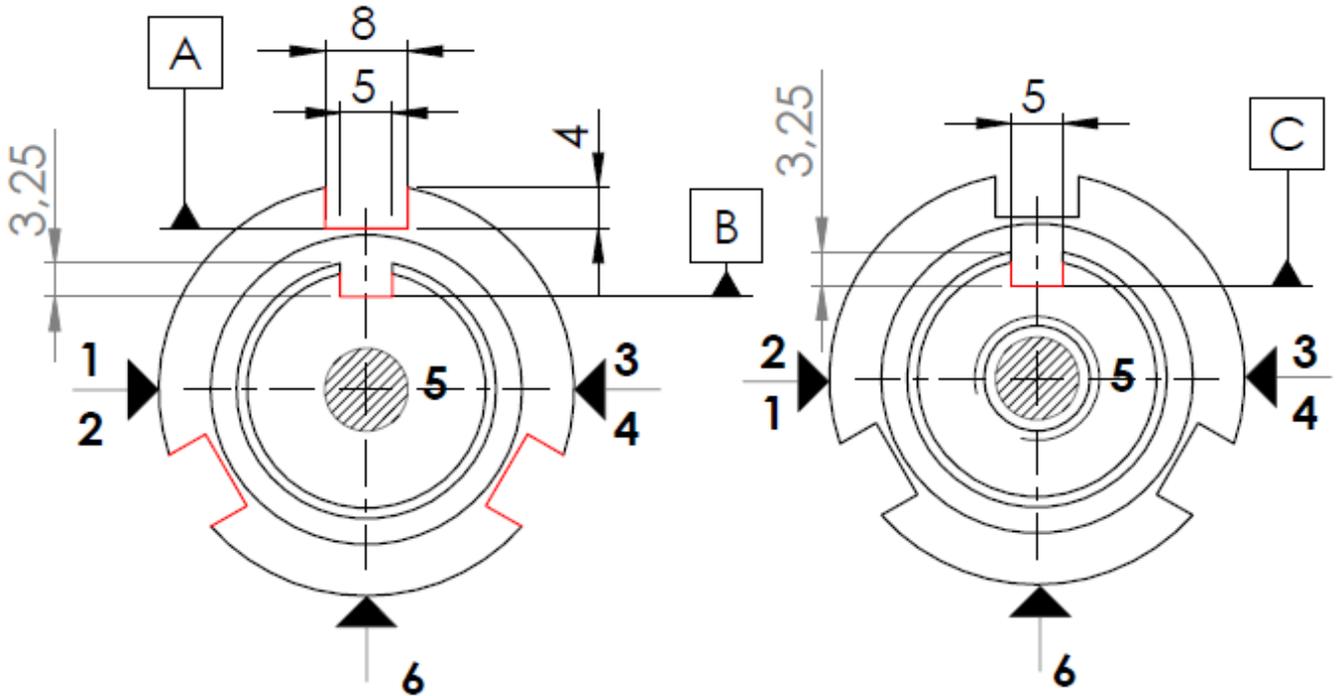
ANALYSE DE LA PHASE				CONDITIONS DE COUPE						
N°	Désignation des opérations		Outillage de coupe et contrôle	$V_c$ [m/min]	F [mm/tr]	$a_p$ [mm]	$T_u$ [min]	z	N [tr/min]	$v_f$ [mm/m in]
1	Chariotage [C]	$40^{+0.01}_{-0.01}$ $402^{+0.5}_{-0.5}$	Outils gauche A.RS	63.83	0.1	2	8	1	500	50
2	Chariotage [B]	$30^{-0.30}_{-0.35}$ $53^{+0.1}_{-0.1}$	Outils gauche A.RS	47.12	0.1	2	1.6	1	500	50
3	Chariotage [A]	$25^{+0.01}_{-0.01}$ $50^{+0.1}_{-0.1}$	Outils gauche A.RS	39.26	0.1	2	1	1	500	50
4	Chanfreinage à $1 \times 45^\circ$		Outil à charioter A.RS	39.26	0.1	2	0.2	1	500	50
5	Perçage Ø10		Fort Ø10	15.70	0.1	2	0.48	1	500	50
6	Filetage M 12×24		Outil a fileté	15.70	0.1	2	0.48	1	500	50
7	Rainurage 2		Outil a rainure extérieur	15.70	0.1	2	0.4	1	500	50
8	Vérifications		Palmer de 25 à 50	-	-	-	-	-	-	-

PHASE		CONTRAT DE PHASE	BUREAU DE METHODE
N°	Désignation		
101	Tournage		
Ensemble:		Code pièce : 001	Brut: Ø45 * 405mm
Pièce : Centreur		Porte-pièce: mandrin 3 mors dure	Programme: /
Matière : A60 (E335)		Machine : Tour parallèle	Nom: arbre



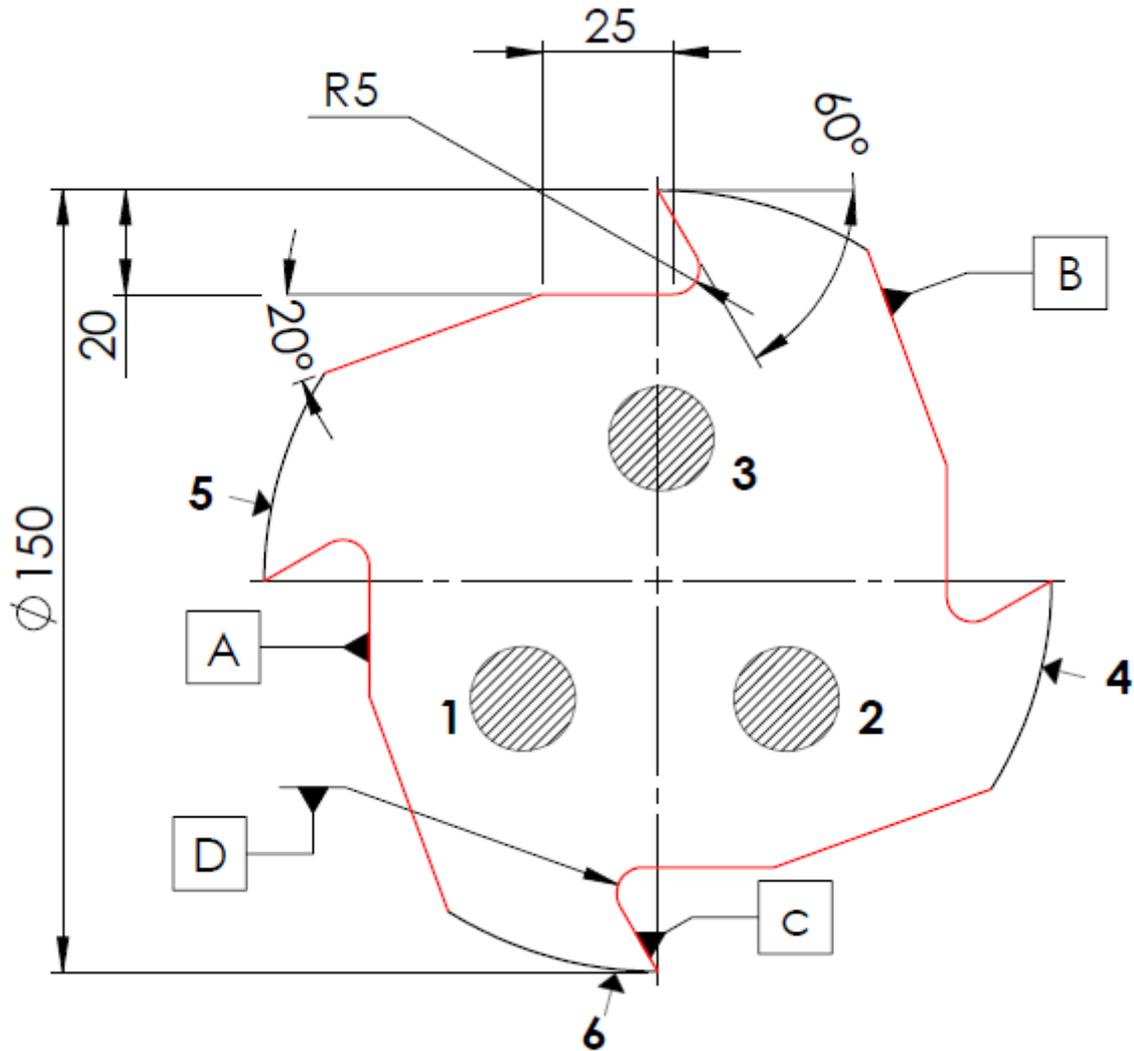
ANALYSE DE LA PHASE			CONDITIONS DE COUPE						
N°	Désignation des opérations	Outillage de coupe et contrôle	$V_c$ [m/min]	F [mm/tr]	$a_p$ [mm]	$T_u$ [min]	z	N [tr/min]	$v_f$ [mm/min]
1	Chariotage [A] $30_{-0.35}^{+0.30}$ [F] $25_{-0.1}^{+0.1}$	Outils gauche A.RS	47.12	0.1	2	0.5	1	500	50
2	Chariotage [B] $25_{-0.01}^{+0.01}$ [E] $40_{-0.1}^{+0.1}$	Outils gauche A.RS	39.26	0.1	2	0.8	1	500	50
3	Dressage [C] $400_{-0.5}^{+0.5}$	Outils droit A.RS	39.26	0.1	2	8	1	500	50
4	Chanfreinage à 45° *1	Outil à charioter A.RS	39.26	0.1	2	0.002	1	500	50
5	Rainurage 2	Outil a rainure extérieur	39.26	0.1	2	0.04	1	500	50
6	Vérifications	Palmer de 25 à 50	-	-	-	-	-	-	-

PHASE		CONTRAT DE PHASE	BUREAU DE METHODE
N°	Désignation		
200	Fraisage		
Ensemble:		Code pièce: 001	Brut: Ø 40 * 400
Pièce : Centreur		Porte-pièce: étau	Programme: /
Matière : A60 (E335)		Machine : Fraise CN 3 AXE	Nom: arbre



ANALYSE DE LA PHASE			CONDITIONS DE COUPE						
N°	Désignation des opérations	Outils de coupe et contrôle	$V_c$ [m/min]	F [mm/tr]	$a_p$ [mm]	$T_u$ [min]	z	N [tr/min]	$v_f$ [mm/m in]
1	Rainurage [A] 8	Outil a rainure extérieur (foret Ø8)	12.56	0.1	2	4	2	500	100
2	Rainurage [B] [C] 5	Outil a rainure extérieur (foret Ø5)	12.56	0.1	2	1.68	2	500	100
3	Vérifications	Pied à coulisse	-	-	-	-	-	-	-

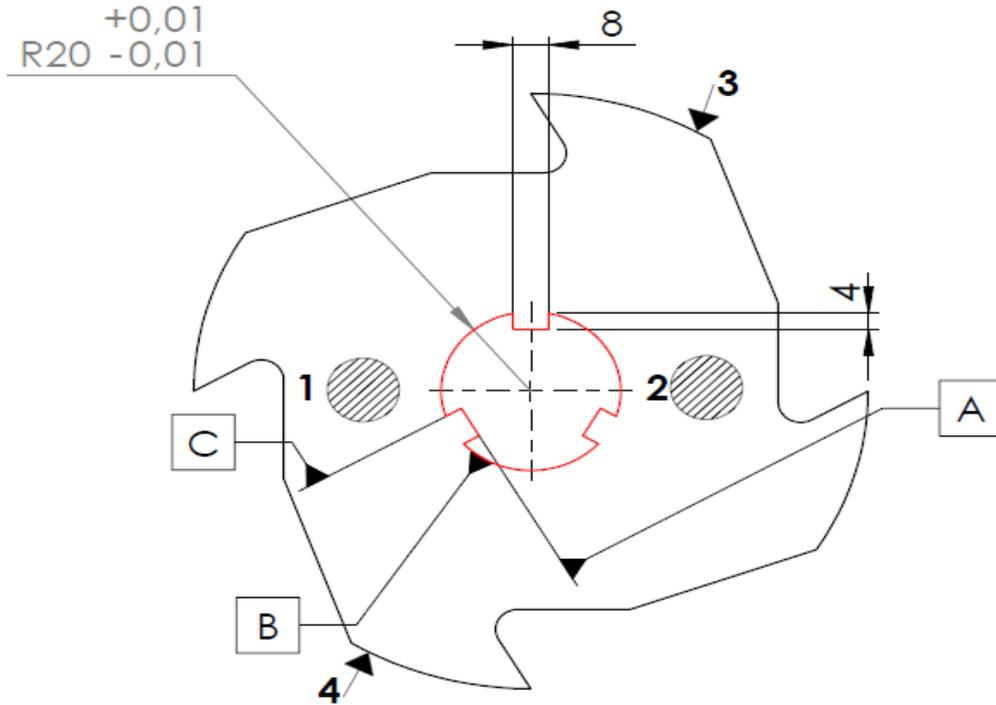
PHASE		CONTRAT DE PHASE	BUREAU DE METHODE
N°	Désignation		
300	Fraisage		
Ensemble:		Code pièce: 004	Brut: Ø 120 * 25 mm
Pièce : Centreur		Porte-pièce: étau	Programme: /
Matière : 42cd4		Machine : Fraise CN 3 AXE	Nom: lame



ANALYSE DE LA PHASE			CONDITIONS DE COUPE						
N°	Désignation des opérations	Outillage de coupe et contrôle	$V_c$ [m/min]	F [mm/tr]	$a_p$ [mm]	$T_u$ [min]	z	N [tr/min]	$v_f$ [mm/min]
1	Surfaçage et dressage [A] 25 * 20 [B] 20° [C] R5 60°	La Fraise à surfacier et surfacier-dresser Ø 10	15.70	0.1	2	-	4	500	200
2	Finition [A] [B] [C]	Fraise à finition Ø 10	15.70	0.1	2	-	4	500	200
3	Vérifications	Pied à coulisse	-	-	-	-	-	-	-



PHASE		CONTRAT DE PHASE	BUREAU DE METHODE
N°	Désignation		
301	Fraisage		
Ensemble:		Code pièce: 002	Brut: Ø120 * 20 mm
Pièce : Centreur		Porte-pièce: étau	Programme: /
Matière : 42cd4		Machine : Fraise CN 3 AXE	Nom: lame



ANALYSE DE LA PHASE			CONDITIONS DE COUPE						
N°	Désignation des opérations	Outillage de coupe et contrôle	$V_c$ [m/min]	F [mm/tr]	$a_p$ [mm]	$T_u$ [min]	z	N [tr/min]	$v_f$ [mm/min]
1	Surfaçage et dressage [B] Ø40 <sup>+0,01</sup> <sub>-0,01</sub> [A] Ø 16 [C] 8	La Fraise à surfacer et surfacer-dresser Ø 4	15.70	0.1	2	0.2	2	500	100
2	Finition [A] [B] [C]	Fraise à finition Ø 4	15.70	0.1	2	0.2	2	500	100
3	Vérifications	Pied à coulisse	-	-	-	-	-	-	-