

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*  
*Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou*  
*Département du génie Mécanique*

*Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master professionnel en Génie  
Mécanique*  
*Option : Fabrication Mécanique et Productique*

*Thème :*

# **Etude et conception et fabrication d'un broyeur végétal**

Réalisé par

LARABI ALI  
SAOUDI ACHOUR

composition de jury

Sous la direction de :

Mr. BELAID Kamel

**2019-2020**

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à :*

*Mes très chers parents qui m'ont toujours soutenu tout au long de ma vie, qui m'ont orienté dans le bon chemin et qui ont tout fait pour que je réussisse, que Dieu vous bénisse et vous garde ;*

*A toute ma famille ;*

*A tous mes amis et tous ceux que j'aime ;*

*A tous les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*Ali*

# *Remerciements*

*Ce projet de fin d'études présenté dans ce manuscrit a été réalisé en collaboration avec l'entreprise MECADEC, nous tenons à remercier le directeur de l'unité de production, ainsi tout le personnel de l'unité.*

*Nous tenons à exprimer nous profondes gratitude à Monsieur Nouredine Co-encadreur de ce projet, ingénieur au bureau d'étude de l'entreprise MECADEC pour ces observations pertinentes et son aide et son orientation. Ainsi Pour ses conseils judicieux.*

*Nous tenons à remercier tout particulièrement, notre promoteur Monsieur BELAID KAMEL, qui a encadré au quotidien notre travail. Sa très grande disponibilité a rendu cette thèse particulièrement agréable. Son expertise, ainsi que ses conseils avisés ont été très formateurs.*

*Nous tenons à exprimer notre reconnaissance envers les membres du jury qui ont eu lourde tache, d'examiner ce mémoire.*

*Enfin, nos remerciements vont à tous ceux qui, de près ou de loin, ont aidé à l'élaboration de ce projet, en particulier nos parents, nos chères amies.*

# SOMMAIRE

<b>Introduction générale.....</b>	<b>01</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur le bois.....</b>	<b>03</b>
1. Définition.....	03
2. Classification des bois massifs.....	03
3. Les différents types de déchets bois.....	04
3.1. Le bois de classe A.....	05
3.2. Le bois de classe B ou AB.....	05
3.3. Le bois de classe C (bois traités dangereux).....	06
4. Les différentes valorisations des déchets bois.....	06
4.1. La valorisation énergétique.....	06
4.2. La valorisation matière.....	06
5. Caractéristiques mécanique du bois.....	07
<b>Chapitre II : Généralités sur les broyeurs.....</b>	<b>10</b>
1. Définition d'un broyeur.....	10
2. Caractéristiques principales d'un broyeur.....	10
3. Le broyage.....	10
4. Les différents types de broyeurs.....	11
4.1. Broyeur à fragmentation grossière.....	11
4.2. Broyeur à couteaux.....	12
4.3. Broyeur pour papier.....	12
4.4. Broyeur pour le verre.....	12
4.5. Broyeur à fragmentation fine (1000 à 10 $\mu$ m).....	12
4.6. Broyeur à marteaux.....	13
4.7. Broyeur à fragmentation ultrafine.....	13
4.8. Broyeurs à billes.....	13
5. Choix et sélection d'un broyeur.....	14
<b>Chapitre III : Pièces de construction.....</b>	<b>21</b>
1. Réducteur.....	21
1.1. Principe de fonctionnement des réducteurs.....	21
2. Transmission par poulies et courroies.....	22
2.1. Les avantages et les inconvénients.....	22
2.2. Les différents types de courroies.....	24
2.3. Caractéristiques des différents types de courroies.....	27
3. Transmission par engrenage.....	28
3.1. Classification des engrenages.....	28
3.2. Types d'engrenages.....	29
4. Roulement.....	32
4.1. Constitution d'un roulement.....	32
4.2. Types de charges supportées par les roulements.....	32
4.3. Les principaux types de roulements à billes et à rouleaux.....	33
4.4. Fixation axiale des bagues.....	34
4.5. Les avantages et les inconvénients.....	34
5. Clavette.....	35
<b>Chapitre IV : Dimensionnement et calculs.....</b>	<b>36</b>
1. Introduction.....	36
2. Cahier de charge.....	36
3. Etude cinématique.....	36
3.1. Schéma cinématique.....	36

3.2. Choix du moteur.....	37
3.3. Calcul de la force de coupe <b>FC</b> du bois.....	37
4. Calcul de RDM des éléments sollicités dans le broyeur.....	38
4.1. Dimensionnement de l'arbre qui port le disque.....	38
4.2. Dimensionnement et matériaux utilisés des lames.....	46
5. Calcul des courroies et poulies.....	47
5.1. Choix de section de la courroie à partir du graphe.....	48
5.2. Diamètres primitifs.....	49
5.3. Calcul de la vitesse de la courroie.....	49
5.4. Calcul de longueur primitive courroie.....	49
5.5. Calcul de la puissance de base de la courroie.....	50
5.6. Puissance admissible de la courroie choisie.....	51
5.7. Nombre nécessaire de courroies.....	53
6. Calcul des roulements.....	54
6.1. Désignation du roulement.....	54
6.2. Caractéristiques du roulement.....	54
6.3. Durée de vie du roulement.....	54
7. Calcul de clavette.....	55
7.1. Calcul d'une clavette rectangulaire.....	55
7.2. Calcul au matage.....	57
<b>Chapitre V : Modélisation Géométrique et numérique.....</b>	
1. Généralités.	
1.1. Introduction.	
1.2. Définition de la CAO.	
1.3. Les avantages et les inconvénients de la CAO.	
1.4. Logiciel utilisée.	
1.5. Les différentes utilisations de SolidWorks.	
2. Modélisation Géométrique.	
2.1. Modélisation Géométrique de l'arbre.	
2.2. Modélisation Géométrique de la lame.	
2.3. Modélisation Géométrique de disque.	
2.4. Assemblage des éléments de broyeur.	
2.5. Assemblage fini du broyeur.	
3. Modélisation numérique.	
3.1. Introduction aux éléments finis.	
3.2. Le maillage.	
3.3. Différents types de maillage.	
3.4. Génération d'un maillage.	
3.5. Maillage des pièces de broyage.	
4. Simulation à l'état statique.	
4.1. Analyse statique de l'arbre	
4.2. Analyse statique de l'arbre en flexion.	
4.3. Analyse statique de l'arbre en torsion.	
5. Conclusion.	
<b>Conclusion générale</b>	

# Liste des tableaux & figures

## Chapitre 1

### Liste des figures

**Figure(01):** Branches de bois.

**Figure(02):** Déchets de bois.

**Figure(03):** Différents valorisation des déchets de bois.

**Figure(04):** Section transversale d'un arbre.

### Liste des tableaux

**Tableau(01):**Caractéristiques mécaniques de bois.

**Tableau(02):**Caractéristiques de quelques essences selon la classification.

## Chapitre 2

### Liste des figures

**Figure(05):**Schéma des différents modes de broyage.

**Figure(06):** Broyeur à couteaux.

**Figure(07):** Broyeurs à marteaux.

**Figure(08):**Broyeur à billes.

**Figure(09):**Broyeurs de matière dure.

**Figure(10):**Broyeur pour carton.

**Figure(11):**Broyeur à deux cylindres.

**Figure(12):**Broyeur végétal à disque.

**Figure(13):**Broyeur végétal à rotor.

## Chapitre 3

### Listes des figures

**Figure(14):** Principe d'une transmission par poulie courroie.

**Figure(15):** Inverseurs.

**Figure(16):** Courroie plate.

**Figure(17):** Exemples d'application des courroies trapézoïdales.

**Figure(18):** Exemple de transmission par courroie crantée.

**Figure(19):** Engrenages à axe concourants.

**Figure(20):** Engrenages à axe parallèles.

**Figure(21):** Engrenages à axe orthogonaux.

**Figure(22):** Transmission par engrenage à denture droite.

**Figure(23):** Transmission par engrenage cylindrique à dentures hélicoïdales.

**Figure(24):** Transmission par engrenage conique.

**Figure(25):** Transmission par roue et vis sans fin.

**Figure(26):** Constitution d'un roulement.

**Figure(27):** Types de charges supportées par les roulements.

**Figure(28):** Chaîne cinématique.

**Figure(29):** Représentation des efforts appliqués sur l'arbre.

**Figure(30):** Diagramme des efforts tranchant.

**Figure(31):** Diagramme des moments fléchissant.

**Figure(32):** Caractéristiques des courroies.

**Figure(33):** Caractéristiques du roulement.

### Liste des tableaux & graphes

**Tableau(03):** Caractéristiques des différents types de courroie.

**Tableau(04):** Les principaux types de roulements à billes et à rouleaux.

**Tableau(05):** Les éléments de la chaîne cinématique.

**Tableau(06):** Coefficient multiplicateur des éléments d'alliage dans un acier faiblement allié.

**Graphe(01):** Gamme des puissances transmissibles par type de courroie.

**Tableau(07):** Puissance de base en KW des courroies trapézoïdal classique.

**Graphe(02):** Longueur primitive.

**Graphe(03):** Angle d'enroulement.

### Introduction générale

Dès lors qu'il s'agit de planter ou d'entretenir de grands arbres, des espaces verts, sont nécessairement engendrés de grandes quantités de déchets. Ces déchets de bois posent parfois des problèmes en termes de traitement des déchets. L'utilisation d'un broyeur à bois s'avère donc bien souvent nécessaire. Ce type de matériel offre la possibilité de réduire considérablement la quantité de déchets de bois résultant d'une activité d'entretien et de gestion d'espaces verts. Le broyeur de végétaux est un instrument idéalement conçu pour fabriquer du compost, du paillage ou encore de recycler tout simplement les bois. Cet outil est équipé d'un système de coupe puissant installé sur un plateau tournant et doté d'un puissant couteau qui sert de pré-broyeur.

Le broyeur de végétaux fonctionne sur des bases plutôt simples. En effet, l'utilisateur n'aura qu'à installer le bois, les branchages ou autres déchets à broyer au fond de la machine.

Un mécanisme de déchiquetage se chargera ensuite du reste tout en réduisant les déchets au minimum. À l'aide d'un fonctionnement à turbine, le reste, du moins les éléments du branchage et du bois qui ont été broyés sont évacués à l'autre bout et sont fins prêts à être réutilisés.

# Chapitre I : Généralités sur le bois

## Chapitre I : Généralités sur le bois

### 1. Définition

Le bois est une matière organique. Parmi ces principaux constituants organiques nous pouvons citer la cellulose environ 50% et la lignine environ 20%.

Le bois est la matière ligneuse et compacte qui compose les branches, le tronc et les racines d'un arbre. Chimiquement le bois se compose presque toujours de 50% de carbone, 42% d'oxygène, 6% d'hydrogène, 1% d'azote et 1% d'éléments divers. Le bois a des qualités et des défauts dont il faut tenir compte dans le façonnage et surtout dans l'assemblage, même des plus petits objets.



**Figure (01):** Branches de bois.

### 2. Classification des bois massifs

Les pièces de bois massives sont des pièces résultant d'opérations d'usinage sur du bois provenant directement du sciage de l'arbre.

Plusieurs critères de classification possible : bois indigènes ou bois d'importation au sein de chacune de ces catégories : bois de feuillus ou bois de résineux parmi les essences de feuillus indigènes :

- ❖ Les **bois très légers** (densité 0,4 à 0,5) : le peuplier, le saule, le tilleul ;

- ❖ Les **bois légers** (densité 0,5 à 0,65) : l'aulne, le bouleau et le tremble ;
  
- ❖ Les **bois demi-lourds** (densité 0,65 à 0,8) : le charme, le châtaignier, le chêne, l'érable, le frêne, le hêtre, le merisier, le noyer, l'orme, le platane, le poirier ;
  
- ❖ Les **bois lourds** (densité 0,8 à 0,95) : le buis, le chêne vert, le cornouiller, le sorbier,...etc.

Parmi les résineux indigènes : les pins, cyprès, épicéas, sapins, mélèzes, cèdres (classement par ordre de densité croissante) :

<b>Classes de densité et de dureté</b>	<b>Densité</b>	<b>Dureté</b>	<b>Essences</b>
Bois très lourds et très durs	0.85	9	Azobé, ipé
Bois lourds et durs	0.70 – 0.85	5 – 9	Charme, movingui, chêne dur
Bois mi-lourds et mi-durs	0.56 – 0.70	2.5 – 5	Niangon, iroko, châtaigner, chêne tendre, pins
Bois légers et tendres	0.45 - 0.55	1.25 -2.5	Framiré, douglas, épicéa, sapin, pins
Bois très légers et très tendres	0.45	1.25	Western red cedar, séquoia, peuplier

**Tableau(01):** Caractéristiques de quelques essences selon la classification.

### **3. Les différents types de déchets bois :**

Les déchets bois sont principalement produits par trois types d'acteurs : les industriels, la distribution et les particuliers.

Parmi les industriels, on retrouve les scieries, les fabricants de meubles et les magasins de grande distribution. Ces derniers doivent faire recycler des palettes, des cagettes, des tourets et diverses chutes de production.

Au sein de ces déchets, on distingue trois grandes familles de déchets de bois : le bois de classe A, le bois de classe B et le bois de classe C. En fonction du type de bois, les possibilités de valorisation diffèrent. Il est donc primordial de pouvoir les distinguer afin de les valoriser au mieux.

**3.1. Le bois de classe A :** est un bois brut et noble, qui n'est ni traité, ni peint, ni collé. C'est le bois des emballages non peints et non traités comme les palettes, caisses, cagettes, bois de calage non traités, planches de bois massif et bois en mélange. C'est aussi le bois des panneaux bois non-mélangés, non traités et sans souillures ou qui sert à fabriquer des tourets.

L'humidité de ce type de biomasse varie de 15 à 25 %, ce qui en fait un combustible hautement calorifique pour les chaufferies industrielles.

En résumé, les bois de classe A sont des bois secs non traités et non peints.

**3.2. Le bois de classe B ou AB (bois traités non-dangereux) :**

Le bois de classe B ou AB est traité avec de faibles adjuvants chimiques (peinture, laque, vernis, etc.) pour mieux se conserver. Il peut être peint et collé.

C'est le bois des panneaux, le bois d'ameublement, le bois de démolition exempt de gravats, des bois peints et les résidus de l'exploitation forestière (souches, grumes, etc.).

Il est principalement issu des déchets du bâtiment et de l'ameublement. On retrouve notamment des poutres, du bois de démolition, des panneaux de particules, des contreplaqués, du bois peint, vernis, mélangés et/ou avec présence de colle, des meubles et fenêtres en bois.



**Figure(02):** Déchets de bois

### 3.3 Le bois de classe C (bois traités dangereux) :

Le bois de classe C est traité et dangereux. Ce sont des bois imprégnés, classés déchets dangereux et polluants.

On retrouve par exemple ce type de bois dans les traverses de chemins de fer, les poteaux électriques et téléphone, les palissades traitées, le bois injecté à cœur aux sels métalliques et les bois « créosotés ». Le bois de portes de fenêtres et de poutres peints au plomb font également partie de cette catégorie. Les bois d'extérieur, traités à la lasure ou à la peinture, les bois d'écrans acoustiques, les piquets de vigne et d'arboriculture, le bois de palissades et les déchets bois issus du génie civil et imprégnés de métaux lourds en sont eux aussi, des bois traités dangereux de classe C.[1]

## 4. Les différentes valorisations des déchets bois :

Après la collecte, le bois est envoyé en centre de tri pour être trié manuellement sur place, il subit un tri manuel avant de partir en filière spécialisée pour être broyé, déferrait, criblé et grappins afin d'être recyclé ou valorisé.

Selon les types de déchets bois, différentes valorisations sont possibles ;

- Les déchets de bois ont deux débouchés principaux : la valorisation matière dans l'industrie des panneaux de particules et la valorisation énergétique en chaufferie.
- Les bois A et B sont généralement valorisés en tant que panneaux de particules. Lorsque ce n'est pas possible, ils sont transformés en combustibles pour la production de chaleur. Dans ce cas, ils sont transformés en plaquettes de bois afin d'alimenter les chauffages collectifs et individuels.
- Les bois de type C peuvent également être valorisés. La valorisation énergétique est possible, à condition qu'elle soit faite dans des installations d'incinération spécifiques. Sinon, ils peuvent être utilisés en cimenterie.

**4.1. La valorisation énergétique :** le bois devient du bois énergie. Le bois est utilisé en tant que combustible pour alimenter les chaufferies industrielles ou collectives et les réseaux de chaleur. Dans certains cas, le recyclage du bois permet de produire de l'électricité, en chauffant l'eau dont la vapeur alimente des générateurs ;

**4.2. La valorisation matière :** le bois est utilisé en tant que nouvelle matière, pour fabriquer de nouveaux éléments, tels que des panneaux de particules ou agglomérés qui permettent de concevoir du mobilier ; [2]



Figure(03): Différents valorisation des déchets du bois.

## 5. Caractéristiques mécanique du bois :

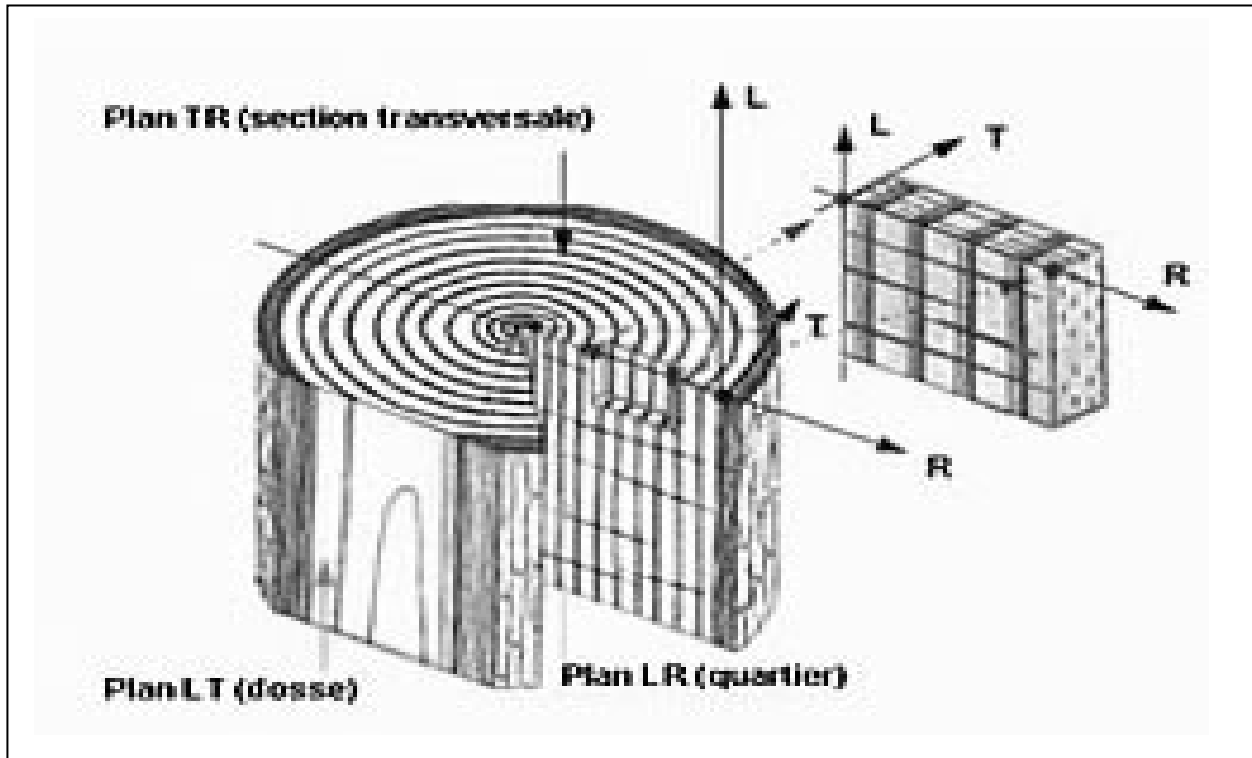
Le bois matériau hétérogène et anisotrope, offre des résistances mécaniques différentes en fonction de la direction de l'effort par rapport à la section transversale, radiale ou tangentielle.

Elles varient avec l'espèce (texture, densité, humidité); dans une même espèce avec l'âge, les conditions d'exposition, de croissance et de voisinage et dans un même individu avec l'emplacement du prélèvement (cœur, aubier, etc.).

On rencontre en outre, une très grande dispersion dans les résultats (du simple au double parfois) pour une même direction d'efforts, dans un même individu, selon en particulier la densité du bois qui demeure la caractéristique prédominante.

Le bois se comporte dans la direction axiale comme une matière fibreuse, résistante, tenace, rigide et dure. Par contre, dans la direction tangentielle, le bois se comporte comme une matière plastique, déformable et de résistance relativement faible.

De plus, en testant le bois à la traction, à la compression, au poinçonnement, au cisaillement, on trouve des différences capitales selon la direction des efforts.



**Figure(04):** Section transversale d'un arbre.

La résistance est d'autant meilleure que le bois testé est plus mince en valeur absolue; le travail d'une allumette est très supérieur à celui d'une poutre. Les résistances à la traction sont 2 à 4 fois plus grandes qu'à la compression. Dans les calculs de construction en bois, il faut prendre un grand coefficient de sécurité.

Sa résistance est très forte dans le sens longitudinal et peut se fendre aisément dans le sens radial. Ces propriétés permettent de choisir le type de découpe selon l'utilisation souhaitée.

Le bois issu de la coupe de troncs d'arbres n'est pas utilisable directement. Il est débité puis mis à sécher à l'air libre de nombreuses années afin que son eau soit éliminée et que les planches utilisées ne se déforment pas.

Voici un tableau qui représente les caractéristiques mécanique de quelques Essence du bois :

Ces valeurs moyennes (en MPa) sont obtenues par essais en laboratoire sur des échantillons de bois. Ces essais sont effectués dans le sens longitudinal du bois. [3]

<b>Essence</b>	<b>Module d'élasticité</b>	<b>Compression</b>	<b>Traction</b>	<b>Flexion</b>	<b>Cisaillement</b>
<b>Épicéa</b>	<b>11000</b>	<b>43</b>	<b>90</b>	<b>66</b>	<b>6.7m</b>
<b>Pins</b>	<b>13000</b>	<b>47</b>	<b>104</b>	<b>87</b>	<b>10.0</b>
<b>Mélèze</b>	<b>13800</b>	<b>55</b>	<b>107</b>	<b>99</b>	<b>9.0</b>
<b>Hêtre</b>	<b>16000</b>	<b>62</b>	<b>135</b>	<b>105</b>	<b>10.0</b>
<b>Chêne</b>	<b>13000</b>	<b>54</b>	<b>90</b>	<b>91</b>	<b>11.0</b>

**Tableau(02):** Caractéristiques mécaniques de quelques essences de bois.

# Chapitre II : Généralités sur les broyeurs

## Chapitre II : Généralités sur les broyeurs

### 1. Définition d'un broyeur :

Le broyeur est une machine utilisée pour le broyage des matériaux, soit faciles à traiter ou difficiles (le bois, 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).

### 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 ou plus qui coupent nettement la matière.

### 3. Le broyage :

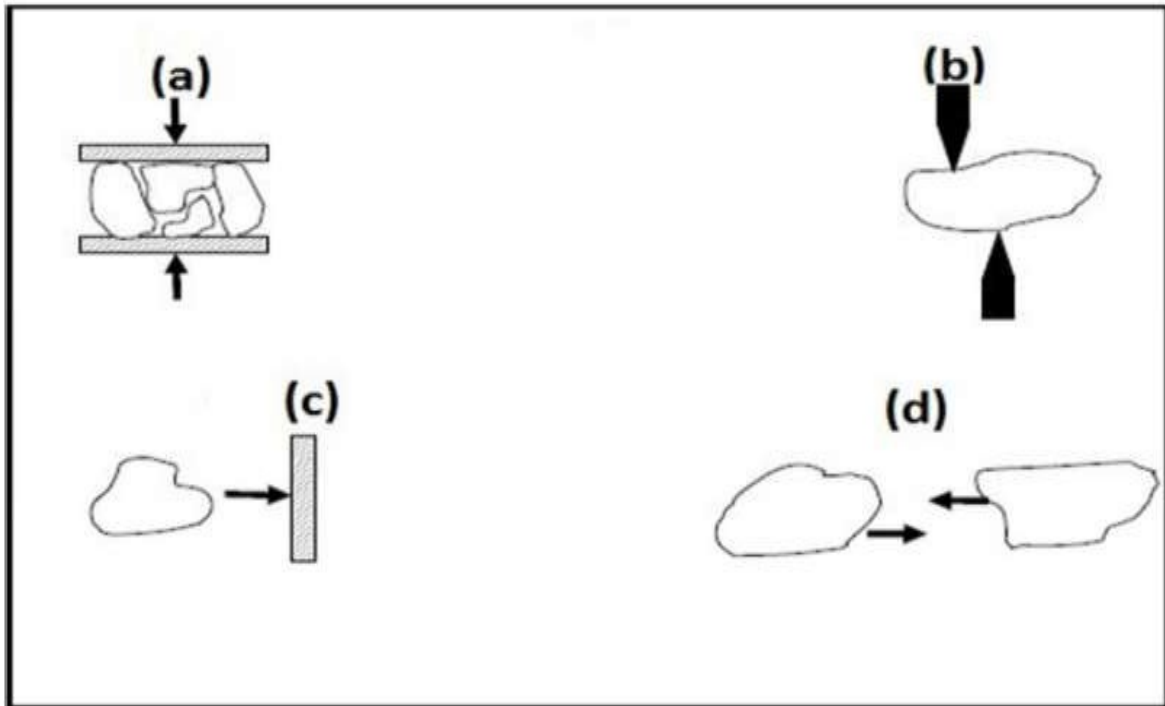
C'est-à-dire réduire la matière en petits fragments ou en poudre. Pour cela il faut la soumettre à des forces de contraintes supérieures à sa résistivité et on appelle ces actions dans la RDM dépasser le domaine d'élasticité et critique de matière et la ramener à son domaine de rupture.

(a) : par compression ou par friction

(b) : par cisaillement

(c) : par choc contre une paroi

(d) : par collision entre les éléments à broyer



Figure(05): Schéma des différents modes de broyage.

#### 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.
- Broyeur à fragmentation fine.
- Broyeur à fragmentation ultrafine.

##### 4.1. 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.

### 4.2. 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(06):** Broyeur à couteaux.

### 4.3. 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.

### 4.4. 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.

### 4.5. 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 violement 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 :

### 4.6. 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(07): Broyeurs à marteaux.

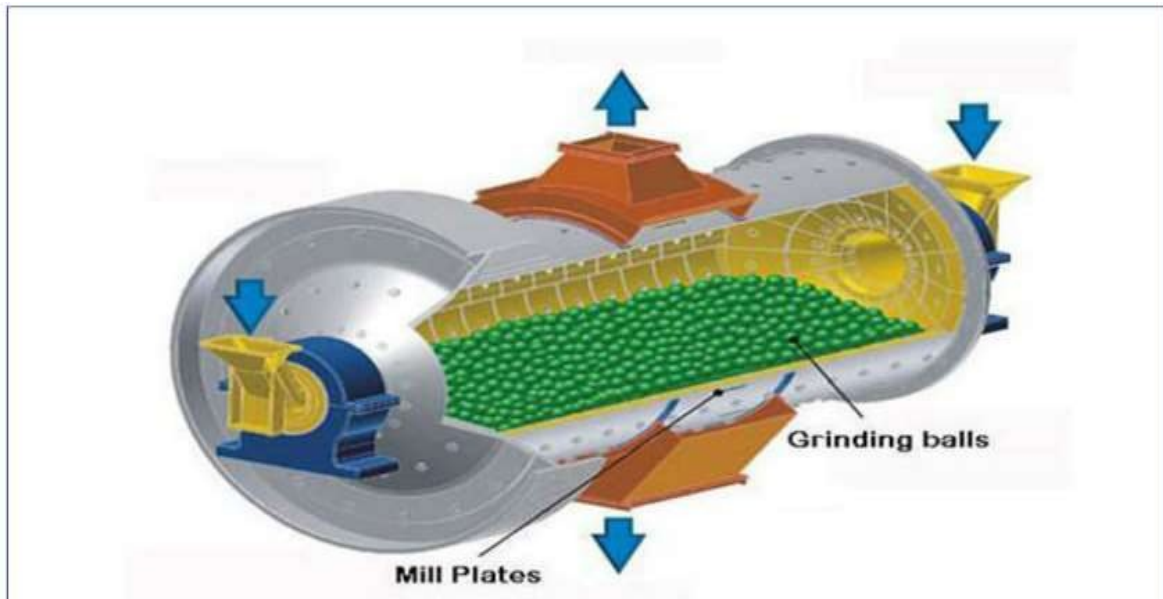
### 4.7. Broyeur à fragmentation ultrafine :

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 [4].

### 4.8. 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 colée contre les parois



**Figure(08):** Broyeur à billes.

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 apparait 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.

### 5. Choix et sélection d'un broyeur

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.

#### 5.1. Choix d'un broyeur :

##### 5.1.1. 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

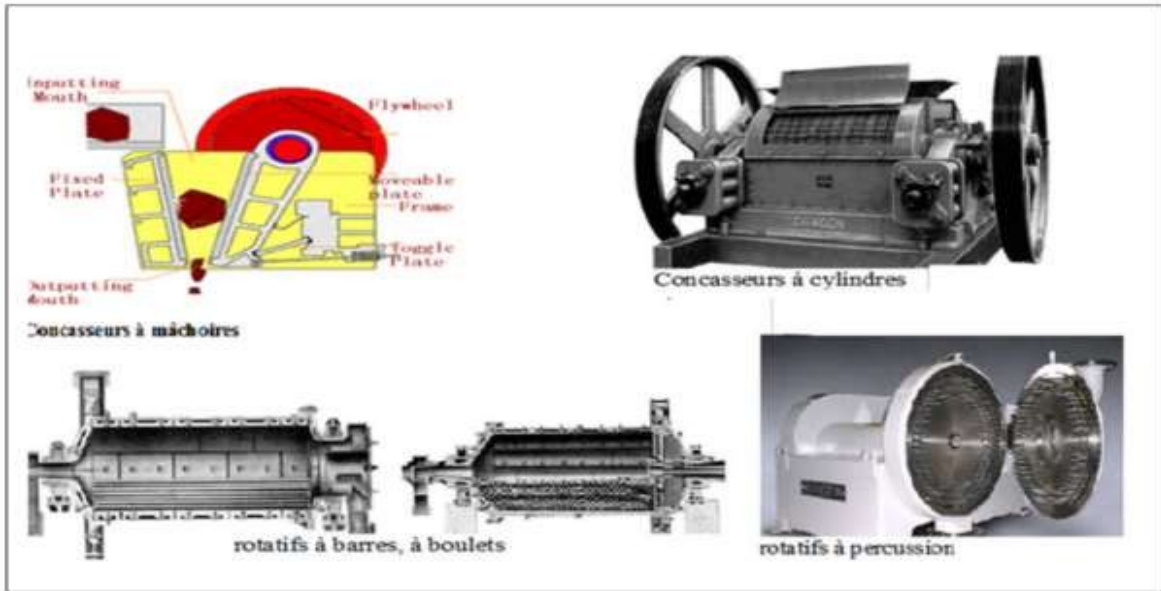
En général, pour choisir un broyeur il faut respecter les paramètres suivants :

- 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. [5]

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. 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 :

### **5.1.1.1. 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 non abrasifs respectivement. Pour répondre à d'autres besoins, nous avons les concasseurs giratoires, les percuteurs et les concasseurs à cylindres ou à marteaux comme c'est le cas dans les cimenteries [5].



Figure(09): Broyeurs de matière dure.

5.1.1.2. Broyage 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(10): Broyeur pour carton.

### 5.1.1.3. 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 [5].



**Figure(11):** Broyeur à deux cylindres.

### 5.1.1.4. Broyage végétal : La solution idéale.

**a. Fonctionnement :** Le broyeur de végétaux est constitué de lames ou couteaux tranchants entraînés en rotation par un moteur thermique ou électrique. Ces couteaux sont placés dans un silo de coupe dans lequel :

- sont insérés les feuillages et branchages d'un côté ;
- et d'où sont extraits les copeaux de bois ainsi produits.



**Figure(12):** Broyeur végétal à disque.



**Figure(13):** Broyeur végétal à rotor.

**b. Utilité d'un broyeur végétal :** Le broyage sur place permet d'éviter les risques, la pollution et les désagréments de l'écobuage tout en réduisant considérablement les problèmes de transport. En réduisant les branches, rameaux et feuillages en copeaux, le broyeur de végétaux rationalise l'utilisation des moyens de transport en permettant :

- la réduction du volume transporté (de 10 à 1) ;
- l'équilibrage du rapport poids/volume du chargement ;
- la limitation des trajets des véhicules ;
- l'utilisation ultime des végétaux broyés (compost, biomasse, etc.).

### **5.1.2. 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

### **5.1.3. 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.

### **5.1.4. 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 III : Pièces de construction

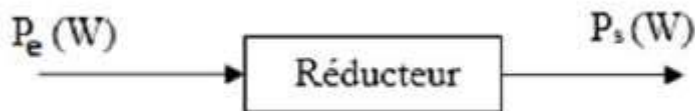
## Chapitre III : Pièces de construction

### 1. Réducteur :

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).[6]

#### 1.1.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

### 2. Transmission par poulies et courroies :

La transmission continue de puissance entre deux arbres animés de mouvements de rotations en rapport constant est assurée de façon courante par engrenage, courroie ou chaîne.

#### 2.1. Les avantages et les inconvénients

La solution par courroie s'est développée très tôt à l'époque industrielle du fait des avantages nombreux qu'elle propose:

- entraxe élevé;
- amortissement des chocs et des à-coups, souplesse d'utilisation;
- silence de fonctionnement;
- bon rendement;
- montage et entretien simples;
- grande durée de vie;
- économie...

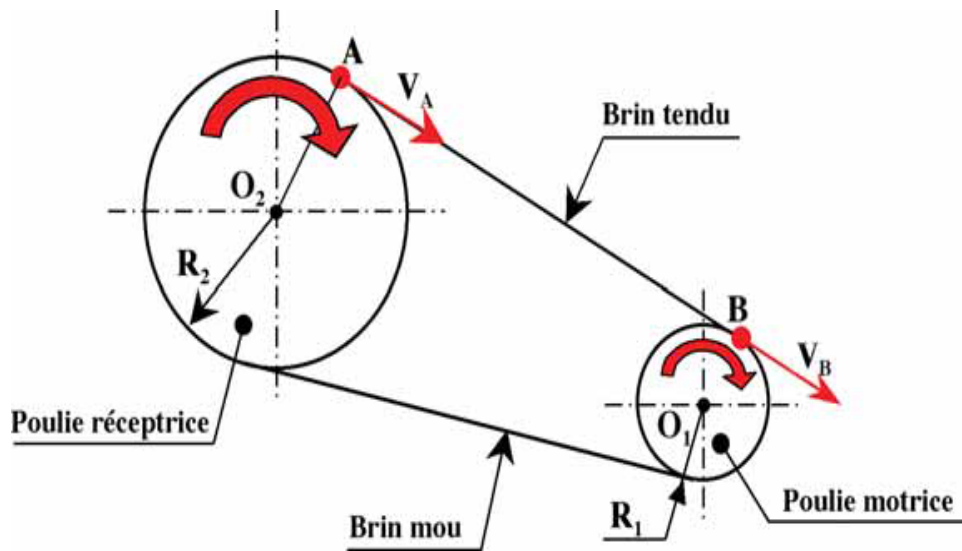
Les courroies, d'abord plates, ont été progressivement remplacées par des courroies à section trapézoïdales pour suivre l'augmentation des vitesses de rotation et de la puissance des machines.

L'évolution de la technologie des courroies a permis d'apporter des réponses aux principales critiques qui leur sont opposées:

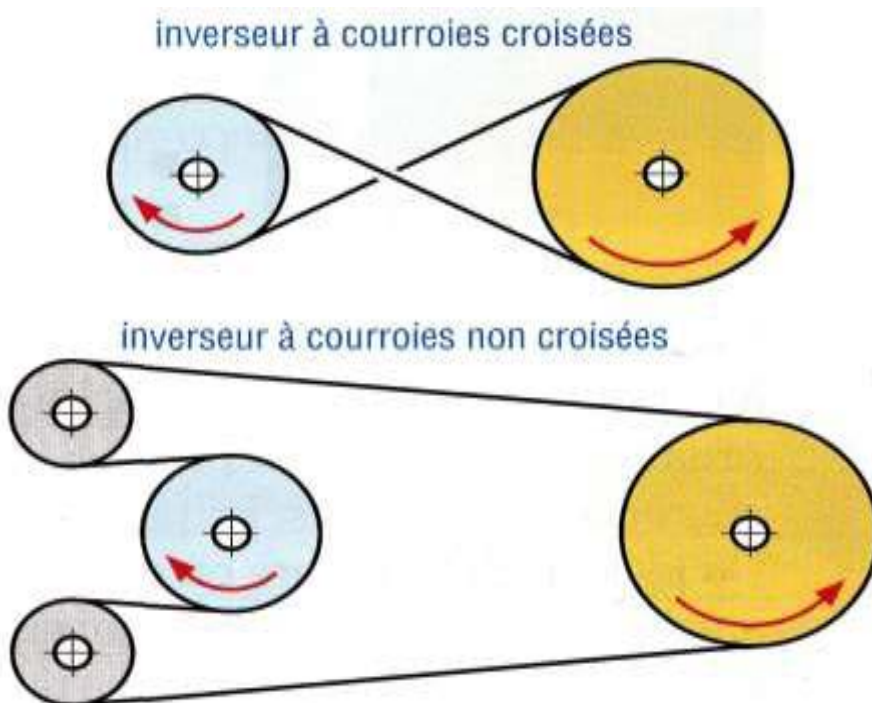
- augmentation de la puissance transmise par choix de matériaux plus performants (synthétiques, composites ou métalliques);
- Emploi de courroies multiples (poly trapézoïdales);
- rigueur du rapport de transmission par usage de courroies crantées synchrones.

Ainsi, il est actuellement possible de concevoir des transmissions de ce type pour des puissances pouvant atteindre 400 kW et des vitesses linéaires dépassant 60 m/s.

La présente étude concerne les transmissions à arbre parallèles, dans un premier temps à courroies trapézoïdales, puis à courroies crantées.[7]



Figure(14):Principe d'une transmission par poulie courroie.



Figure(15): Inverseurs.

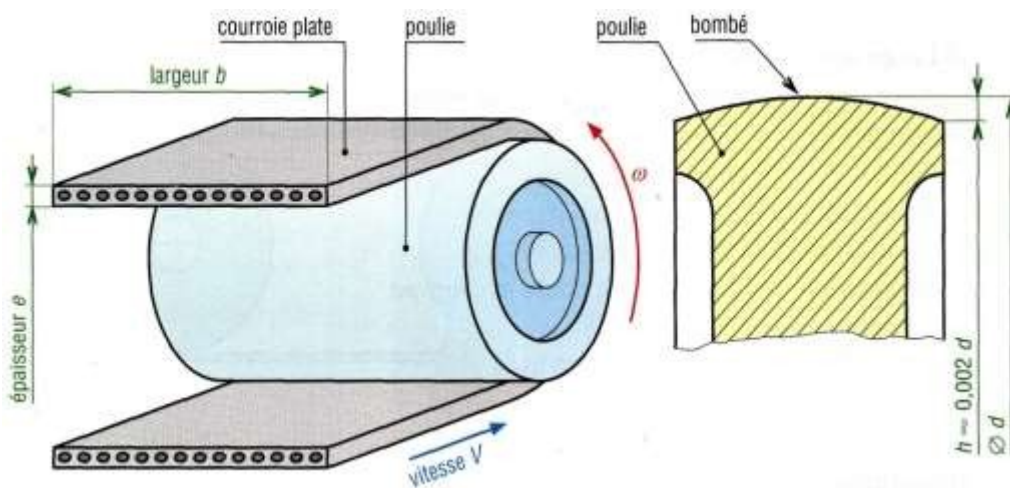
## 2.2. Les différents types de courroies

### 2.2.1. 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 (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 (<25m/s), polyester, aramide revêtu silicone (<80 m/s).



Figure(16): Courroie plate.

### 2.2.2. Courroie 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

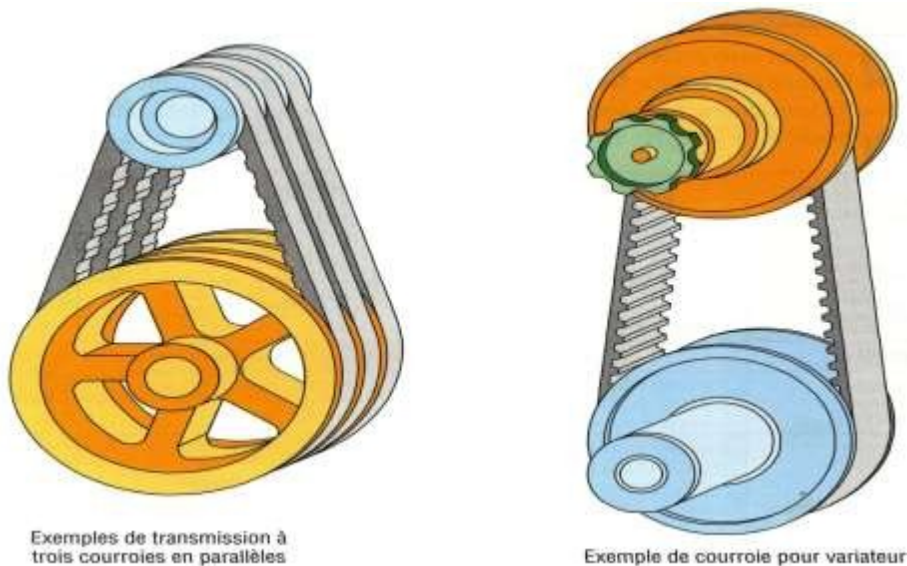
Parallèles sur la même poulie (avec 1, 2, 3..., 10 gorges).

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 court.

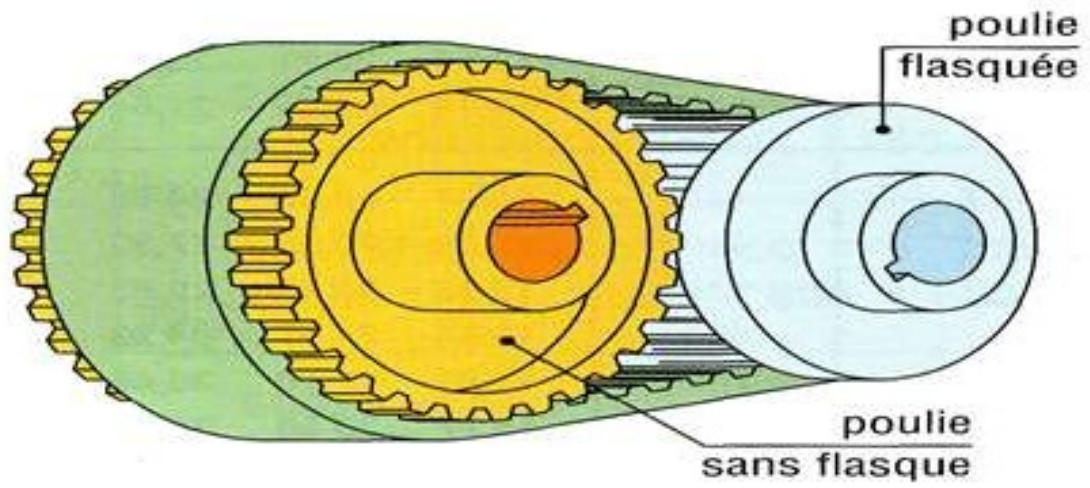
Matériaux : matériau composite chloroprène et fibres de verre et files d'acier. Température d'utilisation: de -25 C° a +85



**Figure(17):** Exemples d'application des courroies trapézoïdales.

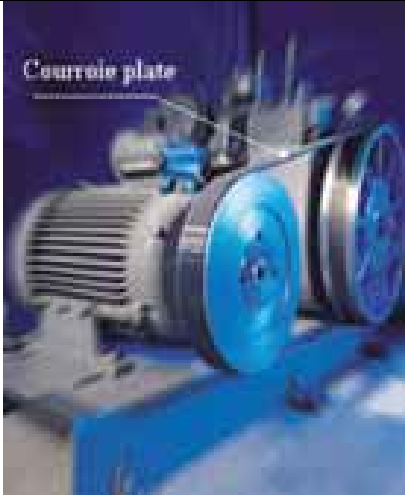
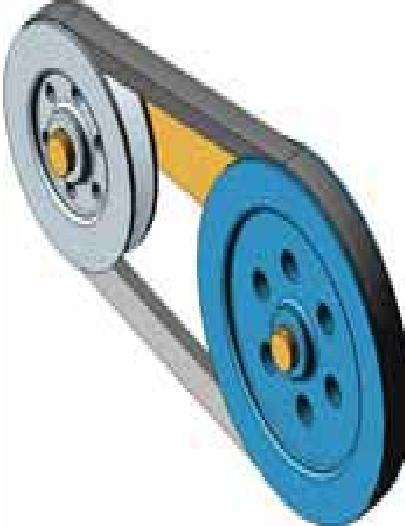

### 2.2.3. Courroies crantées (ou synchrone)

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. [7]



**Figure(18):**Exemple de transmission par courroie crantée.

2.3.Caractéristiques des différents types de courroies :

TYPES		CARACTERISTIQUES
<p><b>COURROIES PLATES</b></p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faciles à plier mais peuvent débarquer par glissement (quitter la poulie)</li> <li>- Très silencieuses, absorbent les chocs</li> <li>- Transmission de vitesses élevées 100 à 200 m/s.</li> <li>le rendement peut atteindre 98 %</li> <li><b>Exemples d'utilisation :</b></li> <li>- Broyeur</li> </ul>
<p><b>COURROIES TRAPEZOÏDALES</b></p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puissance transmissible élevée (emploi de gorges multiples)</li> <li>- Faible encombrement, tension réduite sur l'arbre.</li> <li>- Bonne stabilité latérale.</li> <li>- Risque de coincement dans la gorge</li> <li>- Rendement 92 %</li> <li><b>Exemples d'utilisation :</b></li> <li>- Tour parallèle</li> <li>- Perceuse sensitive</li> </ul>
<p><b>COURROIES CRANTEES</b></p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transmission silencieuse sans glissement (rapport précis).</li> <li>- Une des deux poulies doit être flasquée afin que la courroie ne sorte pas des poulies</li> <li><b>Exemples d'utilisation :</b></li> <li>- Entraînement de l'arbre à cames de moteurs d'automobile.</li> <li>- Déplacement d'une tête d'imprimante</li> </ul>

Tableau(03): Caractéristiques des différents types de courroies.

### 3. 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.

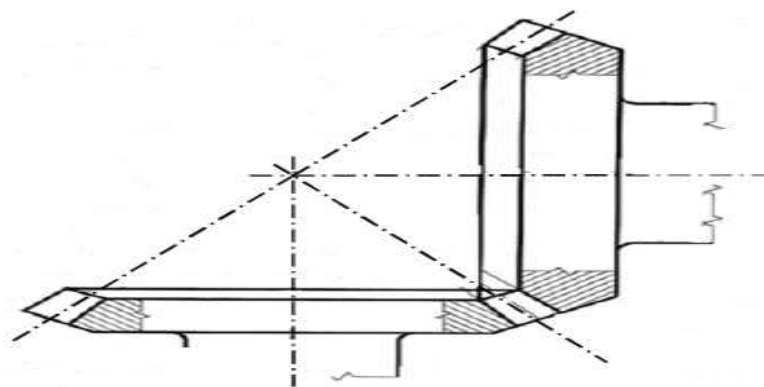
Les solutions concurrentes [8]:

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

#### 3.1. Classification des engrenages :

##### ❖ Engrenages à axe concourants :

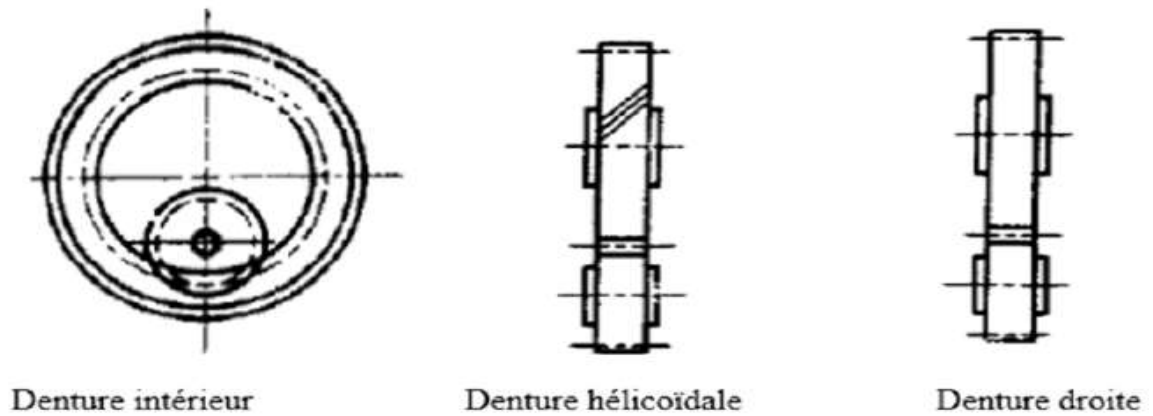
Les axes des deux roues dentées sont Concourants.



Figure(19): Engrenages à axe concourants.

##### ❖ Engrenages à axe parallèles :

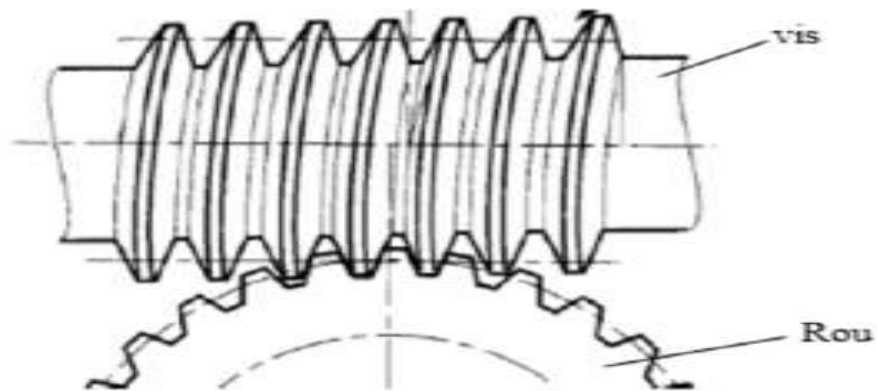
Les axes des deux roues dentées sont parallèles.



Figure(20): Engrenages à axe parallèles.

❖ Engrenages à axe orthogonaux :

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

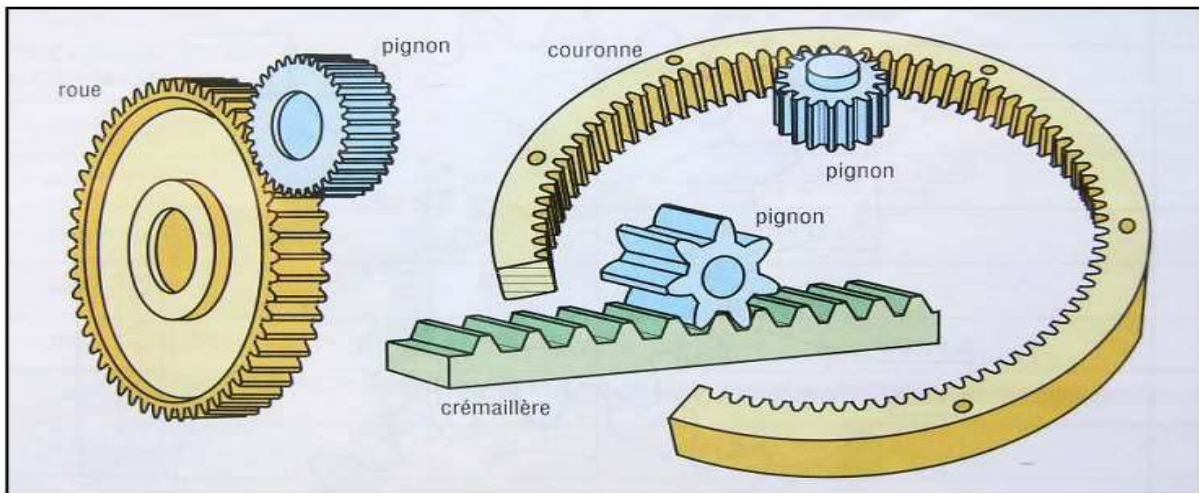


Figure(20): Engrenages à axe orthogonaux.

3.2. Types d'engrenages :

❖ Engrenage cylindrique à dentures droites :

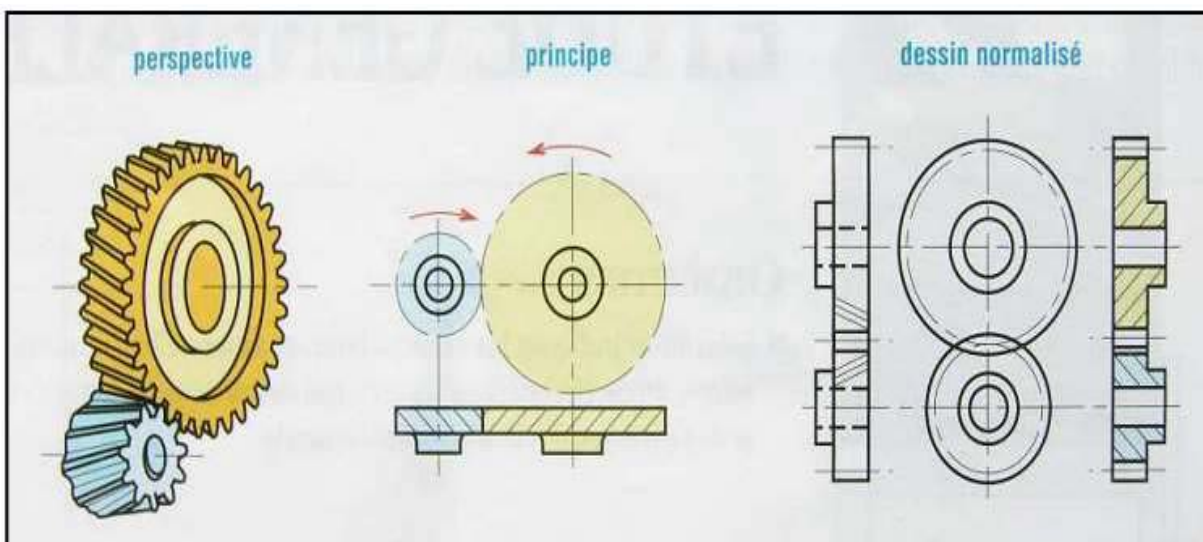
Les dents des deux roues de l'engrenage sont parallèles à l'axe de rotation des arbres.



**Figure(21):** Transmission par engrenage à denture droite.

❖ **Engrenages cylindriques à dentures hélicoïdales :**

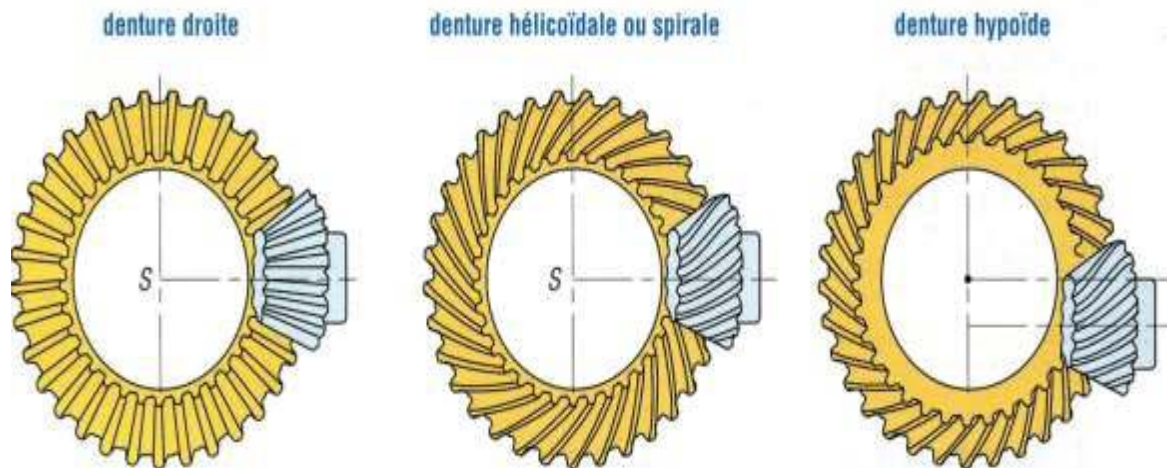
Les dents des roues sont inclinées par rapport à l'axe de rotation des deux arbres, ils sont utilisés en transmission de puissance.



**Figure(22):** Transmission par engrenage cylindrique à dentures hélicoïdales.

❖ **Engrenages coniques :**

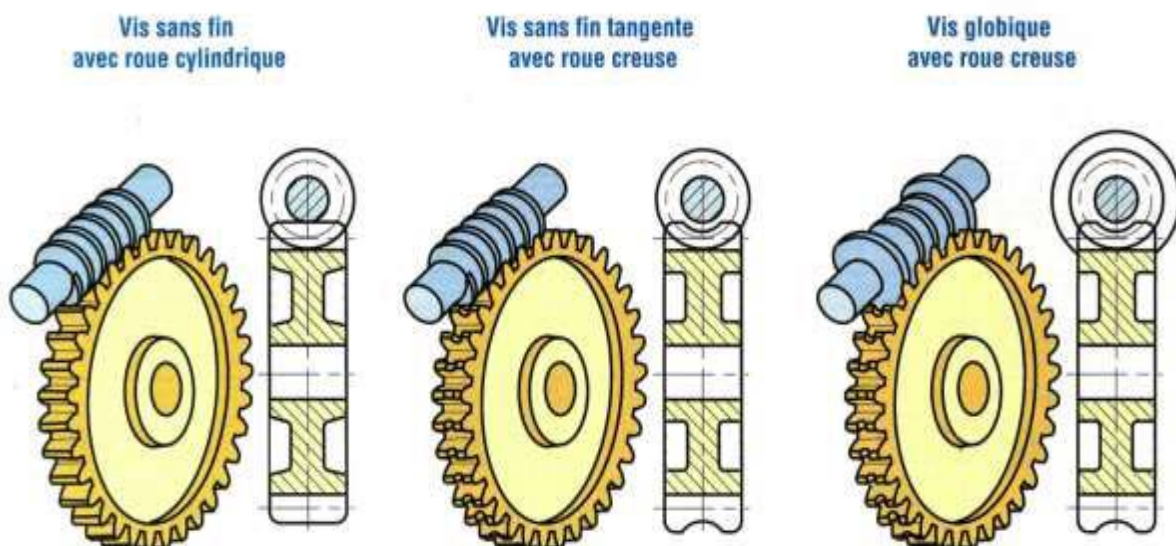
Leurs dents sont taillées dans des surfaces coniques, ils sont utilisés pour transmettre le mouvement entre les arbres concourants, perpendiculaires ou non, la denture peut être droite mais aussi hélicoïdale, ou spirale et la denture peut être aussi hypoïde.



Figure(23):Transmission par engrenage conique.

❖ **Roue à vis sans fin :**

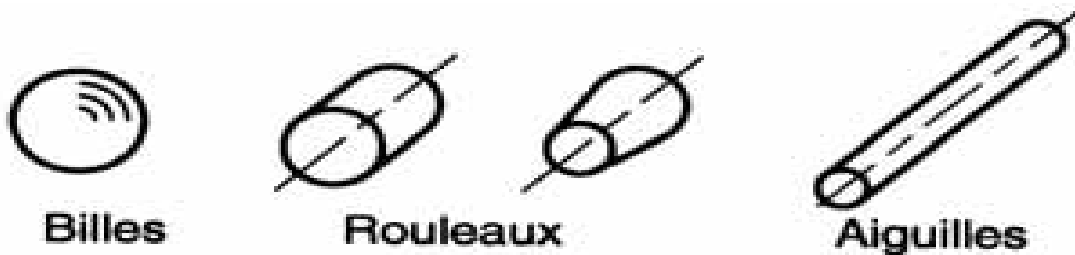
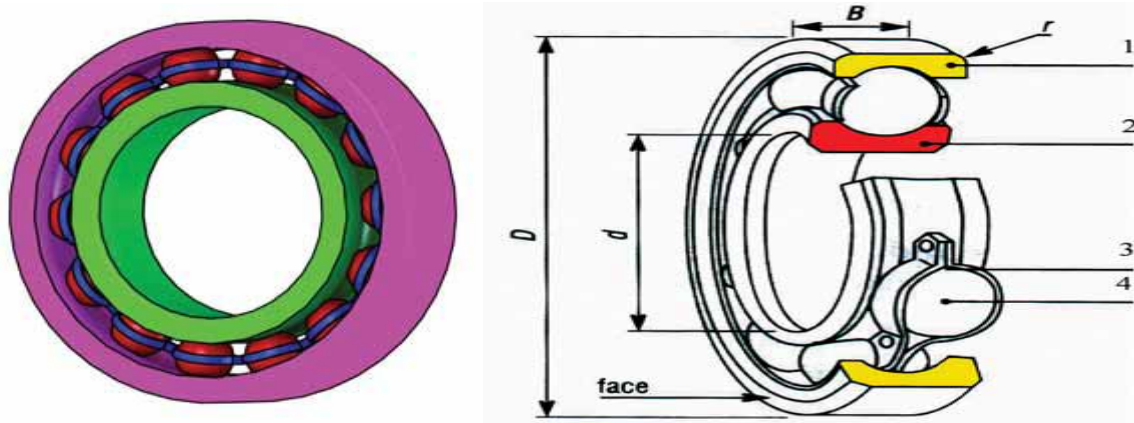
L'une des roues ressemble à une vis et l'autre à une roue hélicoïdale, le sens de rotation de la roue dépend de celui de la vis mais aussi de l'inclinaison de la denture des filets à droite ou à gauche. [08]



Figure(24):Transmission par roue et vis sans fin.

## 4. Roulement :

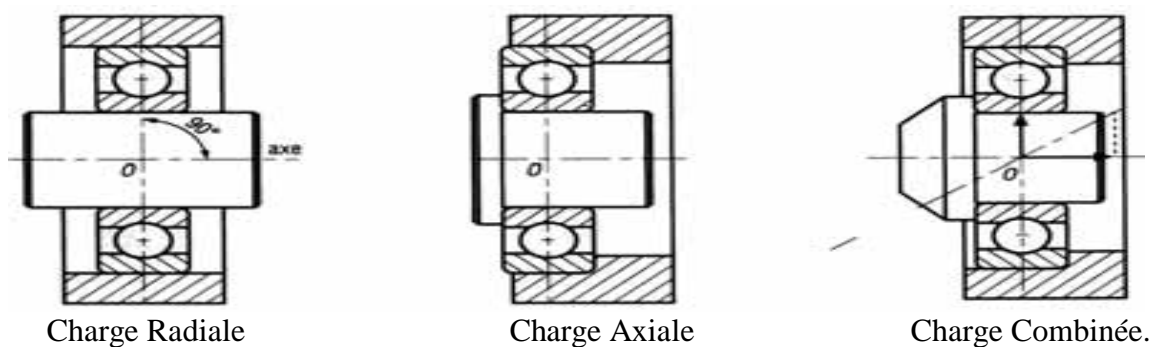
### 4.1. Constitution d'un roulement



Figure(25): Constitution d'un roulement.


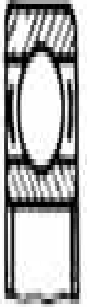


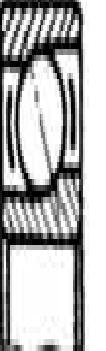



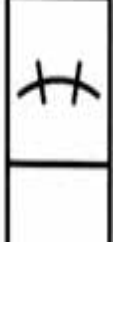

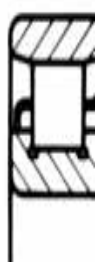

- 1 : Bague extérieure, liée à l'alésage.
- 2 : Bague intérieure, liée à l'arbre.
- 3 : Cage, assure le maintien des éléments roulants.
- 4 : Eléments roulants, situés entre les deux bagues.



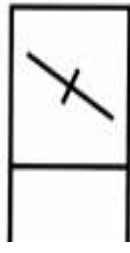
### 4.2. Types de charges supportées par les roulements :



Figure(26):Types de charges supportées par les roulements.

**4.3. Les principaux types de roulements à billes et à rouleaux :**

Type de roulement	de	Représentation		Aptitude à la charge		Aptitude à la vitesse	Remarques Utilisations
		Normale	Conventionnelle	Radiale	Axiale		
Roulement à billes à contact radial				+++	++	+++	Le plus utilisé. Très économique. Existe en plusieurs variantes (Etanche, avec rainure et segment d'arrêt ...)
Roulement à une ou deux rangées de billes à contact oblique				+++	+++	++	Les roulements à une rangée de billes doivent être montés par paire. Avec une rangée de billes, la charge ne peut être appliquée que d'un côté.
Roulement à deux rangées de billes à rotule				+++	+	++	Il se monte par paire. Il est utilisé lorsque l'alignement des paliers est difficile ou dans le cas d'un arbre de grande longueur
Roulement à rouleaux cylindriques.				+++++	0	+++	Il supporte des charges radiales importantes. Les bagues sont séparables, facilitant le montage.

<b>Roulement à rouleaux coniques</b>				+++++	+++	++	Il se monte par paire et en opposition. Les bagues sont séparables, facilitant le montage.
--------------------------------------	---	---	---	-------	-----	----	--

**Tableau(04):** Les principaux types de roulements à billes et à rouleaux.

#### 4.4. Fixation axiale des bagues :

- **Bague se trouve à l'intérieure :**

La fixation axiale des bagues peut être par :

- L'écrou à encoche et la rondelle – frein pour un réglage progressif
- L'anneau élastique pour monter une gorge (peu encombrant)
- Une entretoise pour serrer plusieurs éléments simultanément.
- Un manchon de démontage (le roulement doit toujours s'appuyer contre une surface plane de l'arbre.
- Manchon de serrage pour monter sur des arbres lisses.
- Epaulement sur l'arbre.

- **Bague se trouve à l'extérieure :**

La fixation axiale des bagues peut être par :

- L'anneau élastique : pour monter dans une gorge (peu encombrante).
- Une entretoise : pour serrer plusieurs éléments simultanément. (Elle doit être accompagnée d'un moyen d'immobilisation.
- Un chapeau : pour assurer simultanément l'immobilisation et l'étanchéité.
- Epaulement : un moyen simple et fiable.[9]

#### 4.5. 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.

## 5. Clavette :

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 trois(03) types principaux de clavette:

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

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. [10]

# Chapitre IV : Dimensionnement et calculs

## Chapitre IV : Dimensionnement et calculs

### 1. Introduction :

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

### 2. Cahier de charge :

- Puissance moteur  $P_m = 3 \text{ chv} = 2228 \text{ W}$ .

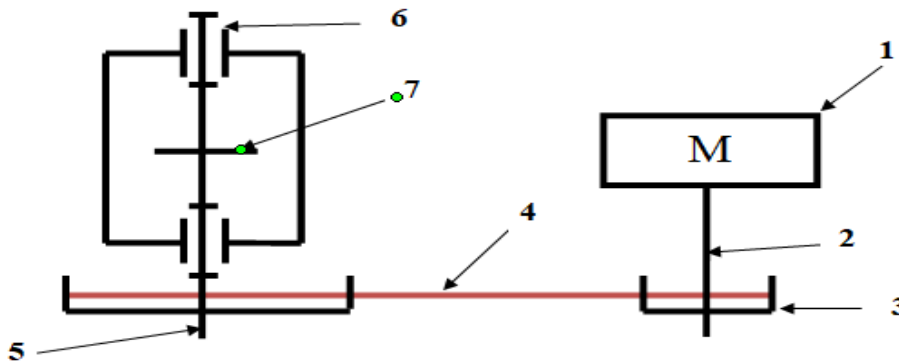
2.1. Vitesse de rotation donnée par le réducteur  $N = 700 \text{ tr/min}$ .

- Longueur de l'arbre : 350mm.
- Diamètre de l'arbre : 35mm.

### 3. Etude cinématique :

#### 3.1. 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(28): Chaîne cinématique.

Désignation	Repéré	Nombre
Moteur électrique	1	1
Arbre moteur	2	1
Poulie	3	2
Courroie	4	1
Arbre porte disque	5	1
Roulement	6	2
Disque porte lames	7	1
Carcasse	8	1

Tableau(05): 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 porte le disque par un réducteur de vitesse ;

**3.2.Choix du moteur :**

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

**3.3.Calcul de la force de coupe  $F_c$  du bois :**

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 bois.

Nous avons la formule de la puissance utile comme suit :

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

$\omega$  : vitesse angulaire.

Où P est la Puissance utile du moteur qui entraine le broyeur  $P_m = 2228W$ .

$M_c$  : 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 bois en N.

D : est le diamètre de l'arbre.

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 :

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

$$\omega = 73.3 \text{ rd/s}$$

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

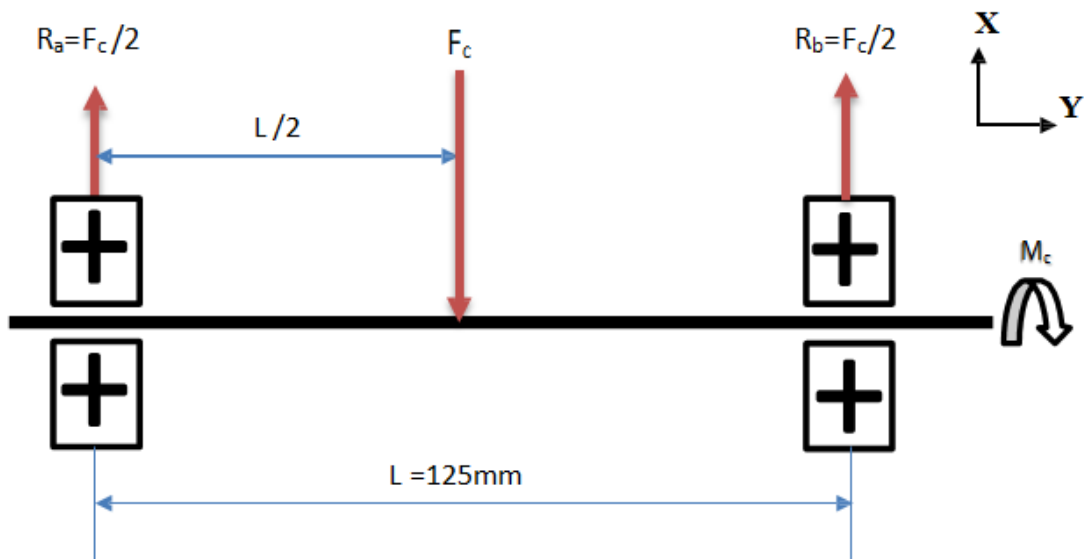
$$FC = \frac{2 \times 2228}{35 \times 10^{-3} \times 73.3}$$

$$\Rightarrow FC = 1736.9 \text{ N}$$

#### 4. Calcul de RDM des éléments sollicités dans le broyeur :

##### 4.1. Dimensionnement de l'arbre qui port le disque :

##### 4.1.1. Calcul des réactions des paliers :



Figure(29): Représentation des efforts appliqués sur l'arbre.

Par les principes fondamentaux de la statique :

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\Sigma F_{ext}} = \vec{0} \\ \vec{\Sigma M/A} = \vec{0} \end{array} \right.$$

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 :

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

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.:

$$R_b = \frac{1736.9}{2}$$

$$\Rightarrow R_b = 868.45 \text{ N}$$

De (1) on a :

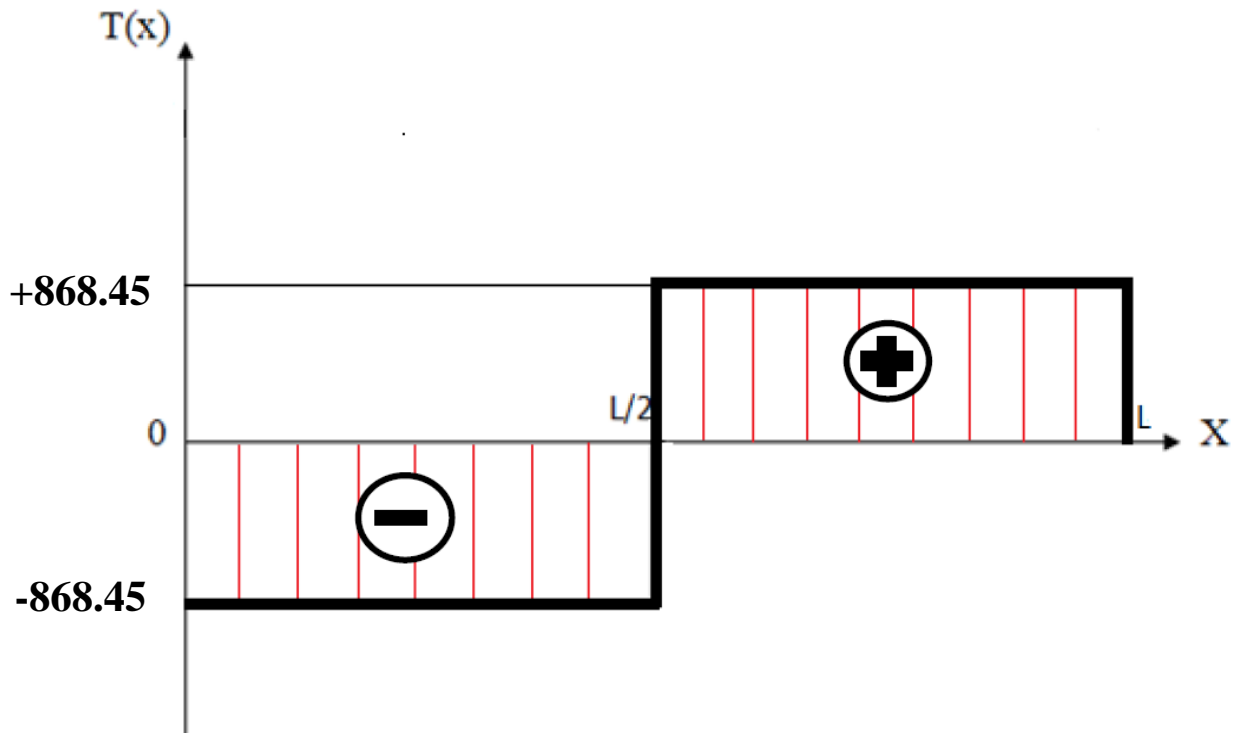
$$R_a = F_c - R_b$$

AN.:

$$R_a = 1736.9 - 868.45 = 868.45 \text{ N}$$

$$\Rightarrow R_a = 868.45 \text{ N}$$

4.1.2. Diagramme des efforts tranchants



Figure(30):Diagramme des efforts tranchant.

4.1.3. Calcul des moments fléchissants :

On a :

➤ Tronçon (1)  $0 < x < L/2$  :

$$R_a \times x + M(x) = 0$$

$$M(x) = - R_a \times x$$

AN. :

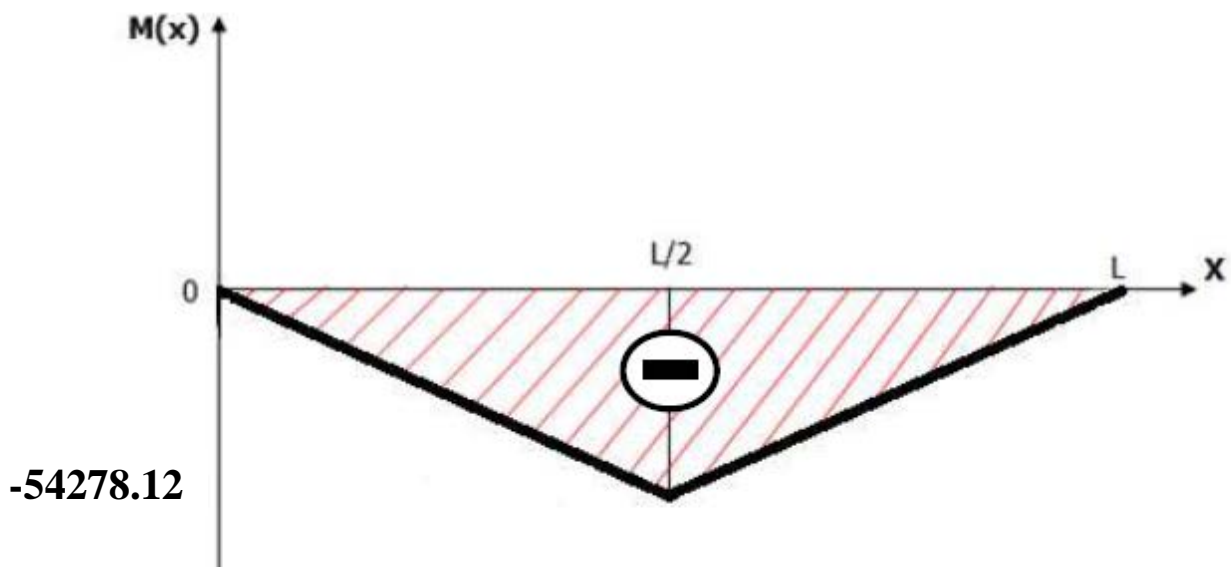
$$\left\{ \begin{array}{l} x = 0 : M(0) = 0 \text{ N.mm} \\ X = L/2 : M(L/2) = -303957.5 \text{ N.m} \end{array} \right.$$

➤ Tronçon (2)  $L/2 < x < L$  :

$$RA \times X - FC \times (X-L/2) + M(X) = 0$$

$$M(X) = -RA \times X + FC \times (X-L/2)$$

$$\begin{cases} X=L/2 : M(L/2) = -303957.5 \text{ N.m} \\ X = L : M(L) = 0 \text{ N.mm} \end{cases}$$



Figure(31):Diagramme des moments fléchissant.

A partir de la figure(31), on déduit  $M_{fmax} = 303957.5 \text{ N.mm}$

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

- Matériaux utilisés pour l'arbre [5] :

L'acier 42 CD 4, est un acier faiblement allié, la nouvelle désignation, cet acier est représenté par l'écriture 42 Cr Mo 4.

(0.42% de carbone, 4/4=1% de chrome, et le pourcentage de molybdène n'est précisé dans cette désignation).

Coefficient multiplicateur			
Élément d'alliage	Coef.	Élément d'alliage	Coef.
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4	Ce, N, P, S	100
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10	B	1 000

**Tableau(06):** Coefficient multiplicateur des éléments d'alliage dans un acier faiblement allié.

On a  $\sigma_p < R_e$  avec  $R_e = \sigma_e = 750$  MPa ( $R_e$  : Résistance d'élasticité)

On prend un coefficient de sécurité  $s = 5$

Avec :

$$S = \sigma_e / \sigma_p$$

Où

$\sigma_p$  : est la résistance pratique a la traction du matériau en MPa,

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

Et  $S$  est le coefficient de sécurité pour notre étude.

D'où la relation devient :

$$\sigma_p = \sigma_e / s$$

AN. :

$$\sigma_p = 750 / 5$$

$$\sigma_p = 150 \text{ MPa}$$

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 :

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

Ou

$$\tau_p = 0.7 \times \sigma_p$$

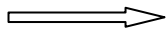
Avec

$\sigma_p$  : est la contrainte pratique à la traction en MPa,

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

AN. :

$$\tau_p = 0.7 \times 150$$



$$\tau_p = 105 \text{ MPa}$$

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 mm<sup>4</sup>,

Et  $v$  est le rayon de disque (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.:

$$R \geq \sqrt[3]{\frac{4 \times 303957.5}{\pi \times 150}}$$

$$\implies R \geq 13.71 \text{ mm}$$

$$\implies d \geq 27.43 \text{ mm}$$

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

$$d \geq 35 \text{ mm}$$

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

Calcul de moment de torsion de l'arbre qui porte le disque :

Nous avons la relation suivante :

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

Où

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

$\omega$  : vitesse angulaire

À partir les données qui se trouvent dans le cahier de charge on a la Puissance moteur :

$$P = 2228 \text{ W.}$$

AN.:

$$M_t = \frac{2228}{73.3}$$

$$\implies M_t = 30.39 \text{ N.m}$$

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 torsion 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  $\text{mm}^4$ ,  
Et  $v$  est le rayon de l'arbre (section circulaire,  $v = R$ ) en mm

Avec :

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

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.:

$$R \geq \sqrt[3]{\frac{2 \times 30390}{\pi \times 105}}$$

$$\mathbf{R \geq 5.69 \text{ mm}}$$

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

$$\mathbf{D \geq 11.38 \text{ mm}}$$

#### 4.1.6. Calcul du moment idéal:

Le moment idéal est donné par la relation suivante :

$$M_i = \sqrt{(M_{fmax})^2 + M_t^2}$$

AN.:

$$M_i = \sqrt{(303.957)^2 + (30.39)^2}$$

$$M_i = 305.47 \text{ N.m}$$

#### 4.1.7. Calcul du diamètre de l'arbre :

Le diamètre de l'arbre est donné par la condition suivante :

$$D \geq \sqrt[3]{\frac{10 \times M_i \times 10^3}{R_p}}$$

$$D \geq \sqrt[3]{\frac{10 \times 305.47 \times 10^3}{150}}$$

$$D \geq 27.32 \text{ mm}$$

Pour que notre mécanisme fonctionne en toute sécurité on prend :

$$D = 35 \text{ mm}$$

#### 4.2. Dimensionnement et matériaux utilisés des lames :

##### - Matériaux utilisés :

- Acier Z200 C12. Connu sur sa nouvelle désignation X200Cr12
- Famille des aciers faiblement alliés.
- Composition chimique : 12% de chrome, 2% de carbone, 0.2 de silicium et 0.3 de manganèse.
- Module d'élasticité 210000 Mpa.
- Application :

- Outils de découpage, emboutissage (poinçons, matrices).
- Outils d'usinage (outils de travail de bois).
- Outils de formage (pour l'extrusion des alliages légers et de la matière plastique, outils pour compression des matières abrasives).
- Instruments de mesure (calibre, tampons, jauges).
- Dimensions des lames :
  - Longueur :  $L=150\text{mm}$
  - Largueur :  $l=100\text{mm}$
  - Épaisseur :  $e=5\text{mm}$ .

### 5. Calcul des courroies et poulies :

On a :

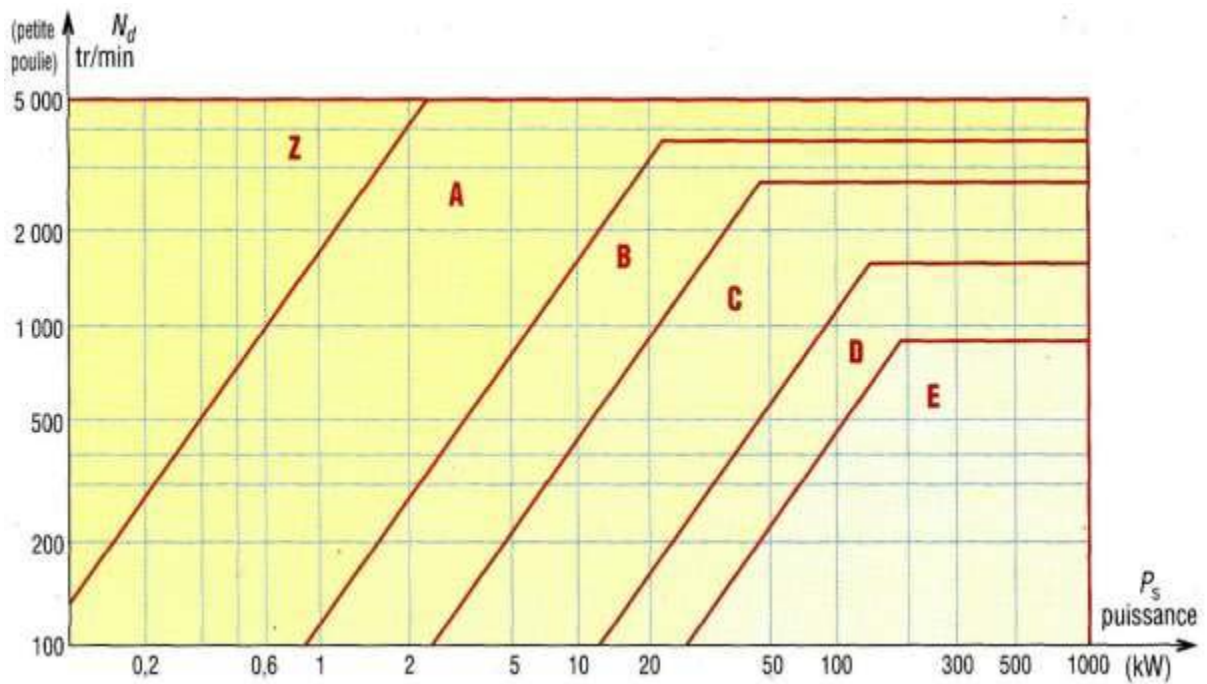
- $P= 2228\text{W}=2.228\text{KW}$
- $N_a= 2300 \text{ tr/min}$
- $N_D=700\text{tr/min}$ .

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

D'où,  $P_s = P \times K_s = 2.228 \times 1.3 = 2.8964 \text{ KW}$

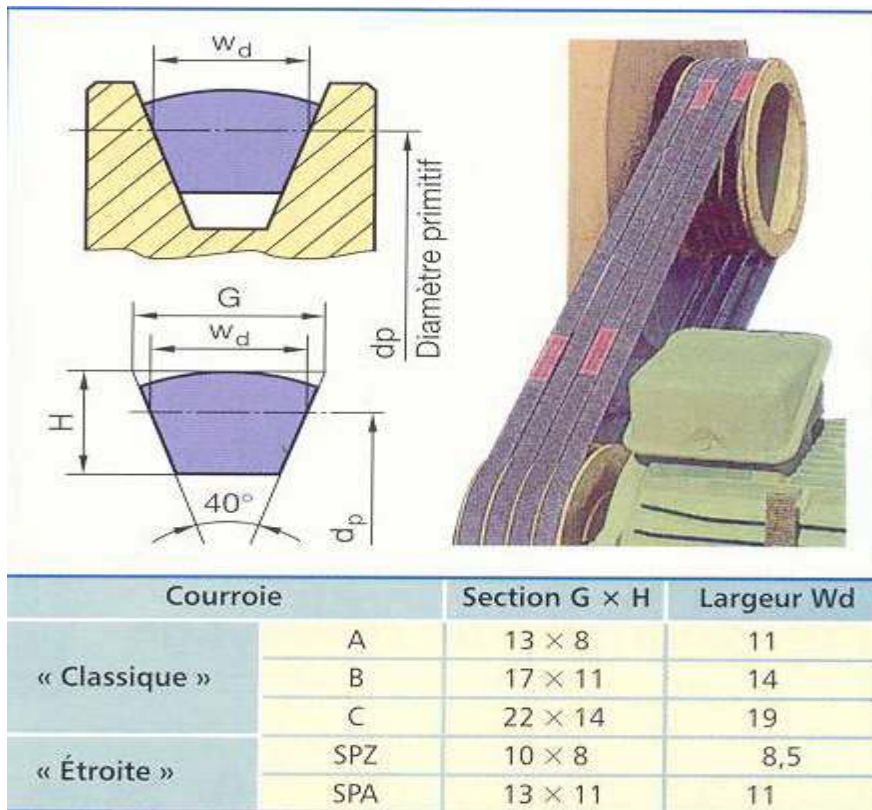
$$P_s = 2.8964 \text{ KW}$$

5.1.Choix de section de la courroie à partir du graphe :



**Graphe(01):** Gamme des puissances transmissibles par type de courroie.

Donc permet de sélectionner les courroies de type A



**Figure(32):** Caractéristique des courroies.

**5.2.Diamètres primitifs :**

$d = 50$  mm est imposé pour la petite poulie.

Et pour la grande poulie on a :

Le rapport de transmission :

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

$$\frac{N_D}{N_d} = \frac{d}{D} \implies \frac{700}{2300} = \frac{50}{D}$$

$$D = \frac{2300 \times 50}{700} = 164.28 \text{ mm}$$

$$D = 164.28 \text{ mm}$$

**5.3.Calcul de la vitesse de la courroie :**

$$v = \omega d = \frac{d}{2}$$

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

$$v = \frac{\pi \times 2300}{30} \times 25 = 6.01 \text{ m/s}$$

$$v = 6.01 \text{ m/s}$$

**5.4.Calcul de longueur primitive courroie :**

Calcule d'abord l'Entraxe (**a**) :

On a :

$$\frac{D}{d} = \frac{164.28}{50} = 3.285 > 3$$

Donc :  $a \geq D \Rightarrow a \geq 164.28 \text{ mm}$

$$a_{min} = 164.28 \text{ mm}$$

$$a_{maxi} = 3 \times (D + d) = 642.84 \text{ mm}$$

$$a = 475 \text{ mm}$$

$$L_P = 2 \times a + \frac{\pi}{2}(D+d) + \frac{(D-d)^2}{4 \times a}.$$

$$L_P = 2 \times 475 + \frac{(164.28+50)^2}{4 \times 475} + \frac{\pi}{2} (164.28+50).$$

$$L_p = 1311.76 \text{ mm.}$$

On prend

$$L_p = 1760 \text{ mm.}$$

**5.5. Calcul de puissance de base de la courroie :**

$$d = 50 \text{ mm}$$

$$v = 6.01 \text{ m/s}$$

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
<b>Z</b>	50	0,45	0,72	0,85	–	–	<b>C</b>	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
<b>A</b>	85	1,25	2,04	2,66	3,01	–	<b>D</b>	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>B</b>	120	2,11	3,23	4,23	4,80	–	<b>E</b>	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(07):** Puissance de base en KW des courroies trapézoïdal classique.

Et d'après le tableau 3 on a les valeurs suivent 1.25 et 2.04

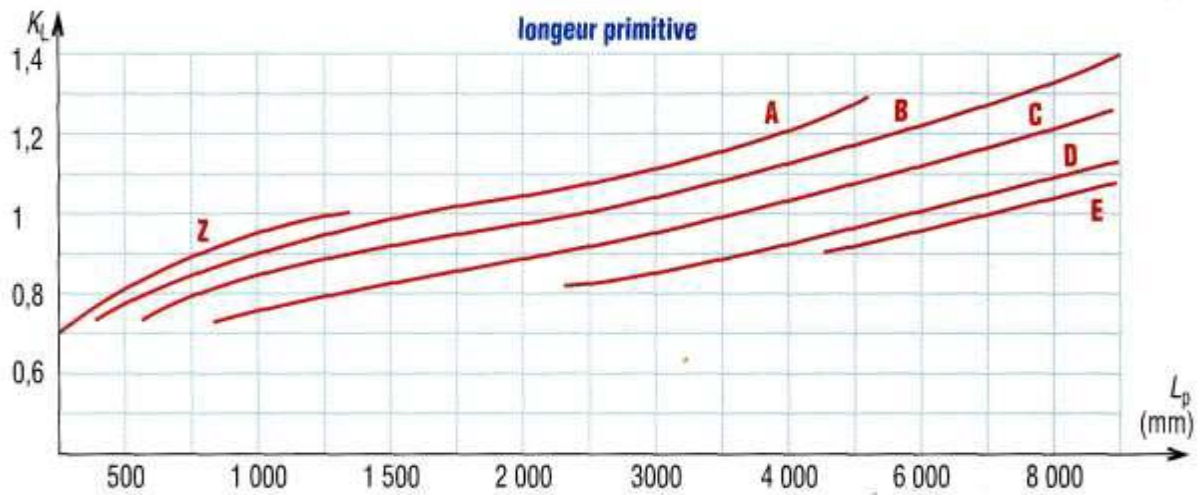
On a obtenu par interpolation entre 1.25 et 2.04

$$P_b = 1.70kW$$

**5.6.Puissance admissible de la courroie choisie :**

On a:

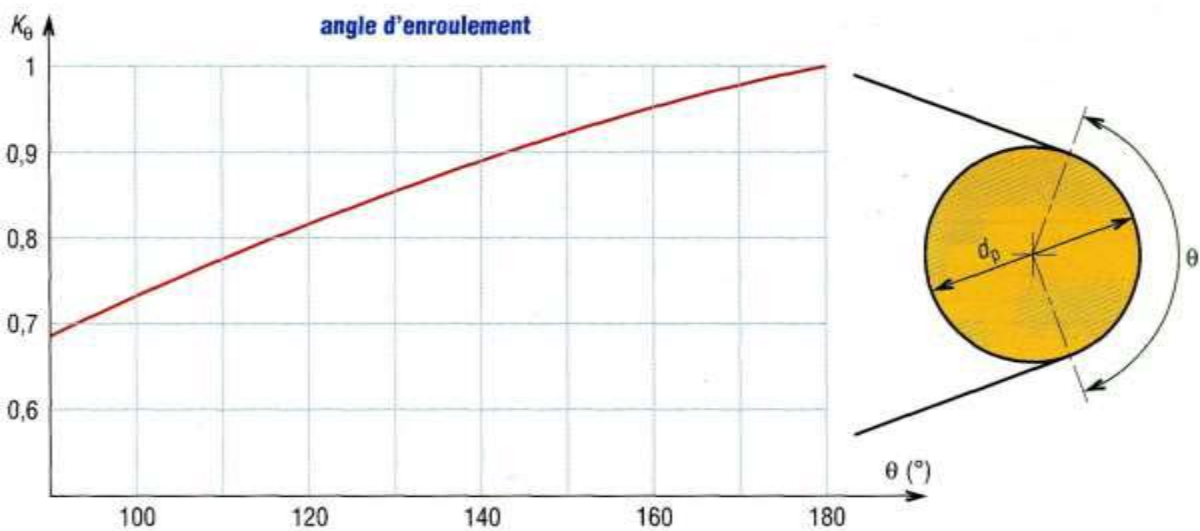
$$P_a = P_b \times K_L \times K_\theta$$



Graphe(02): Longueur primitive.

A partir de graphe on a :

$$K_L \approx 0.9 \text{ avec } L_p = 1150 \text{ mm}$$



Graphe(03): Angle d'enroulement.

$$\theta = 180^\circ - 2 \sin^{-1} \frac{(D - d)}{2 \times a}$$

$$\theta = 180^\circ - 2 \sin^{-1} \frac{(164.28 - 50)}{2 \times 325}$$

$$\theta = 180 - 20.25$$

$$\theta = 159.75^\circ$$

A partir de graphe :

$$K\theta \approx 0.96$$

Puissance admissible

$$P_a = 1.7 \times 0.9 \times 0.96 = 1.46 \text{ KW}$$

$$P_a = 1.46 \text{ KW}$$

5.7. Nombre nécessaire de courroies :

$$n_c = \frac{p_s}{p_a}$$

$$n_c = \frac{2.89}{1.46} = 1.97$$

⇒ Soit 2 courroies.

## 6. Calcul des roulements :

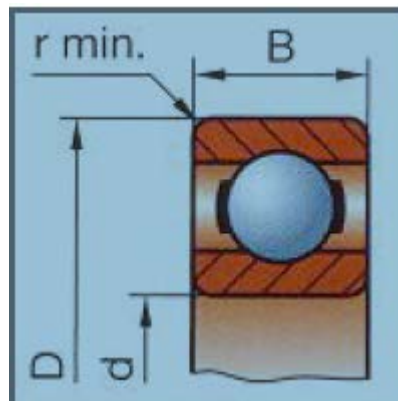
### 6.1. Désignation du roulement :

Roulement **30 BC 6**

**30** : diamètre intérieur du roulement.

**BC** : type de roulement rigide à billes.

**6** : Série de base.



**Figure(33):**Caractéristiques du roulement.

### 6.2. Caractéristiques du roulement :

$d=30\text{mm}$  : diamètre intérieur du roulement.

$D=62\text{mm}$  : diamètre extérieur du roulement.

$B=16\text{mm}$  : largeur du roulement.

$r=1$  : angle du congé.

### 6.3. Durée de vie du roulement :

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.

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

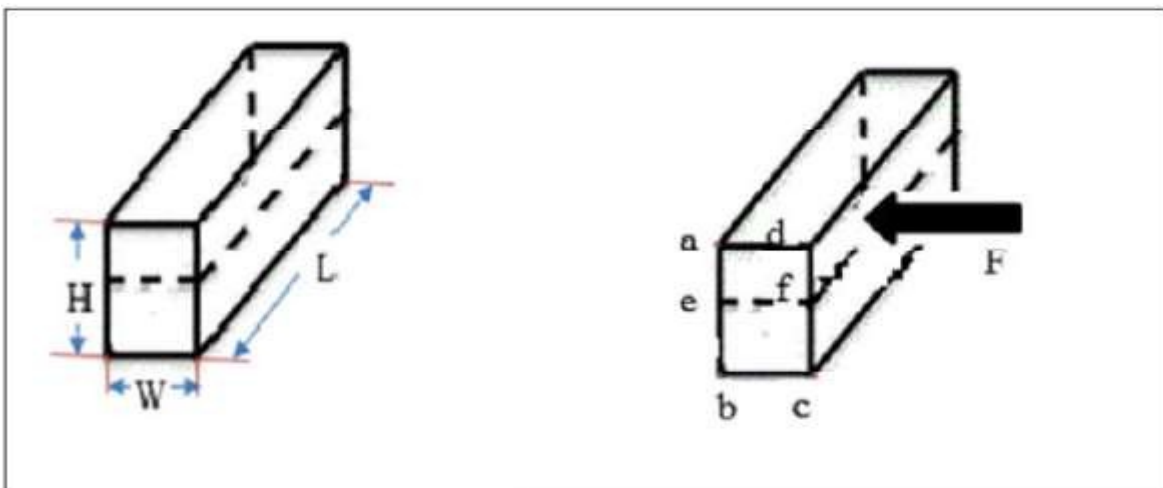
$$L_{10h} = \frac{c}{p} \times \frac{10^6}{60 \times N}$$

$$L_{10h} = \frac{19500}{173.69} \times \frac{10^6}{60 \times 700}$$

$$L_{10h} = 2673.07 \text{ h} = 111.37 \text{ j}$$

## 7. Calcul de clavette

### 7.1. Calcul d'une clavette rectangulaire :



Figure(34) : Clavette rectangulaire.

Les normes donnent les valeurs de la largeur a et de la hauteur b en fonction du diamètre de l'arbre (tableau ci-dessous). Il reste à trouver la longueur l de la clavette.

d	a	b	s	j	k	d	a	b	s	j	k
de 6 à 8 inclus	2	2	0,16	d - 1,2	d + 1	58 à 65	18	11	0,6	d - 7	d + 4,4
8 à 10	3	3	0,16	d - 1,8	d + 1,4	65 à 75	20	12	0,6	d - 7,5	d + 4,9
10 à 12	4	4	0,16	d - 2,5	d + 1,8	75 à 85	22	14	1	d - 9	d + 5,4
12 à 17	5	5	0,25	d - 3	d + 2,3	85 à 95	25	14	1	d - 9	d + 5,4
17 à 22	6	6	0,25	d - 3,5	d + 2,8	95 à 110	28	16	1	d - 10	d + 6,4
22 à 30	8	7	0,25	d - 4	d + 3,3	110 à 130	32	18	1	d - 11	d + 7,4
30 à 38	10	8	0,4	d - 5	d + 3,3	130 à 150	36	20	1,6	d - 12	d + 8,4
38 à 44	12	8	0,4	d - 5	d + 3,3	150 à 170	40	22	1,6	d - 13	d + 9,4
44 à 50	14	9	0,4	d - 5,5	d + 3,8	170 à 200	45	25	1,6	d - 15	d + 10,4
50 à 58	16	10	0,6	d - 6	d + 4,3	200 à 230	50	28	1,6	d - 17	d + 11,4

Nota : L'emploi d'une clavette, sur un arbre de dimension supérieure, est possible.

**Tableau :** Dimensions des clavettes normalisées.

Dans notre cas d'étude on prend une clavette de 8×7×l (a=8 ; largeur et b=7 ; hauteur).  
Calcul au cisaillement :

$$\tau_{adm\ cis} = 0.58 \frac{Re}{s} = 0.58 \times \frac{750}{5}$$

$$\tau_{adm\ cis} = 85 \text{ N/mm}^2$$

$$L \geq \frac{Mt}{a \times d \times \tau_{adm\ cis}}$$

**AN.:**

$$L \geq \frac{2 \times 303957.5}{8 \times 30.85} \quad \longrightarrow \quad L \geq 29.79 \text{ mm}$$

On prend : L = 30 mm

**7.2.Calcul au matage :**

En ce qui concerne les clavettes, la pression admissible de matage doit être beaucoup plus faible. En effet, il faut que l'on puisse facilement monter et démonter l'assemblage. Aucune déformation n'est permise. C'est pourquoi on choisira la pression admissible de matage pour une clavette dans le tableau ci-dessous.

<i>Valeurs couramment admises pour la pression admissible au matage des clavettes longitudinales (<math>p_{adm\ mat}</math> en <math>N/mm^2</math>)</i>	
Clavetage fixe	(a) 40 à 70 (b) 60 à 100 (c) 80 à 150
Clavetage glissant sans charge	(a) 15 à 30 (b) 20 à 40 (c) 30 à 50
Clavetage glissant avec charge	(a) 3 à 10 (b) 5 à 15 (c) 10 à 20
(a) : Conditions de fonctionnement plutôt mauvaises : chocs, grandes tolérances, etc... (b) : Conditions de fonctionnement moyenne (avant-projet) (c) : Bonnes conditions de fonctionnement : ajustement parfait, aucun choc, etc... <i>Remarque</i> : au dessus de $250 N/mm^2$ le matage est important.	

**Tableau :** Pression admissible de matage pour un clavetage longitudinal libre.

Du tableau on prend :  $P_{adm} = 40 N/mm^2$ .

$$L \geq \frac{4 \times Mt}{b \times d \times P_{adm}} = \frac{4 \times 303957.5}{7 \times 30 \times 40}$$

$$L \geq 144.74 \text{ mm}$$

$$L \leq 1.75 \dots \dots 2d = 1.75 \dots \dots 2 \times 30 = 60 \text{ mm.}$$

On choisit :  $L = 30 \text{ mm}$

# Chapitre V : Modélisation géométrique et numérique

## Chapitre V : Modélisation Géométrique et numérique

### 1. Généralités

#### 1.1. 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.

#### 1.2. 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.

#### 1.3. 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.

#### 1.4. Logiciel utilisée :

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 : SOLIDWORKS (COSMOSWORKS), 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.

### 1.5. 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 :

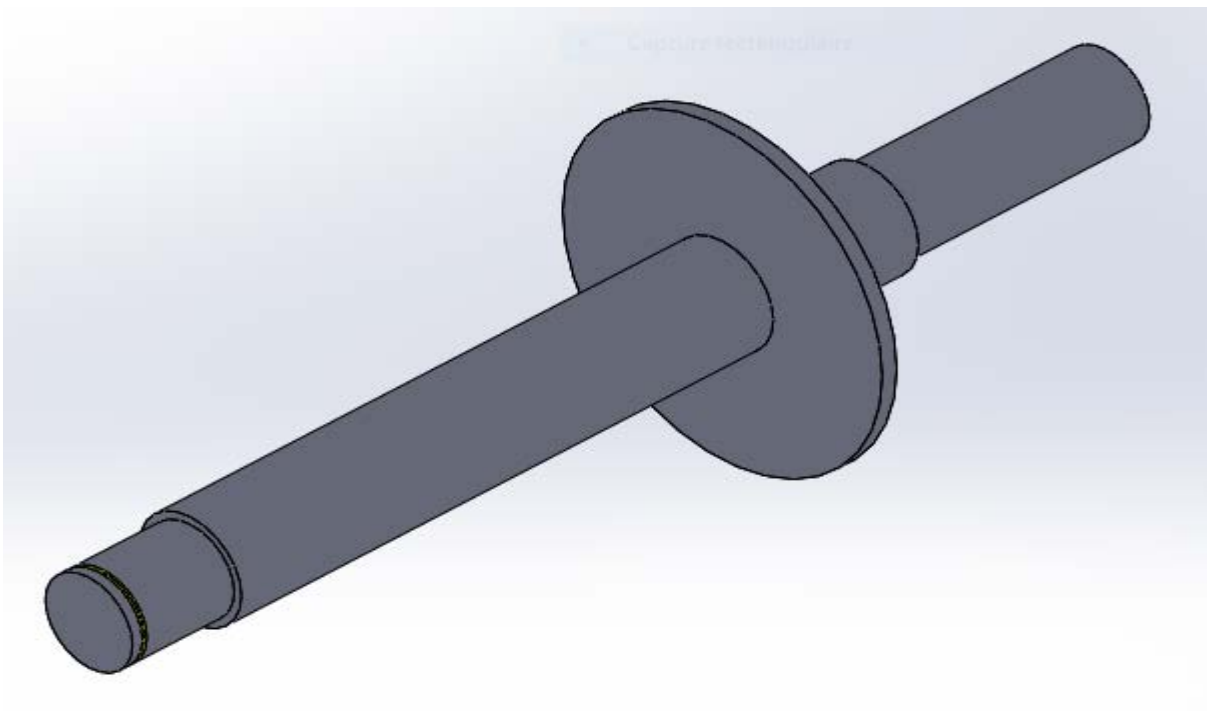
- Produits du design industriel ;
- Ouvrages de génie civil ;
- Ouvrages d'architecture ;

### 2. Modélisation géométrique :

La modélisation géométrique des pièces du broyeur avec le logiciel SolidWorks passe par trois(03) étapes :

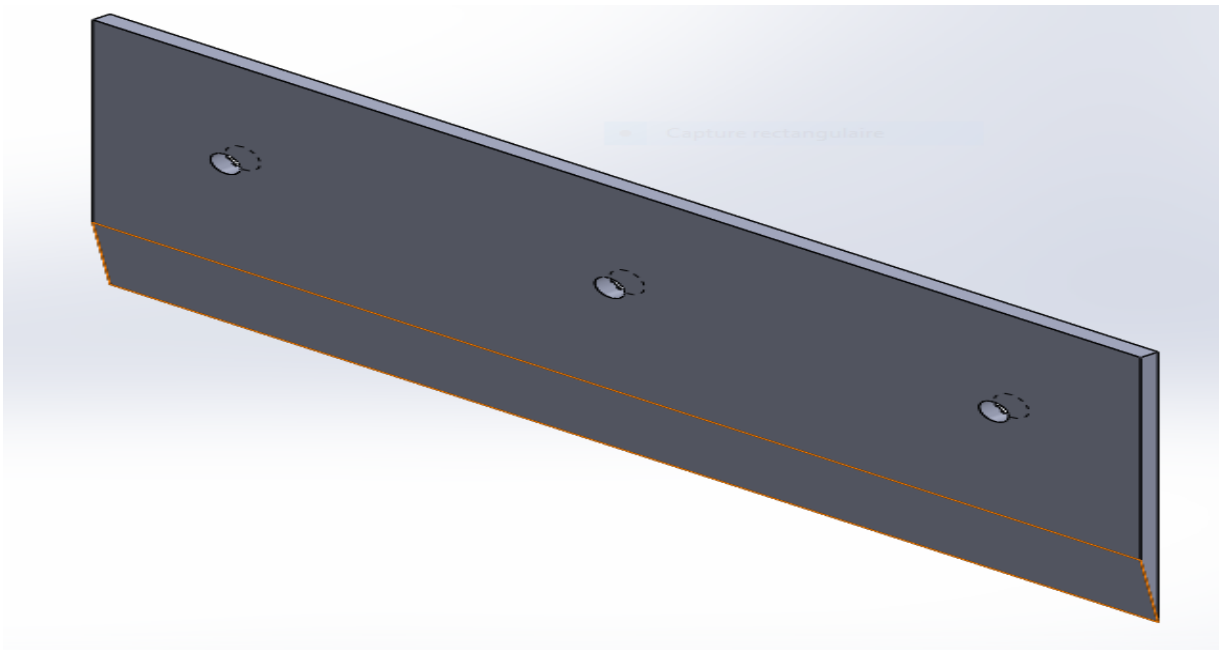
- Création des pièces en model de 2D (2 Dimensions) ;
- Création des pièces en model de 3D (3 Dimensions) ;
- Assemblage des pièces.

#### 2.1. Modélisation Géométrique de l'arbre :



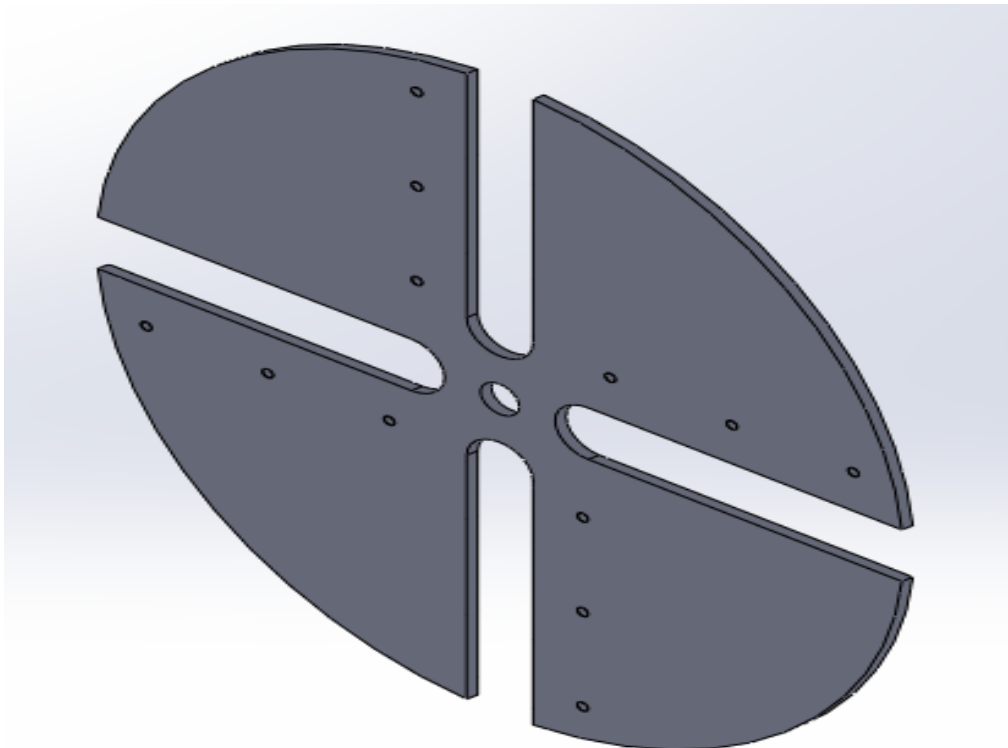
**Figure(35) :** Modèle CAO de l'arbre.

## 2.2. Modélisation Géométrique de la lame



Figure(36) : Modèle CAO de la lame.

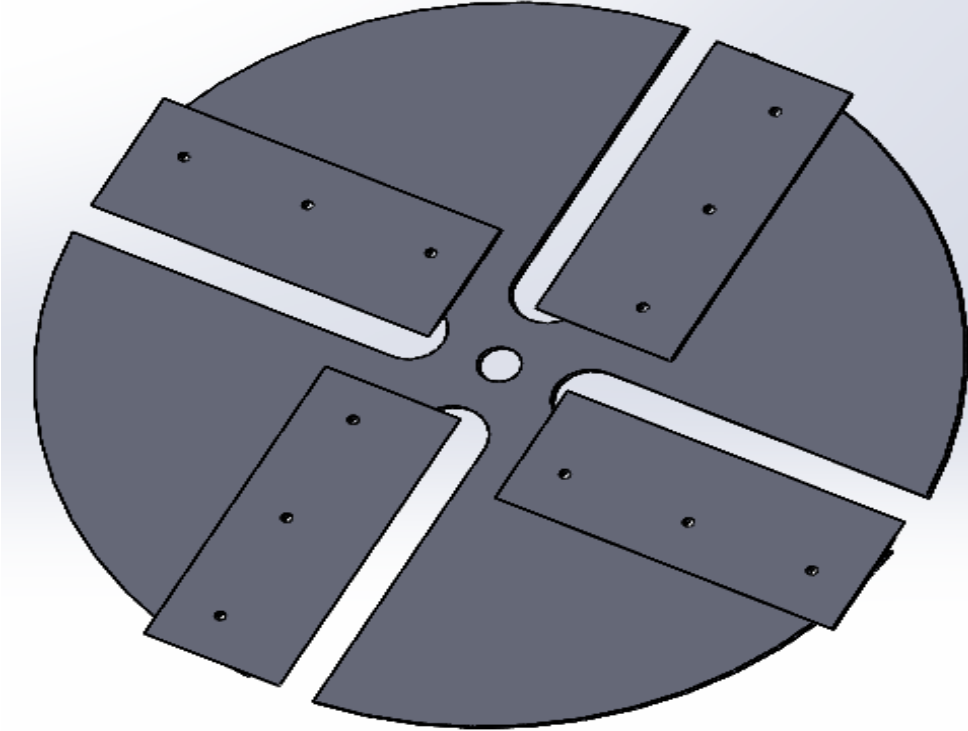
## 2.3. Modélisation Géométrique de disque



Figure(37) : Modèle CAO de disque.

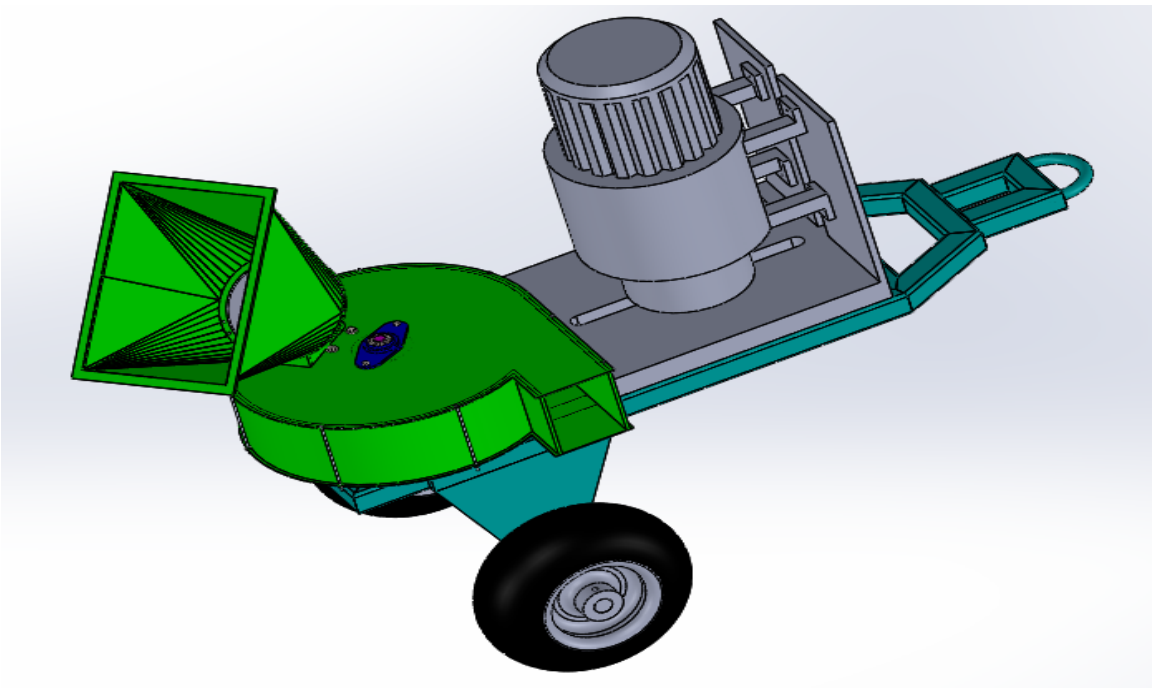
2.4. Assemblage des éléments de broyeur :

Notre broyeur comporte un disque qui porte Quatre lames (04) comme le montre la figure ci-dessous :



Figure(38) : Positionnement des lames sur le disque.

2.5. Assemblage fini du broyeur :



Figure(39) : Assemblage fini du broyeur.

### 3. Modélisation numérique :

#### 3.1. 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
  - 3.1.1.** Définition des points clés (key points) /lignes/surfaces/volumes ;
  - 3.1.2.** Définir le type d'élément fini, ses propriétés géométriques et les propriétés physiques des matériaux ;
  - 3.1.3.** Maillage des lignes /surfaces/volume si cela est requis ;
  - 3.1.4.** 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 :
  - 3.1.5.** La liste des déplacements nodaux ;
  - 3.1.6.** Les forces et des moments au niveau des éléments ;

### 3.1.7. Tracé des Déformées.

### 3.2. 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.

### 3.3. Différents types de maillage :

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

**3.3.2. 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.

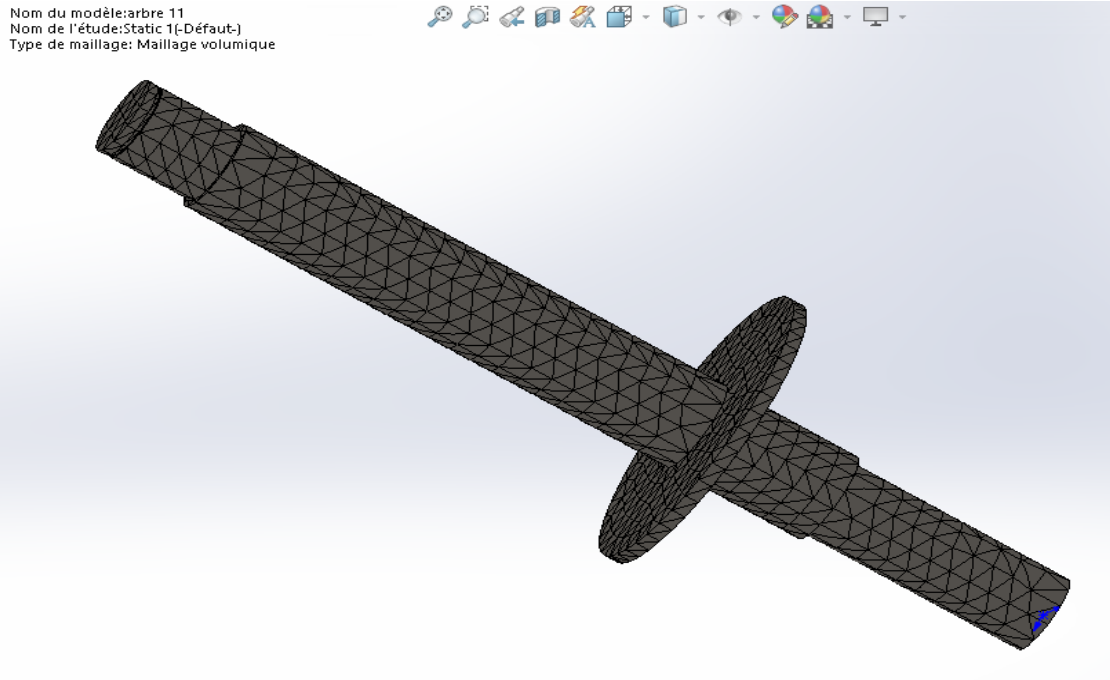
**3.3.3. Maillage volumique :** Dans cet élément, aucune hypothèse simplificatrice n'est posée sur les déformations et les contraintes. Il est par contre, nécessaire, pour calculer l'énergie élastique, de faire des hypothèses sur l'évolution du champ de déplacement à l'intérieur de l'élément.

### 3.4. Génération d'un maillage :

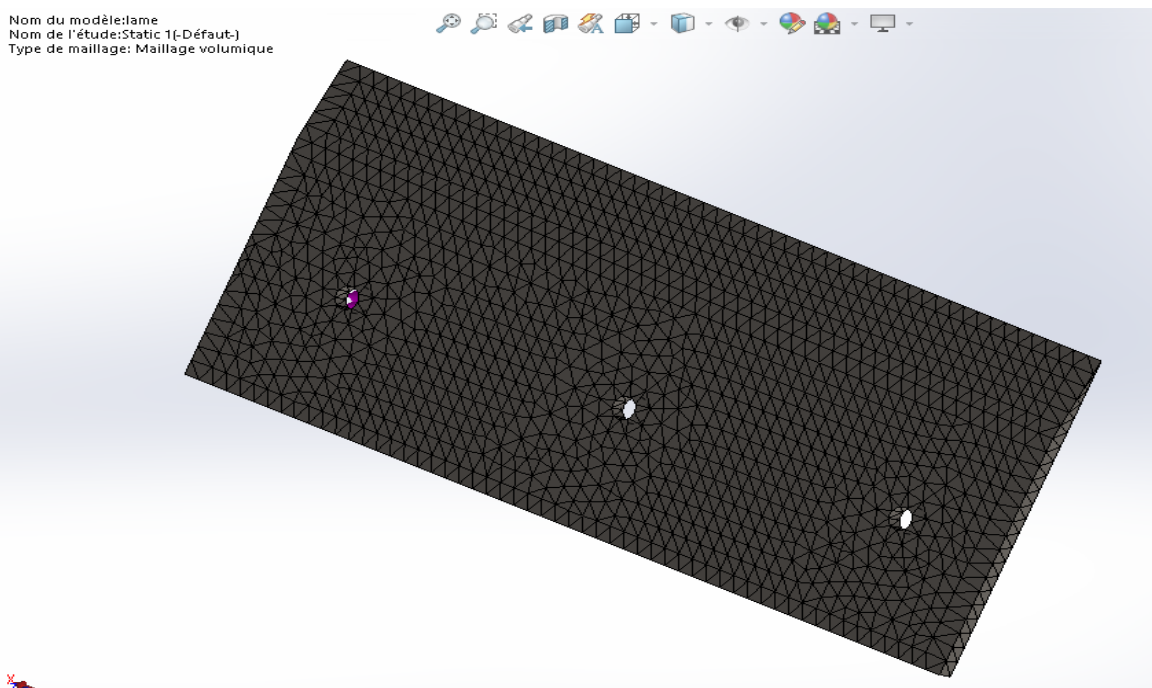
Pour générer un maillage volumique, il faut tout d'abord créer un modèle géométrique ou importer directement un modèle géométrique issu d'un logiciel CAO comme SolidWorks. Pour SolidWorks nous avons choisi un maillage par défaut.

### 3.5. Maillage des pièces du broyage :

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



**Figure(39) : Maillage de l'arbre.**



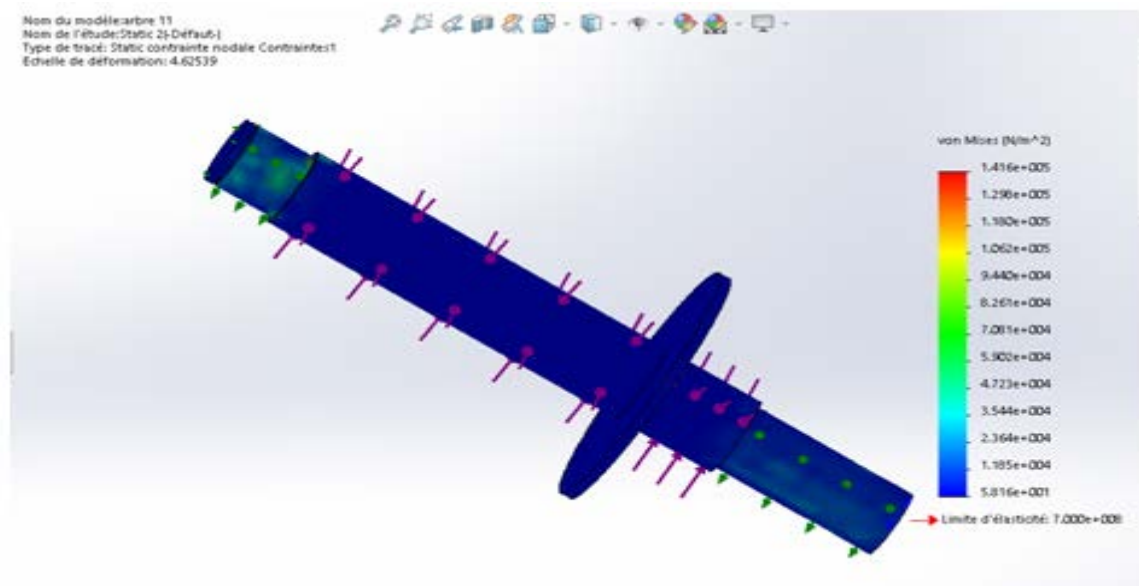
**Figure(40) : Maillage de la lame.**

### 4. Simulation à l'état statique :

#### 4.1. Analyse statique de l'arbre

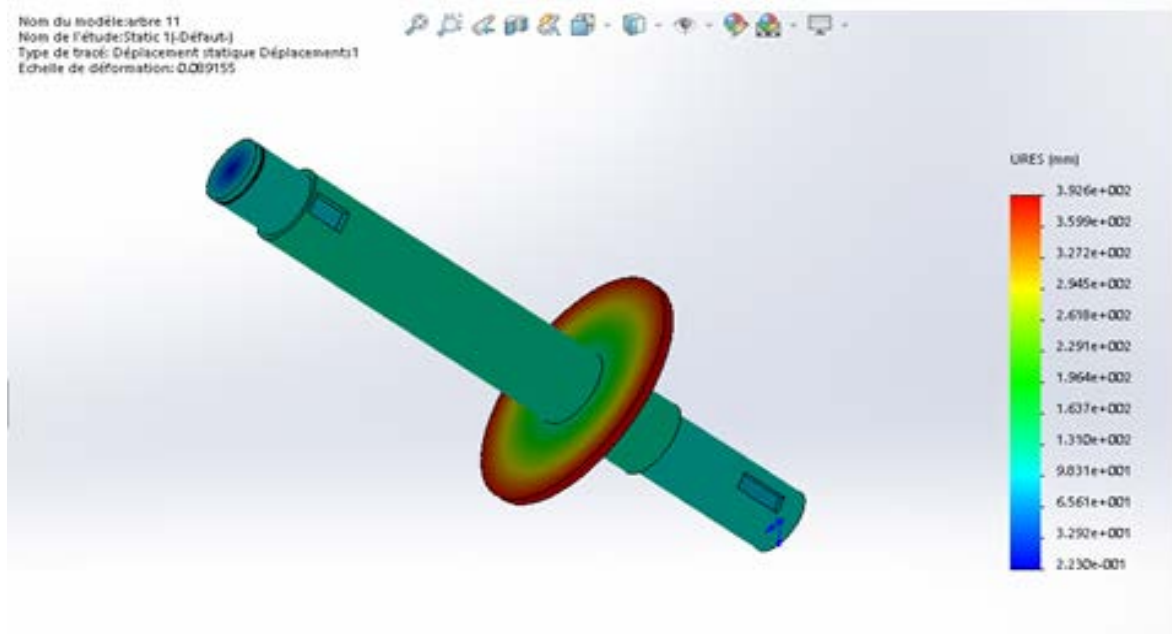
Il ne faut jamais se baser sur les décisions de conceptions uniquement sur les données présentées dans ce rapport. On utilise ces informations en conjonction avec des données expérimentales. Des tests réels sont indispensables pour valider le produit final. La simulation utilisée dans ce cas nous aide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

#### 4.2. Analyse statique de l'arbre en flexion :



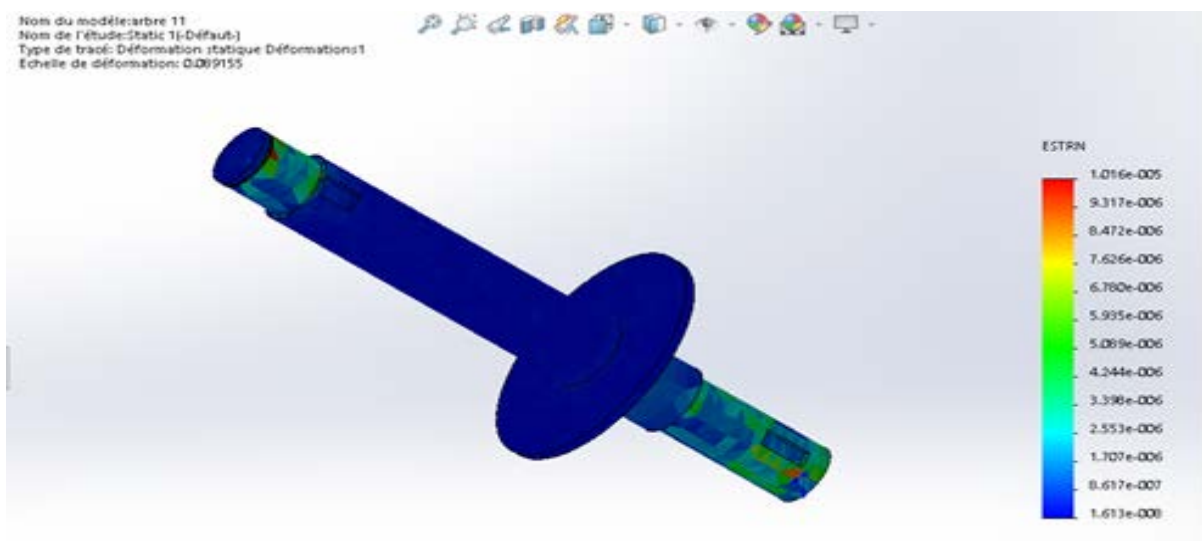
**Figure(41)** : graphe de contrainte de déplacement (arbre soumis à la flexion).

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  $3.97334 \cdot 10^{-10}$  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.



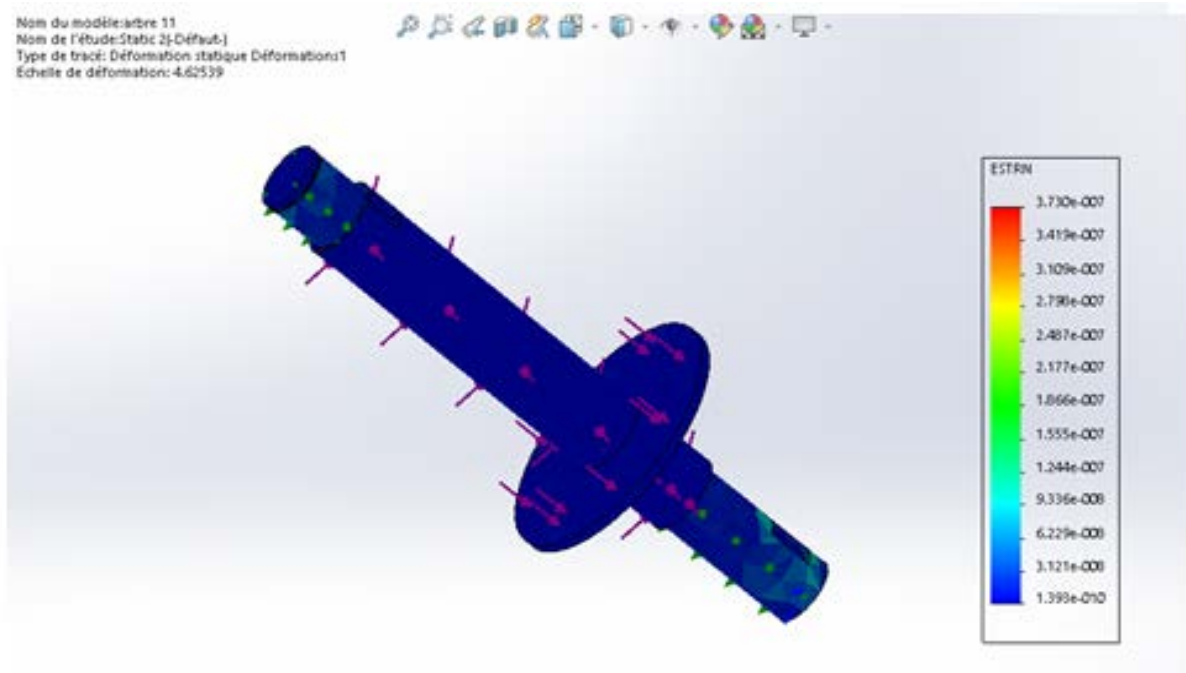
Figure(42) : graphe de déformation (arbre soumis à la flexion)

#### 4.3. Analyse statique de l'arbre en torsion :



Figure(43) : graphe de contrainte de déplacement (arbre soumis à la torsion).

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



**Figure(44)** : 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.

### 5. 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

Le broyeur offre la possibilité de réutiliser presque immédiatement les déchets qu'il vient de broyer. Le principal avantage du broyeur à bois réside donc dans le fait qu'il contribue largement aux principes de recyclage des éléments naturels et ainsi à apporter un plus value dans le système environnemental.

Le principe de fonctionnement d'un broyeur à bois est donc, à première vue, des plus simples.

Cependant, ce type d'engin est doté de pièces complexes et dangereuses . Le paramètre de sécurité est ainsi à prendre en compte à tout moment

## Références bibliographiques

[01] :ÉVALUATION DU GISEMENT DE DÉCHETS BOIS ET SON POSITIONNEMENT DANS LA FILIÈRE BOIS/BOIS ÉNERGIE Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : FCBA, (Ludovic GUINARD, Gérard DEROUBAIX, Marie-Lise ROUX, Anne-Laure LEVET, Vincent QUINT), Avril 2015.

[02]:Site officiel de groupe de services et de déchets et de solutions industrielles spécialisé dans la gestion durable des ressources en polygone 20 Octobre 2020. Recyclage et valorisation de vos déchets de bois Valoservices (suez.fr).

[03] : Cours de Dr.GHOMARI Fouad /faculté des sciences de l'ingénieur /Université Aboubaker Belkaid Tlemcen.

[04] : 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).

[05] : Mémoire de fin d'étude, université de Bejaia, option Fabrication Mécanique et productive, thème : Etude et conception et réalisation d'un broyeur pour le recyclage des déchets de plastique.Mr : CHENNINE Dalil et BOUAFAI Boualem. Promotion(2017/2018).

[06]:Chevalier:Guidedudessinateurindustriel,éditionAFNORParis(2004).

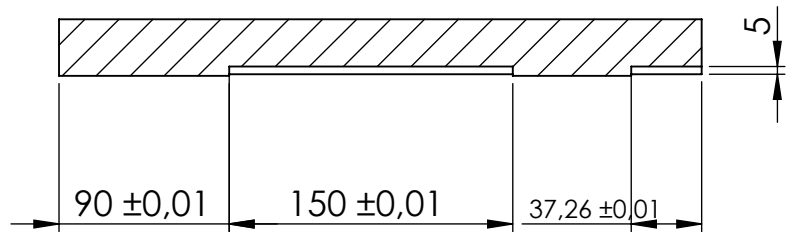
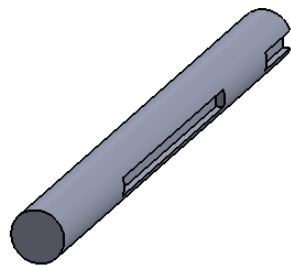
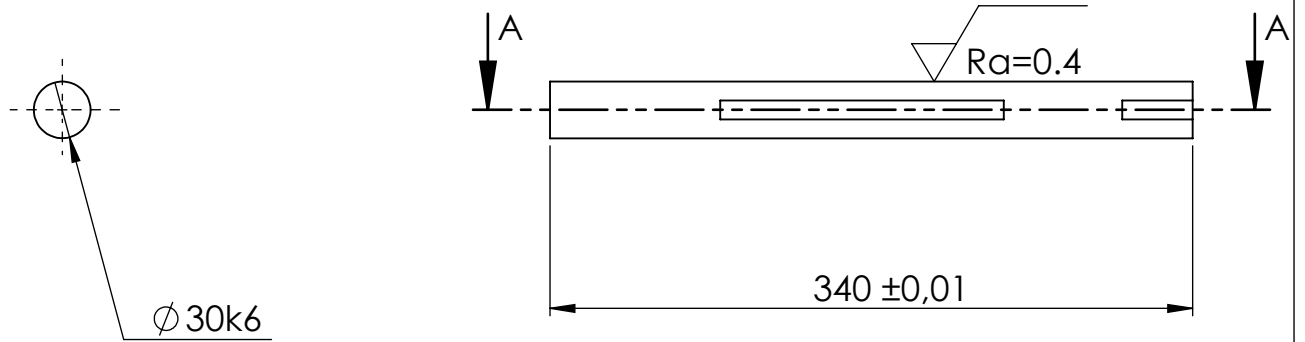
[07] : Système mécanique théorie et dimensionnements. Michel Aublin, Revé Bon coupain,Michel Boulatan, DanielCaron, Emile Jeay, Bernard lacage, Jacky Réa. Professeur en classe préparatoire technologique et en section de technicien supérieure, édition DUNOD Paris 1992.

[08] :Mémoire de fin d'études, université de Bejaia, option Fabrication Mécanique et productive, thème :Etude et conception et réalisation d'un broyeur pour le recyclage des déchets de plastique.

[09] :Formulaire de Mécanique « Pièces de construction », Youde XIONG, édition éyrolles France 2007.

[10] :Mémoire de fin d'étude universitaire appliquées DEUA en génie mécanique, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, thème : Etude d'un broyeur à émaux, Mr. HAMDIAHMAN et AMRANI Tahar, Promotion 2003.

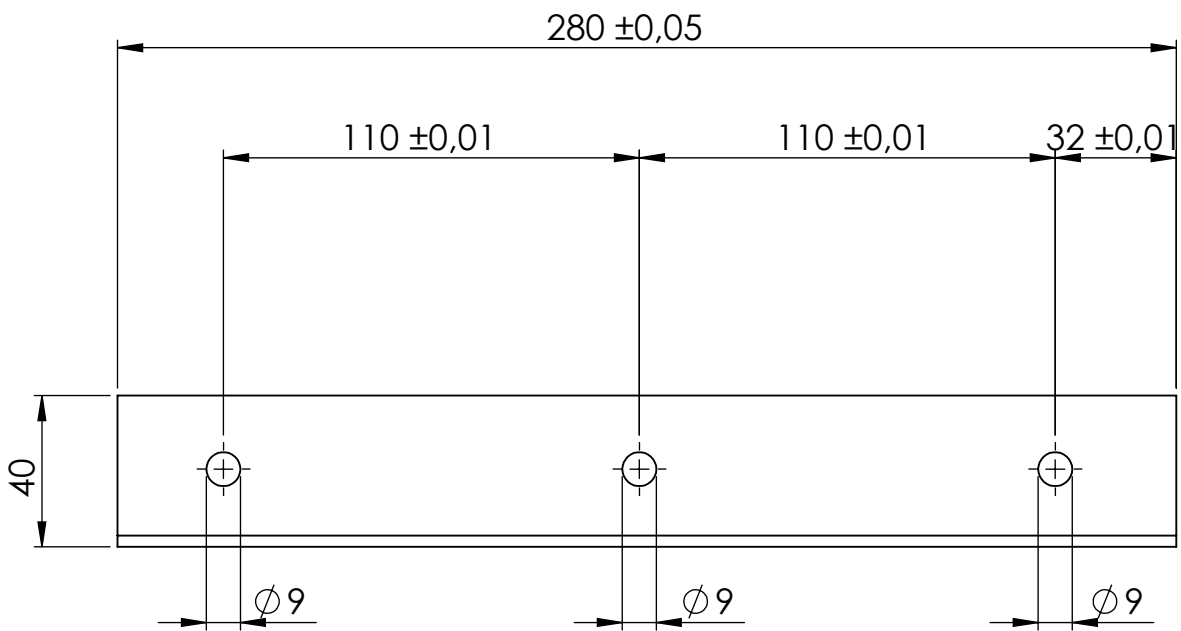
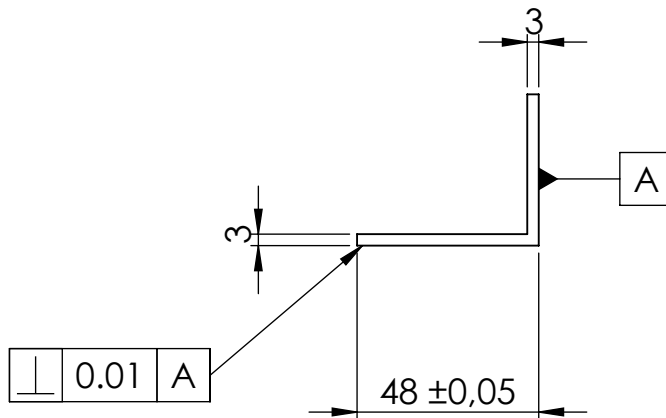
ANNEXES

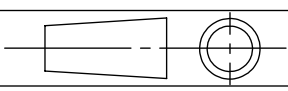


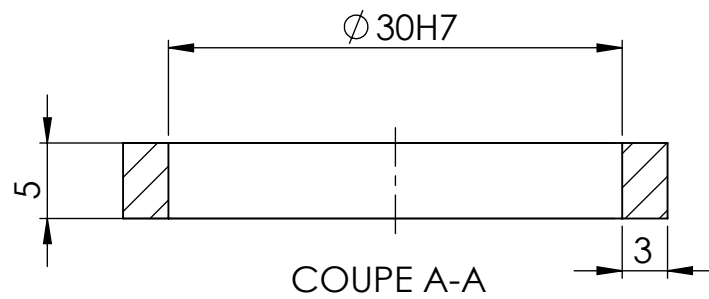
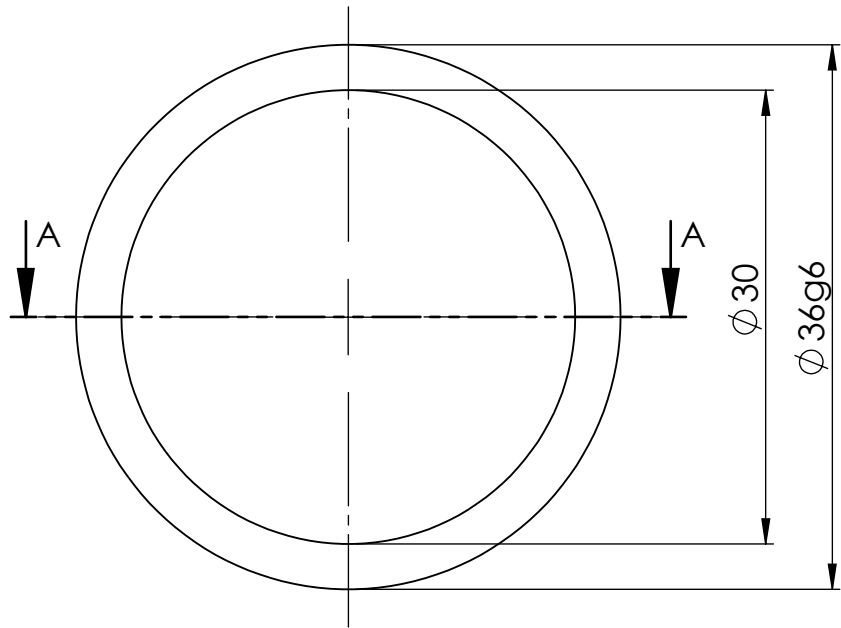
COUPE A-A

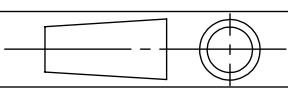
01	01	Arbre	42 Cd4	
Rep	Nbr	Désignation	Matière	Observation
Echelle: 1:4		<b>BROYEUR DE BOIS</b>	Saoudi Achour larabi Ali	
A4		UMMTO-FGC-DGM	Pro 2020	

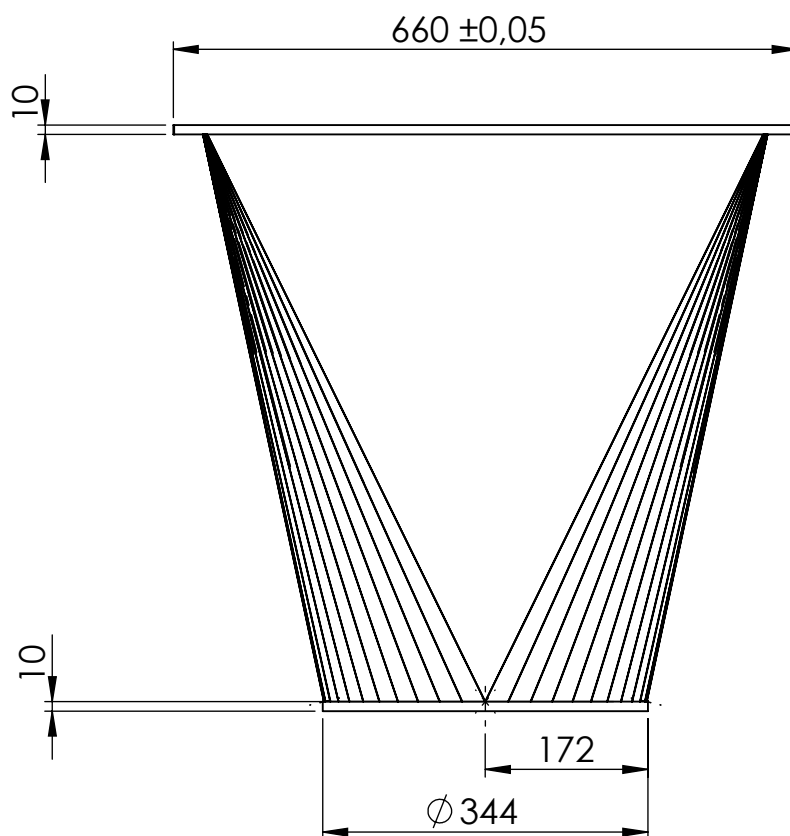
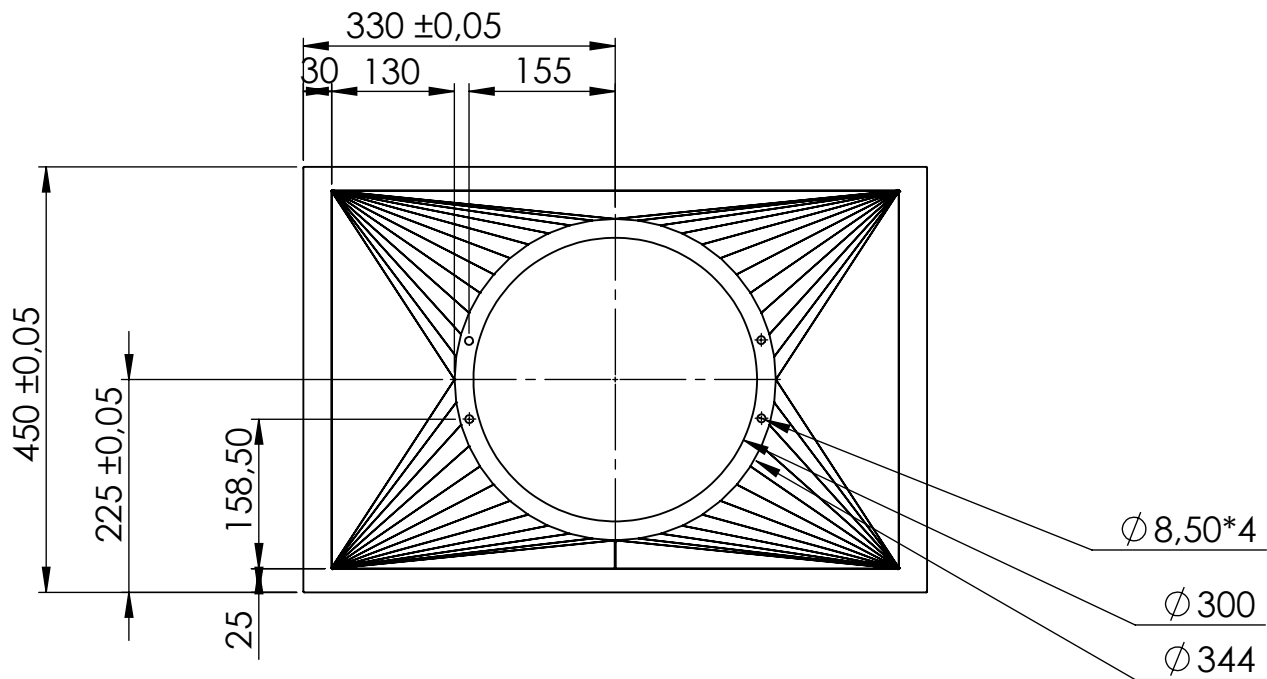


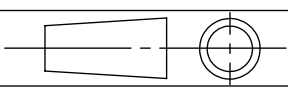


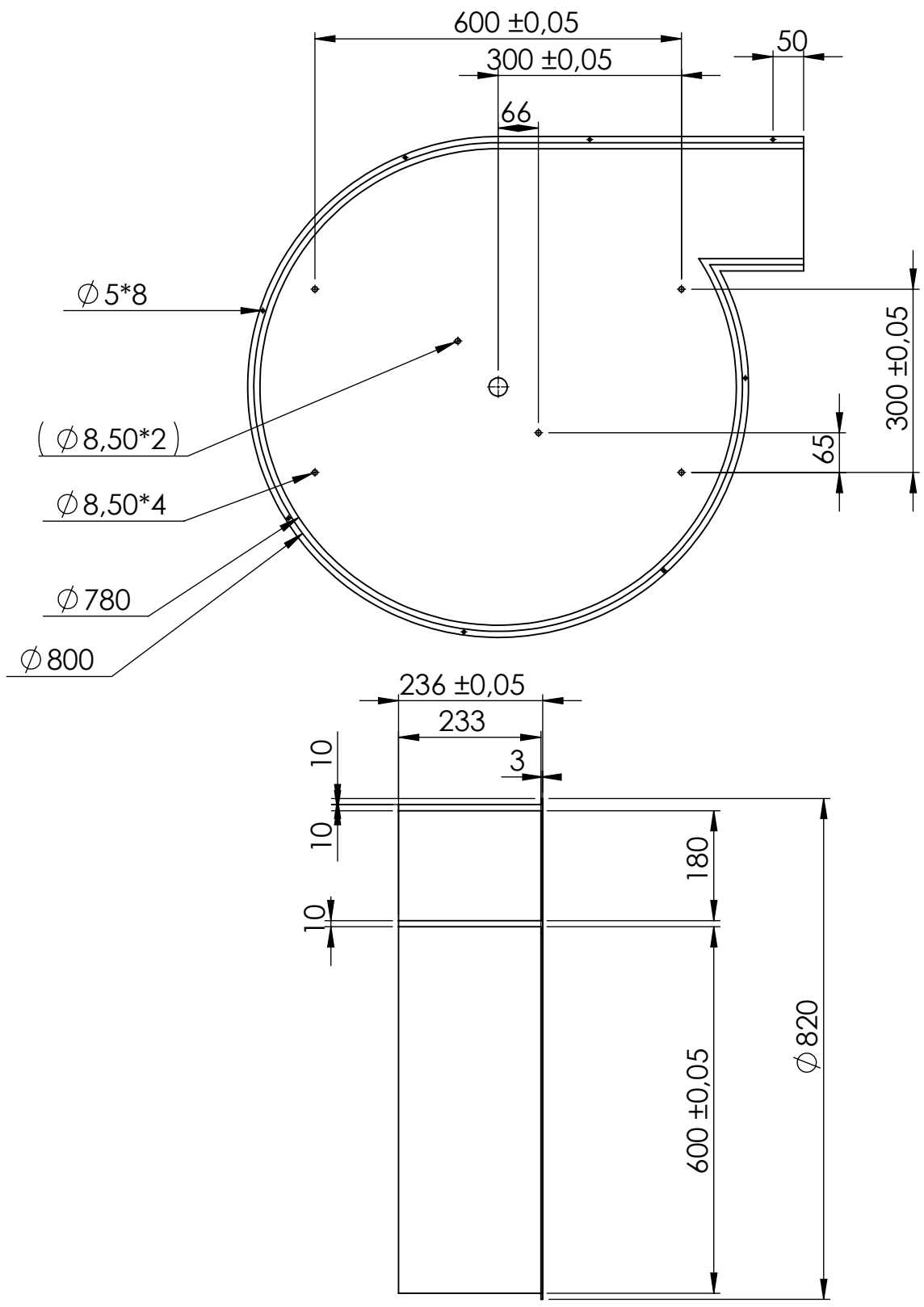
03	01	Arrête de dégagement	A60	
Rep	Nbr	Désignation	Matière	Observation
Echelle: 1:2		<b>BROYEUR DE BOIS</b>	Saoudi Achour larabi Ali	
				
A4		UMMTO-FGC-DGM	Pro 2020	



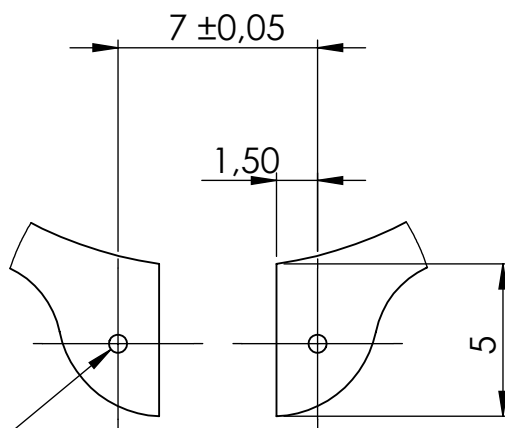
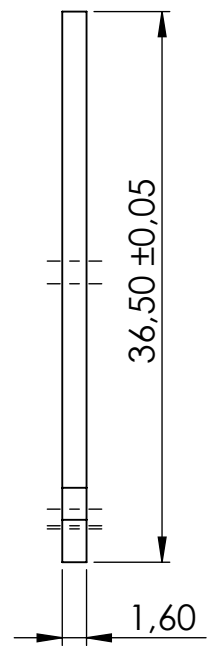
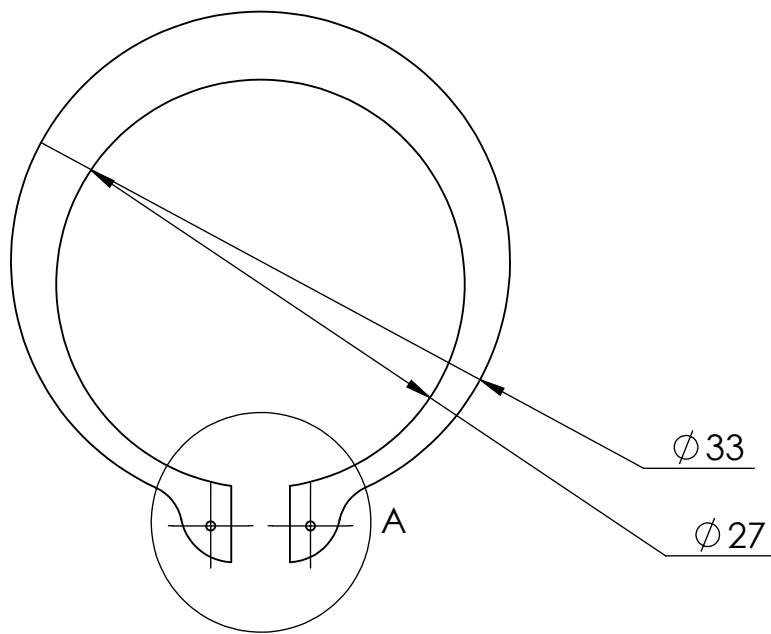
04		<b>Bague de séparation</b>	<b>A60</b>	
<b>Rep</b>	<b>Nbr</b>	<b>Désignation</b>	<b>Matière</b>	<b>Observation</b>
<b>Echelle: 2:1</b>		<b>BROYEUR DE BOIS</b>	Saoudi Achour larabi Ali	
				
A4		<b>UMMTO-FGC-DGM</b>	<b>Pro 2020</b>	



05	01	<b>Baquet</b>	A60	
Rep	Nbr	Désignation	Matière	Observation
Echelle: 1:		<b>BROYEUR DE BOIS</b>	Saoudi Achour larabi Ali	
				
A4		<b>UMMTO-FGC-DGM</b>	Pro 2020	

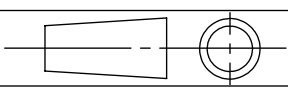


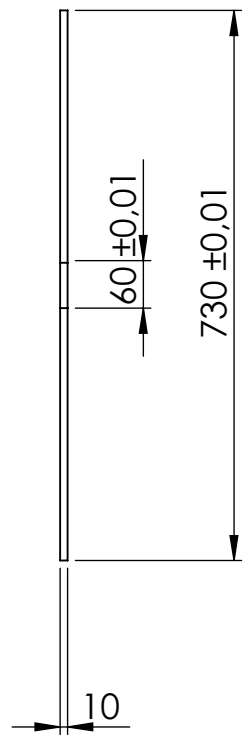
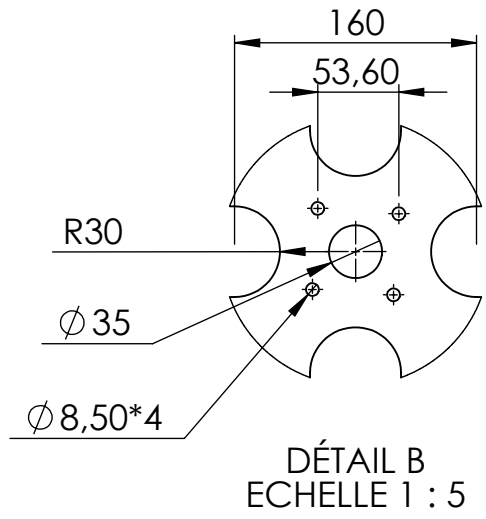
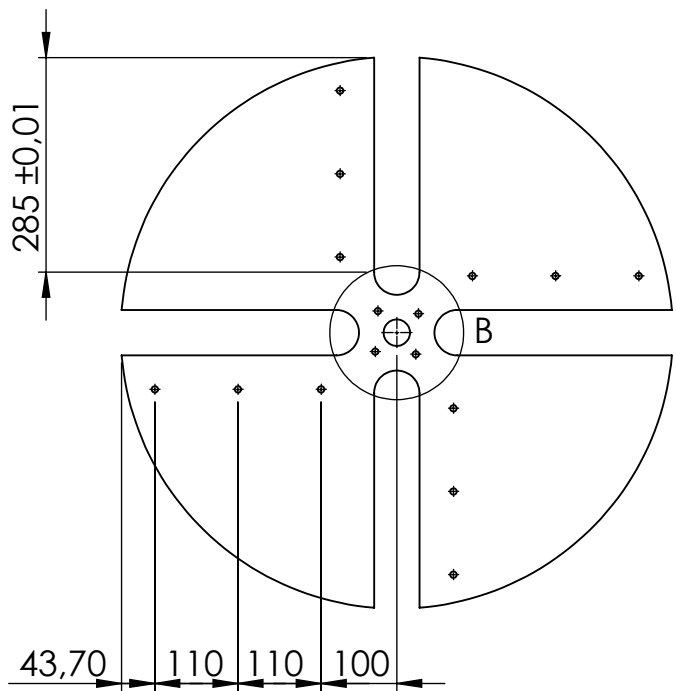
14	01	<b>Carcasse inferieure</b>	A60	
<b>Rep</b>	<b>Nbr</b>	<b>Désignation</b>	<b>Matière</b>	<b>Observation</b>
<b>Echelle: 1:10</b>		<b>BROYEUR DE BOIS</b>	Saoudi Achour larabi Ali	
A4		<b>UMMTO-FGC-DGM</b>	Pro 2020	



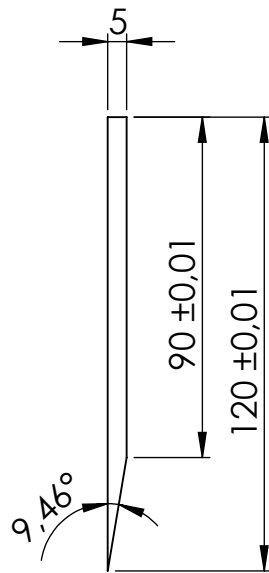
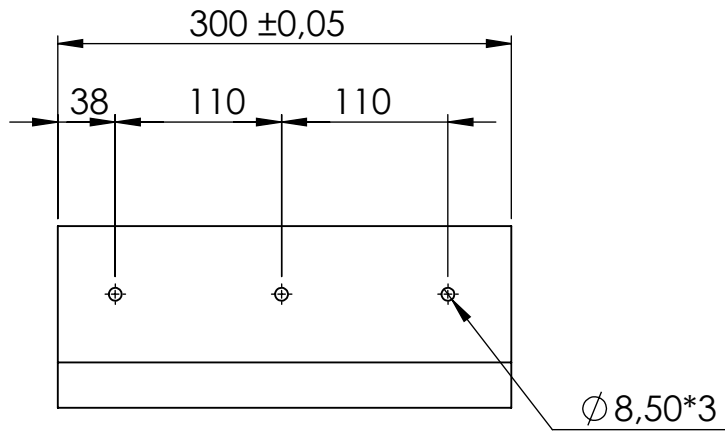
Ø 0,60\*2

DÉTAIL A  
ECHELLE 4 : 1

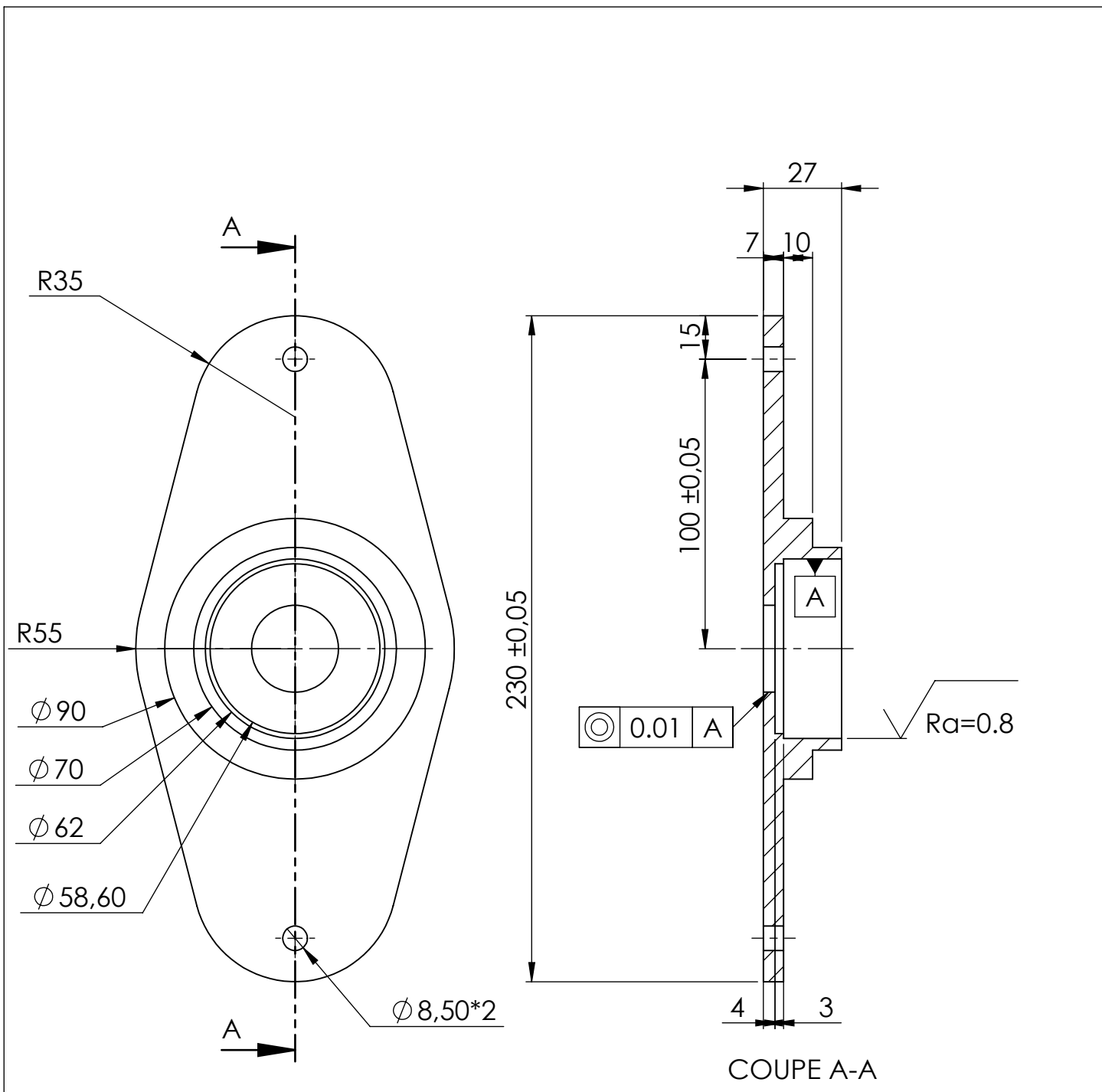
06	01	CIRCLIPS	Acier	
Rep	Nbr	Désignation	Matière	Observation
Echelle: 2:1		<p style="text-align: center;"><b>BROYEUR DE BOIS</b></p> 	<p style="text-align: center;">Saoudi Achour larabi Ali</p>	
A4				



07	04	<b>Disque</b>	<b>Z200</b>	
<b>Rep</b>	<b>Nbr</b>	<b>Désignation</b>	<b>Matière</b>	<b>Observation</b>
<b>Echelle: 1:10</b>		<b>BROYEUR DE BOIS</b>	Saoudi Achour larabi Ali	
A4		<b>UMMTO-FGC-DGM</b>	<b>Pro 2020</b>	

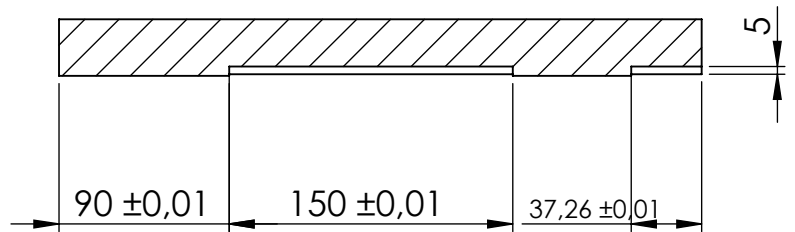
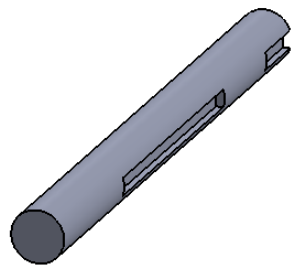
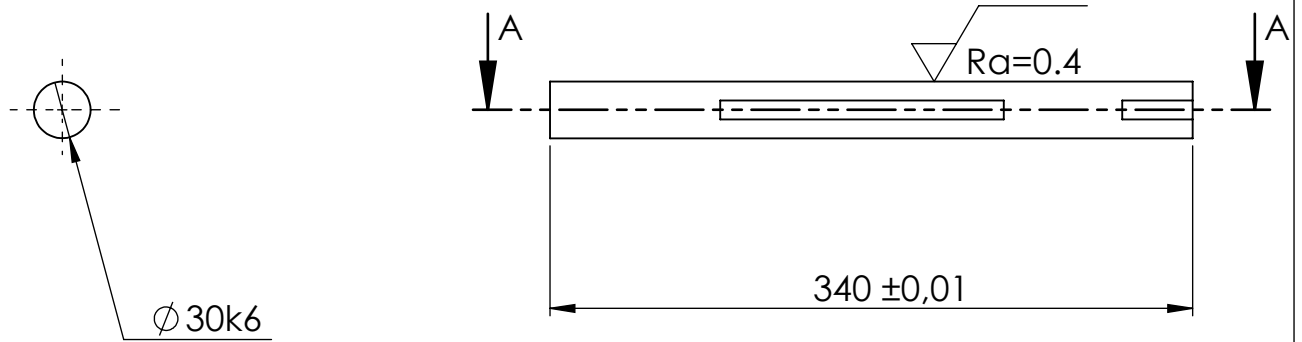


08	04	Lame	Z200	
Rep	Nbr	Désignation	Matière	Observation
Echelle: 1:5		BROYEUR DE BOIS	Saoudi Achour larabi Ali	
A4		UMMTO-FGC-DGM	Pro 2020	

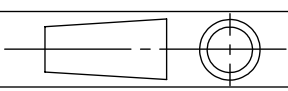


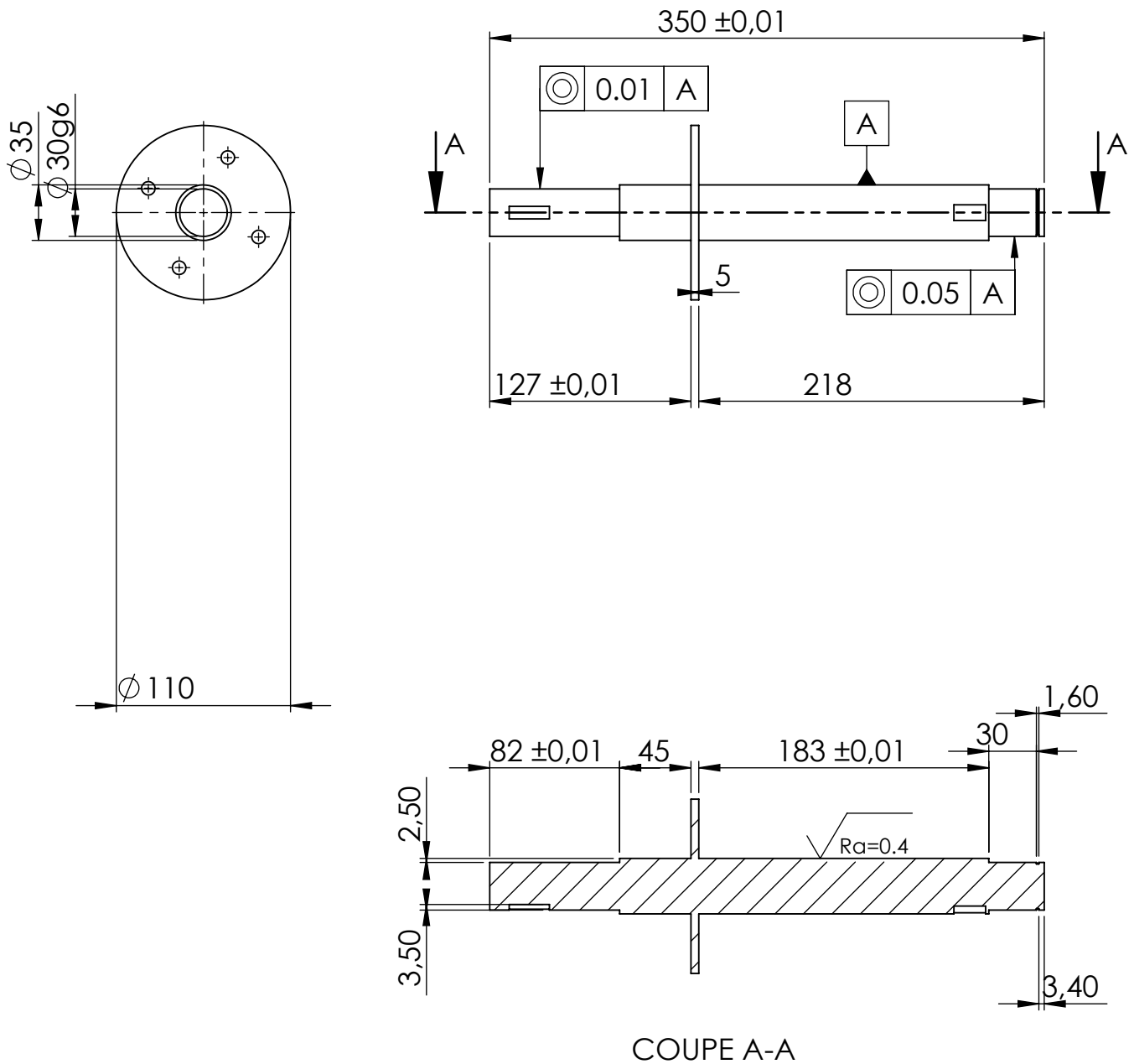
09	02	<b>Palier roulement</b>	42Cd4	
Rep	Nbr	Désignation	Matière	Observation
Echelle: 1:2		<b>BROYEUR DE BOIS</b>	Saoudi Achour larabi Ali	
A4		<b>UMMTO-FGC-DGM</b>	Pro 2020	

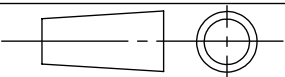


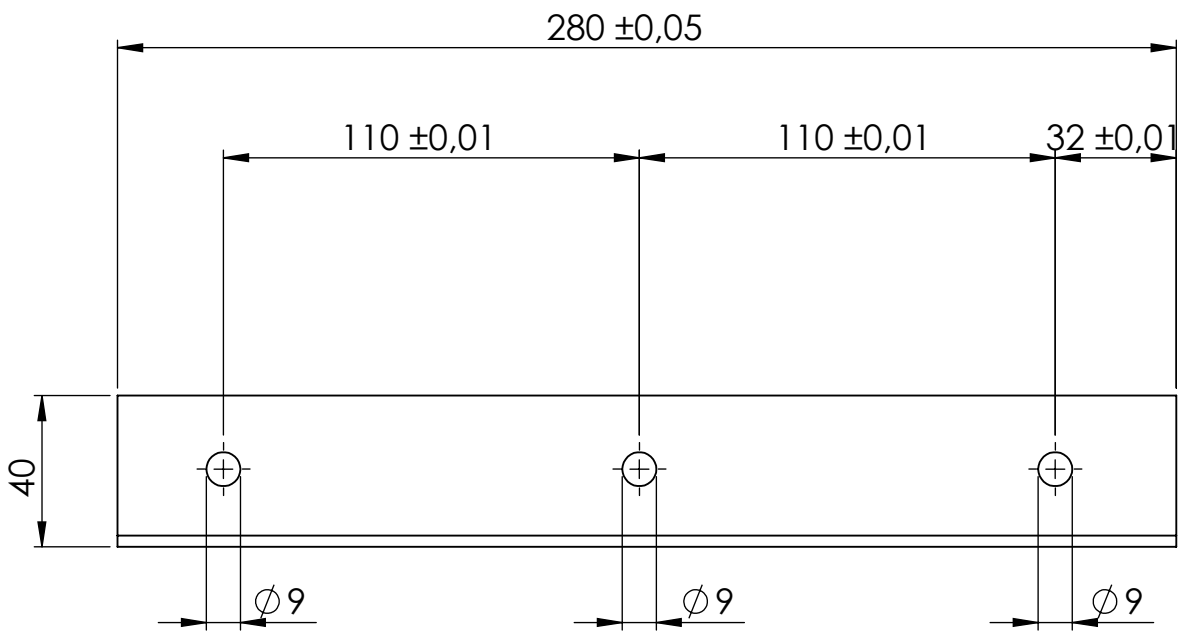
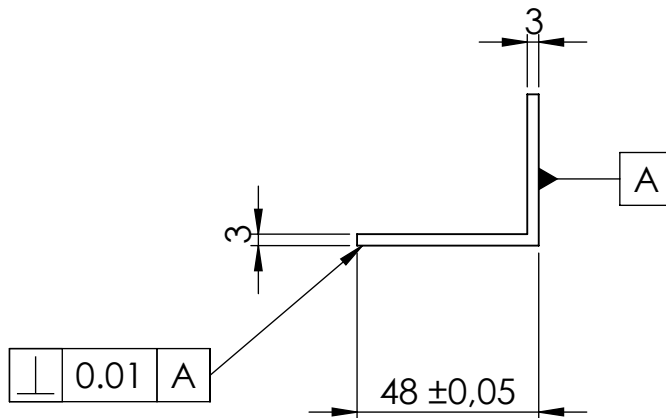


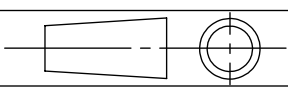
COUPE A-A

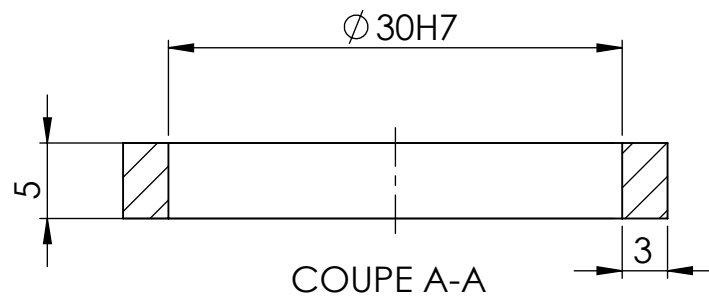
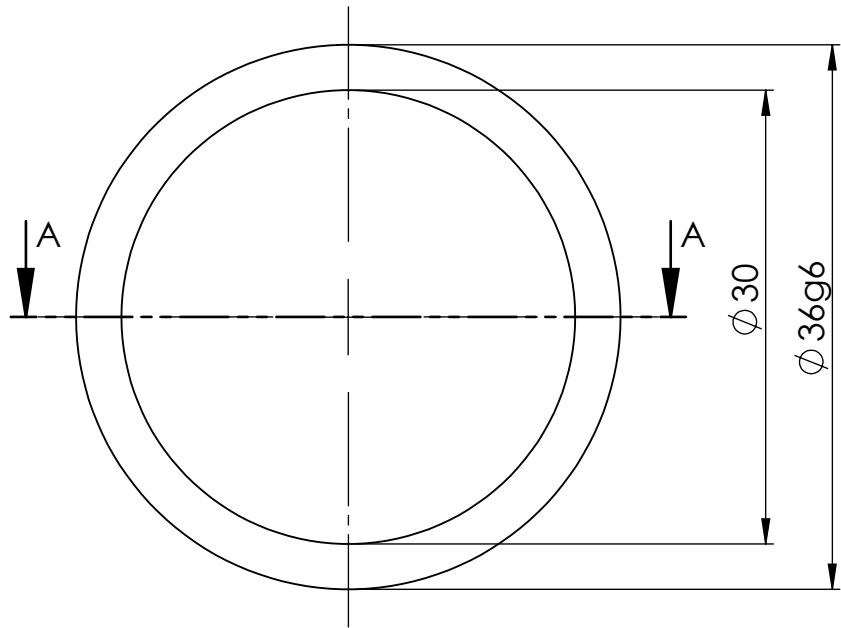
01	01	Arbre	42 Cd4	
Rep	Nbr	Désignation	Matière	Observation
Echelle: 1:4		<b>BROYEUR DE BOIS</b>	Saoudi Achour larabi Ali	
				
A4		UMMTO-FGC-DGM	Pro 2020	

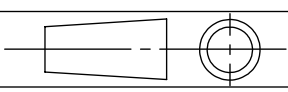


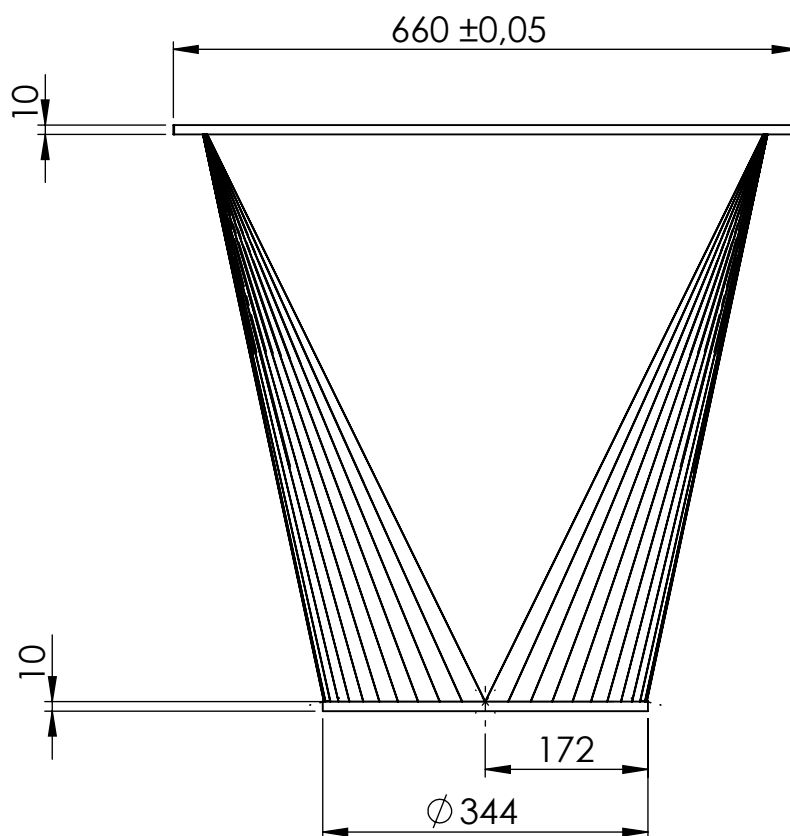
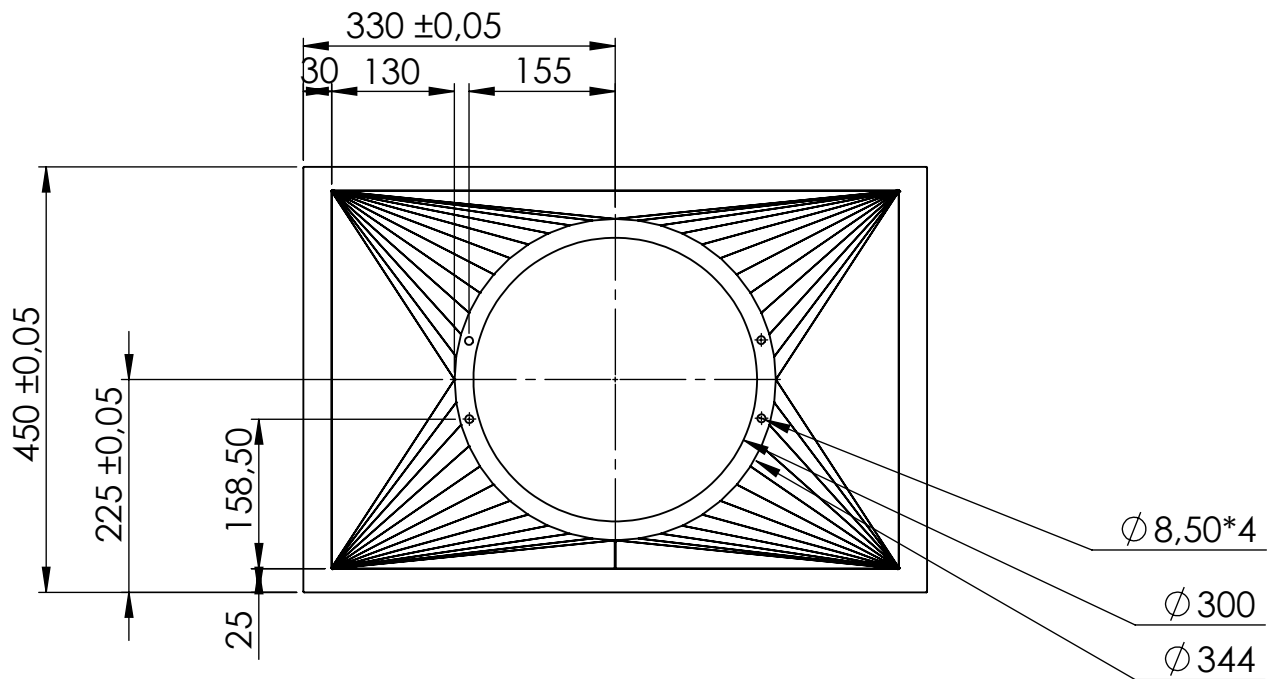
02	01	Arbre	X42Cd4	
Rep	Nbr	Désignation	Matière	Observation
Echelle: 1:4		<b>BROYEUR DE BOIS</b>	Saoudi Achour larabi Ali	
				
A4		UMMTO-FGC-DGM	Pro 2020	

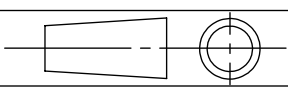


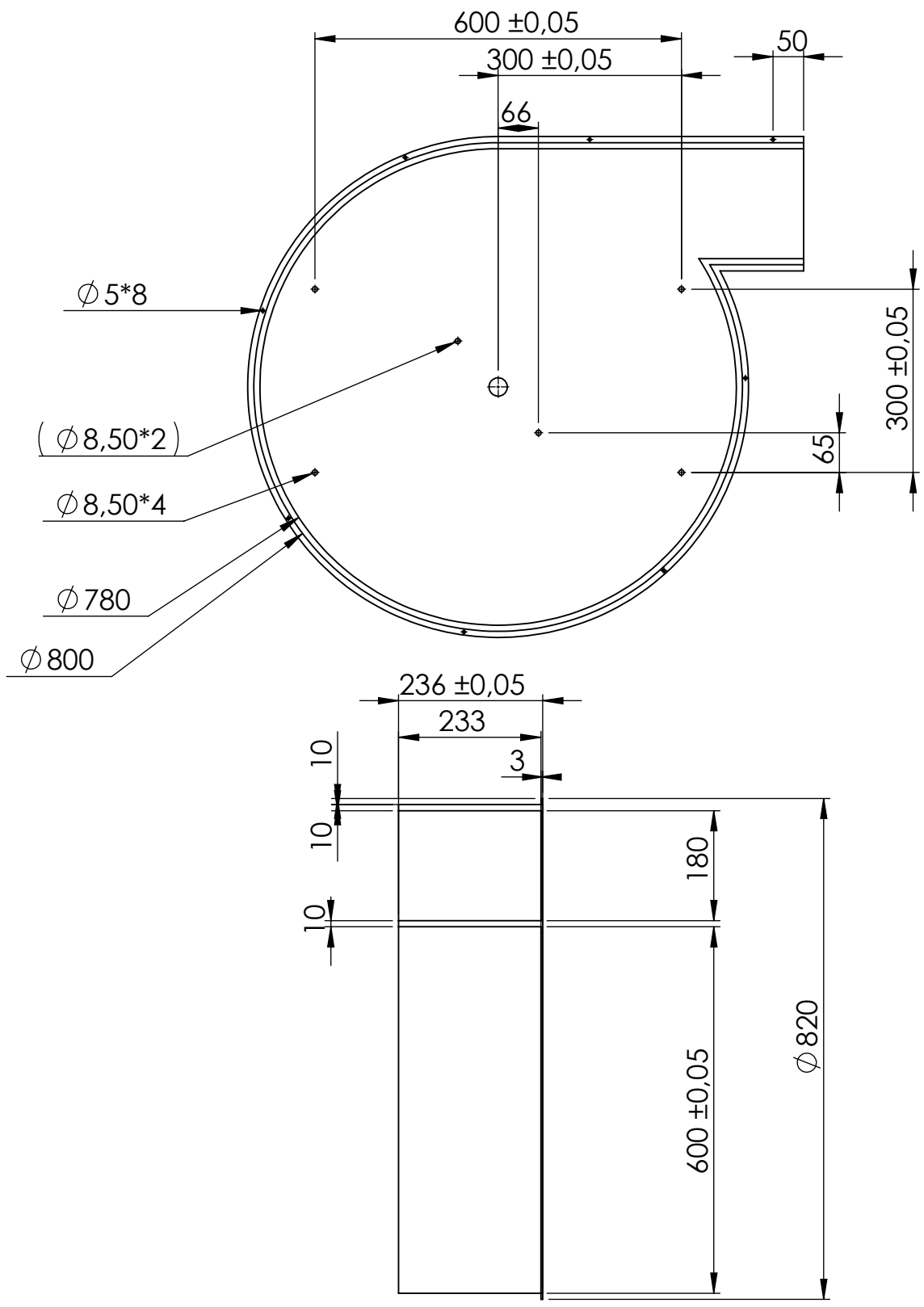
03	01	Arrête de dégagement	A60	
Rep	Nbr	Désignation	Matière	Observation
Echelle: 1:2		<p style="text-align: center;"><b>BROYEUR DE BOIS</b></p> 	<p style="text-align: center;">Saoudi Achour larabi Ali</p>	
A4				



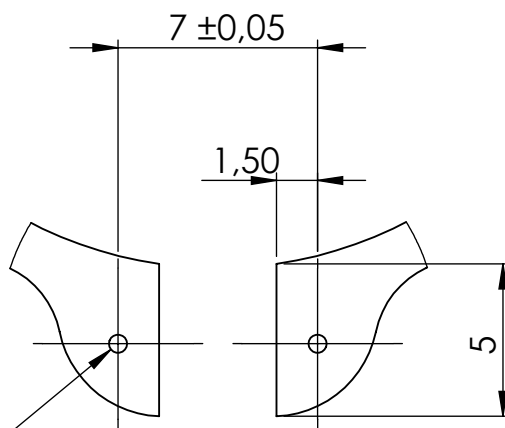
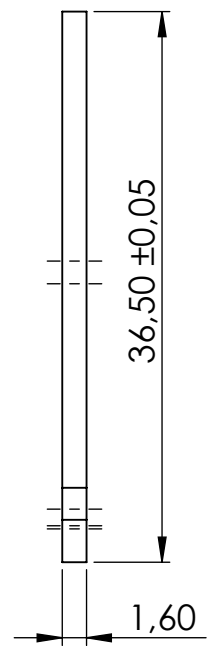
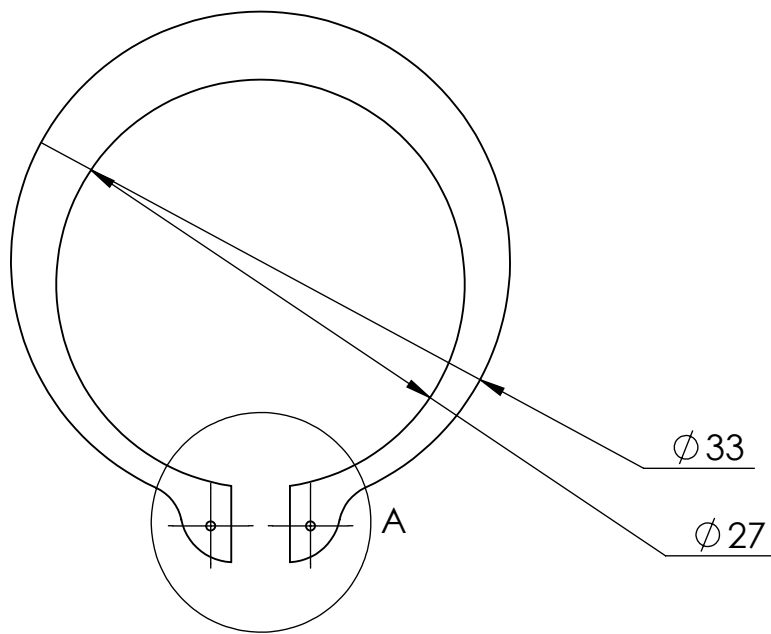
04		<b>Bague de séparation</b>	<b>A60</b>	
<b>Rep</b>	<b>Nbr</b>	<b>Désignation</b>	<b>Matière</b>	<b>Observation</b>
<b>Echelle: 2:1</b>		<b>BROYEUR DE BOIS</b>	Saoudi Achour larabi Ali	
				
A4		<b>UMMTO-FGC-DGM</b>	<b>Pro 2020</b>	



05	01	<b>Baque</b>	A60	
Rep	Nbr	Désignation	Matière	Observation
Echelle: 1:		<b>BROYEUR DE BOIS</b>	Saoudi Achour larabi Ali	
				
A4		<b>UMMTO-FGC-DGM</b>	Pro 2020	



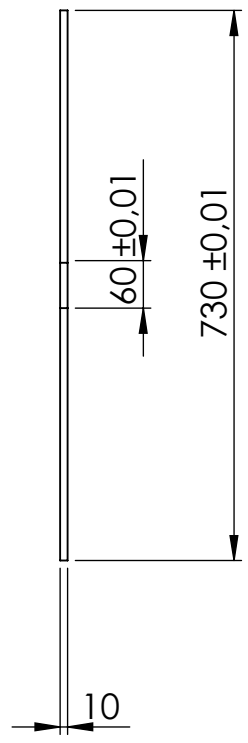
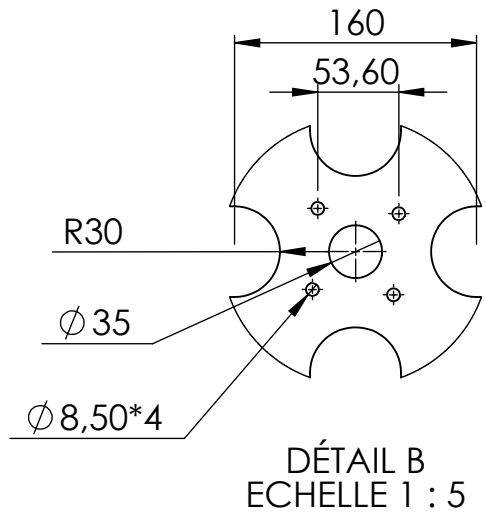
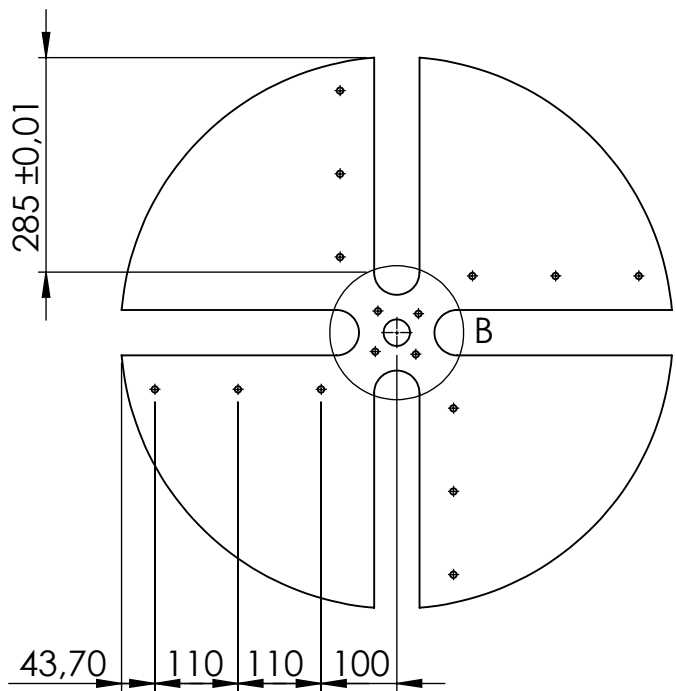
14	01	<b>Carcasse inferieure</b>	A60	
Rep	Nbr	Désignation	Matière	Observation
Echelle: 1:10		<b>BROYEUR DE BOIS</b>	Saoudi Achour larabi Ali	
A4		<b>UMMTO-FGC-DGM</b>	Pro 2020	



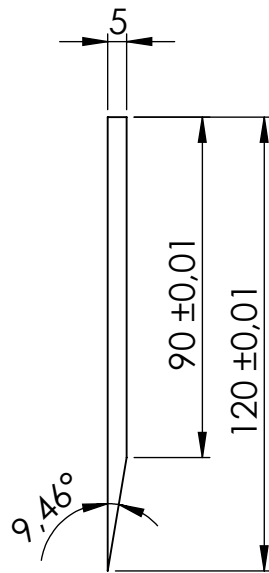
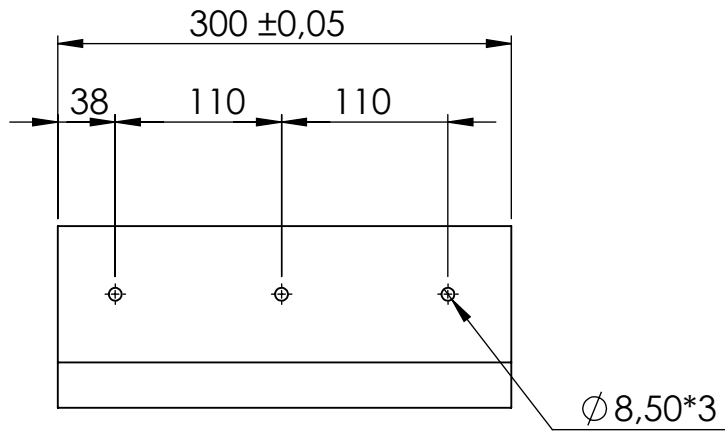
Ø 0,60\*2

DÉTAIL A  
ECHELLE 4 : 1

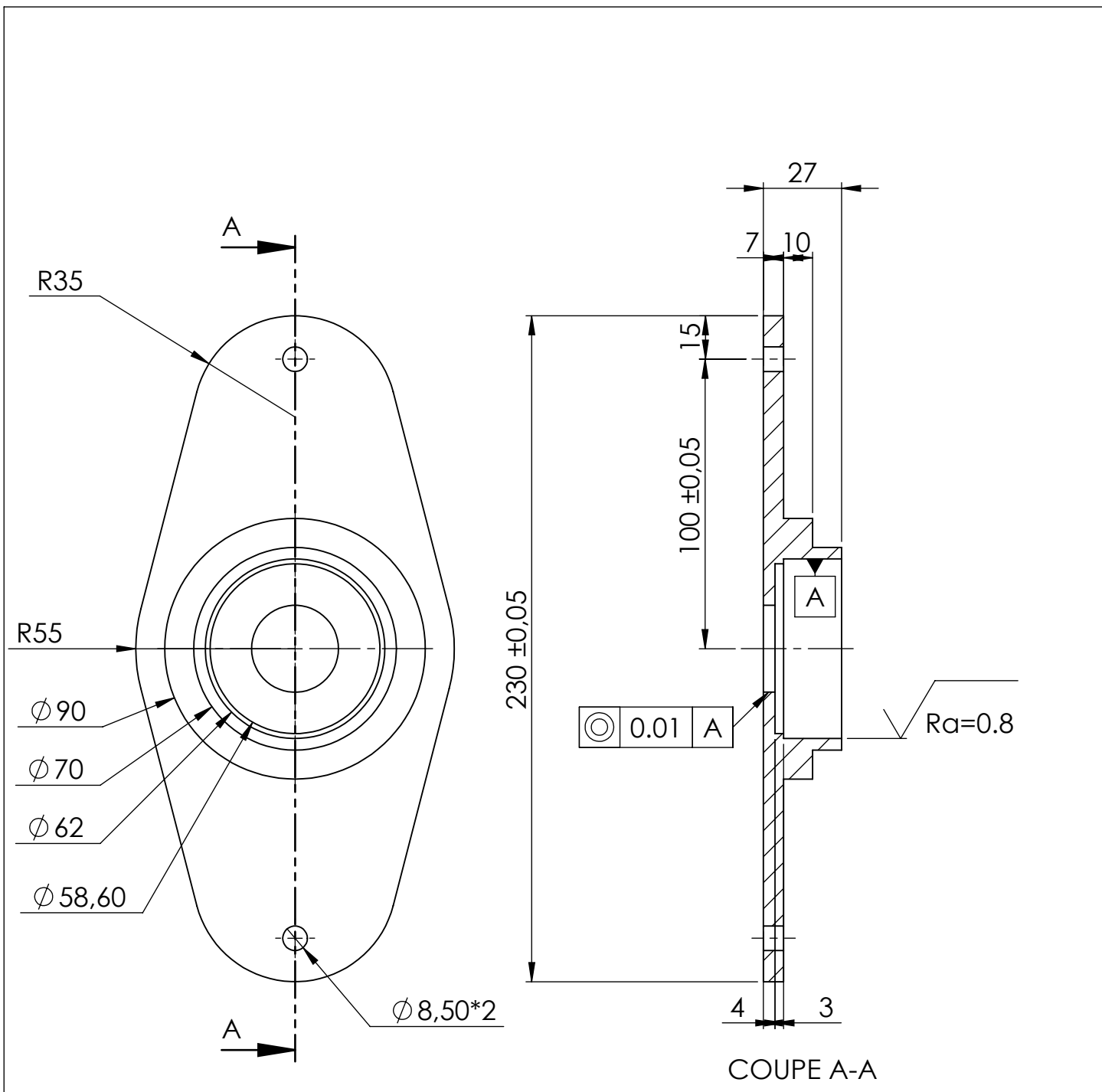
06	01	CIRCLIPS	Acier	
Rep	Nbr	Désignation	Matière	Observation
Echelle: 2:1			<b>BROYEUR DE BOIS</b>	Saoudi Achour larabi Ali
A4				



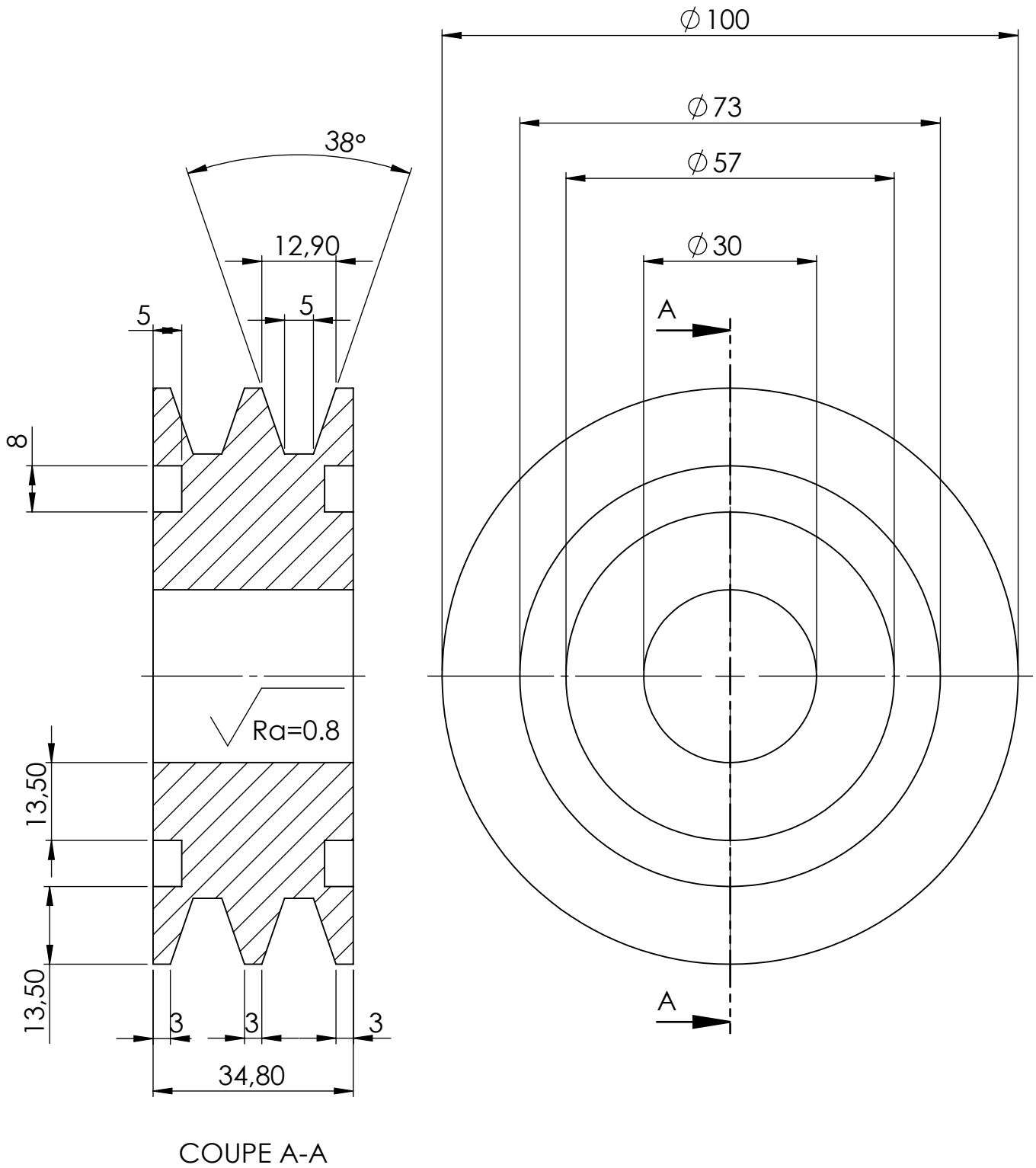
07	04	<b>Disque</b>	<b>Z200</b>	
<b>Rep</b>	<b>Nbr</b>	<b>Désignation</b>	<b>Matière</b>	<b>Observation</b>
<b>Echelle: 1:10</b>		<b>BROYEUR DE BOIS</b>	Saoudi Achour larabi Ali	
A4		<b>UMMTO-FGC-DGM</b>	<b>Pro 2020</b>	



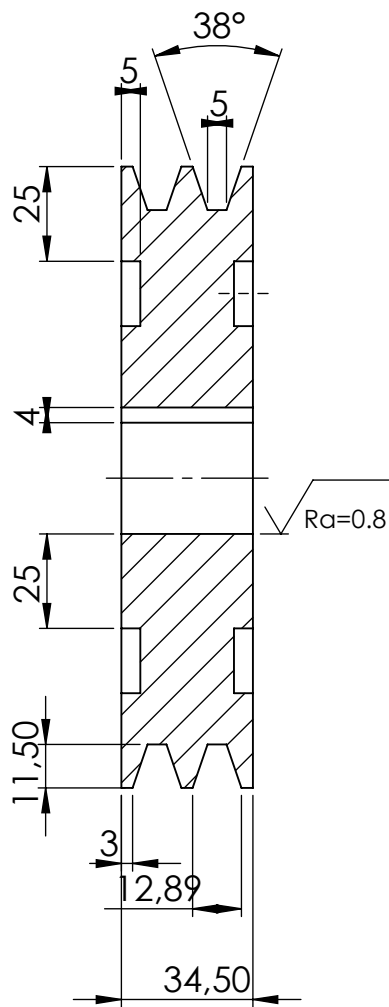
08	04	Lame	Z200	
Rep	Nbr	Désignation	Matière	Observation
Echelle: 1:5		<b>BROYEUR DE BOIS</b>	Saoudi Achour larabi Ali	
A4		UMMTO-FGC-DGM	Pro 2020	



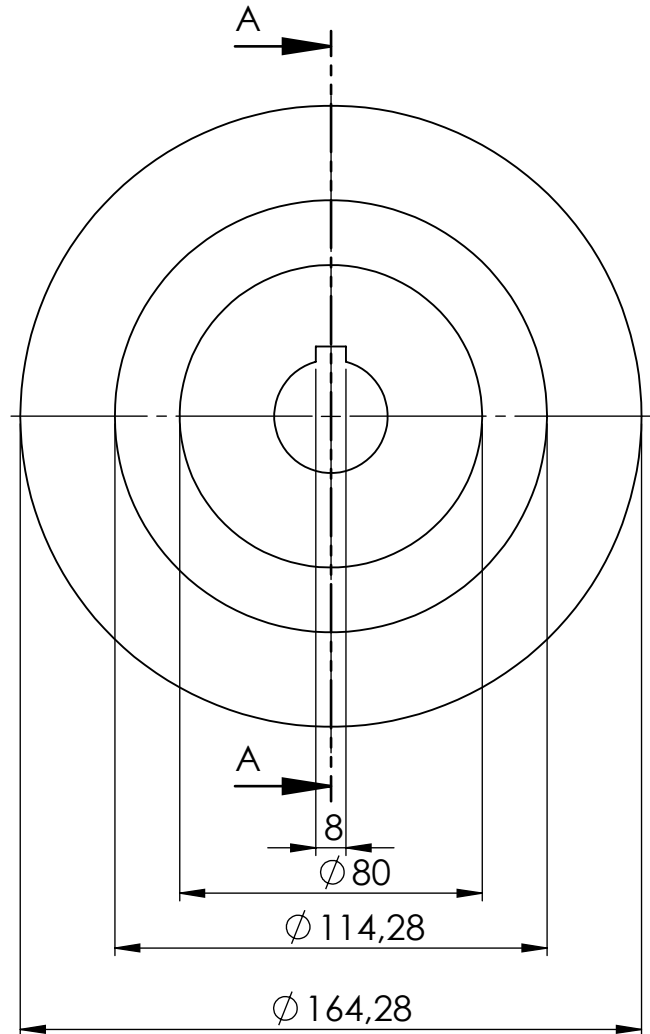
09	02	<b>Palier roulement</b>	42Cd4	
Rep	Nbr	Désignation	Matière	Observation
Echelle: 1:2		<b>BROYEUR DE BOIS</b>	Saoudi Achour larabi Ali	
A4		<b>UMMTO-FGC-DGM</b>	Pro 2020	

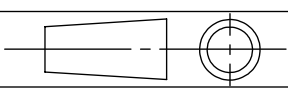


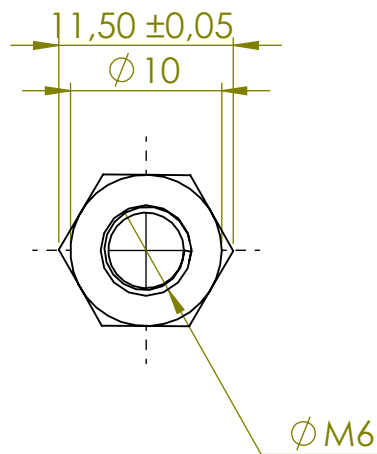
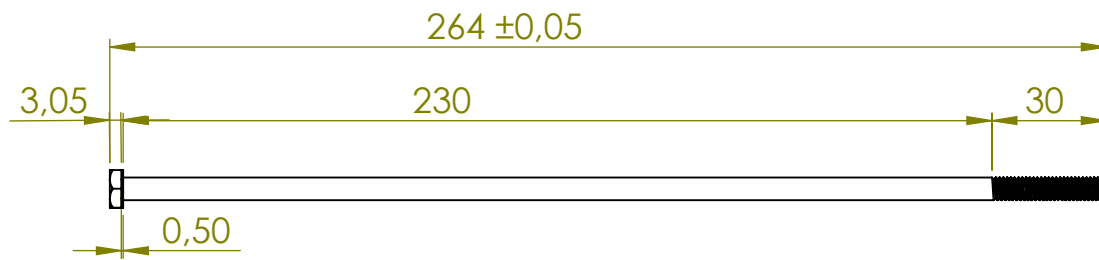
10	01	<b>Petite poulie</b>	<b>FT20</b>	
<b>Rep</b>	<b>Nbr</b>	<b>Désignation</b>	<b>Matière</b>	<b>Observation</b>
<b>Echelle: 1:</b>		<b>BROYEUR DE BOIS</b>	<b>Saoudi Achour larabi Ali</b>	
<b>A4</b>		<b>UMMTO-FGC-DGM</b>	<b>Pro 2020</b>	

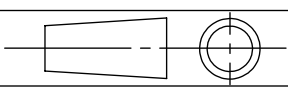


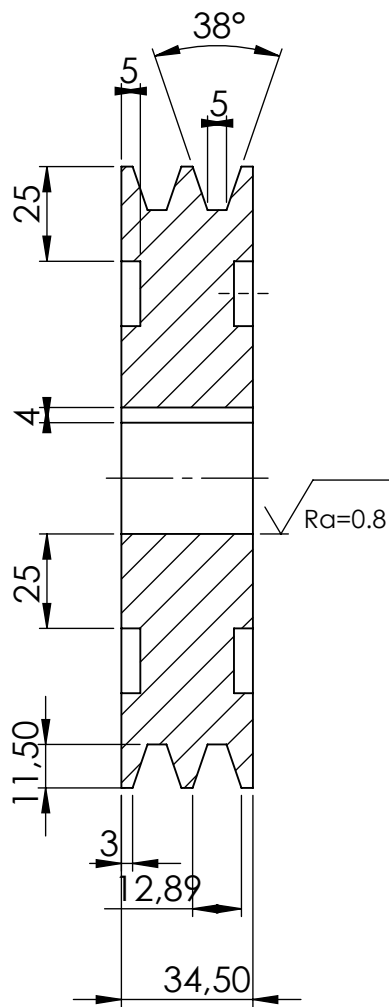
COUPE A-A



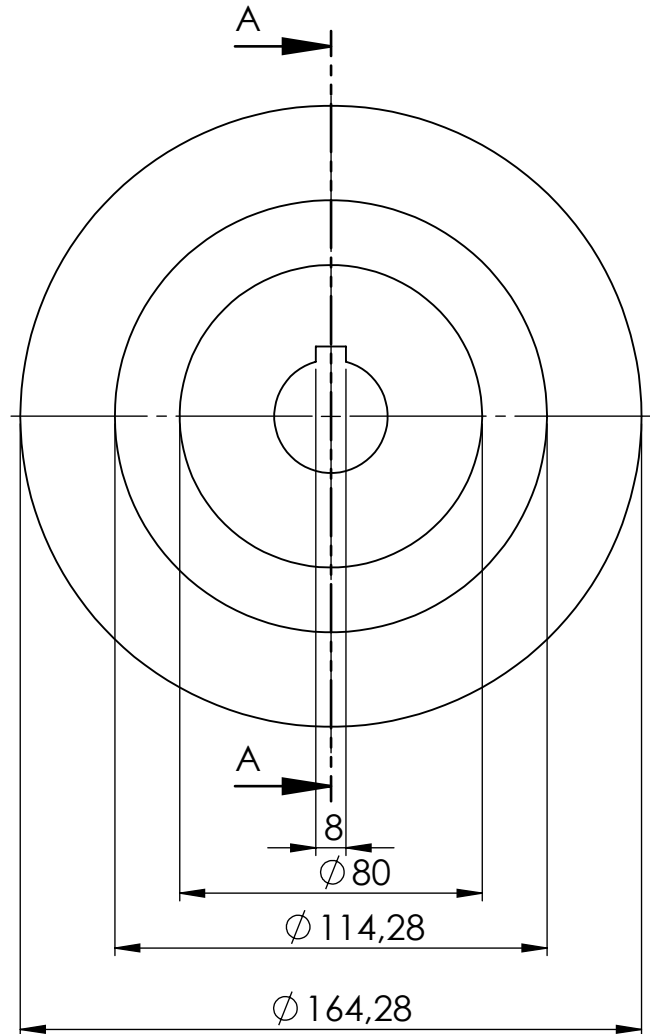
11	01	<b>Grande poulie</b>	FT20	
Rep	Nbr	Désignation	Matière	Observation
Echelle: 1:2		<b>BROYEUR DE BOIS</b>	Saoudi Achour larabi Ali	
				
A4		<b>UMMTO-FGC-DGM</b>	Pro 2020	

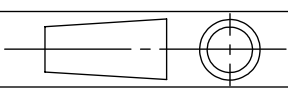


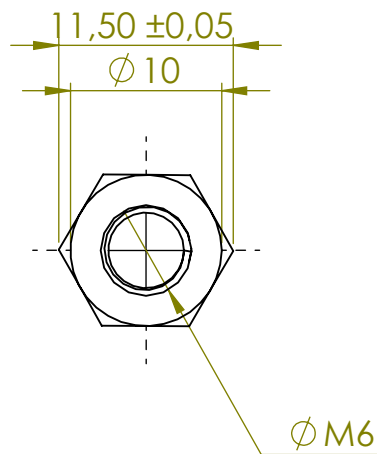
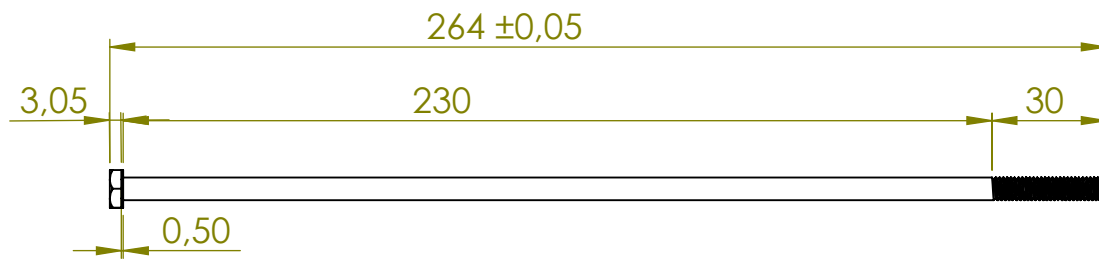
12	08	Tige	X200Cr12	
Rep	Nbr	Désignation	Matière	Observation
Echelle: 1:2		<b>BROYEUR DE BOIS</b>	Saoudi Achour larabi Ali	
				
A4		UMMTO-FGC-DGM	Pro 2020	

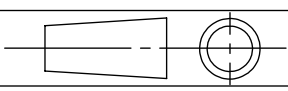


COUPE A-A



11	01	<b>Grande poulie</b>	FT20	
Rep	Nbr	Désignation	Matière	Observation
Echelle: 1:2		<b>BROYEUR DE BOIS</b>	Saoudi Achour larabi Ali	
				
A4		<b>UMMTO-FGC-DGM</b>	Pro 2020	



12	08	Tige	X200Cr12	
Rep	Nbr	Désignation	Matière	Observation
Echelle: 1:2		<b>BROYEUR DE BOIS</b>	Saoudi Achour larabi Ali	
				
A4		UMMTO-FGC-DGM	Pro 2020	