

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE  
MÉMOIRE DE PROJET DE FIN D'ÉTUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME  
D'INGÉNIEUR D'ÉTAT EN GÉNIE MÉCANIQUE

---

# Dimensionnement et conception d'un broyeur à lames pour le recyclage du plastique

---

Un travail de : MAHFOUD Mouna

Sous la direction de : M. GUERGUEB Brahim, ENP Alger

Présenté et soutenu publiquement le 18 Octobre 2020

## Composition de Jury

<b>Président du jury</b>	M. Said RECHAK	Professeur	ENP Alger
<b>Promoteur</b>	M. Brahim GUERGUEB	MA-A	ENP Alger
<b>Examineur</b>	M. Djamel SAIDI	MC-B	ENP Alger
<b>Examineur</b>	M. Hamid SEDJAL	MA-A	ENP Alger
<b>Invité</b>	M. Yacine BELKACEMI	MC-A	ENP Alger



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE  
MÉMOIRE DE PROJET DE FIN D'ÉTUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME  
D'INGÉNIEUR D'ÉTAT EN GÉNIE MÉCANIQUE

---

# Dimensionnement et conception d'un broyeur à lames pour le recyclage du plastique

---

Un travail de : MAHFOUD Mouna

Sous la direction de : M. GUERGUEB Brahim, ENP Alger

Présenté et soutenu publiquement le 18 Octobre 2020

## Composition de Jury

<b>Président du jury</b>	M. Said RECHAK	Professeur	ENP Alger
<b>Promoteur</b>	M. Brahim GUERGUEB	MA-A	ENP Alger
<b>Examineur</b>	M. Djamel SAIDI	MC-B	ENP Alger
<b>Examineur</b>	M. Hamid SEDJAL	MA-A	ENP Alger
<b>Invité</b>	M. Yacine BELKACEMI	MC-A	ENP Alger

ENP 2020

## ملخص:

تهدف هذه المذكرة إلى تصميم آلة التقطيع ذات الشفرات لإعادة تدوير النفايات البلاستيكية باستخدام أداة Solidworks Computer Aided Design (CA0)

آلة التقطيع هي أداة لتقليل النفايات البلاستيكية إلى رقائق لإعادة استخدامها حيثما أمكن ذلك (إعادة التدوير). إنه مزود بمحرك ومجهز بشفرات كعضو نشط في عملية التقطيع القص.

تتكون المذكرة أيضا من دراسة شاملة لجميع أعضاء آلة التقطيع المستوحاة من آلات التقطيع الموجودة بالفعل في المجال مع سهولة معينة في التحقيق.

**الكلمات المفتاحية:** طحن، تقطيع، نفايات، بلاستيك، إعادة تدوير.

---

### Abstract:

This thesis is intended for the design of a blade shredder for recycling plastic waste using the Solidworks Computer Aided Design (CA0) tool for real life implementation.

The shredder is a tool for reducing plastic waste into chips for reuse where possible (recycling). It is motorized and equipped with blades as an active organ in the shear shredding process.

The study consists in a global dimensioning of all the shredder's organs which is inspired by the shredders already existing in the field with a certain ease of realization.

**Keywords:** Grinding, Shear, Blades, Waste, Plastic, Recycling.

---

### Résumé :

Ce mémoire est destiné à la conception d'un broyeur à lames pour le recyclage des déchets en plastique à l'aide de l'outil de conception Assistée par Ordinateur (CA0) Solidworks en vue de réalisation en vie réelle.

Le broyeur est un outil servant à réduire les déchets plastiques en copeaux pour réutilisation dans les cas possibles (recyclage). Il est motorisé avec des lames comme organe actif dans le processus du broyage par cisaillement.

L'étude consiste en un dimensionnement global de tous les organes du broyeur qui est inspiré des broyeurs déjà existants en réalité avec une certaine facilité de réalisation.

**Mots-Clés :** Broyage, Cisaillement, Lames, Déchets, Plastique, Recyclage.

## DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents et grand-parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

À mes chères soeurs pour leurs tendresses, leur complicité et leurs encouragements permanents.

À tous mes enseignants pour leur soutien et leur dévouement tout au long de mon parcours universitaire.

À toutes mes copines pendant ces deux dernières années, Imene, Hamida, Kenza et Manel,  
*Thank you for accepting me the way I am*

À tous mes camarades de promotion de Génie Mécanique 2017-2020, pour leurs complicités, leurs écoutes et leurs partages.

À tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à l'élaboration de ce travail et dont les noms ne figurent malheureusement pas sur ces pages. Qu'ils trouvent ici le témoignage de mon estime et de ma gratitude.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible.

## REMERCIEMENTS

LOUANGE À ALLAH, DIEU UNIQUE, QUE SA PAIX ET SA BÉNÉDICTION SOIENT SUR LE DERNIER DES PROPHÈTES, MUHAMMAD, SUR SA FAMILLE ET SUR TOUS SES COMPAGNONS.

JE TIENS À REMERCIER MON ENSEIGNANT ET PROMOTEUR, MONSIEUR BRAHIM GUERGUEB, ENSEIGNANT À L'ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE, POUR SA DISPONIBILITÉ, SON AIDE, AINSI QUE POUR TOUTES LES RÉPONSES QU'IL A SU ME DONNER QUAND JE RENCONTRAIS DES SOUCIS, ET JE LUI SAIS GRÉ DE SON SOUTIEN ET SES PRÉCIEUX CONSEILS.

JE REMERCIE LE PRÉSIDENT DU JURY, MONSIEUR SAID RECHAK, AINSI QUE LES EXAMINATEURS, MONSIEUR SAIDI DJAMEL ET SEDJAL HAMID, ET YACINE BELKACEMI EN TANT QUE INVITÉ, D'AVOIR ACCEPTÉ D'ÉVALUER MON MODESTE TRAVAIL.

J'EN SUIS TRÈS RECONNAISSANTE À TOUS MES PROFESSEURS DE GÉNIE MÉCANIQUE AYANT CONTRIBUÉ À MA FORMATION TOUT AU LONG DE MON CURSUS QUI ONT AIDÉ POUR AVOIR MENER CE TRAVAIL JUSQU'À LA FIN. JE N'OUBLIE PAS MES PARENTS POUR LEUR CONTRIBUTION, LEUR SOUTIEN ET LEUR ENCOURAGEMENT PERMANENTS. ENFIN, JE REMERCIE TOUTES LES PERSONNES ET ASSOCIATIONS QUI, D'UNE QUELCONQUE MANIÈRE, M'ONT APPORTÉ LEUR AMITIÉ, LEUR ATTENTION, LEURS ENCOURAGEMENTS, LEUR APPUI ET LEUR ASSISTANCE POUR QUE JE PUISSE MENER À TERME CE TRAVAIL

# Table des matières

Liste des tableaux

Tables des figures

Nomenclature

Liste des abréviations

	Page
<b>Introduction</b>	<b>19</b>
<b>Chapitre 1 Généralités sur la récupération des déchets en plastique</b>	<b>23</b>
1.1 Problématique . . . . .	23
1.2 Élimination des déchets en plastique . . . . .	24
1.2.1 Traitement et récupération des déchets . . . . .	24
1.2.2 La collecte et tri des déchets plastiques . . . . .	24
1.3 Intérêt de la récupération des déchets plastiques . . . . .	25
1.4 Mode de traitement des déchets en matière plastique . . . . .	27
1.4.1 Le recyclage mécanique . . . . .	27
1.4.2 Les étapes du recyclage mécanique . . . . .	28
1.4.3 Recyclage chimique . . . . .	30
1.5 Différentes procédés de transformation du plastique . . . . .	30

1.5.1	Calandrage . . . . .	31
1.5.2	Thermoformage . . . . .	32
1.5.3	Injection . . . . .	33
1.5.4	Injection soufflage . . . . .	34
1.5.5	Extrusion : . . . . .	36
1.5.6	Extrusion gonflage . . . . .	37
1.5.7	Extrusion soufflage . . . . .	38
1.5.8	Expansion moulage . . . . .	39
1.6	Conclusion . . . . .	40
<b>Chapitre 2 Généralités sur les broyeurs</b>		<b>42</b>
2.1	Définition d'un broyeur . . . . .	42
2.2	Composition d'un broyeur . . . . .	43
2.3	Approche générale de la technologie du broyage . . . . .	44
2.4	Physique de la fracture . . . . .	44
2.4.1	Propriétés élastiques et plastiques des matériaux . . . . .	45
2.4.2	Modes d'application des contraintes . . . . .	46
2.4.3	Mécanisme de fragmentation . . . . .	48
2.5	Types des broyeurs . . . . .	49
2.5.1	Classification des broyeurs . . . . .	49
2.6	Choix d'un broyeur . . . . .	54
2.6.1	Critères du choix d'un broyeur . . . . .	54
2.6.1.1	Selon la nature de la matière à broyer . . . . .	54
2.6.1.2	Selon les caractéristique techniques . . . . .	55
2.6.1.3	Selon la fiabilité et la disponibilité . . . . .	55
2.7	Broyeurs pour le plastique . . . . .	56
2.7.1	Introduction . . . . .	56

2.7.2	Caractéristiques des broyeurs à plastique . . . . .	56
2.8	Conclusion . . . . .	57
<b>Chapitre 3 Étude théorique des éléments constituant le broyeur et choix des matériaux</b>		<b>59</b>
3.1	Étude cinématique du broyeur . . . . .	59
3.1.1	Introduction . . . . .	59
3.1.2	Considérations générales sur les contacts . . . . .	60
3.1.3	Identifications des liaisons . . . . .	60
3.1.4	Représentation schématique des éléments cinématiques . . . . .	61
3.1.4.1	Transmission par adhérence : Roue de friction . . . . .	61
3.1.4.2	Transmission par obstacles : Engrenages . . . . .	62
3.1.4.3	Transmission par lien souple : poulie-courroie . . . . .	63
3.1.4.4	Transmission par lien flexible : Pignon-chaîne . . . . .	64
3.1.5	Établissement du schéma cinématique du broyeur . . . . .	65
3.1.5.1	Explication du schéma cinématique . . . . .	66
3.2	Étude théorique des éléments de machine : . . . . .	67
3.2.1	Choix du moteur . . . . .	67
3.2.1.1	Introduction . . . . .	67
3.2.1.2	Calcul de l'effort de coupe $F_c$ . . . . .	67
3.2.1.3	Calcul de la vitesse de rotation du rotor . . . . .	70
3.2.1.4	La puissance du moteur . . . . .	71
3.2.1.5	Caractéristiques du moteur . . . . .	72
3.2.2	Choix et dimensionnement des courroies de transmission . . . . .	73
3.2.2.1	Cahier de charge du broyeur : . . . . .	73
3.2.2.2	Choix du type du courroie : . . . . .	73
3.2.2.3	Dimensionnement des courroies <b>HFX XPA</b> . . . . .	75

3.2.2.4	Étude statique et de résistance de la courroie choisie : . . . . .	80
3.2.3	Dimensionnement de l'arbre . . . . .	84
3.2.3.1	Introduction . . . . .	84
3.2.3.2	Calcul de l'effort de coupe $F_c$ . . . . .	85
3.2.3.3	Étude à la flexion de l'arbre porteur des lames . . . . .	85
3.2.3.4	Étude à la torsion de l'arbre : . . . . .	89
3.2.3.5	Choix du matériau de l'arbre : . . . . .	89
3.2.3.6	Critères de résistance aux sollicitations externes : . . . . .	90
3.2.3.7	Calcul du diamètre de l'arbre principal : . . . . .	91
3.2.3.8	Jeu entre les lames . . . . .	92
3.2.3.9	Calcul de rigidité de l'arbre . . . . .	93
3.2.3.10	Conclusion . . . . .	95
3.2.4	Dimensionnement des roulements . . . . .	96
3.2.4.1	Généralités sur les roulements . . . . .	96
3.2.4.2	Types de roulements . . . . .	96
3.2.4.3	Choix des roulements . . . . .	100
3.2.5	Calcul de la durée de vie du roulement 62/22 . . . . .	100
3.2.6	Dimensionnement des engrenages . . . . .	103
3.2.6.1	Introduction . . . . .	103
3.2.7	Calcul des engrenages . . . . .	104
3.2.8	Calcul des paramètres du broyage . . . . .	106
3.2.8.1	Le volume de la trémie . . . . .	106
3.2.8.2	Débit du broyage . . . . .	108
3.3	Choix des matériaux . . . . .	109
3.3.1	Introduction . . . . .	109
3.3.2	Sélection des matériaux . . . . .	110
3.3.2.1	Matériau pour le châssis de la machine . . . . .	110

3.3.2.2	Matériaux pour arbre porteur des lames . . . . .	111
3.3.2.3	Matériaux pour lames . . . . .	112
3.3.2.4	Matériaux pour pignons . . . . .	113
3.3.2.5	Matériaux pour roulements . . . . .	114
3.4	Conclusion . . . . .	114
<b>Chapitre 4</b>	<b>Conception et simulation numérique des éléments du broyeur</b>	<b>116</b>
4.1	La modélisation numérique 3D . . . . .	116
4.1.1	Introduction . . . . .	116
4.1.2	Les logiciels de conception et ingénierie mécanique 3D . . . . .	117
4.1.3	Types de conception et d'ingénierie mécanique . . . . .	118
4.1.3.1	Conception Assistée par Ordinateur CAO . . . . .	118
4.1.3.2	Ingénierie Assistée par Ordinateur IA0 . . . . .	118
4.1.3.3	Fabrication Assistée par Ordinateur FAO . . . . .	119
4.1.4	Le logiciel SolidWorks . . . . .	119
4.1.4.1	Historique . . . . .	120
4.1.4.2	Mode de fonctionnement . . . . .	120
4.2	Modélisation géométriques des éléments du broyeur . . . . .	121
4.2.1	Conception de la table du broyeur . . . . .	121
4.2.2	Conception des poulies . . . . .	122
4.2.3	Conception des engrenages . . . . .	122
4.2.4	Conception de l'arbre porteur des lames . . . . .	122
4.2.5	Conception des lames . . . . .	123
4.2.6	Assemblage des éléments du broyeur . . . . .	124
4.3	Simulation numérique sur ANSYS . . . . .	124
4.3.1	Introduction . . . . .	124
4.3.2	Méthodologie d'analyse basée sur la théorie des éléments finis . . . . .	125

4.3.3	Simulation numérique de l'arbre . . . . .	126
4.3.3.1	L'arbre en flexion . . . . .	126
4.3.3.2	L'arbre en torsion . . . . .	128
4.3.4	Simulation numérique des lames . . . . .	129
4.3.5	Conclusion . . . . .	130
<b>Chapitre 5</b>	<b>Plan de maintenance et procédés de fabrication</b>	<b>133</b>
5.1	La maintenance . . . . .	133
5.1.1	Définition de la maintenance : . . . . .	133
5.1.2	Les objectifs de la maintenance : . . . . .	133
5.1.3	Les concepts de la maintenance . . . . .	134
5.1.4	Définition du plan de maintenance . . . . .	135
5.1.5	Objectifs du plan . . . . .	136
5.1.6	Analyse de Modes de Défaillance selon leurs Effets et leur Criticité (AMDEC) : . . . . .	136
5.1.6.1	Introduction . . . . .	136
5.1.6.2	Démarche AMDEC . . . . .	137
5.1.6.3	Analyse AMDEC du broyeur . . . . .	140
5.1.6.4	Actions correctives à prendre : . . . . .	142
5.2	Procédé de fabrication . . . . .	143
5.2.1	Choix du procédé de fabrication des lames et joints de lames . . . . .	143
5.3	Conclusion . . . . .	146
	<b>Conclusion</b>	<b>147</b>
	<b>Références</b>	<b>150</b>

# Liste des tableaux

2.1	Les différents composants dans un broyeur . . . . .	43
3.1	Schéma cinématique . . . . .	66
3.2	Caractéristiques du moteur . . . . .	72
3.3	Récapitulatif des caractéristiques de courroie . . . . .	84
3.4	Résumé des résultats de simulation . . . . .	94
3.5	Caractéristiques du roulement 62/22 . . . . .	100
3.6	Caractéristiques du roulement 6305-2RS1 . . . . .	103
3.7	Éléments caractéristiques des engrenages cylindriques à denture droite . . . .	106
3.8	Dimensions de la trémie . . . . .	107
3.9	Composition chimique du S355MC . . . . .	111
3.10	Caractéristiques mécaniques moyennes E335 . . . . .	112

# Table des figures

1.1	Recyclage mécanique . . . . .	28
1.2	Procédé de calandrage . . . . .	31
1.3	Procédé de thermoformage . . . . .	32
1.4	Procédé d'injection . . . . .	33
1.5	Procédé d'injection soufflage . . . . .	35
1.6	Procédé d'extrusion . . . . .	36
1.7	Procédé d'extrusion gonflage . . . . .	37
1.8	Procédé d'extrusion soufflage . . . . .	38
1.9	Procédé d'expansion moulage . . . . .	39
2.1	Courbe contraintes-déformations . . . . .	46
2.2	Principaux modes d'application de contraintes . . . . .	47
2.3	Les différents types de broyeur en fonction de la dureté du matériau et de la taille du produit à obtenir. . . . .	50
2.4	Schéma d'un broyeur à couteaux . . . . .	50
2.5	Schéma d'un broyeur à marteaux . . . . .	51
2.6	Schéma d'un broyeur universel (à broches) . . . . .	52
2.7	Broyeurs à cylindres . . . . .	53
2.8	Schéma d'un broyeur à jet de fluide avec classificateur intégré . . . . .	53
3.1	Schéma d'une transmission par roue de friction . . . . .	62
3.2	Schéma d'une transmission par engrenages . . . . .	62

---

3.3	Schéma d'une transmission poulie-courroies . . . . .	64
3.4	Schéma d'une transmission roue dentée-chaîne . . . . .	65
3.5	Chaine cinématique du broyeur . . . . .	65
3.6	Vitesse de coupe en fonction du matériau . . . . .	71
3.7	Coefficient de service $k_s$ . . . . .	73
3.8	Diamètres normalisés des poulies pour courroies XPA et SPA . . . . .	76
3.9	Efforts sur l'arbre et paliers . . . . .	85
3.10	Bilan des forces sur l'arbre . . . . .	86
3.11	Valeurs indicatives du coefficient de sécurité $s$ pour arbres . . . . .	91
3.12	Jeu entre lames . . . . .	93
3.13	Déplacement total pour 26 mm . . . . .	94
3.14	Déplacement total pour 27 mm . . . . .	95
3.15	Déplacement total pour 30 mm . . . . .	95
3.16	Schéma des roulements rigides à billes . . . . .	97
3.17	Schéma des roulements à contact oblique . . . . .	98
3.18	Schéma des roulements à rouleaux cylindriques et à rouleaux coniques . . . . .	99
3.19	Schéma des roulements à aiguilles . . . . .	99
3.20	Vue de coupe de la trémie d'alimentation . . . . .	107
3.21	Trémie du chargement . . . . .	107
3.22	Dispositions des lames sur l'arbre . . . . .	108
3.23	Composition chimique du 16MnCr5 . . . . .	114
4.1	Autodesk . . . . .	117
4.2	Dassault Systèmes . . . . .	117
4.3	Exemple de l'interface Solidworks pour la conception Assistée par Ordinateur . . . . .	118
4.4	Exemple de l'Ingénierie Assistée par Ordinateur IAO (Autodesk) . . . . .	119
4.5	Exemple de la Fabrication Assistée par Ordinateur FAO . . . . .	119

---

4.6	Les concepts de base de SolidWorks . . . . .	121
4.7	Table de la machine . . . . .	121
4.8	Modèle de la poulie motrice . . . . .	122
4.9	Modèle de l'engrenage cylindrique à dentures droites . . . . .	123
4.10	Modèle de l'arbre de transmission . . . . .	123
4.11	Conditions sur la structure . . . . .	127
4.12	Conditions sur la structure . . . . .	127
4.13	Contraintes principale maximale . . . . .	128
4.14	Déformations élastique équivalente . . . . .	128
4.15	Conditions de la torsion . . . . .	129
4.16	Déplacement total . . . . .	129
4.17	Contrainte élastique équivalente . . . . .	129
4.18	Déformations élastique équivalente . . . . .	130
4.19	Contrainte élastique équivalente de la lame à quatre parties actives . . . . .	130
4.20	Contrainte élastique équivalente de la lame à quatre parties actives . . . . .	131
4.21	Contrainte élastique équivalente de la lame avec pastilles . . . . .	131
5.1	Objectifs de la maintenance . . . . .	134
5.2	Diagramme synthétisant les méthodes de maintenance . . . . .	135
5.3	Échelle de gravité . . . . .	138
5.4	Échelle de la fréquence . . . . .	138
5.5	Échelle de la non-détection . . . . .	139
5.6	Échelle de la criticité . . . . .	139
5.7	Groupe d'alimentation . . . . .	140
5.8	Organes de transmission de puissance . . . . .	141
5.9	Découpe par jet d'eau . . . . .	144
5.10	Découpe par Plasma . . . . .	144

5.11 Découpe par Laser . . . . .	145
5.12 Découpe par EDM . . . . .	145

# Nomenclature

<b>C</b>	Couple	<b>N.m</b>
<b>i</b>	Rapport de transmission	
<b><math>\omega</math></b>	Vitesse angulaire	<b>rd/s</b>
<b>N</b>	Vitesse de rotation	<b>tr/min</b>
<b>V</b>	Vitesse tangentielle	<b>m/s</b>
<b>Z</b>	Nombre de dents	
<b>P</b>	Puissance	<b>W</b>
<b><math>P_{eff}</math></b>	Puissance effective	<b>W</b>
<b><math>P_n</math></b>	Puissance nominale	<b>W</b>
<b>E</b>	Entraxe	<b>m</b>
<b>L</b>	Longueur de la courroie	<b>m</b>
<b>T</b>	Tension sur le brin tendu	<b>N</b>
<b>t</b>	Tension sur le brin mou	<b>N</b>
<b><math>F_a</math></b>	Effort axial	<b>N</b>
<b><math>F_r</math></b>	Effort radial	<b>N</b>
<b><math>F_t</math></b>	Effort tangentiel	<b>N</b>
<b>R</b>	Réaction sur les paliers	<b>N</b>
<b>m</b>	Module	<b>mm</b>
<b><math>m_l</math></b>	Masse linéique	<b>g/m</b>
<b>f</b>	Coefficient de frottement	
<b>s</b>	Coefficient de sécurité	
<b><math>\sigma_t</math></b>	Contrainte normale de traction	<b>N/m<sup>2</sup></b>
<b><math>\sigma_f</math></b>	Contrainte normale de flexion	<b>N/m<sup>2</sup></b>
<b><math>\tau_t</math></b>	Contrainte tangentielle de torsion	<b>N/m<sup>2</sup></b>

$\tau_c$	Contrainte tangentielle de cisaillement	$N/m^2$
$\sigma_e$	Contrainte normale limite élastique	$N/m^2$
$\tau_r$	Contrainte tangentielle limite à la rupture en glissement	$N/m^2$
$M_t$	Moment de torsion	N.m
$M_f$	Moment de flexion	N.m
$d$	Diamètre primitif	$m$
$d_a$	Diamètre de tête	$m$
$d_f$	Diamètre de base	$m$
$h_f$	Hauteur du creux	$m$
$h_a$	Hauteur de saillie	$m$
$b$	Largeur de la denture	$m$
$k$	Coefficient de largeur	
$p$	Pas	$m$
$V_{hopper}$	Volume de la trémie	$m^3$
$Q_m$	Débit massique	$kg/s$
$e$	Épaisseur du plastique	$m$

## LISTE DES ABREVIATIONS

CAO	Conception Assisté Ordinateur
DIB	Déchets Industriels Banals
DIS	Déchets Industriels Spéciaux
DAE	Déchets d'Activités Économiques
DID	Déchets Industriels Dangereux
DAO	Dessin Assisté Ordinateur
DXF	Drawing eXchange Format
STL	STereo-Lithography
STEP	STandard for the Exchange of Product model data
IGES	Initial Graphic Exchange Standard
BTP	Bâtiments Travaux Publics
HLE	Haute Limite Elasticité
PET	PolyÉthylène Téréphtalate
PEHD	PolyÉthylène High Density
PELD	PolyÉthylène Light Density
PP	PolyPropylène
PVC	PolyChlorure du Vinyle
PS	PolyStyrène

# Introduction

---

## Introduction

Au sein de défi global qu'est le développement durable, nous nous trouverons obligés de trouver des solutions aux enjeux environnemental sur notre planète. Pour pourvoir y remédier, nous cherchons d'abord la cause de ces enjeux, la réponse est claire et évidente : les déchets de tout type qui sont principalement, les Déchets Industriels Spéciaux (**DIS**), les Déchets d'Activités Économiques (**DAE**), les Déchets Industriels Dangereux (**DID**) et les Déchets Industriels Banals (**DIB**). Le dernier type de déchets (**DIB**) existe majoritairement dans la planète sous forme de ferrailles, métaux non ferreux, les textiles, papier, verre et plastique. L'économie circulaire est alors un levier important pour relever ce défi pour les autorités publiques et les industriels. Le recyclage est l'un des leviers qui permet d'atteindre les objectifs d'économie de ressources et de diminution des gaz à effet de serre afin de mieux respecter les normes européennes et internationales sur l'environnement.

Le recyclage des matières plastiques dans les autres pays connaît depuis quelques années un développement important, il est devenu nécessaire pour des raisons écologiques et sous la contrainte de lois. Il est considéré, avant tout, comme une activité économique rentable, génératrice de revenus et créatrice d'emplois. Il est donc intelligent de réfléchir à enrichir notre pays avec une industrie basées sur le recyclage des produits comme le plastique.

Notre travail d'ailleurs tourne autour de cette problématique, qui vise à proposer un modèle du broyeur pour le plastique principalement mais pourra également faire l'affaire d'une initiation à des travaux futurs pour d'autres matériaux. Le modèle proposé sera renforcé avec une étude complète du broyeur allant de l'étude cinématique de tous les composants mécaniques ainsi que l'étude à la résistance en utilisant la **RDM** et les simulations numériques sur le modèle **CAO**.

Ce mémoire est divisé en cinq chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une présentation générale sur le recyclage, les différentes méthodes de récupération des déchets et leurs utilisations. Il comportera aussi les différents

---

types de déchets et leurs classifications.

Le deuxième chapitre concerne une vue globale sur les différents appareillages utilisées dans le broyage, leurs classifications par rapport aux déchets recyclés.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude mécanique de différents éléments principaux et le choix de leur matériaux respectifs. Le quatrième chapitre est dédié à la conception assistée par ordinateur de la machine en utilisant les nouvelles technologies en termes de modélisation et l'analyse numérique des constituants du broyeur, nous présentons les simulations numériques effectuées, leurs résultats et une discussion sur ces résultats afin de valider les calculs théoriques abordées dans le chapitre 3.

Le dernier chapitre qui est le chapitre cinq, sera consacré à une analyse de défaillance ainsi qu'un plan de maintenance préventive pour une meilleure durée de vie de la machine.

# Généralités sur la récupération des déchets en plastique

# Chapitre 1

## Généralités sur la récupération des déchets en plastique

### 1.1 Problématique

Selon un article de la revue scientifique « *Science Advanced* », la matière plastique qui s'est initiée il y a environ seulement une soixantaine d'années a connu une accélération de production qui a généré 8,3 milliards de tonnes, dont la plupart sont des produits jetables qui finissent par devenir déchets. Comme nous ne nous pouvons pas gérer ce qu'on ne mesure pas, une étude détaillée a été menée afin de mieux quantifier la totalité des matières plastiques produites. Le résultat était que sur les 8,3 milliards de tonnes produites, 6,3 milliards de tonnes se sont transformées en déchets plastiques et que 9% ont été recyclées. De ce fait, nous présentons dans le présent chapitre, l'intérêt majeur du recyclage de ces déchets pour l'industrie et pour l'environnement ainsi les méthodes utilisées [1].

## 1.2 Élimination des déchets en plastique

L'élimination des déchets plastique est un processus important pour le recyclage car pas toute la masse de déchets peut être recyclée.

### 1.2.1 Traitement et récupération des déchets

Dans l'industrie du plastique, la production, le traitement et l'utilisation de cette matière génèrent des déchets et ces derniers doivent être récupérés et traités d'une manière à :

- Économiser la matière vierge ;
- Éviter le problème d'évacuation et de remise en rebut ;
- Conserver la ressource naturelle.

### 1.2.2 La collecte et tri des déchets plastiques

La collecte est le procédé fondamental par lequel les matières recyclables sont acheminées vers des établissements de transformation. Les déchets plastiques sont collectés aux fins du recyclage plutôt que jetés aux dépotoirs après usages. Ils sont triés selon leurs types puis comprimés et emballés pour minimiser les coûts de transport, ensuite on les achemine vers les lieux de stockage ou de traitement.

### 1.3 Intérêt de la récupération des déchets plastiques

Durant ces dernières années plusieurs solutions sont adaptées, pour préserver ces sources potentielles d'énergie et de matière, afin de protéger la nature et la santé humaine de ces déchets éparpillés ou incinérés. L'intérêt croissant porté à la récupération et à la valorisation des déchets de matières plastiques est lié à leurs grandes quantités, à l'augmentation des coûts d'énergie et des matières premières. Le plastique jeté dans la nature ne pourri pas, ne se décompose pas, un sac plastique met 400 ans pour disparaître, une bouteille 1000 ans . Les déchets de plastiques peuvent présenter divers dangers pour l'environnement, ils contiennent des additifs (colorants, stabilisants et plastifiants) qui peuvent eux-mêmes renfermer des composés toxiques comme du cadmium et du plomb. Les plastiques brûlés dégagent des gaz toxiques qui peuvent attaquer les voies respiratoires, détruire la faune et la flore. Donc il est nécessaire de récupérer les emballages plastiques pour les recycler afin de faire des économies d'énergie et de protéger l'environnement.

#### 1) Importance quantitative des déchets :

Les matières plastiques occupent une place importante dans l'ensemble des produits de consommation, d'ailleurs aucun matériau de production n'a connu au cours des quarante dernières années une évolution aussi spectaculaire que les matières plastiques. En effet en 2000, 180 millions tonnes de matières plastiques synthétiques ont été produites dans le monde. À titre comparatif, la production d'acier est de 750 millions de tonnes et celle d'aluminium de 20 millions de tonnes. La croissance de la production des plastiques est de l'ordre de 3 à 8% par an depuis 10 ans.

## 2) Intérêt économique :

Le recyclage est crucial pour préserver la planète, déjà menacée par l'arrivée de l'industrialisation. La gestion de déchets ne révèle que des avantages pour l'écologie mais également pour l'économie. Et pour un système de gestion plus simple, la location de bennes à ordures est une excellente option.

À cet effet, plusieurs voies ont été proposées dont le traitement en vue de leur récupération, celle-ci a un impact économique certain (économie de matière, de matières premières et d'énergie) [4].

### 2.1) Économie de matière :

Le thermoplastique fondu redevient un objet plastique, il est donc possible d'économiser la matière par le recyclage mécanique. Les déchets de matières plastiques peuvent être recyclés selon différentes voies :

- Réinjection dans le cycle de production pour l'obtention du même produit (cas de la bouteille de PEHD).
- Utilisation avec un autre polymère pour en faire un alliage en vue de l'obtention d'autres produits. Cette opération nécessite l'étude préalable de la compatibilité de ces matériaux récupérés avec d'autres polymères.
- Réutilisation des matières plastiques dans la décoration (formation des objets de décoration avec les bouteilles de PET et PEHD après leur utilisation).

Le recyclage et la réutilisation des matières plastiques peuvent présenter la meilleure solution au problème des déchets solides. De bons résultats ont été obtenus dans ce sens au cours de ces dernières années.

## 2.2) Économie d'énergie :

L'incinération du plastique produit de l'énergie, une tonne de plastique dégage autant d'énergie qu'une tonne de fuel. Les déchets polymères représentent un potentiel énergétique susceptible d'être valorisé par incinération directe. Le haut pouvoir calorifique des matières plastiques permet d'expliquer ce type de valorisation. En effet lors de l'incinération de ces déchets, l'énergie dégagée peut être récupérée sous forme de chaleur ou de vapeur d'eau.

# 1.4 Mode de traitement des déchets en matière plastique

## Le recyclage

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets et de réintroduction des matériaux qui en sont issus dans le cycle de production d'autres produits équivalents ou différents. Le recyclage permet de réduire les volumes de déchets, et donc leur pollution, et de préserver les ressources naturelles en réutilisant des matières premières déjà extraites.

### 1.4.1 Le recyclage mécanique

Le recyclage mécanique est le procédé qui consiste à récupérer, puis broyer mécaniquement les déchets plastiques, afin de les réutiliser pour fabriquer de nouvelles pièces. Le recyclage mécanique est extrêmement simple lorsque les plastiques sont constitués d'une seule résine.

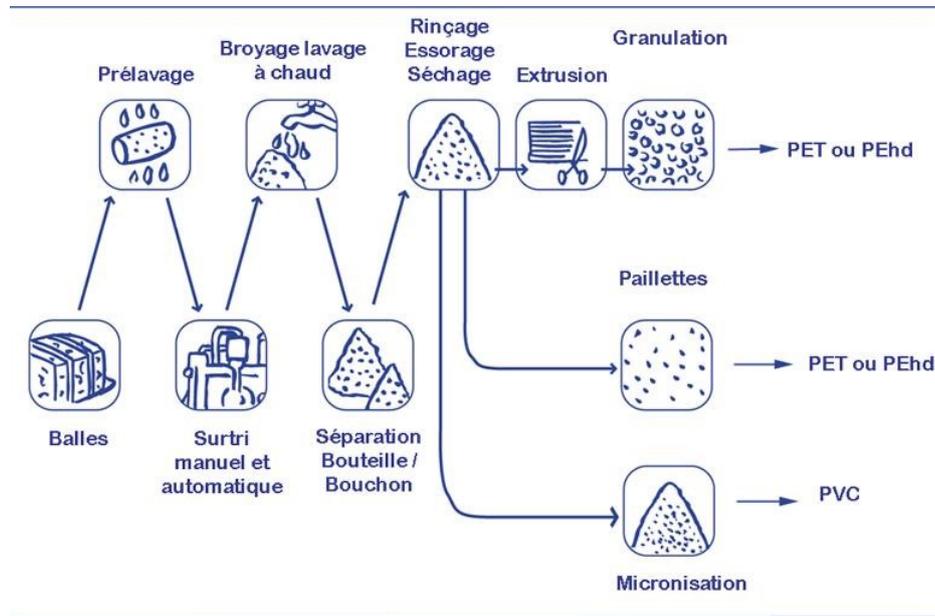


FIGURE 1.1 – Recyclage mécanique

### 1.4.2 Les étapes du recyclage mécanique

Le recyclage mécanique au niveau industriel s'opère en deux étapes essentielles qui sont la régénération puis le recyclage.

L'objectif de la régénération est de séparer le plastique de tous les autres constituants de l'objet. Les techniques varient d'une installation à l'autre en fonction des débouchés visés et des technologies disponibles lors de la conception de l'usine.

a) **Récupération et contrôle :**

Le régénérateur reçoit et pèse le camion de balles puis décharge les balles puis effectue le contrôle de conformité (mesure, pesage et dénombrement des contaminants)

b) **Déballage :**

Pour alimenter la ligne de régénération, l'opérateur coupe les liens puis pousse les balles dans une fosse ou une trémie. Le délitage se fait ensuite dans un trommel

(grand cylindre rotatif).

c) **Criblage :**

C'est l'élimination des particules fines (poussières, graines) et des étiquettes, sur un crible à axe rotatif ou dans un trommel par des secouements.

d) **Tris complémentaires :**

Différentes technologies de tri sont mises en œuvre pour séparer automatiquement en différents flux les éléments présents, selon la matière ou la couleur. Le tri automatique est le plus souvent précédé d'un contrôle manuel pour ôter de tous les objets indésirables (hétéroclites) dont la séparation ne peut pas être automatisée.

e) **Broyage**

Il consiste à couper ou déchiqueter les déchets plastiques en paillettes, on pourra ensuite séparer les différentes matières plastiques.

f) **Lavage :**

Le lavage facilite la séparation des contaminants et permet de nettoyer les paillettes de plastique. Il se fait avec des détergents (produits de lavage) ou simplement avec l'eau, dans une cuve d'immersion.

g) **Séparation :**

Elle peut être de deux types : par flottaison ou sédimentation ou bien séparation par cyclonage.

- La séparation par flottaison ou sédimentation consiste en une séparation des matériaux dans l'eau en fonction de leur densité.
- La séparation par cyclonage : les particules de plastique sont séparées dans l'air ou dans l'eau en fonction de leur taille et/ou de leur poids.

h) **Séchage et conditionnement :**

Le séchage s'effectue sur des machines à assécher.

i) **Extrusion-filtration-granulation :** En fonction de leur application, les paillettes

de plastiques sont fondues et passent à travers des filtres pour éliminer les dernières impuretés (fibre de papier, résidus d'aluminium). On forme ainsi des joncs puis des granulés, semblables à des résines plastiques vierges.

Ce type de recyclage reste limité pour différentes raisons : le problème du tri des différents polymères parmi les déchets plastiques, les problèmes de mise en œuvre des polymères recyclés et les dégradations des propriétés mécaniques de ces matériaux.

### 1.4.3 Recyclage chimique

Le recyclage chimique désigne un processus qui modifie la structure chimique des déchets plastique en les convertissant en molécules plus courtes prêtes à être utilisées pour de nouvelles réactions chimiques. Par exemple les processus comme la gazéification et la pyrolyse rompent les chaînes polymériques pour produire un gaz de synthèse, ainsi que des fractions liquides et semi-liquides. En outre, de nouveaux processus de dépolymérisation sont en voie de développement pour transformer certains types de plastiques en monomères, pouvant servir à la production de résines vierges. L'exemple le plus commun de recyclage chimique en Europe est, pour l'instant, l'utilisation de déchets plastique dans les hauts-fourneaux ; les plastiques y sont convertis en gaz de synthèse et remplacent le coke, le charbon ou le gaz naturel comme agent de réduction permettant de transformer le minerai de fer et les autres métaux oxydés en métaux purs.

## 1.5 Différentes procédés de transformation du plastique

Les matières plastiques ou polymères destinés à la transformation se présente sous forme de liquides, de poudres ou de granulés. Pour les transformer, il faut les mélanger et les fondre, y ajouter parfois des additifs (colorants, plastifiants. . . ) et les façonner en choisissant

parmi les huit principaux procédés, celui qui est le plus adapté à l'objet ou à l'emballage que l'on souhaite obtenir.

### 1.5.1 Calandrage

Le calandrage permet de fabriquer des produits semi-finis, comme des films. Dans une machine appelée calandre, les matières thermoplastiques, mélangées à des additifs et des stabilisants, sont écrasés entre plusieurs cylindres parallèles.

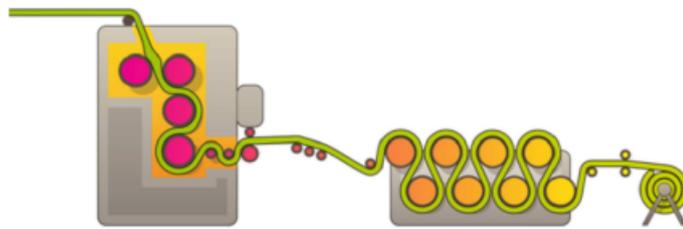


FIGURE 1.2 – Procédé de calandrage

#### Principe

- Elle le passe plusieurs fois entre les rouleaux pour une homogénéisation parfaite, un peu comme une guimauve.
- Pour permettre la gélification de la matière, celle-ci passe entre 2 calandres chauffées, réglées selon différents paramètres (température calandres, pressions, vitesse rotation...).
- L'écartement, la pression et le type de rouleaux vont donner les dimensions et les aspects des films (le grainage).
- Les films sont mis en bobine ou coupés et empilés pour faire des feuilles, aux dimensions et épaisseurs souhaitées des objets à former.

## Applications

Le calandrage permet de fabriquer des produits semi-finis : Des feuilles ou des films qui seront transformés par la suite pour devenir des pots, des barquettes ou des gobelets.

### 1.5.2 Thermoformage

Derrière ce terme compliqué se cache le procédé de fabrication qui permet de réaliser toutes sortes d'objets aux formes creuses. Concrètement, pour les emballages, le thermoformage permet de créer des barquettes, des gobelets ou encore des pots de yaourt.

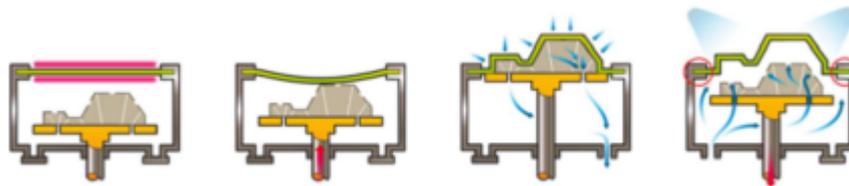


FIGURE 1.3 – Procédé de thermoformage

#### Principe

Le thermoformage est une technique de moulage.

- Mise en place de la feuille et chauffage par un plateau chauffant supérieur et inférieur.
- Montée du moule : la feuille est ramollie et le moule monte pour emboutir la feuille.
- Formage / Refroidissement : une fois le moule en position haute, le vide est fait entre le moule et la feuille.
- La feuille se plaque sur le moule et en prend sa forme. De l'air ou de petites

gouttelettes d'eau sont projetées sur la pièce pour la refroidir et lui donner sa forme finale.

- De l'air est soufflé à l'intérieur du moule pour décoller la pièce du moule et celui-ci descend pour libérer la pièce.
- Une fois le moule descendu, la pièce peut être enlevée puis décortiquée pour enlever les chutes de production (cercle rouge).

### Applications

- Jouets (bac à sable, toboggans...)
- Pots de yaourt
- Blister Gobelets et barquettes

### 1.5.3 Injection

Les jouets et les figurines en plastique ont été façonnés à partir de cette technique de moulage appelée l'injection. C'est un procédé de fabrication qui permet de créer des objets moulés avec des formes compliquées en grande série. Cette technique est parfaitement adaptée pour la réalisation de pièces de très petite ou de grande taille (de quelques dixièmes de grammes à plusieurs kilogrammes).

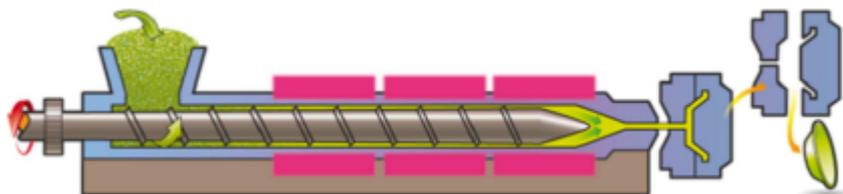


FIGURE 1.4 – Procédé d'injection

## Principe

Avant de ressembler à des jouets sophistiqués, les Playmobil ou les Legos n'étaient que des granulés.

- La matière plastique est versée dans la trémie de la presse à injecter.
- Elle est chauffée et malaxée par une vis sans fin. Les granulés deviennent liquides et se mélangent.
- La pâte est injectée sous pression vers un moule en acier verrouillé.
- Le plastique chaud prend la forme du moule plus froid et se solidifie à mesure que la température baisse. Et voilà, le produit fini !

## Applications

- Médical : Instruments médicaux à usage unique
- Automobile : tableau de bord voiture, pièce sous capot moteur
- Loisir : télévision, téléphone portable...
- Électroménagers : cafetière, robot...
- Emballages : préformes de bouteilles, seaux, pots

### 1.5.4 Injection soufflage

Pour la conception des bouteilles, des flacons ou encore des biberons, on utilise l'injection soufflage.

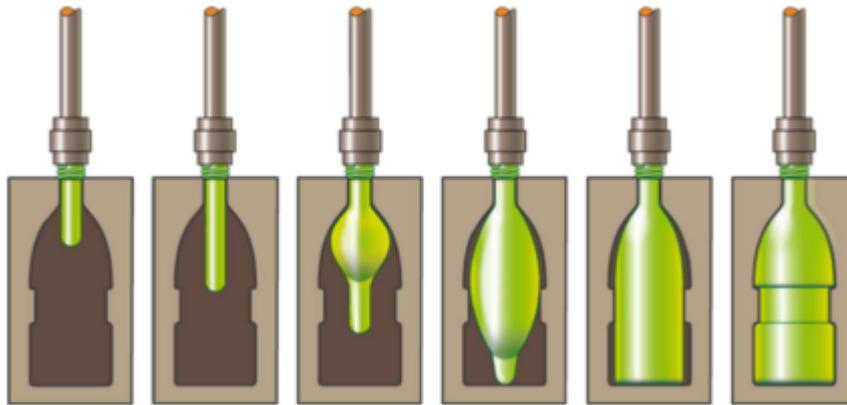


FIGURE 1.5 – Procédé d'injection soufflage

### Principe

L'injection-soufflage permet d'avoir une cadence très élevée dans le cycle de fabrication qui se déroule en deux grandes phases. Dans l'atelier d'injection, on fabrique d'abord une préforme, pour façonner, une sorte d'éprouvette avec le goulot de la bouteille.

Vient ensuite le soufflage, proprement dit.

- Dans l'atelier de soufflage, on chauffe de nouveau le plastique du tube que l'on va étirer dans un moule à l'aide d'une tige.
- Pour que la matière prenne parfaitement la forme du moule, on lui envoie un jet d'air très puissant (le soufflage).
- Le moule est ensuite refroidi et s'ouvre, la bouteille apparaît.

L'application la plus connue de genre de méthode est bien les bouteilles d'eau et de Soda.

### 1.5.5 Extrusion :

L'extrusion est le procédé de transformation qui sert à fabriquer des pièces en longueur comme des tuyaux, des gouttières ou des tubes... De dentifrice par exemple.

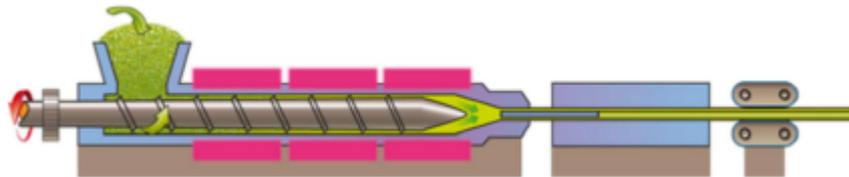


FIGURE 1.6 – Procédé d'extrusion

#### Principe

- On verse le polymère sous forme de granulés ou de poudre solide dans la trémie de l'extrudeuse ;
- La matière est entraînée par la vis sans fin qui tourne dans un cylindre chauffé ;
- Elle se liquéfie sous l'effet de la chaleur et de la friction ;
- La vis entraîne le plastique vers la sortie. La tête de sortie (pièce en acier aux formes variées) donne sa forme au produit au plastique qui est ensuite refroidi.

Avant de l'aplatir entre des rouleaux, on forme des soufflets et on prédécoupe les sacs.

#### Applications

- Bâtiment : profilés des fenêtres, gouttières, tubes d'évacuation...
- Médical : tubes perfusion...
- Emballages : tubes, pailles...

### 1.5.6 Extrusion gonflage

Ce procédé est un dérivé de l'extrusion, il consiste à souffler en continu de l'air à l'intérieur d'un tube appelé paraison pour la faire gonfler. Ce procédé ne nécessite pas de moule, c'est l'air soufflé qui donne la forme et le refroidissement. Cette technique permet de fabriquer des sacs plastiques.

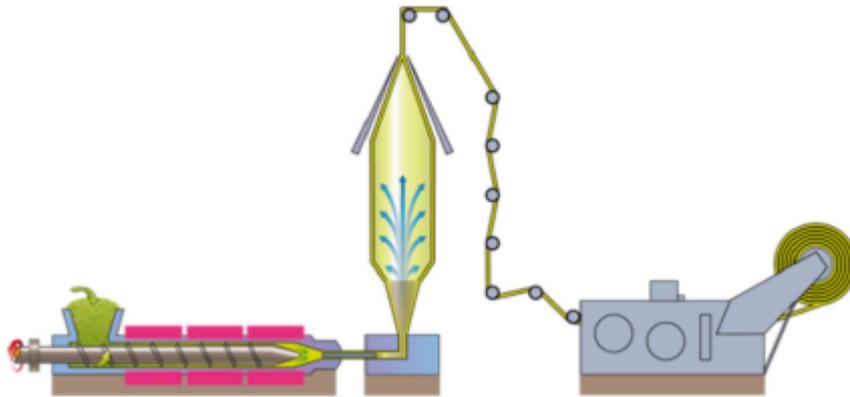


FIGURE 1.7 – Procédé d'extrusion gonflage

#### Principe

En phase initiale, le principe est le même que celui de l'extrusion classique mais il n'y a pas de forme à la sortie de l'extrudeuse.

- On insuffle de l'air comprimé dans le plastique ramolli.
- Il se gonfle alors et s'élève verticalement comme une bulle de film très fin. On le laisse ensuite refroidir.
- Avant de l'aplatir entre des rouleaux, on forme des soufflets et on prédécoupe les sacs.
- On les enroule sur des bobines ou on forme des rouleaux.

## Applications

Fabrication des sacs plastiques, de sacs poubelles, films étirables.

### 1.5.7 Extrusion soufflage

Ce procédé consiste à combiner la technique de l'extrusion avec celle du soufflage. Il permet de fabriquer des objets creux comme les bouteilles de lait ou les flacons de lessive par exemple.

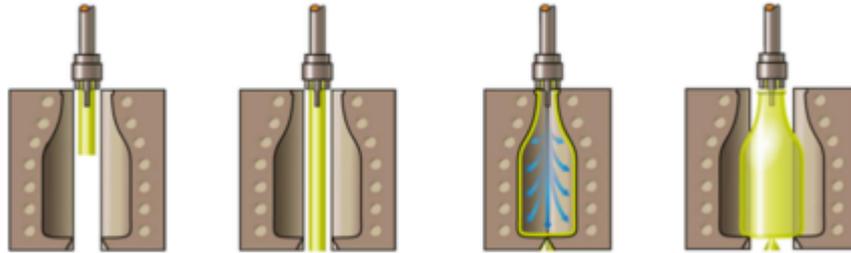


FIGURE 1.8 – Procédé d'extrusion soufflage

#### Principe

On réalise d'abord un tube par extrusion simple.

- Le tube extrudé (appelé paraison) est enfermé dans un moule de soufflage (2 demi-coquilles ayant la forme désirée).
- La paraison présente un orifice à son extrémité, qui est pincée (là où sera l'ouverture finale du récipient).
- Puis de l'air est injecté dans le moule afin que le tube adopte parfaitement les parois où il est très rapidement refroidi. Il suffit alors de démouler l'objet ainsi

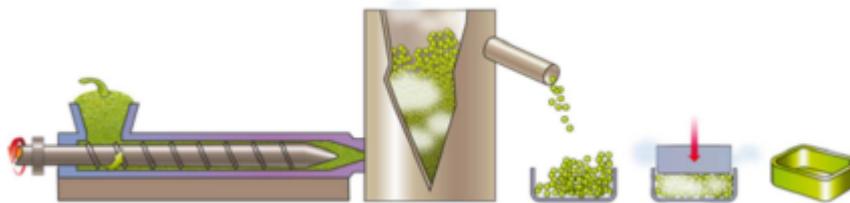
fabriqué et le tour est joué.

## Applications

- Flacons, bouteilles, bidons.
- Pièces pour l'automobile.

### 1.5.8 Expansion moulage

Le dernier procédé de transformation est appelé expansion moulage. Il sert à fabriquer toutes sortes d'emballages en polystyrène expansé.



**FIGURE 1.9 – Procédé d'expansion moulage**

## Principe

- Avant d'être expansé, le polystyrène se présente sous forme de petites billes qui renferment des micro-inclusions de gaz (à l'état liquide).
- Au contact de la vapeur d'eau, la matière plastique se ramollit et le gaz qu'elle contient se dilate.
- Les billes gonflent grâce à l'air qu'il contient, comme le pop-corn, mais avec une forme plus régulière.

- Cette première expansion est réalisée en usine dans de grandes cuves en inox et permet d'obtenir jusqu'à 30 fois le volume initial des petites billes de polystyrène.
- Ensuite, on sèche les billes pré-expansées dans un silo et on les introduit dans un moule fermé, soumis à une nouvelle injection de vapeur d'eau. Les billes reprennent leur expansion, occupent tout l'espace du moule et se soudent entre elles pour obtenir la forme désirée de l'emballage.

## 1.6 Conclusion

Suite à cette brève présentation des différentes étapes que doit subir la matière usagée en vue d'une réintroduction dans le processus de fabrication et les différents procédés de transformation de plastique, le broyage est une étape indispensable dans le processus de recyclage et pour cette raison nous consacrons le chapitre III en l'étude d'un broyeur pour le plastique. En outre, nous présentons d'abord dans le chapitre II, des généralités sur le broyage et les broyeurs.

# Généralités sur les broyeurs

# Chapitre 2

## Généralités sur les broyeurs

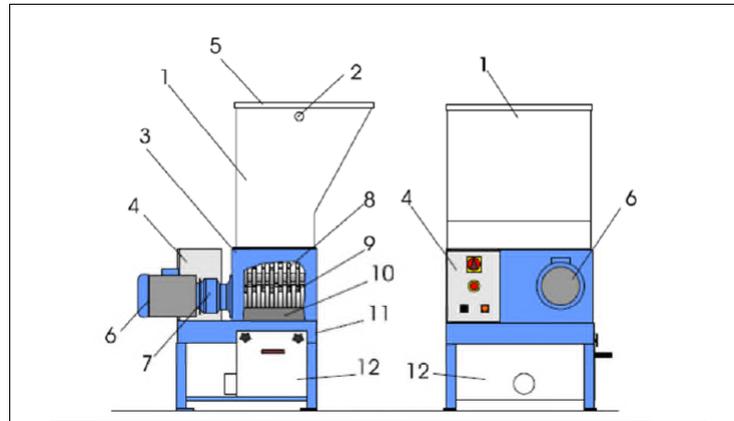
### 2.1 Définition d'un broyeur

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

- Lorsque les déchets de fabrication sont réutilisés directement dans le cycle de production (matières plastique) ;
- Lors de la mise en place de processus de production utilisant comme matière première les déchets d'autres processus industriel (Recyclage).

## 2.2 Composition d'un broyeur

Nous décrivons la composition d'un broyeur sur la figure et le tableau suivants :



Numéro	Désignation
1	Trémie du chargement
2	Orifice de levage et de transport
3	Corps de la machine
4	Tableau électrique
5	Couvercle de la trémie
6	Moteur
7	Réducteur
8	Disque d'introduction
9	Éléments de coupe
10	Grille
11	Base de la machine
12	Récipient avec goulot de récupération.

TABLE 2.1 – Les différents composants dans un broyeur

## 2.3 Approche générale de la technologie du broyage

La fragmentation est une opération consistant à réduire le volume individuel de particules solides à un degré déterminé et/ou à augmenter la surface développée de l'unité de masse (surface spécifique) de particules solides. La réalisation de la division des corps solides, par effet mécanique, peut concerner soit la réduction en fragments de dimensions prédéterminées d'un ou de plusieurs solides, soit la réduction d'un ensemble de solides déjà divisés jusqu'à des grains de plus petite taille.

Donc, le broyage est l'ensemble des opérations conduisant, par l'application de contraintes mécaniques externes, à la division d'une masse solide en fragments de dimensions inférieures. Son efficacité est toujours évaluée par une mesure de l'accroissement de la finesse. Les sollicitations mécaniques accroissent l'énergie libre des matériaux, qui va se convertir en énergie de surface en engendrant alors la fragmentation. Différents types de broyages existent :

- Le *concassage* : encore appelé broyage grossier, il conduit à des particules de quelques centimètres à quelques millimètres.
- La *désintégration* : est la réduction des dimensions des matières tendres, agglomérées ou fibreuses.
- La *pulvérisation* : conduit à des particules inférieures à 0,1 millimètre.
- La *micronisation* : (ou broyage ultra-fin) produit des particules jusqu'à micromètre.

## 2.4 Physique de la fracture

Les particules se cassent quand une force est exercée sur elles et cause ainsi une déformation.

Quand une certaine quantité d'énergie, résultat de cette force et de la déformation, est

appliquée, le processus de broyage commence. La déformation et les contraintes dans une particule sont fonction des propriétés des matériaux.

### 2.4.1 Propriétés élastiques et plastiques des matériaux

Les propriétés des matériaux peuvent être décrites par la courbe contrainte-déformation (Figure 3.1). Pour une déformation maximale, le matériau se casse. La figure montre que nous pouvons distinguer deux zones et une intermédiaire : une zone de déformation dite élastique c'est-à-dire le matériau reprend sa position initiale à l'équilibre, cette zone est le résultat des efforts appliqués de faible intensité, la déformation est proportionnelle à la charge appliquée. La deuxième zone est appelée zone de déformation plastique, la déformation dans cette zone est *permanente* c'est-à-dire si nous supprimons les efforts appliqués, le matériau ne reprend pas sa position initial. Cette zone est la conséquence des efforts appliqués ayant une intensité élevée. La zone intermédiaire est la zone élasto-plastique, elle est la transition de la zone élastique vers la zone plastique. À partir d'une valeur maximale de la charge, le matériau continue de s'allonger, même sous charge réduite ; une striction commence et s'achève par une *rupture*. La limite de la zone élastique est notée comme la *contrainte limite d'élasticité* ( $\sigma_E$ ) or que la pente de la droite qui est une caractéristique mécanique du matériau est appelée *Module d'élasticité*  $E$ . Selon les déformations nous pouvons distinguer :

- Déformation élastique : matériau *fragile* ;
- Déformation élastique et plastique : matériau *semi-fragile* ;
- Déformation plastique : matériau *ductile*.

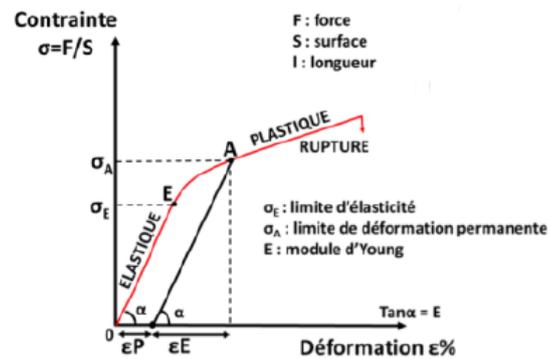


Fig.4 : Courbe contrainte-déformations

## FIGURE 2.1 – Courbe contraintes-déformations

### 2.4.2 Modes d'application des contraintes

La fragmentation des solides résulte de l'action d'un champ de contraintes engendré par des forces de contact (compression, cisaillement, torsion, flexion, attrition, plus rarement traction). Ce champ varie donc avec l'intensité et la distribution des forces, avec la nature, la forme et les discontinuités structurales du solide. Il varie aussi avec la dynamique des déformations. La répartition des contraintes induit un réseau de fissures dont la densité et l'orientation conditionnent la dimension et la forme des fragments et, par conséquent, la finesse.

- **Compression-cisaillement (a,b et c)** Le broyage a lieu essentiellement par *compression* (ou écrasement) et *attrition* (ou friction) entre les deux surfaces solides qui peuvent être celles de la machine ou celles des particules adjacentes. La contrainte est engendrée par le déplacement simultanément perpendiculaire et tangentiel des deux surfaces l'une par rapport à l'autre avec une vitesse relative

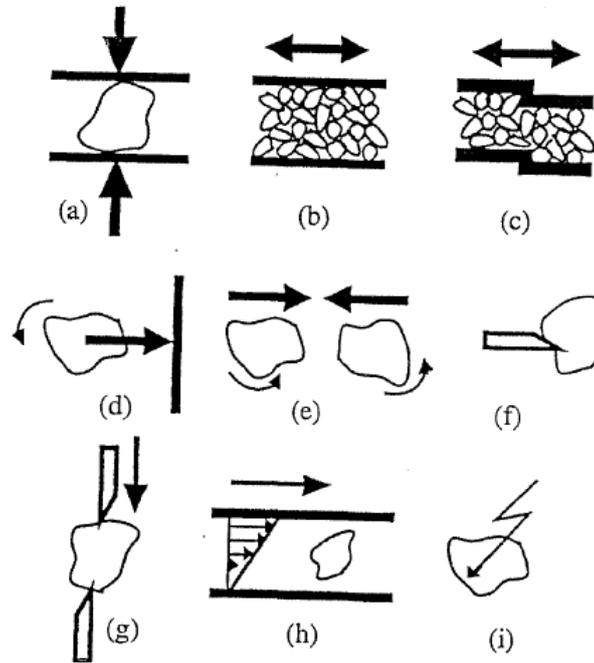


FIGURE 2.2 – Principaux modes d'application de contraintes

généralement inférieure à 10 m/s.

La compression ou l'écrasement sont généralement utilisés pour la fragmentation de solides durs en gros morceaux, alors que l'attrition par frottement sur une surface rugueuse donne plutôt des produits fins.

- **Impact (d,e et f)** Le broyage se fait grâce à l'impact des particules contre les parois de la machine ou des organes mobiles (boulets, marteaux, ... ) ou contre une autre particule (auto-broyage). L'intensité de la contrainte résultante est fonction de la vitesse relative des particules au moment de l'impact. Elle est généralement comprise entre 20 et 200 mis. La réduction par impact fournit, selon le cas, des tailles très différentes allant des tailles relativement grossières aux poudres fines.
- **Cisaillement (g)** La particule est prise en porte-à-faux entre les outils de coupe. L'énergie nécessaire à la fragmentation est fonction de la résistance du matériau au coupage et de la conception des outils de coupe dont la vitesse de déplacement

est généralement inférieure à 10  $\mu\text{m}$ . Le découpage et le cisaillement permettent d'obtenir des dimensions grossières et peu précises.

- **Cisaillement dans le champ de vitesse d'un fluide (h)**

Ce mode d'application de la contrainte de cisaillement n'est réellement efficace que dans le cas de solides très fragiles. En pratique, il est surtout utilisé pour la désagglomération dans des milieux très visqueux.

- **Apport d'énergie par un procédé non mécanique (i)**

L'énergie nécessaire à la fragmentation peut être d'origine thermique, thermoélectrique, ultrasonique ....

### 2.4.3 Mécanisme de fragmentation

Suivant le matériau traité et le mode de fragmentation mis en œuvre, différents mécanismes de fragmentation restent possibles. On considère en général trois grands types de mécanisme de fragmentation qui compte tenu de l'inhomogénéité de la répartition des défauts structuraux des particules, interviendront souvent simultanément :

#### **L'abrasion**

Elle consiste en une érosion de la surface des particules; elle génère deux grandes populations : la première de taille voisine de la particule abrasée, la seconde constitué par les fragments arrachés étant une population de particules beaucoup plus fines que la population de départ.

L'abrasion, a donné lieu à de nombreuses études notamment de la part des spécialistes de la fluidisation et des réacteurs catalytiques, domaine dans lesquels ce mode de fragmentation est généré par un phénomène indésirable : l'attrition. L'attrition est définie comme une usure de deux particules dures par frottement.

## **La désintégration**

Elle résulte d'un apport énergétique suffisamment intense pour engendrer une contrainte qui dépasse largement le point de fracture. Les particules ainsi générées sont de petite taille devant celle de la particule mère et la distribution de taille de ces fragments est très étalée.

## **Le clivage**

C'est un phénomène intermédiaire entre l'abrasion et la désintégration, engendre la production de particules du même ordre de grandeur que la particule mère, il résulte d'un apport énergétique juste suffisant à la propagation de fractures préexistantes.

## **2.5 Types des broyeurs**

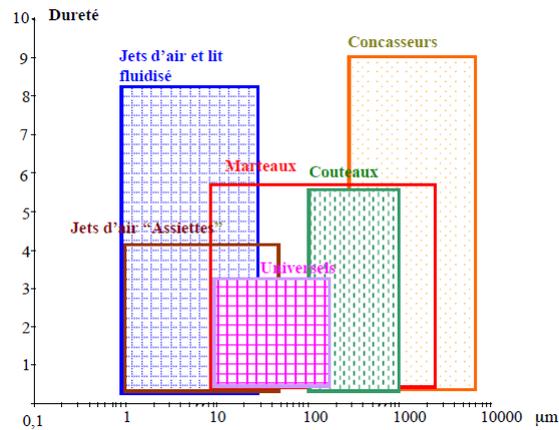
### **2.5.1 Classification des broyeurs**

Nous distinguons principalement huit types de broyeurs que nous présentons dans la figure ci-après, nous illustrons ces derniers en fonction de la dureté et la taille du produit à obtenir. Ces deux critères sont importants pour le choix de la technologie de broyage.

### **Broyeurs à fragmentation grossières**

#### **Broyeur à couteaux**

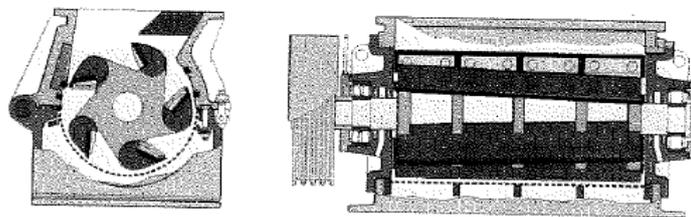
Parfois appelés granulateurs, ils mettent en œuvre un système rotor-stator qui cisaille le produit broyé. Leur capacité de production dépend de la puissance fournie (de l'ordre



**FIGURE 2.3 – Les différents types de broyeur en fonction de la dureté du matériau et de la taille du produit à obtenir.**

de 250 à 3500 Watts), de la vitesse du rotor ainsi que de la longueur et du nombre des couteaux dont la forme peut aussi éventuellement varier. Ces appareils sont particulièrement recommandés pour le traitement des matériaux fibreux tels que les légumes, les plantes aromatiques et certaines épices mais aussi pour les matières plastiques et le papier. Les tailles obtenues sont généralement de l'ordre de 1 à 6 mm

À titre indicatif, les débits peuvent être très importants et dépasser plusieurs dizaines de tonnes à l'heure comme lors du broyage des betteraves en sucrerie. Certains appareils sont munis de dispositifs d'alimentation permettant d'introduire des pièces de grandes tailles.

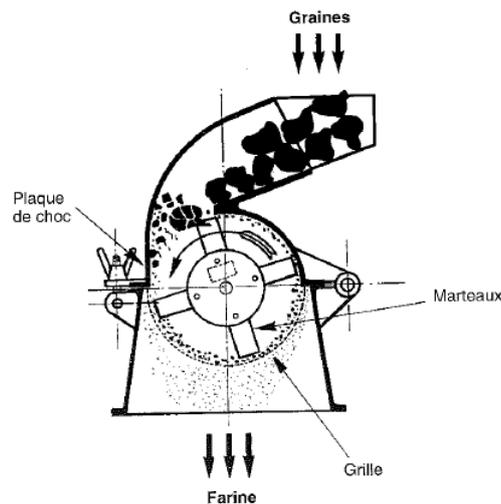


**FIGURE 2.4 – Schéma d'un broyeur à couteaux**

## Broyeur à marteaux

Ils produisent une réduction de taille par impact entre les particules et une surface dure. Les principaux facteurs régissant le procédé sont : la taille et la forme du tamis associé, le type de marteaux et la vitesse périphérique des marteaux (20 à 60  $m/s$ ).

Ces dispositifs couvrent une large gamme de distributions granulométriques, comme suit



**FIGURE 2.5 – Schéma d'un broyeur à marteaux**

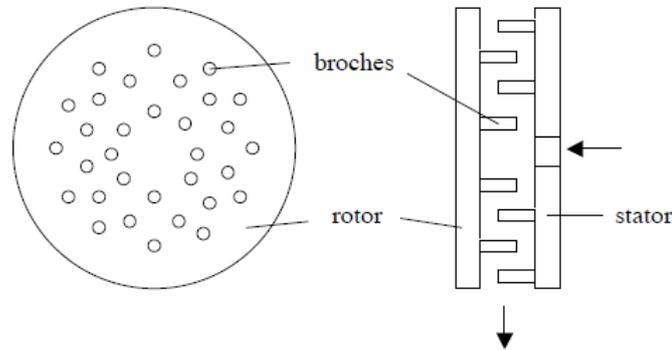
nous pouvons changer les marteaux et les grilles. Ils permettent de traiter des matériaux mous et de dureté moyenne avec des granulométries de sortie de 90 à 850  $\mu m$  pour des débits allant de jusqu'à 15 tonnes/heure. Certaines configurations permettent d'utiliser le broyage cryogénique de la manière suivante en se servant d'azote liquide pour refroidir et fragiliser les matériaux broyés. Ils sont également utilisés pour le traitement de produits fibreux, thermoplastiques ou sensibles à la chaleur.

## Broyeur universel (à broches)

Ils se caractérisent par l'interchangeabilité de couples rotor-stator (couteaux, marteaux, broches, disques de cisaillement) qui leur donne une grande diversité d'applications.

Ils sont souvent présents dans les laboratoires et en petite production industrielle.

Lors de l'utilisation d'un module rotor-stator de type disque à broches, le solide à broyer



**FIGURE 2.6 – Schéma d'un broyeur universel (à broches)**

entre par gravité au niveau de l'axe de la chambre de broyage et est projeté par la force centrifuge contre les broches fixes du stator. La vitesse du rotor peut atteindre des vitesses périphériques de l'ordre de 200 m/s. La taille des particules est, dans cette configuration, déterminée par le débit d'alimentation et la vitesse du disque à broches.

Ce type de broyeur présente un avantage énorme, du fait que le couple rotor-stator permet une grande flexibilité quant à la distribution granulométrique. Nous pourrions alors effectuer un broyage moyen et fin et même très fin ( $50$  à  $150\mu m$ )

### **Broyeurs 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 oeuvre de forces d'impact (les particules sont comprimées entre les corps broyant, projetées violemment contre une paroi, qui peut être fixe ou mobile, ou les unes contre les autres dans ce cas là on parlera d'auto broyage).



FIGURE 2.7 – Broyeurs à cylindres

### Broyeurs à fragmentation ultra-fine

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

L'énergie théorique nécessaire pour la réduction ultrafine des grains est toujours inférieure de 1% de l'énergie réelle dépensée.

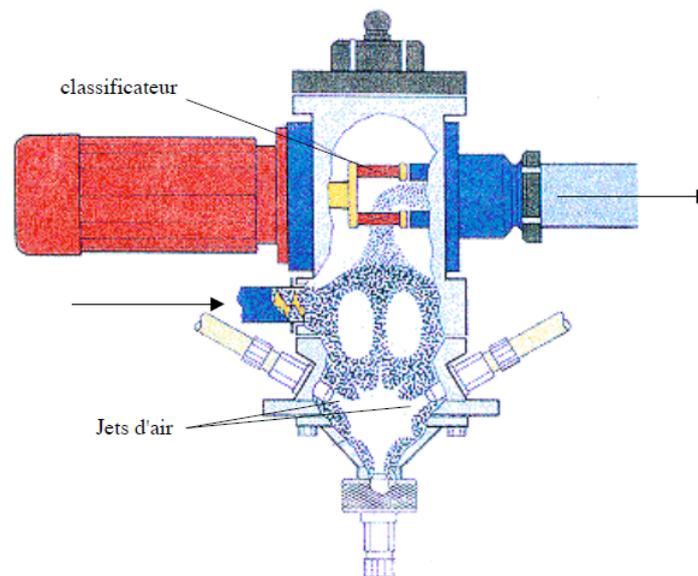


FIGURE 2.8 – Schéma d'un broyeur à jet de fluide avec classificateur intégré

## 2.6 Choix d'un broyeur

### 2.6.1 Critères du choix d'un broyeur

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 pour choisir un broyeur qui sont donnés comme suite :

#### 2.6.1.1 Selon la nature de la matière à broyer

On trouve par exemple dans ce critère ;

1) **Les paramètres intrinsèque du matériau :**

Ces paramètres permettent d'identifier le comportement du matériau lors du processus de déformation. Elles jouent aussi sur la formes des fragments ainsi que leurs tailles.

2) **Énergie 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.

3) **Vitesse de déformation :**

Elle conditionne le comportement du matériau à broyer.

4) **Réduction des dimensions du matériau :**

Cette dernière n'est pas illimité et souvent nécessite plusieurs équipements travaillant en série.

En effet la matière à broyer, par ses caractères physico-chimiques offre un critère de choix très important d'un broyeur, la technologie appliquée varie selon la matière à traiter. Nous citons les broyeurs de matière dure, du bois, d'emballage et de céréales.

#### **2.6.1.2 Selon les caractéristique techniques**

Ce critère englobe toutes les caractéristiques que nous pouvons trouver sur la fiche technique d'un broyeur et sont :

- La taille et le gabarit de la machine
- La puissance électrique du moteur
- La puissance mécanique sur les outils de coupe (ou bien rendement mécanique)
- Vitesse de rotation sur le rotor
- Capacité de charge et le volume de la trémie
- Le débit massique.

#### **2.6.1.3 Selon la fiabilité et la disponibilité**

Dès qu'on a déterminé la nature de 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 rechange 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.

## 2.7 Broyeurs pour le plastique

### 2.7.1 Introduction

Comme énoncé précédemment les broyeurs sont des machines permettant la réduction de la taille initiale d'un produit une raison bien spécifique. Les broyeurs de plastiques ont exactement les mêmes objectives et vu que le matériau à broyer est le plastique, ils utilisent les couteaux(lames) comme outil de coupe et le cisaillement comme principe de broyage.

### 2.7.2 Caractéristiques des broyeurs à plastique

Les broyeurs sont caractérisés principalement par leur puissance, leur débit massique et le matériau auquel ils sont destinés ainsi que leur vitesse. Ils sont dotés d'une unité de chargement qui est souvent une simple trémie, cette partie remplit une fonction qui n'est pas négligeable, 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 du broyeur est réalisée par une série d'éléments tranchants (couteaux, lames. . . etc.) qui coupent le plastique en se croisant. Les éléments principaux du système sont les arbres qui portent des couteaux ou des lames, et la motorisation du groupe de broyage est assurée habituellement par un moteur électrique asynchrone, qui permet à travers un réducteur de vitesse, de transmettre sa puissance aux arbres ayant les éléments tranchants, afin d'exercer les forces nécessaires au broyage.

## 2.8 Conclusion

Après avoir tout les critères du choix et les types existants pour mener une bonne étude commençant par le bon choix, et le broyeur le mieux adapté à notre besoin et bien le broyeur à couteaux (à lames). Il est à noter que tous les types et tailles de broyeurs déjà évoqués rendent les des machines impressionnantes et d'une utilité importante.

Étude théorique des éléments constituant  
le broyeur et choix des matériaux

# Chapitre 3

## Étude théorique des éléments constituant le broyeur et choix des matériaux

### 3.1 Étude cinématique du broyeur

#### 3.1.1 Introduction

La modélisation cinématique des mécanismes a pour objet la constitution d'un outil de calcul permettant de valider ou vérifier les performances mécaniques d'un système.

Le graphe des liaisons en est la forme la plus fondamentale. Le schéma cinématique est un outil d'analyse fonctionnelle qui a pour vocation de modéliser les mouvements entre les différentes classes d'équivalence préalablement identifiées.

Ce schéma cinématique prend appui sur le graphe des liaisons, ainsi que sur l'analyse des géométries de contact de chacune des liaisons, qui permettent d'identifier le nom des liaisons.

Un schéma cinématique sera donc un modèle qui définira de quelle façon la cinématique se transmet entre l'entrée et la sortie du mécanisme.

Il sera utilisé dans plusieurs cadres d'étude :

- **Étude cinématique** : Loi entrée-sortie par fermeture cinématique.
- **Étude statique** : Modélisation des efforts dans les liaisons.
- **Étude géométrique** : Loi entrée-sortie par fermeture géométrique.
- **Étude de conception** : recherche d'un moyen de transmission de mouvement.

### 3.1.2 Considérations générales sur les contacts

On considère les points suivants :

- Les contacts mécaniques entre pièces sont supposés parfaits, sans jeu.
- Les surfaces fonctionnelles sont géométriquement exactes, sans frottement ni adhérence et sans déformations sous charge.
- La modélisation des liaisons est basée sur l'analyse des surfaces de contact entre les groupes cinématiques liés.

### 3.1.3 Identifications des liaisons

En construction mécanique pour étudier les mouvements d'un mécanisme, on construit des modèles qui mettent en évidence les relations cinématiques entre ses constituants. C'est pourquoi il est intéressant de modéliser les liaisons mécaniques, c'est à dire les possibilités de mouvements compatibles avec les surfaces de contact.

- **Liaisons élémentaires ou simples :**

On appelle liaison élémentaire de deux solides  $S_1$  et  $S_2$ , tout contact mécanique de  $S_1$  et  $S_2$  s'effectuant suivant deux surfaces parmi les surfaces élémentaires suivantes : **surfaces planes, surfaces cylindriques, surfaces sphériques.**

- **Liaisons composées :**

On appelle liaison composée, toute liaison entre deux solides  $S_1$  et  $S_2$  s'effectuant au moyen d'au moins deux liaisons élémentaires. Essentiellement à cause des problèmes de fabrication, il est très rare de trouver des liaisons pivot, glissière, hélicoïdale et sphérique à doigt réalisées de façon élémentaire.

- **Liaisons obtenues par l'ajout d'un autre élément :**

Certaines liaisons dans les mécanismes n'utilisent pas le principe de contact direct entre les deux solides. Grâce à l'interposition d'éléments glissants ou roulants entre les solides, il est possible d'obtenir des mouvements relatifs plus performants d'un point de vue énergétique. Ces éléments peuvent être des coussinets, des roulements à billes ou à rouleaux, les vis à billes ainsi que les rotules lisses.

### 3.1.4 Représentation schématique des éléments cinématiques

#### 3.1.4.1 Transmission par adhérence : Roue de friction

— **Principe**

Soient deux solides  $S_1$  et  $S_2$  constamment en contact suivant leur tangente commune ( $\Delta_{12}$ ) au point de contact M,  $S_1$  tournant à  $\Delta_1$  et  $S_2$  à  $\Delta_2$ .

S'il n'y a pas de glissement (pas de mouvement relatif) entre  $S_1$  et  $S_2$ , on a :

$$V = r_1\omega_1 = r_2\omega_2$$

Il vient :

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{r_1}{r_2}$$

Cependant, ce rapport n'est pas rigoureusement constant du fait du glissement relatif entre les deux surfaces en contact.

La représentation normalisée est la suivante :

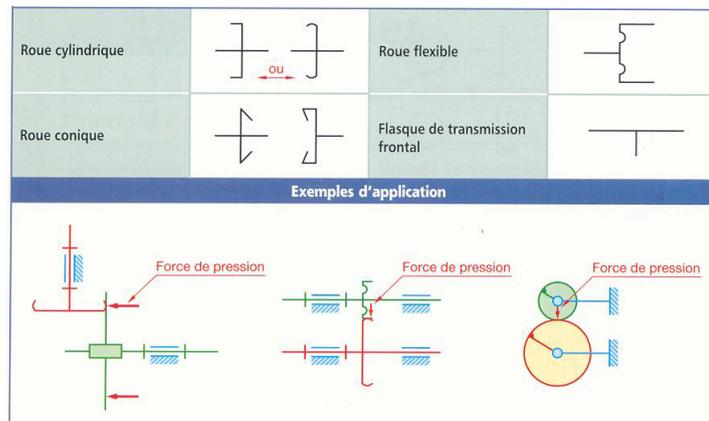


FIGURE 3.1 – Schéma d'une transmission par roue de friction

### 3.1.4.2 Transmission par obstacles : Engrenages

Pour transmettre une puissance donnée entre deux arbres rapprochés avec un rapport de transmission rigoureusement constant, on utilise des roues dentées qu'on appelle engrenages. Ces engrenages transmettent la puissance demandée par obstacle avec un rendement élevé.

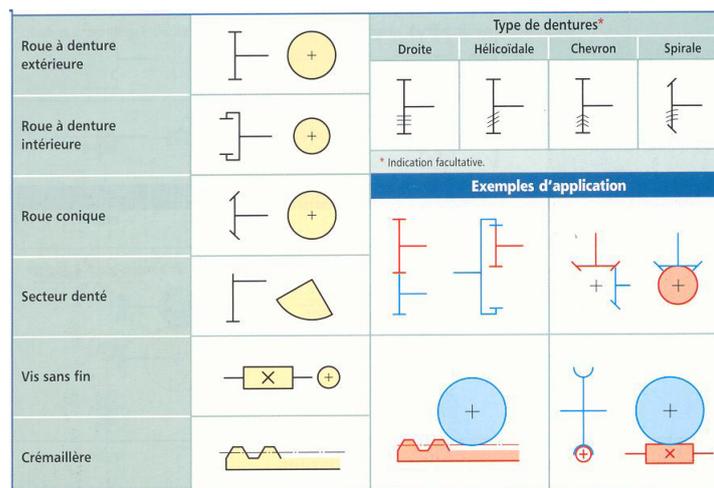


FIGURE 3.2 – Schéma d'une transmission par engrenages

### 3.1.4.3 Transmission par lien souple : poulie-courroie

Les courroies sont des éléments flexibles qui permettent la transmission de puissance entre deux arbres éloignés, l'un est moteur, l'autre est récepteur. Leur utilisation permet un fonctionnement silencieux, un montage et un entretien facile, un amortissement des chocs, des vibrations et des à-coups, des frais d'installation peu élevés, etc. cependant, le rapport de transmission entre les deux arbres n'est pas constant du fait du glissement fonctionnel entre les courroies et les poulies.

- **Avantages :**

- Rigidité en torsion assez faible, ceci permet leur utilisation lorsque les axes des poulies ne sont pas parallèles (possibilité d'utiliser des galets intermédiaires).
- Solution économique.
- Fonctionnement silencieux.
- Amortissement des à-coups grâce à l'élasticité des courroies.

- **Inconvénients**

- Matériaux des courroies non adaptés à des conditions difficiles (température élevée par exemple).
- Durée de vie limitée.
- Nécessite une surveillance périodique en vue du remplacement de la courroie.
- Glissement (sauf pour courroie crantée).

### Représentation normalisée d'une transmission par courroie :

Elle est illustrée dans la figure ci-après pour différentes vues et types (simples et étagées) ainsi que la liaison avec l'arbre.

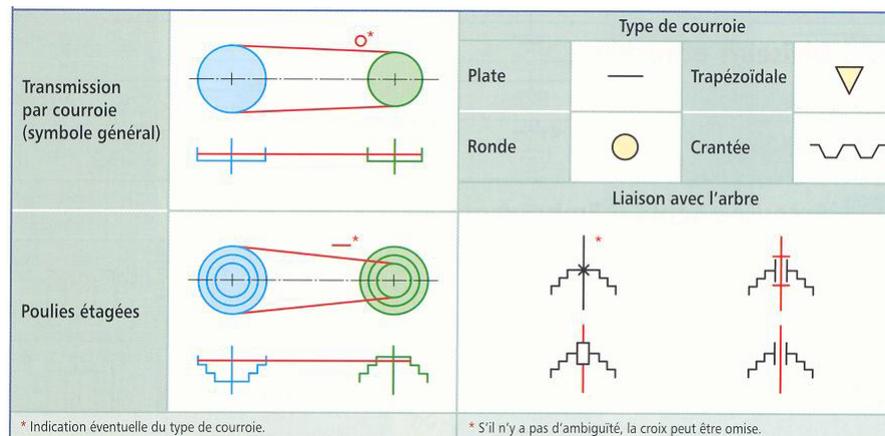


FIGURE 3.3 – Schéma d'une transmission poulie-courroies

### 3.1.4.4 Transmission par lien flexible : Pignon-chaîne

Les chaînes, comme les courroies trapézoïdales, sont des éléments flexibles qui permettent la transmission de puissance entre deux arbres parallèles éloignés. Elles sont constituées de maillons articulés en acier résistant, ce qui leur permet de supporter des efforts plus élevés que ceux appliqués aux courroies.

On distingue deux types de chaînes :

- Les chaînes de transmission de puissance (exemple : chaîne dans les moteurs à combustion interne)
- Les chaînes de manutention (déplacement ou levage d'une charge) : exemple : chaînes à maillons soudés.

- **Avantages :**

- Transmission de couples très importants.
- Aucun glissement.

- **Inconvénients**

- Bruyant et nécessite une lubrification.

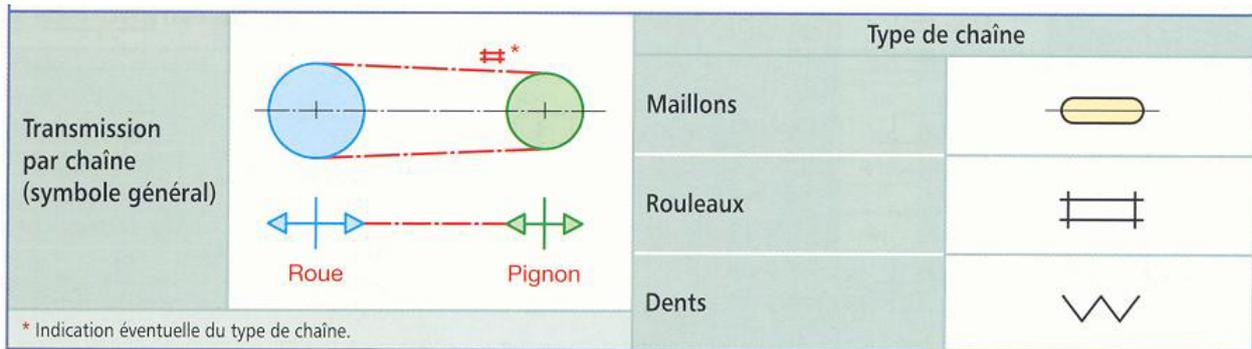


FIGURE 3.4 – Schéma d’une transmission roue dentée-chaîne

### 3.1.5 Établissement du schéma cinématique du broyeur

La chaîne cinématique est un ensemble de pièces destiné, au sein d’une machine, à transmettre ou transformer un mouvement. On peut la modéliser à l’aide d’un schéma cinématique.

Le schéma cinématique de notre broyeur sera comme suit :

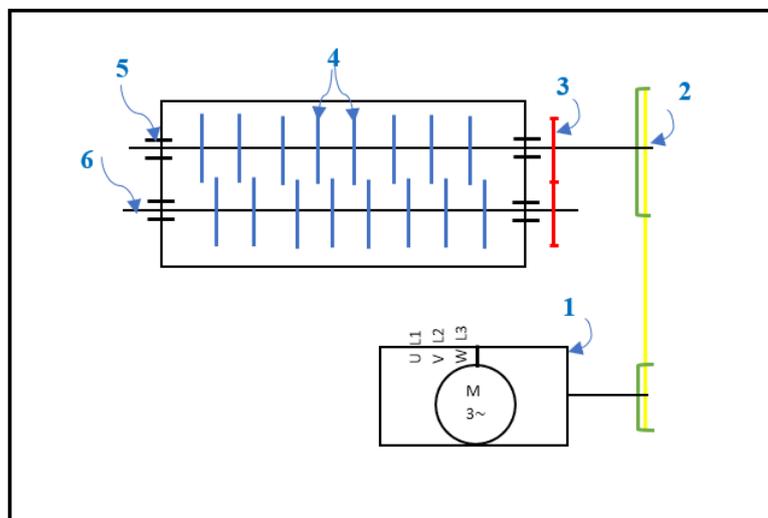


FIGURE 3.5 – Chaîne cinématique du broyeur

Référence	Désignation
1	Moteur électrique
2	Transmission par poulie courroie
3	Transmission par engrenages
4	Éléments de coupe
5	Roulements
6	Arbre porteur des lames

**TABLE 3.1 – Schéma cinématique**

### 3.1.5.1 Explication du schéma cinématique

Le moteur électrique constitue la source d'énergie et de puissance de toute la machine, la puissance de ce moteur est transmise au 1<sup>er</sup> arbre contenant les lames de notre broyeur par le biais d'un système de transmission par lien souple est donc système poulie-courroie que nous allons dimensionner plus tard. Ce système sert également à réduire la vitesse de rotation sur l'arbre récepteur afin d'augmenter le couple pour un meilleur rendement du broyage. Par la suite, le 2<sup>ème</sup> arbre est entraîné en rotation grâce à un système de transmission par obstacles, plus précisément, par engrenages et ceci est afin d'assurer un rapport de transmission rigoureusement constant pour des engrenages ayant le même nombre de dents ou bien même diamètre primitif. Les éléments de coupe ou bien les lames du broyeur sont montées et mises en rotation sur leurs arbres respectifs grâce à la forme prismatique de l'arbre (arbre hexagonale) Le guidage en rotation est assuré par des roulements à billes que nous dimensionnons plus tard dans ce chapitre.

## 3.2 Étude théorique des éléments de machine :

### 3.2.1 Choix du moteur

#### 3.2.1.1 Introduction

Les moteurs électriques sont de nos jours, à l'exception des dispositifs d'éclairage, les récepteurs les plus nombreux dans les industries et les installations tertiaires. Leur fonction, de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique, leur donne une importance économique toute particulière qui fait qu'aucun concepteur d'installation ou de machine, aucun installateur et aucun exploitant ne peut les ignorer.

De ce fait, nous devons étudier les besoins en puissance de notre machine pour pouvoir choisir le moteur électrique adéquat pour notre cas.

#### 3.2.1.2 Calcul de l'effort de coupe $F_c$

Comme convenu, notre broyeur sert principalement au recyclage des déchets en plastique en les broyant après avoir été triés. Donc, en se basant sur les caractéristiques mécaniques du plastique et les considérations géométriques de notre machine, nous pouvons estimer la puissance nécessaire pour le broyage du plastique. Le plastique coupé est sollicité en cisaillement - nous considérons un effort de coupe concentré sur une lame regroupant l'ensemble -, nous aurons alors les relations suivantes :

$$\tau \leq \tau_r \Rightarrow \frac{F_c}{S} \leq \tau_r \quad (3.1)$$

Où :

—  $\tau$  représente la contrainte de cisaillement [MPa];

- $\tau_r$  est la contrainte de rupture en cisaillement du plastique [**MPa**];
- $F_c$  est l'effort de coupe appliquée par la lame sur le plastique [**N**];
- $S$  est la surface cisailée en  $mm^2$

Dans notre cas, nous avons opté pour un système fonctionnant avec 8 lames d'une longueur de 15 mm chacune, ce qui nous fait une longueur totale des lames de 120 mm. L'épaisseur du plastique que nous avons choisie est de  $e = 2mm$ , cette épaisseur dépasse l'épaisseur des bouteilles de plastique suivant les normes agro-alimentaire qui est de  $300\mu m$  ce qui nous permet de surdimensionner notre broyeur pour des produits plus épaisses que les bouteilles PET.

D'autre part, la documentation technique nous donne la contrainte à la rupture du plastique en traction  $\sigma_r$ , mais nous avons besoin de la contrainte de rupture en cisaillement notre cas. Toutefois, Technique de l'Ingénieur nous permet de trouver cette dernière à partir de celle en traction par la relation suivante :

$$\tau_r \approx 0,7\sigma_r \quad (3.2)$$

La contrainte de rupture en traction  $\sigma_r$  est donnée selon la nature de plastique (Polyéthylène Haute Densité et basse densité **PEHD** et **PEBD**, Polyéthylène Téréphtalate **PET**, Polychlorure de vinyle **PVC**, Polypropylène **PP**, Polystyrène **PS**, ...).

Pour assurer une certaine efficacité à notre broyeur, on doit assurer que la puissance du moteur est suffisante pour couper les déchets en plastique quel que soit le type du plastique présent dans les déchets. Pour cela, nous devons avoir une contrainte de cisaillement plus importante que la contrainte de cisaillement à la rupture la plus grande des types.

La composition des déchets est illustrée dans le tableau suivant :

	$\chi_i$	$\sigma_r$	$\tau_r$
<b>PVC</b>	4	25	17,5
<b>HDPE</b>	15	22,5	15,75
<b>PP</b>	7	24,5	17,15
<b>LPDE</b>	23	7	4,9
<b>PET</b>	15	24	16,8
<b>PS</b>	6	25	17,5
<b>Autre</b>	30	-	-
<b>Total</b>	100		

**Tableau 1 : Composition des déchets plastiques avec leurs contraintes de rupture respectives**

D'après les données du tableau précédent, nous remarquons que les PVC et le PS ont la plus grande contrainte à la rupture en traction ainsi qu'en cisaillement, de ce fait, nous basons notre dimensionnement par rapport à ces deux types de plastique malgré leur petite présence dans la composition globale des déchets .

En récapitulatif, nous pouvons maintenant réarranger les équations citées auparavant afin de pouvoir trouver l'effort de coupe nécessaire  $F_c$  qui est donné par :

$$\mathbf{F}_c = \frac{\mathbf{e}^2 \tau_r}{2 \tan \alpha} \quad (3.3)$$

$\alpha$  est l'angle d'attaque entre les lames et le plan de coupe, il est trop faible mais non nul (environ 2° et en faisant l'application numérique, nous trouvons que :

$$F_c = 200,5 daN$$

La valeur numérique trouvée indique l'effort de coupe nécessaire qui peut causer la rupture du plastique. Cette valeur peut être majorée par rapport aux efforts de coupes dans les machines existantes mais le dimensionnement de toute la suite prendra en considération ce sur-dimensionnement et on pourra probablement adapter la machine pour d'autres matières plus dures.

### 3.2.1.3 Calcul de la vitesse de rotation du rotor

Afin de pouvoir estimer la puissance nécessaire du moteur électrique, nous avons besoin aussi de savoir la vitesse de rotation du rotor (arbre avec lames) et pour cela il faut connaître la vitesse de coupe  $V_c$ . Cette vitesse dépend principalement de la nature du matériau à usiner qui est le plastique dans notre cas, la vitesse de rotation sera alors conclue à partir de la relation :

$$N = \frac{1000V_c}{\pi D} \quad (3.4)$$

Où :

- $D$  est le diamètre du rotor en  $mm$
- $V_c$  est la vitesse de coupe en  $m/min$
- $N$  est la vitesse de rotation du rotor en  $tr/min$

Dans la figure ci-après, nous remarquons qu'il est aujourd'hui possible d'usiner des pièces mécaniques sur de larges plages de vitesses de coupe. Selon le matériau utilisé, ces plages varient, mais il est toujours possible de distinguer trois zones de vitesses de coupe distinctes :

- une zone de vitesse correspondant aux vitesses de coupe de l'Usinage Conventionnel
- une zone de vitesses de coupe inexploitable (conditions de coupe dégradées)
- une zone de vitesses de coupe correspondant à l'Usinage Grande Vitesse UGV

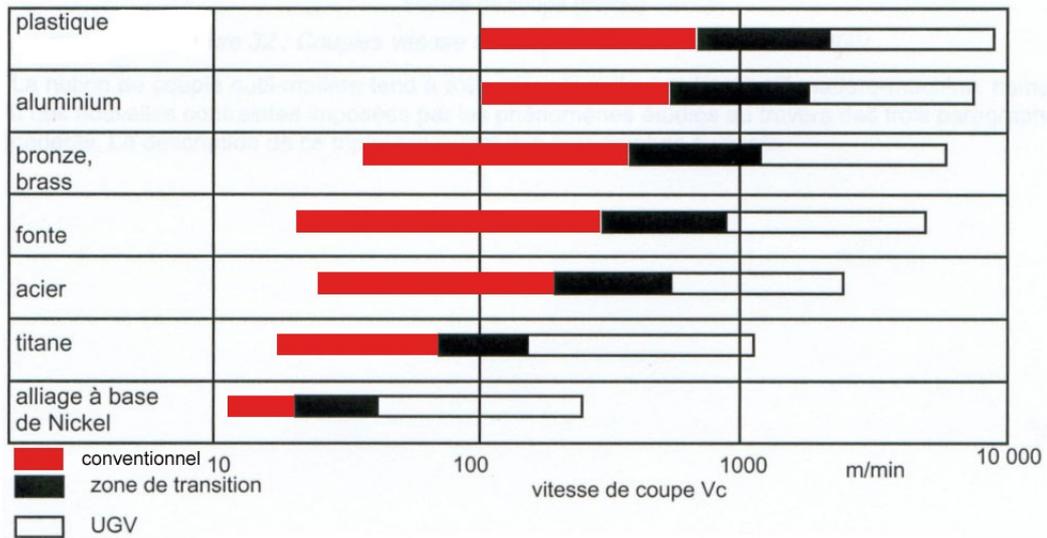


FIGURE 3.6 – Vitesse de coupe en fonction du matériau

Nous intéressons au plastique en usinage conventionnel, ce qui fait que la vitesse de coupe varie entre  $100\text{m}/\text{min}$  et  $900\text{m}/\text{min}$ . Nous optons pour la vitesse minimale afin de pouvoir travailler dans un régime sonore faible.

La vitesse de rotation sera alors pour un rotor de diamètre  $D = 120\text{mm}$  :

$$N = 266 \text{ tr}/\text{min}$$

Vu que nous effectuons un dimensionnement d'une machine, un sur-dimensionnement sur la puissance du moteur sera nécessaire et du coup cette vitesse de rotation changera vers une valeur plus grande.

### 3.2.1.4 La puissance du moteur

La puissance du moteur peut être maintenant calculée car nous avons déjà calculer l'effort de coupe et la vitesse de rotation. Elle sera alors :

$$P = C\omega \Rightarrow P = F \times \frac{D}{2} \times \frac{\pi N}{30} \quad (3.5)$$

En faisant l'application numérique, on trouve :

$$P = 3310 \quad W$$

Comme nous l'avons déjà évoqué dans les sections précédentes, cette puissance trouvera sa valeur augmentée pour des raisons de sur-dimensionnement. Nous choisissons de ce fait, une puissance de **4kW** et donc un **moteur asynchrone triphasé à 6 pôles** et donc une vitesse de rotation de l'arbre de  $N_m = 1000tr/min$

### 3.2.1.5 Caractéristiques du moteur

Nous avons cherché dans la documentation technique de quelques fournisseurs de moteurs électriques connus en Algérie notamment ENEL, nous avons choisi un moteur électrique triphasé du groupe **ENEL** ayant les caractéristiques suivantes :

Moteur	<b>890-120-1336-0081 à 6 pôles</b>
Fixation	<b>Fixation à pattes B3</b>
Puissance assignée (kW)	<b>4</b>
Vitesse de rotation (tr/min)	<b>1000</b>
Vitesse de rotation nominale (tr/min)	<b>955</b>
Couple nominale (N.m)	<b>40</b>
Fréquence assignée (Hz)	<b>50</b>
Diamètre de l'arbre moteur (mm)	<b>38k6</b>

**TABLE 3.2 – Caractéristiques du moteur**

### 3.2.2 Choix et dimensionnement des courroies de transmission

#### 3.2.2.1 Cahier de charge du broyeur :

- Type du moteur : Moteur triphasé à 6 pôles
- Puissance nominale du moteur :  $P = 4kW$
- Vitesse de rotation du moteur :  $N = 1000tr/min$
- Vitesse de rotation de l'arbre récepteur :  $N_s = 300tr/min$
- Diamètre maximale du coté de l'arbre récepteur :  $D = 250mm$

#### 3.2.2.2 Choix du type de courroie :

##### a) Coefficient de service :

Le coefficient de service  $k_s$  est déterminé par rapport aux conditions qui sont le type de moteur, la durée de fonctionnement par jour et le nature du couple. Pour le régime de fonctionnement, le tableau dans l'annexe I nous informe que le couple pour les broyeurs est Très Variable (TV). De ce fait et à partir du tableau ci-dessous, nous pouvons avoir le coefficient de service pour un fonctionnement en moyenne de 8 heures par jour :

Tableau V : Valeurs du coefficient de service $k_s$									
Facteur de service $k_s$	Conditions de fonctionnement								
	8 heures/jour			16 heures/jour			24 heures/jour		
	U	V	TV	U	V	TV	U	V	TV
Moteur électrique usuel Couple de démarrage normal	1	1,12	1,25	1,12	1,25	1,40	1,18	1,32	1,50
Démarrages fréquents ou inversions de sens fréquentes	1,12	1,25	1,40	1,25	1,40	1,60	1,32	1,40	1,70
Moteur électrique à couple de démarrage élevé ou moteur synchrone. Moteur diesel à 1 ou 2 cylindres	1,18	1,32	1,50	1,32	1,50	1,70	1,40	1,60	1,80
Inversion de sens ou démarrages fréquents avec moteur à fort couple de démarrage	1,32	1,50	1,70	1,50	1,70	1,90	1,60	1,80	2
U : Couple uniforme	V : Couple variable			TV : Couple très variable					

FIGURE 3.7 – Coefficient de service  $k_s$

Le coefficient de service est alors :

$$k_s = 1,25$$

**b) Calcul de la puissance effective :**

Elle est donnée par :

$$P_{eff} = k_s \times P_n \quad (3.6)$$

En faisant l'application numérique, nous trouvons que :

$$P_{eff} = 1,25 \times 4 = 5kW$$

**c) Choix de la section de la courroie :**

Ce choix est effectué en se basant les abaques fournis par TEXROPE. Ces derniers sont en fonction de la vitesse de rotation de la petite poulie (motrice dans ce cas) et la puissance de calcul qui est dans ce cas la puissance effective calculée précédemment. D'après le graphe dans l'annexe sur le choix de la section entre VP2 et HFX, on voit bien que pour une puissance de calcul de  $P_{eff} = 5kW$  et une vitesse de rotation de la petite poulie de  $N = 1000tr/min$ , on trouve que les sections de courroies les plus adaptées sont :

— Type VP 2 (Courroies industrielles enveloppées de section étroite) : SPZ, SPA

— Type HFX (Courroies industrielles à flancs nus de section étroite) : XPZ, XPA

Afin de faire le bon choix entre ces deux courroies, nous avons pris en considération les différentes propriétés de chaque type.

Les courroies VP 2 sont plus hautes pour une même largeur d'armature et bénéficient d'une plus grande surface de flancs en contact avec la poulie. Leur adhérence est augmentée, est donc elle peut transmettre plus de puissance unitairement. Or que les courroies HFX, qui présente une haute flexibilité, sont plus adaptées aux petits diamètres et leur nouveau crantage permet de diminuer les contraintes de

flexion tout en permettant d'assurer des rapports de transmission plus élevées mais plus compactes et donc plus économiques.

De ce fait, et en raison de contraintes d'encombrement que nous avons, nous choisissons les courroies HFX de type XPA.

### 3.2.2.3 Dimensionnement des courroies HFX XPA

On doit choisir les diamètres de tels façon à réduire le nombre de gorges tout en restants inférieur au limites imposées sur les diamètres et la vitesse linéaire qui est de 45 m/s pour les courroies de type HFX.

#### a) Conditions sur les diamètres :

Nous définissons le rapport de transmission comme étant :

$$i = \frac{D_{moteur}}{D_{broyeur}} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3.7)$$

Nous aurons alors :

$$i = \frac{d_1}{d_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{300}{1000} \Rightarrow i = 0,3$$

Pour le diamètre de la petite poulie  $d_1$ , nous pouvons l'avoir sachant le rapport de transmission  $i$  et la condition imposée sur l'encombrement. Nous trouvons alors :

$$d_1 = d_2 \times i$$

Et vu que le diamètre  $d_2$  ne doit pas dépasser 250mm, nous aurons donc :

$$d_2 \leq 250 \Rightarrow d_1 \leq 75$$

À partir de la figure ci-après qui indique les valeurs des diamètres normalisés des poulies pour les courroies XPA et SPA, nous concluons que les poulies que nous pouvons utilisées ont les diamètres :63, 71 et 75 mm. Pour minimiser l'encombre-

Tableau VII : diamètres normalisés des poulies pour courroies SPA et XPA																	
Courroies SPA et XPA										En gras : courroie XPA seulement							
63	75	85	95	106	118	132	150	170	190	212	236	265	300	335	375	450	560
71	80	90	100	112	125	140	160	180	200	224	250	280	315	355	400	500	630

FIGURE 3.8 – Diamètres normalisés des poulies pour courroies XPA et SPA

ment du côté du broyeur, nous optons pour la poulie de diamètre 63mm Nous aurons alors :

- Pour la petite poulie :  $d_1 = 63mm$
- Pour la grande poulie :  $d_2 = \frac{d_1}{i} = \frac{63}{0,3} = 210mm$

La valeur de de d2 étant non normalisé, on doit prendre un diamètre normalisé le plus proche, on prendra alors  $d_2 = 212mm$

b) Vérification de la vitesse linéaire :

La documentation de TEXROPE nous permet également de calculer la vitesse linéaire à partir de la formule suivante :

$$V = \frac{N_i \times d_i}{19100} \quad (3.8)$$

- Pour la poulie motrice :

$$V_1 = \frac{N_1 \times d_1}{19100} = 3,298m/s < 45m/s$$

- Pour la poulie réceptrice :

$$V_2 = \frac{N_2 \times d_2}{19100} = 3,32m/s < 45m/s$$

Les conditions sur la vitesse linéaires sont alors respectées.

### Conclusion

Nous concluons que les diamètres choisis conformément aux conditions de travail sont le couple :

$$(d_1, d_2) = (63mm, 212mm)$$

De ce fait, le nouveau rapport de transmission sera :

$$r = \frac{d_2}{d_1} = \frac{212}{63} = 3,365$$

**c) La puissance brute transmissible :**

La puissance brute transmissible de la courroie XPA est fournie par le catalogue TEXROPE et elle est de :

$$P_0 = 1,2kW$$

Cette puissance brute transmissible est tirée pour un rapport de transmission  $r$  de 3,365, un diamètre de la petite poulie de 63 mm et une vitesse de rotation de 1000 tr/min de la petite poulie.

Il est à noter que la vitesse de 1000 tr/min n'existe pas dans le tableau de puissance brute, nous avons fait alors une interpolation entre les valeurs correspondantes à 970 et 1165.

Elle est également donnée pour une longueur de 2360 mm et  $\alpha=180^\circ$ , elle sera corrigée plus tard.

**d) L'entraxe et la longueur :**

TEXROPE nous fournit une formule qui nous permet de trouver un intervalle pour l'entraxe :

Nous avons :

$$0,7(d_1 + d_2) < E < 2(d_1 + d_2) \quad (3.9)$$

Pour notre cas, nous trouvons :

$$192,5 < E < 500$$

Nous choisissons l'entraxe  $E = 400mm$ . Pour cette valeur nous calculons la longueur théorique de la courroie avec la formule suivante :

$$L_{th} = \frac{\pi}{2}(d_1 + d_2) + 2E' + \frac{(d_2 - d_1)^2}{4E'} \quad (3.10)$$

Par la suite, nous devons choisir une longueur de la courroie normalisée et recalculer l'entraxe réel par la formule suivante :

$$E = \frac{L - \frac{\pi}{2}(d_1 + d_2)}{2} - \frac{(d_2 - d_1)^2}{4[L - \frac{\pi}{2}(d_1 + d_2)]} \quad (3.11)$$

Nous résumons les calculs dans le tableau suivant :

Entraxe $E'(mm)$	Longueur $L_{th}(mm)$	Longueur $L(mm)$	Entraxe réel $E(mm)$
400	1245,8	1250	402,24

e) **Calcul du nombre de courroie nécessaire pour la transmission :**

Selon la documentation TEXROPE, le nombre de courroie est donné par :

$$N_c = \frac{P_{eff}}{C_l \times k_\alpha \times P_0} \quad (3.12)$$

Où :

- $P_{eff}$  : la puissance effective calculée précédemment.
- $C_l$  : Facteur de longueur.
- $k_\alpha$  : Facteur d'arc.
- $P_0$  : la puissance brute transmissible par la courroie HFX XPA.

Nous avons alors besoin de calculer les deux facteurs précédents :

• **Facteur d'arc  $k_\alpha$**

Le facteur  $k_\alpha$  est donné par la relation suivante :

$$k_\alpha = 1,25(1 - 5^{-\frac{\alpha}{\pi}}) \quad (3.13)$$

L'angle d'enroulement  $\alpha$  est tiré de la table suivante pour  $\frac{d_2-d_1}{E}$  :

<b>Facteur d'arc <math>\alpha</math></b>		
$\frac{D-d}{E}$	$\alpha$	$\alpha$
0,00	180	1,00
0,04	178	0,99
0,11	173	0,98
0,19	169	0,97
0,26	165	0,96
0,32	161	0,95
0,39	158	0,94
0,45	154	0,93
0,51	151	0,92

De ce fait, le facteur d'arc  $k_\alpha$  est :

$$k_\alpha = 1,25(1 - 5^{-\frac{158,86}{180}}) = 0,948$$

• Calcul du coefficient de longueur :

<b>L (mm)</b>	800	900	1000	1120	1250	1400	1600	1800	2000	2360	2500	2650	2800	3000	3150	3350	3550	3750	4000
<b><math>C_l</math></b>	0,82	0,84	0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	1,00	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,10

Le coefficient  $C_l$  pour une longueur de 1250 mm est alors tiré directement de la figure précédente et vaut :

$$C_l = 0,90$$

À ce stade, nous pouvons calculer le nombre de courroies nécessaires :

$$N_c = \frac{5}{1,2 \times 0,948 \times 0,90} = 2,95$$

Pour des raisons de sécurité et de fiabilité de notre machine, nous prenons un nombre de courroie de 3.

### 3.2.2.4 Étude statique et de résistance de la courroie choisie :

#### Tension de pose et la réaction statique

a) La tension de pose

Elle est donnée par la formule suivante :

$$T_0 = \frac{P_{eff} e^{f_{eq}\alpha} + 1}{2N_c V e^{f_{eq}\alpha} - 1} + m_l V^2 \quad (3.14)$$

Pour la courroie que nous avons choisie :

- La masse linéique  $m_l = 0,123kg/s$
- La vitesse linéaire  $V = 4m/s$
- Le coefficient de frottement  $f = 0,25$
- La puissance effective  $P_{eff} = 5000W$
- Le nombre de courroie  $N_c = 3$
- L'angle d'inclinaison  $\delta = 38^\circ$
- L'angle d'enroulement  $\alpha = 158,86^\circ = 2,773rad$

Le coefficient de frottement équivalent est donnée par :

$$f_{eq} = \frac{f}{\sin\left(\frac{\delta}{2}\right)} = 0,768 \quad (3.15)$$

La tension de pose sera alors :

$$T_0 = 632N$$

b) La réaction statique :

Elle est donnée par :

$$R_0 = 2N_c T_0 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (3.16)$$

Nous trouverons alors :

$$R_0 = 1581N$$

c) **Les réactions sur les paliers en charge :**

Selon la conduite de calcul pour les courroies trapézoïdales, nous trouverons que les réactions sur les paliers en charge sont :

$$R_x = 2N_c T_0 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = R_0 \quad (3.17)$$

D'autre part :

$$R_y = \frac{P_{eff}}{V} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (3.18)$$

Et la résultante est donnée par :

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$$

En faisant l'application numérique, on trouve :

$$R_x = 1581N$$

$$R_y = 206N$$

La résultante est alors :

$$R = 1595,026N$$

d) **La tension sur le brin tendu**

Elle est donnée par :

$$T = \frac{P_{eff}}{N_c V} \frac{e^{f\alpha}}{e^{f\alpha} - 1} + m_l V^2 \quad (3.19)$$

En faisant le calcul, on trouve :

$$T = 632N$$

**Conditions de résistance de la courroie :**

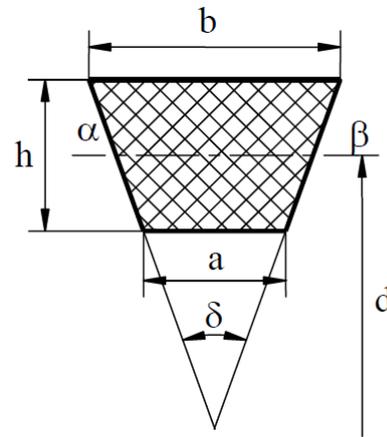
a) Contrainte due à la tension sur le brin tendu :

La contrainte est donnée par :

$$\sigma_n = \frac{T}{S} \quad (3.20)$$

T étant la tension sur le brin tendu qu'on déjà calculé précédemment.

S est la section transversale de la courroie (hachurée sur la figure ci-contre)



Section

$$S = \frac{(a + b)h}{2}$$

**d'une courroie trapézoïdale**

La courroie XPA a pour caractéristiques géométrique :  $b = 13mm$  et  $h = 10mm$ .

D'autre part :

$$a = b - 2h \tan\left(\frac{\delta}{2}\right)$$

Nous trouverons alors :

$$a = 13 - 2 \times 10 \tan\left(\frac{38}{2}\right) = 6mm$$

La section S est alors :

$$S = 95,567mm^2$$

La contrainte due à la tension sur le brin tendu est donnée par :

$$\sigma_n = 7MPa$$

b) Contrainte due à la force centrifuge :

Elle est donnée par :

$$\sigma_c = \frac{F_c}{S} = \frac{m_l V^2}{S} \quad (3.21)$$

Nous trouvons alors :

$$\sigma_c = 20,5kPa$$

c) **Contrainte due à la flexion de la courroie :**

Elle est donnée par :

$$\sigma_f = \frac{hE}{d} \quad (3.22)$$

E est le module d'élasticité longitudinal (Module d'Young)

Afin de trouver la contrainte maximale due à la flexion, nous prendrons le diamètre de la petite poulie est donc  $d = 63mm$

$$\sigma_f = \mathbf{16MPa}$$

d) **La contrainte totale :**

La contrainte totale est définie comme étant la somme des contraintes déjà calculées, donc :

$$\sigma_{tot} = \sigma_n + \sigma_c + \sigma_f \quad (3.23)$$

Et donc :

$$\sigma_{tot} = \mathbf{24MPa}$$

Cette contrainte est largement inférieure à la contrainte admissible du matériau de la courroie qui est de  $\sigma_{adm} = 75MPa$

Dans le tableau ci-dessous, nous récapitulons les calculs qu'on a fait ainsi que les caractéristiques de la courroie choisie :

Type de courroie	<b>HFX XPA 1250</b>
Masse linéique $m_l$ (g/m)	<b>123</b>
Nombre de courroies $N_c$	<b>3</b>
Valeur de $\delta(^{\circ})$ pour $d_{1n} = 63mm$	<b>38</b>
Dimensions $b \times h(mm)$	<b>13x10</b>
Valeur de la petite base $a(mm)$	<b>6</b>
Section $S(mm^2)$	<b>95,567</b>
Tension de pose $T_0(N)$	<b>202</b>
Réaction statique $R_0(N)$	<b>1582</b>
Réaction dynamique $R(N)$	<b>1595</b>
Effort $T$ sur le brin tendu (N)	<b>632</b>
Force centrifuge $F_c(N)$	<b>1,7</b>
Contrainte $\sigma_n(daN/cm^2)$	<b>66,1</b>
Contrainte $\sigma_c(daN/cm^2)$	<b>0,21</b>
Contrainte $\sigma_f(daN/cm^2)$	<b>158,7</b>
Contrainte totale $\sigma_{tot}(daN/cm^2)$	<b>240</b>

TABLE 3.3 – Récapitulatif des caractéristiques de courroie

### 3.2.3 Dimensionnement de l'arbre

#### 3.2.3.1 Introduction

Nous rappelons le cahier de charge de notre broyeur afin de pouvoir effectuer le dimensionnement du broyeur. Le cahier de charge est le suivant :

- Puissance délivrée sur l'arbre :  $P = 4kW$
- Vitesse de rotation de l'arbre porteur des lames :  $N_s = 297tr/min$

### 3.2.3.2 Calcul de l'effort de coupe $F_c$

Dans cette partie, nous sommes en mesure de refaire le calcul de l'effort de coupe sur l'arbre porteur des lames. En admettant une transmission de puissance parfaite par la courroie, le rendement est alors maximal et égal à 1, ce qui fait que la puissance délivrée par le moteur est entièrement transmise à l'arbre récepteur, ceci est justifié du fait que les courroies ont été bien dimensionnées.

Nous avons alors :

$$P_m = P_s = \frac{C_m}{\omega} = F_c \frac{d}{2} \frac{\pi N_s}{30} \Rightarrow F_c = 60 \frac{P_m}{\pi d N_s} \quad (3.24)$$

On trouve :

$$F_c = 2143N$$

### 3.2.3.3 Étude à la flexion de l'arbre porteur des lames

a) L'effort sur les paliers :

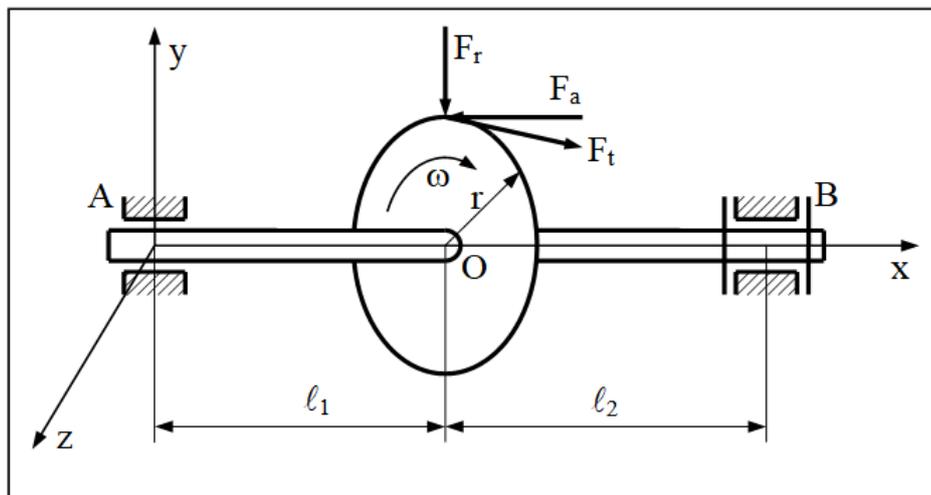
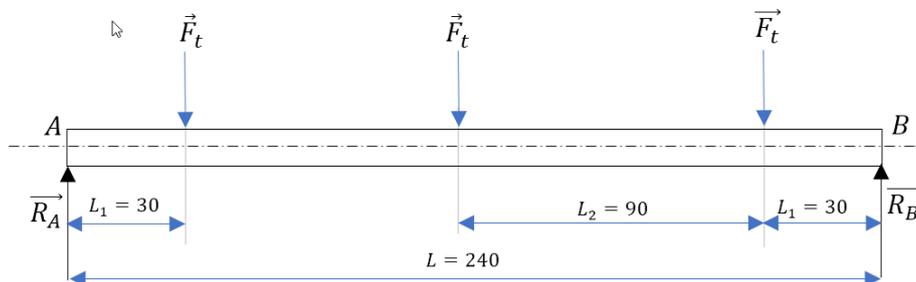


FIGURE 3.9 – Efforts sur l'arbre et paliers

Dans notre cas, nous avons que l'effort tangentiel qui est l'effort de coupe calculé précédemment. D'autre part, la figure est une illustration d'une transmission sur une seule roue, nous devons l'adapter au nombre de lame que nous avons et puis nous effectuons le bilan des forces et des moments pour trouver les efforts sur les paliers A et B.

Toutefois, les huit lames que nous avons sur chaque arbre ne travaillent pas tous à la fois, l'arbre alors n'est pas chargé avec les 8 efforts de flexion. Les lames sont décalées d'un angle de  $120^\circ$  et donc nous nous retrouvons avec 3 lames actives seulement et donc la disposition des charges sur l'arbre dans le plan  $(Ax, Az)$  sera comme suit :



**FIGURE 3.10 – Bilan des forces sur l'arbre**

Dans la figure ci-dessous, nous avons choisi une disposition adéquate des lames qui est d'un nombre de sept lames sur chaque arbre. La distance entre les lames notée par  $s$  est constante or que la distance des lames par rapport aux appuis est notée par  $a$ .

Pour notre cas, l'épaisseur de chaque lame est fixée à  $15\text{mm}$  et le joint entre les lames à une épaisseur de  $15\text{mm}$ . De ce fait, la distance  $s$  est  $s = 30\text{mm}$  et la

distance  $a = 20mm$ .

Le bilan des forces sur l'axe des x nous permet de conclure que :

$$R_{Ax} = R_{Bx} = 0 \quad (3.25)$$

Les paliers A et B constituent alors une liaison *Pivot*.

Nous effectuons maintenant le bilan des forces par rapport à l'axe des z puis le bilan des moments, nous trouverons alors :

$$R_{Az} + R_{Bz} - 3 \times F_c = 0 \quad (3.26)$$

$$\left( \frac{F_c}{2} L_1 + \frac{L}{2} + (L - L_1) \right) = R_{Bz} L \quad (3.27)$$

Sachant que  $L = 240$ , nous concluons que :

$$\mathbf{R}_{Az} = \mathbf{R}_{Bz} = \frac{3\mathbf{F}_c}{2} = \mathbf{3214,5N} \quad (3.28)$$

Ce résultat était prédictible en raison de la symétrie dans la disposition des lames, cette symétrie nous permet d'éliminer les balourds et donc les vibrations, ces derniers peuvent réduire le rendement de notre machine.

b) **Diagramme des efforts tranchants :**

La construction des diagrammes des éléments de réduction constitue une étape essentielle dans toute étude de RDM. Un diagramme est un graphe qui indique la valeur (intensité et nature) de la sollicitation considérée dans toutes les sections du système étudié. Les diagrammes des éléments de réduction permettent de localiser les sections les plus sollicitées (sièges des contraintes les plus élevées) et servent au dimensionnement des différents éléments des structures. Dans la construction des diagrammes, les valeurs positives et négatives sont portées de part et d'autre d'un axe-origine.

Nous commençons d'abord par établir le diagramme des efforts tranchants. Ce diagramme est établi en isolant chaque tronçon et en appliquant la RFD pour

trouver la résultante équivalente le long du tronçon considéré. Nous trouverons alors :

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{3F_c}{2} & , 0 \leq x \leq L_1 \\
 T &= \frac{F_c}{2} & , L_1 \leq x \leq L/2 \\
 T &= -\frac{F_c}{2} & , L/2 \leq x \leq L - L_1 \\
 T &= -\frac{3F_c}{2} & , a + 2s \leq x \leq a + 3s
 \end{aligned}$$

La distribution d'effort tranchant sur l'arbre peut être donnée pour la moitié de l'arbre car la répartition des charges est symétrique.

c) **Moment fléchissant :**

Afin de pouvoir effectuer le dimensionnement de l'arbre, nous avons besoin de calculer la contrainte normale maximale en flexion. Cette dernière ne peut être calculée qu'à partir du moment fléchissant maximal et pour cela, nous sommes amenés à établir le diagramme du moment fléchissant. Le diagramme est obtenu tout comme pour l'effort tranchant, en isolant chaque tronçon et en établissant l'équilibre mais en moment.

Comme nous avons déjà établi le diagramme des efforts tranchants et nous intéressons à avoir le moment fléchissant maximal, nous savons que :

$$T_y = -\frac{\partial M_{fz}}{\partial x} \tag{3.29}$$

De l'équation précédente, nous concluons qu'un effort tranchant nul est équivalent à un moment de flexion maximal, nous nous intéressons alors au tronçon du  $a + 3s$  et  $a + 4s$  et on trouve :

$$M_{f_{max}} = \frac{F_c}{2}(3L_1 + L_2) \tag{3.30}$$

Et donc :

$$M_{f_{\max}} = 192,87\text{N.m}$$

Le moment de flexion maximal est constant sur tout ce tronçon et nous devons maintenant calculer le moment de torsion sur l'arbre.

### 3.2.3.4 Étude à la torsion de l'arbre :

La torsion correspond au ou le système des forces, réduit en G, donne seulement une composante normale du moment résultant appelé moment de torsion.

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

$$P_m = C_m \omega = M_t \omega \Rightarrow M_t = \frac{30P_m}{\pi N_s} \quad (3.31)$$

On trouve alors :

$$M_t = 128,610\text{N.m}$$

### 3.2.3.5 Choix du matériau de l'arbre :

Pour l'arbre, nous choisissons un acier pour construction mécanique. La norme NF EN 10025 à 10027 donne la nouvelle désignation d'aciers selon leurs emplois et leurs compositions chimiques.

Pour notre cas c'est-à-dire l'arbre, nous optons pour un acier de construction pour emploi E335 (E pour dire Emploi et 335 est la valeur minimale de la limite d'élasticité en Mégapascals selon la nouvelle désignation de la norme)

- L'acier E335 est un acier non allié ;
- Il est d'usage normal ne devant subir aucun traitement thermique.
- Il s'agit d'un acier couramment utilisé en construction mécanique.

### 3.2.3.6 Critères de résistance aux sollicitations externes :

Dans la pratique, les sollicitations extérieures permettent de dimensionner les organes mécaniques liés à l'arbre (paliers, clavettes, roulements, cannelures...). Leurs dimensions conduisent à définir les dimensions et la géométrie de l'arbre. Au moment du calcul de l'arbre, les sollicitations et la géométrie de l'arbre sont donc souvent connues.

D'une manière générale, le calcul de prédétermination d'un arbre se fait sous deux aspects :

- **Aspect statique** : à partir du calcul de la résistance de l'arbre et de sa déformation et donc sa rigidité.
- **Aspect dynamique** : à partir du calcul de la tenue en fatigue de l'arbre et des vibrations engendrée.

#### 1) Critère de résistance statique :

L'essai principalement adopté est bien l'essai de traction simple, il permet d'avoir la résistance à la rupture en traction  $\sigma_m$  et la résistance élastique  $\sigma_e$ . Ces derniers sont les paramètres les plus importants dans le dimensionnement.

##### a) Critère de Tresca ou cisaillement maximal :

Ce critère convient pour les aciers doux et les alliages légers. Il peut s'énoncer ainsi : deux états de contrainte sont également dangereux s'il y a égalité des contraintes tangentielles maximales.

$$\sigma_e = \sqrt{(\sigma_t + \sigma_f)^2 + 4(\tau_t + \tau_c)^2} \quad (3.32)$$

##### b) Critère de Von Mises :

Ce critère est très utilisé pour l'ensemble des matériaux métalliques. Il est basé sur l'hypothèse que la défaillance du matériau se produit lorsque l'énergie de variation de forme atteint une valeur limite fixée.

$$\sigma_e = \sqrt{(\sigma_t + \sigma_f)^2 + 3(\tau_t + \tau_c)^2} \quad (3.33)$$

c) **Coefficient de sécurité :**

Les coefficients de sécurité sont des paramètres permettant de dimensionner des dispositifs. Mais la connaissance des charges normales en utilisation n'est guère suffisante. Il faut alors prévoir la possibilité d'une utilisation inadaptée. C'est pour cela qu'on utilise un coefficient de sécurité, noté habituellement  $s$ .

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

FIGURE 3.11 – Valeurs indicatives du coefficient de sécurité  $s$  pour arbres

**3.2.3.7 Calcul du diamètre de l'arbre principal :**

L'arbre est soumis à une sollicitation de flexion et de torsion combinés et animé d'un mouvement de rotation uniforme. La torsion est exprimée par un moment de torsion constant le long de l'arbre et vaut  $M_t = 128,610N.m$ .

La flexion est aussi exprimée par un moment de flexion maximale  $M_{f_{max}} = 192,87N.m$ , nous devons alors calculer le diamètre de l'arbre vérifiant la condition de résistance pour une sollicitation composée de flexion et de torsion simultanément.

Nous utilisons alors le critère de Von Mises tel que :

- Contrainte normale de traction/compression :  $\sigma_t = \frac{4N}{\pi D^2} = 0$
- Contrainte normale de flexion :  $\sigma_f = \frac{32M_f}{\pi D^3}$
- Contrainte tangentielle de torsion :  $\tau_t = \frac{16M_t}{\pi D^3}$

- Contrainte tangentielle du cisaillement :  $\tau_t = \frac{T}{\pi D^2} = 0$

La condition de résistance s'annonce comme suit :

$$\sigma_e \leq \sigma_{adm} \Rightarrow \sqrt{\sigma_f^2 + 3\tau_t^2} \leq \frac{\sigma_e}{s} \quad (3.34)$$

OU bien :

$$\frac{\sqrt{M_f^2 + 0,75M_t^2}}{\left(\frac{I}{\nu}\right)} \leq \frac{\sigma_e}{s} \quad (3.35)$$

On définit  $\left(\frac{I}{\nu}\right)$  comme le module de section et égal à  $\frac{\pi D^3}{32}$ , le coefficient de sécurité est choisi par rapport à la figure 4.6 et égal à  $s = 4$ . Le diamètre de l'arbre est alors :

$$D \geq \sqrt[3]{\frac{32\sqrt{M_f^2 + 0,75M_t^2}}{\pi \frac{\sigma_e}{s}}} \quad (3.36)$$

Sachant que pour notre cas,  $M_t = 12861,02 daN.mm$ ,  $M_f = 19287 daN.mm$  et la résistance à la traction pour l'acier E335 est  $\sigma_e = 33,5 daN/mm^2$  Toutefois, ce dimensionnement avec le critère de Von Mises n'est pas suffisant dans notre cas car on est obligé de maintenir un certain jeu de fonctionnement entre les lames et donc on doit contrôler la flèche de l'arbre et donc un calcul de rigidité.

### 3.2.3.8 Jeu entre les lames

Vu que le processus du broyage adopté pour notre machine est le cisaillement, le jeu entre les lames doit être bien défini et respecté préalablement. Selon le jeu que nous choisissons, trois situations se présentent :

- Jeu important : dans ce cas, les déformations sont trop importantes et le cisaillement sera probablement remplacé par une flexion (pas de cisailage)
- Jeu nul : Les déformations seront faibles dans ce cas tout en provoquant l'usure des lames

- Le jeu de fonctionnement idéal : il est également choisi en fonction de l'épaisseur. Dans la majorité des cas, il est le 1/10 de l'épaisseur et donc 0,2 mm dans notre cas.

La figure ci-dessous illustre les cas présentés déjà en dessus :

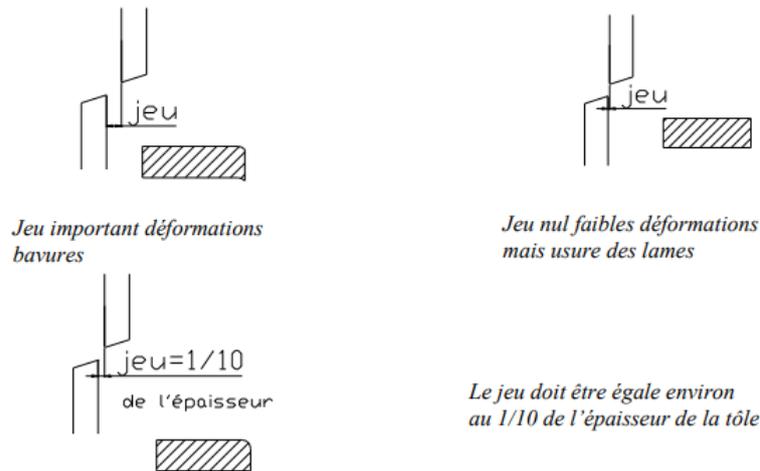


FIGURE 3.12 – Jeu entre lames

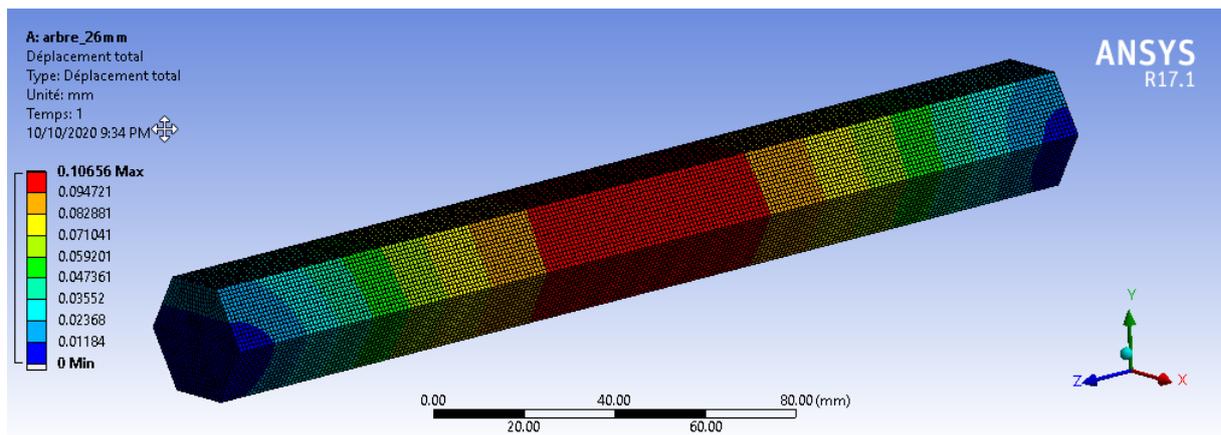
### 3.2.3.9 Calcul de rigidité de l'arbre

Le calcul de rigidité est, à ce stage, important pour maintenir les lames en fonctionnement et ceci en contrôlant la flèche maximale. La flèche ou bien le déplacement dû à la flexion peut être obtenue à partir de l'équation de la ligne élastique avec une double intégration :

$$\mathbf{f} = \mathbf{y}(\mathbf{x}) = \int \left[ \int -\frac{\mathbf{M}_{f_z}(\mathbf{x})}{\mathbf{EI}_z} d\mathbf{x} + \mathbf{C}_1 \right] d\mathbf{x} + \mathbf{C}_2 \quad (3.37)$$

Les constantes  $C_1$  et  $C_2$  sont déterminées à l'aide des conditions limites aux appuis. Il faut noter que dans le cas des poutres ayant plusieurs tronçons dont chacun possède sa propre équation du moment, il faut substituer l'expression de  $M$  dans chacune des équations différentielles et procéder à l'intégration. Les constantes d'intégration dans ce cas sont déterminées

en utilisant les conditions aux appuis des extrémités de la poutre et aux conditions de continuité aux limites des tronçons. Dans notre cas, nous avons 4 tronçons et donc la méthode d'intégration directe est une méthode longue pour déterminer la flèche, pour résoudre ce problème nous optons pour les simulations numérique pour avoir la flèche maximale et vérifier les résultats analytiques. Nous optons directement pour la simulation d'un arbre hexagonale de différentes dimensions afin de faire le bon choix relativement à la rigidité. Nous optons pour des arbres de diamètres différents : 26mm, 27 mm et 30 mm et nous choisissons la configuration la plus optimale qui nous permet de s'assurer que le broyage aura lieu avec les conditions de travail. La distribution des efforts est déjà donnée, nous plaçons une sonde de déplacement pour évaluer la flèche de l'arbre. Les résultats sont sur les figures suivantes :



**FIGURE 3.13 – Déplacement total pour 26 mm**

Nous résumons les résultats suivants dans un tableau :

Diamètre(mm)	26	27	30
Déplacement total maximal(mm)	0,106	0,092	0,062

**TABLE 3.4 – Résumé des résultats de simulation**

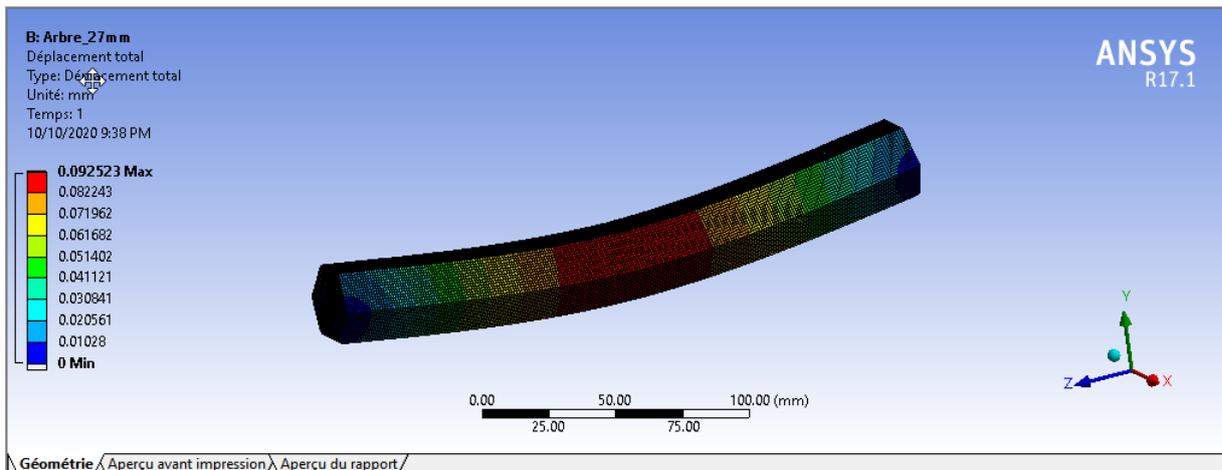


FIGURE 3.14 – Déplacement total pour 27 mm

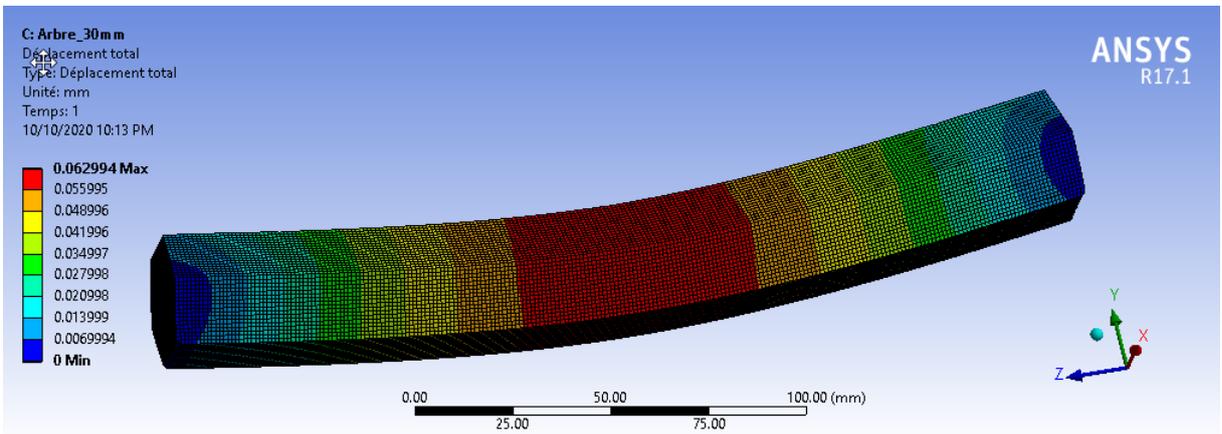


FIGURE 3.15 – Déplacement total pour 30 mm

### 3.2.3.10 Conclusion

En prenant en considération tous les paramètres précédents, nous optons pour l'arbre de diamètre 30 mm afin de gagner en rigidité et pour être sûre que notre machine fonctionnera. En choisissant ce diamètre, la condition de résistance est également vérifiée avec un coefficient de sécurité d'environ 3,5.

## 3.2.4 Dimensionnement des roulements

### 3.2.4.1 Généralités sur les roulements

Les roulements sont des ensembles constitués d'éléments mécaniques, utilisés pour le guidage en rotation des arbres et moyeux. Ils sont très répandus en construction mécanique et sont utilisés sans élaboration supplémentaire. Ils sont de différents types (roulements à une ou deux rangées de billes, à rotules, à rouleaux cylindriques, à rouleaux coniques, à aiguilles, butées à billes, etc. . .).

Un roulement est composé d'une bague intérieure qui se monte sur l'arbre, d'une extérieure qui se loge dans le moyeu (alésage ou logement), des éléments roulants (billes, cylindres, cônes, aiguilles, etc. . .) et, généralement, d'une cage pour maintenir ces éléments roulants dans leur position relative.

Il assure principalement :

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

### 3.2.4.2 Types de roulements

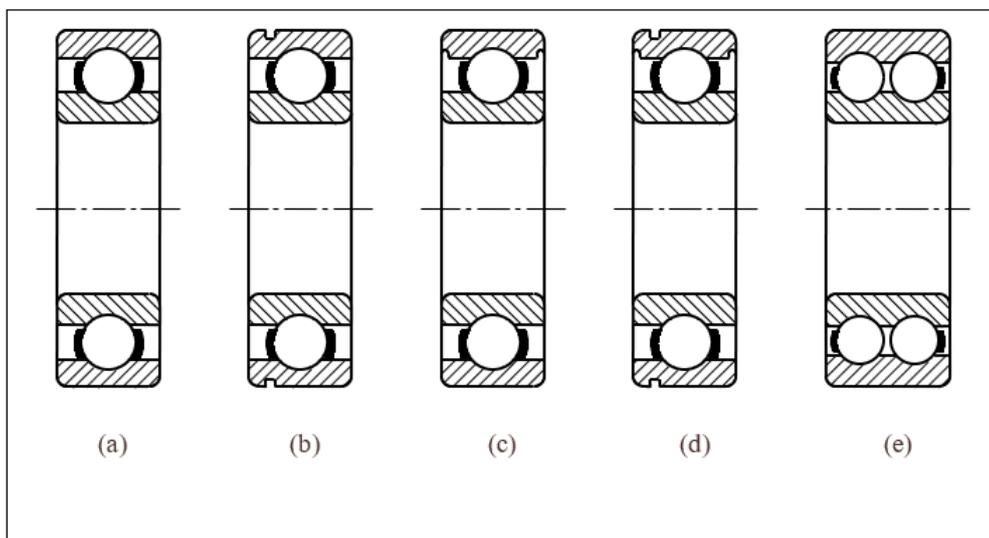
Les roulements sont de différents types : les roulements rigides à billes (contact radial ou oblique), roulements à rotule (à billes ou à rouleaux sphériques), roulements à rouleaux cylindriques ou coniques), roulements à aiguilles, butées (à billes, à rouleaux cylindriques ou sphériques, à aiguilles).

Le type de roulement à préconiser pour assurer la liaison pivot d'un palier est conditionné par deux paramètres :

- La direction de la charge qui peut être radiale, axiale ou radiale et axiale
- L'importance du fléchissement de l'arbre qui résulte des charges radiales et qui tend à provoquer un dés-alignement (rotulage) des bagues l'une par rapport à l'autre.

Nous présentons dans la suite, les schémas du différents types de roulements.

a) **Roulements rigides à billes :**

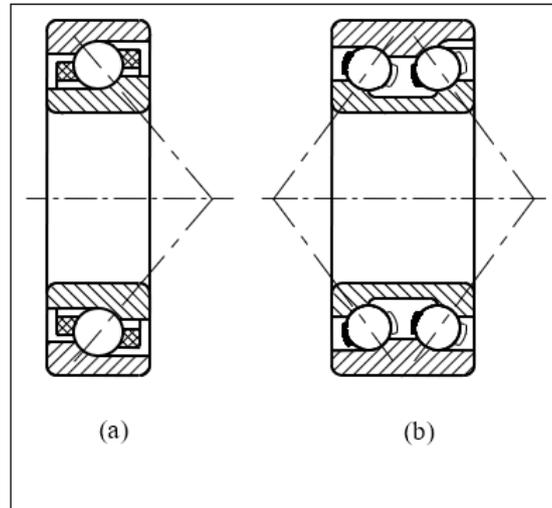


**FIGURE 3.16 – Schéma des roulements rigides à billes**

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

Ces roulements permettent de supporter des charges radiales moyennes et des charges axiales faibles. L'angle de rotulage admissible est de 2 à 16°.

b) **Roulements à contact oblique :**



**FIGURE 3.17 – Schéma des roulements à contact oblique**

(a) À une rangée de billes : Effort axial dans un seul sens (de droite vers la gauche sur la bague intérieure, en sens inverse sur la bague extérieure)

(b) À deux rangées de billes (effort axial dans les deux sens)

Ces roulements supportent des charges radiales et axiales moyennes. L'angle de rotulage est de 1 à 2°.

c) **Roulements à rouleaux cylindriques et à rouleaux coniques :**

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

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

d) **Roulements à aiguilles :**

Ces roulements ont des éléments roulants cylindriques de grande longueur par rapport au diamètre. Les roulements sans bague intérieure sont utilisés lorsqu'il est

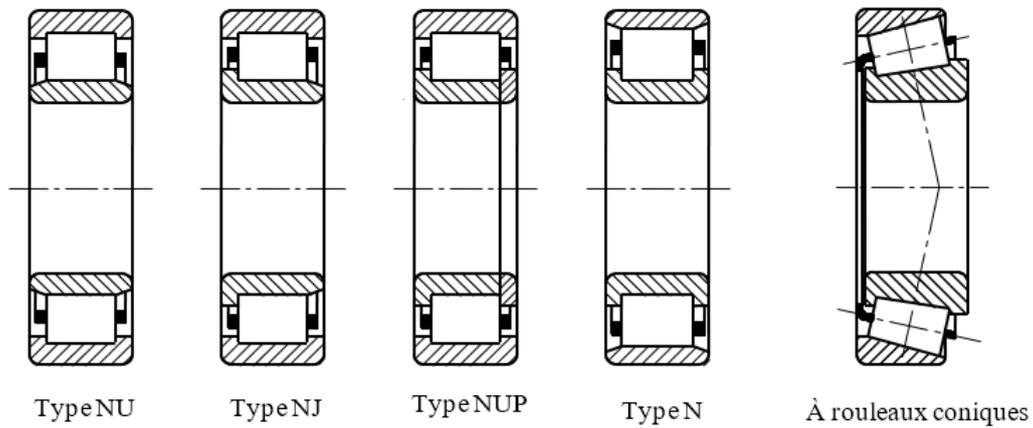


FIGURE 3.18 – Schéma des roulements à rouleaux cylindriques et à rouleaux coniques

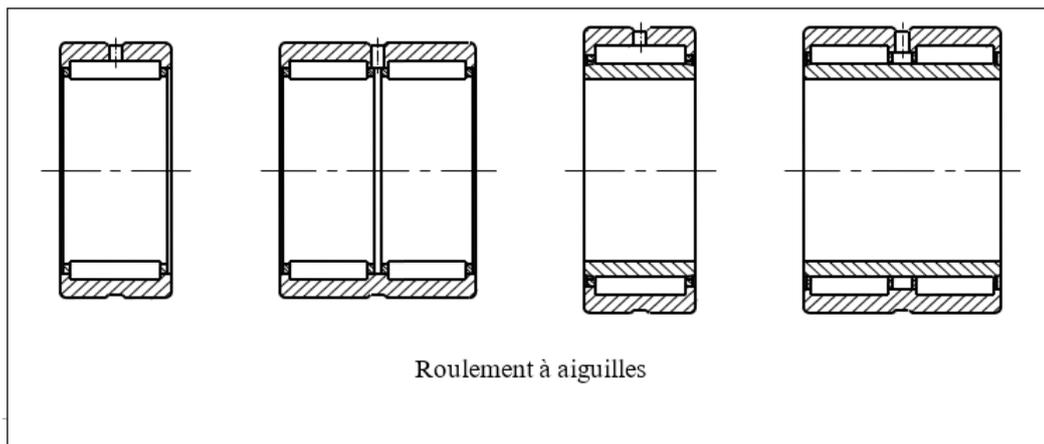


FIGURE 3.19 – Schéma des roulements à aiguilles

possible de tremper et rectifier les chemins de roulement nécessaires sur l'arbre. Les roulements avec bague intérieure sont utilisés pour les montages où il est impossible ou trop coûteux de trempe et rectifier l'arbre. Ces roulements ne supportent que des charges purement radiales et ne tolèrent pratiquement aucun rotulage.

### 3.2.4.3 Choix des roulements

Le roulement que nous souhaitons dimensionner à pour but d'assurer le guidage en rotation du rotor portant les lames dans les appuis A et B.

Comme déjà cité en haut, les roulements existent en plusieurs types et seuls les efforts présents dans un système peuvent nous guider à faire le bon choix. Vu l'absence des efforts axiaux, dans notre cas, et l'effort radial relativement important, les roulements rigides à billes sont les mieux adaptés à notre situation pour une bon guidage et un bon fonctionnement.

Le diamètre de l'arbre porteur des lames est  $D = 30mm$ , par contre pour l'emplacement des roulements, nous choisissons un diamètre intérieur plus petit que le diamètre de l'arbre. Ce diamètre n'est pas choisi aléatoirement mais par rapport au catalogue **SKF** pour les roulements rigides à billes disponibles d'où le choix de  $d = 22mm$  et le roulement **rigide à billes 62/22**

### 3.2.5 Calcul de la durée de vie du roulement 62/22

La durée de vie d'un roulement dépend principalement de la charge dynamique équivalente que nous calculons plus tard et la charge dynamique de base qui caractérise le roulement et donné par le catalogue **SKF** comme suit :

La durée de vie du roulement est donnée par :

$d_{int}(mm)$	$D_{ext}(mm)$	<b>B (mm)</b>	<b>C (kN)</b>	$C_0$ (kN)	$P_u$ (kN)
22	50	14	14	7,65	0,325

**TABLE 3.5 – Caractéristiques du roulement 62/22**

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^n \tag{3.38}$$

Où :

- C est la charge dynamique de base
- P est la charge dynamique équivalente donnée par :

$$P = XF_r + YF_a \quad (3.39)$$

- $L_{10}$  est donnée en millions de tours et n est égal à :
  - n = 3 pour les roulements à billes
  - n = 10/3 pour les roulements à rouleaux

La charge dynamique équivalente est donnée en fonction des charges radiales et axiales appliquées et qui les efforts sur les paliers que nous avons déjà calculés en haut. Il est à rappeler que les liaisons A et B sont des liaisons pivot tel que :

$$R_A = \left\{ \begin{array}{l} R_{Ax} = 0 \\ R_{Ay} = 0 \\ R_{Az} = 3F_c/2 = 3215,3N \end{array} \right\} \quad (3.40)$$

$$R_B = \left\{ \begin{array}{l} R_{Bx} = 0 \\ R_{By} = 0 \\ R_{Bz} = 3F_c/2 = 3215,3N \end{array} \right\} \quad (3.41)$$

L'effort radial et axial sur le palier A est défini comme :

$$\mathbf{F}_{aA} = \mathbf{R}_{Ax} = 0N$$

$$\mathbf{F}_{rA} = \sqrt{\mathbf{R}_{Ay}^2 + \mathbf{R}_{Az}^2} = 321,5daN$$

Pareil pour le palier B vu la symétrie des charges, on trouve ;

$$\mathbf{F}_{aB} = \mathbf{R}_{Bx} = 0N$$

$$\mathbf{F}_{rB} = \sqrt{\mathbf{R}_{By}^2 + \mathbf{R}_{Bz}^2} = 321,5daN$$

### 1. Calcul de la charge dynamique équivalente

Vu que l'effort axial est nul dans les deux cas, on conclue que :

$$\mathbf{X} = \mathbf{0} \quad ; \quad \mathbf{Y} = \mathbf{1} \quad \implies \quad \mathbf{P} = \mathbf{F}_r \quad (3.42)$$

### 2. Calcul de la durée de vie nominale

De ce fait, la durée de vie  $L_{10}$  est donnée par :

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^n \implies L_{10} = \left(\frac{14000}{3215,25}\right)^3 = \mathbf{82,6 \text{ millions de tours}} \quad (3.43)$$

Cette durée de vie est en millions de tours mais pour une vitesse de rotation donnée  $N$ , elle peut s'exprimer en heure par la relation suivante :

$$L_{10h} = \frac{10^6 L_{10}}{60N} \quad (3.44)$$

En faisant l'application numérique pour  $N = 297$  tr/min, nous trouvons que :

$$L_{10h} = \frac{10^6 82,6}{60 \times 297} \implies L_{10h} = \mathbf{6432,652 \text{ heures}} \quad (3.45)$$

### 3. Charge statique équivalente

Comme pour la charge dynamique équivalente  $P$ , en absence d'effort axial nous concluons que :

$$\mathbf{X}_0 = \mathbf{0} \quad ; \quad \mathbf{Y}_0 = \mathbf{1} \quad \implies \quad \mathbf{P}_0 = \mathbf{F}_r \quad (3.46)$$

### 4. Coefficient de sécurité statique $s_0$

Il est donné par :

$$s_0 = \frac{C_0}{P_0} = \frac{7650}{3215N} \implies \mathbf{2,379 > 2} \quad (3.47)$$

Le roulement 62/22 en présence des conditions du travail de notre broyeur, sa durée de vie est faible ainsi que le coefficient de sécurité statique. De ce fait, nous sommes en mesure de choisir un autre roulement plus fiable. Nous optons alors pour le roulement 6305-2RS1 qui a les caractéristiques suivantes :

$d_{int}(\text{mm})$	$D_{ext}(\text{mm})$	<b>B (mm)</b>	<b>C (kN)</b>	$C_0$ (kN)	$P_u$ (kN)
25	62	17	23,4	11,6	0,49

**TABLE 3.6 – Caractéristiques du roulement 6305-2RS1**

La durée de vie sera alors :

$$L_{10} = \left( \frac{C}{P} \right)^3 = (23400/3215,256)^3 = 385,479 \text{ millionsdetours} \quad (3.48)$$

En heures, on trouve :

$$L_{10h} = \frac{10^6 L_{10}}{60N} = 21631,8269 \text{heures}$$

Le coefficient de sécurité statique est, pour ce roulement :

$$s_0 = \frac{C_0}{P_0} = 11600/3215,256 = 3,608 \quad (3.49)$$

On peut maintenant conclure que le roulement 6305 est plus fiable et plus sécuritaire dans la machine vue que sa durée de vie est plus élevée et le coefficient de sécurité est supérieur à 2.

## 3.2.6 Dimensionnement des engrenages

### 3.2.6.1 Introduction

Notre broyeur est une machine tournante ayant deux rotors porteur de lames, la puissance du moteur doit être transmise au deux arbres pour avoir le même couple et doivent tourner avec la même vitesse. Pour ces raisons, nous optons pour des engrenages cylindriques à dentures droites que nous dimensionnons dans cette partie.

### 3.2.7 Calcul des engrenages

Les principales caractéristiques d'un engrenages sont le module  $m$  et le diamètre primitif ou bien le nombre de dents.

Le module est tiré de la formule de *Lewis simplifiée* et le diamètre à partir de l'entraxe  $E$  qui est connu.

#### 1. Détermination des diamètres primitifs

L'entraxe entre les engrenages est imposé par le diamètre des lames et les joints de lames qui est de 84 mm et donc  $E = 84mm$ .

D'autre part, l'entraxe est défini comme :

$$E = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Comme le rapport de transmission doit être égal à l'unité et donc nous concluons que :

$$d_1 = d_2 \implies d_1 = d_2 = 84mm \quad (3.50)$$

#### 2. Calcul du module m

Le module est donné par la formule de lewis simplifié comme suit :

$$m \geq 2,34 \sqrt{\frac{F_t}{k\sigma_{adm}}} \quad (3.51)$$

Où :

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

$$F_t = \frac{2P}{\omega d} = \frac{2 \times 4000}{\frac{\pi \times 297}{30} \times 84 \times 10^{-3}} \implies \mathbf{F_t = 3062,144 \text{ N}} \quad (3.52)$$

—  $k$  est le coefficient de la largeur de denture. Les valeurs courantes sont entre 8 et 12, alors nous choisissons :

$$\mathbf{k = 10} \quad (3.53)$$

- $\sigma_{adm}$  est la résistance pratique du matériau. Pour notre cas, nous avons opter pour **16MnCr5** ayant une résistance à l'extension  $R_e = 600$  MPa et nous fixons le coefficient de sécurité à  $s = 3$ , on trouve alors :

$$\sigma_{adm} = \frac{R_e}{s} = \mathbf{200 \text{ MPa}} \quad (3.54)$$

Le module sera alors :

$$m \geq 2,34 \sqrt{\frac{3062,144}{10 \times 200}} \implies \mathbf{m \geq 2,895 \text{ mm}} \quad (3.55)$$

Nous choisissons alors un module  $m = 4$  mm de la série principale.

### 3. Détermination du nombre de dents Z

Sachant le diamètre primitif et après avoir déterminer le module  $m$ , nous pouvons calculer le nombre de dents  $Z$  comme suit :

$$d = mZ \implies Z = d/m = 21 \text{ dents} \quad (3.56)$$

Les pignons (1) et (2) ont le même nombre de dents qui est 21 dents.

- ### 4. Calcul des éléments de taillage des engrenages
- Les éléments de taillage correspond aux côtes géométriques de l'engrenage, nous les résumons dans le tableau suivant :

Éléments caractéristiques	Formule	Valeur
Module	$m$ (mm)	4
Nombre de dents	$Z$	21
Diamètre primitif (mm)	$d = mZ$	84
Angle de pression (°)	$\alpha$	20
Diamètre de base (mm)	$d_b = d \cos \alpha$	78,9
Hauteur de saillie (mm)	$h_a = m$	4
Hauteur du creux (mm)	$h_f = 1,25m$	5
Diamètre de tête (mm)	$d_a = d + 2h_a$	92
Diamètre du pied (mm)	$d_f = d - 2h_f$	81,5
Épaisseur au cercle primitif (mm)	$s = m(\frac{\pi}{2})$	6,2
Pas primitif (mm)	$p = \pi m$	12,57

TABLE 3.7 – Éléments caractéristiques des engrenages cylindriques à denture droite

### 3.2.8 Calcul des paramètres du broyage

Le broyage ou les broyeurs d'une façon générale sont caractérisée par plusieurs paramètres entre autre : la capacité de la trémie du chargement, la puissance du moteur, le débit du broyage et le taille de la machine ( dimensions du gabarit).

Dans cette partie, nous nous intéressons à calculer ces paramètres afin de finaliser la fiche technique de la machine.

#### 3.2.8.1 Le volume de la trémie

Une trémie d'alimentation également appelée convoyeur à trémie tampon ou d'alimentation, permet le stockage intermédiaire d'un produit pour générer un flux contrôlé ou

assurer une production ou un recyclage par lots.

Nous optons pour une trémie trapézoïdale comme sur la figure suivante, les dimensions de la petite base ainsi que la grande base se résument dans le tableau ci-après :

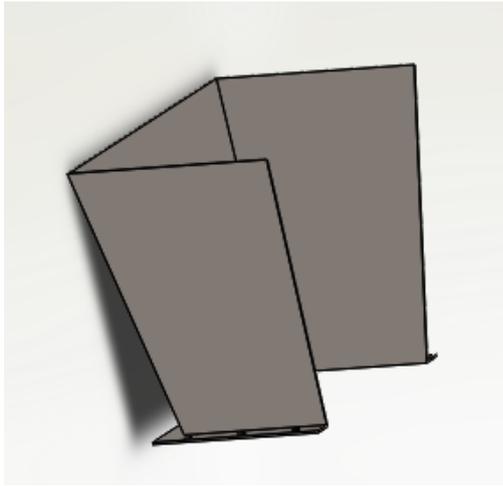


FIGURE 3.20 – Vue de coupe de la trémie d'alimentation

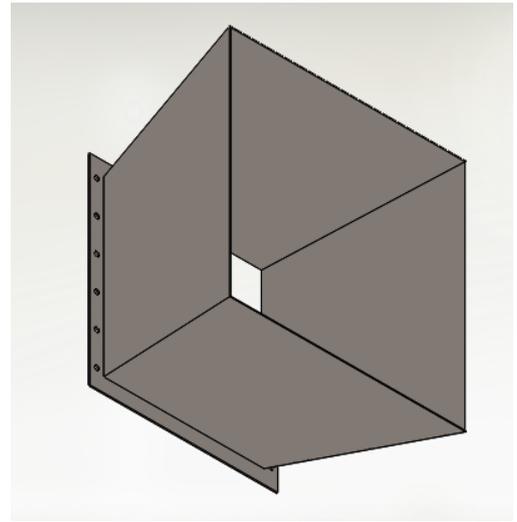


FIGURE 3.21 – Trémie du chargement

Petite base	Longueur $l$ (mm)	Largeur $w$ (mm)
	236	236
Grande base	Longueur $L$ (mm)	Largeur $W$ (mm)
	350	350
Hauteur $H$ (mm)	300	

TABLE 3.8 – Dimensions de la trémie

Le volume d'une trémie trapézoïdale est donnée par :

$$V_{\text{hopper}} = \frac{H}{3} \left( \frac{L^2 W - l^2 w}{L - l} \right) \quad (3.57)$$

En faisant l'application numérique, nous trouvons que :

$$V_{\text{hopper}} = 0,031\text{m}^3$$

Pour une masse volumique moyenne du plastique (elle diffère selon le type du plastique), nous pouvons estimer le poids du plastique que la trémie peut contenir. La valeur moyenne de la masse volumique est autour de  $998 \text{ kg/m}^3$ , on trouve que :

$$P_{\text{plastique}} = \rho_{\text{plastique}} \times V_{\text{hopper}} \implies P_{\text{plastique}} = 30,938\text{kg} \quad (3.58)$$

### 3.2.8.2 Débit du broyage

Le débit du broyage est un paramètre très important pour évaluer les performances d'un broyeur, il dépend principalement de la surface coupée par tour, la vitesse de rotation ainsi que l'épaisseur du plastique.

Les lames sont au nombre 16, huit sur chaque arbre et espacées par des joint de lames d'une épaisseur égale à l'épaisseur de la lame. La surface coupée par chaque lame en un tour est la surface de la partie active de chaque lames par le nombre de lames actives.

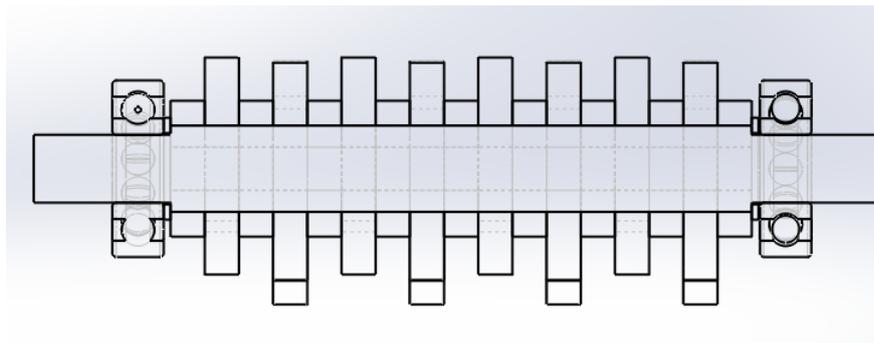


FIGURE 3.22 – Dispositions des lames sur l'arbre

La surface active de chaque lame est estimée en utilisant SolidWorks et on trouve :

$$S_{cc} = 314\text{mm}^2$$

La surface coupée par tour est alors, sachant que nous disposons de 16 lames actives :

$$S_{/tr} = S_{cc} \times n_{lames} \implies \mathbf{S_{/tr} = 5024 \text{ mm}^2/\text{tour}} \quad (3.59)$$

La surface coupée par min est donnée par :

$$S_{/min} = S_{/tr} \times N_s \implies \mathbf{S_{/min} = 1492128 \text{ mm}^2/\text{min}} \quad (3.60)$$

Le débit volumique est donné par :

$$Q_v = S_{min} \times e \implies \mathbf{Q_v = 0,002238192 \text{ m}^3/\text{min}} \quad (3.61)$$

En débit massique en kg/h, nous trouvons que :

$$Q_m = 60Q_v \times \rho_{plastique} \implies \mathbf{Q_m = 134,28 \text{ kg/h}} \quad (3.62)$$

Le débit massique de notre machine est assez important mais il n'est pas suffisant pour juger les performances de la machine, nous sommes en mesure alors de calculer l'efficacité du broyage qui tient en compte le volume du plastique à l'entrée et à la sortie, nous rappelons que le broyeur conçu appartient à la classe des fragmentations grossières où la granulométrie de est à l'ordre de quelques millimètres.

## 3.3 Choix des matériaux

### 3.3.1 Introduction

Le choix des matériaux est une tâche fondamentale et très complexe. En effet, dans un nombre important de cas, il ne concerne pas seulement un aspect purement technique répondant à des exigences fonctionnelles, mais aussi à des attentes relevant des préférences des utilisateurs dans le cadre d'un marché spécifique. Ainsi, le choix des matériaux doit être

analysé sous l'angle de l'ingénierie de matériaux mais aussi sur celle du design industriel, tout en tenant compte de toutes les informations qui lui seront associées.

On distingue deux grandes catégories de matériaux :

1. **Les matériaux de structure** : que nous utilisons principalement pour leurs capacités à soutenir des sollicitations mécaniques et thermique.
2. **Les matériaux fonctionnels** : que nous utilisons pour les propriétés mécaniques et physiques d'une façon générale.

### 3.3.2 Sélection des matériaux

L'art de la conception du projet est de trouver des solutions techniques, tout en répondant aux exigences de stabilité et de résistance, et aux contraintes architecturales de viabilité, de sécurité et d'esthétique.

La sélection d'un matériau n'est jamais due au hasard dans l'industrie. Lors de la phase de conception, les caractéristiques des matériaux doivent être soigneusement étudiées et fixées afin d'éviter toutes complications lors de leur utilisation, ce qui a pour effet d'éviter des coûts superflus.

#### 3.3.2.1 Matériau pour le châssis de la machine

Nous choisissons pour le châssis un matériaux à Haute Limite d'élasticité (HLE) comme le **S355** pour les tubes soudées et ceci est en raison des caractéristiques mécaniques qu'il présente vis à vis de la fonction voulue.

##### 1. Application typiques :

Les aciers à haute limite d'élasticité sont mis en oeuvre dans des secteurs aussi

divers que le transport (engins de chantiers, remorques, machines agricoles, matériel ferroviaire, etc.), le profilage (rayonnage industriel, etc.) et la construction (grues, glissières de sécurité, etc.).

## 2. Spécification générale :

On donne la composition chimique de l'acier S355MC (Acier Micro-allié) :

	C (%)	Mn(%)	Si (%)	P(%)	S(%)	Al(%)	Nb(%)	V(%)	$C_{eq}$ (%)
<b>S355MC</b>	$\leq 0,12$	$\leq 1,50$	$\leq 0,5$	$\leq 0,025$	$\leq 0,02$	$\leq 0,015$	$\leq 0,09$	$\leq 0,20$	$\leq 0,36$

**TABLE 3.9 – Composition chimique du S355MC**

## 3. Caractéristiques

Le carbon équivalent est le paramètre primordial pour juger la soudabilité d'un acier, il est calculé en fonction des pourcentages du carbone et les autres alliages. Plus le carbon équivalent est faible, plus sa soudabilité est bonne. Pour notre cas, le S355 a un  $C_{eq} \leq 0,36$  c'est à dire il a une très bonne soudabilité et cela justifie le choix que nous avons fait pour les tubes soudés sans oublier sa résistance élastique importante qui lui permet de supporter des charges importantes.

### 3.3.2.2 Matériaux pour arbre porteur des lames

Dans ce chapitre, nous avons déjà dimensionné l'arbre porteur des lames et nous avons opter pour un acier de construction mécanique (**E335**) où couramment connu sous le nom (**A60**). C'est un acier d'emploi, pour construction mécanique et supporte parfaitement les charges qui sont appliquées sur l'arbre (avec un coefficient de sécurité important).

**1. Applications typiques :**

La haute résistance mécanique que offre cette nuance d'acier permet son utilisations pour différentes applications comme : Pièces soumises à de fortes pressions de surface, vis sans fin, pignons, clavettes, axes, bagues. . . . .

**2. Composition chimique de E335 :**

Dans la documentation accessible, la composition chimique de cet acier n'est pas bien précises sauf pour quelques éléments d'addition (pourcentage de Soufre (S) est inférieur à 0,045%)

**3. Caractéristiques :**

Les caractéristiques du E335 sont :

- Acier à usage courant en Mécanique générale, non traité et il offre une bonne résistance mécanique ( $R_m \approx 700MPa$ )
- Acier de construction non allié d'usage générale.

Les caractéristiques mécaniques se résument dans le tableau suivant :

**TABLE 3.10 – Caractéristiques mécaniques moyennes E335**

$R_e$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	A(%)	Dureté HRC
335	700	6-16	59,4

**3.3.2.3 Matériaux pour lames**

Pour les lames qui sont les parties fonctionnelles dans notre machine, nous sommes obligés de choisir un matériau qui convient aux conditions de travail. La documentation sur les matériaux à outils nous a permet de choisir le **X200Cr12** pour les lames ou **Z200C12**

**1. Applications typiques :**

Adapté pour la réalisation d'outils de coupes ainsi que d'outils de formage à froid tels que : lames de cisailles filières, matrices, poinçons de coupes très sollicités, outils d'emboutissage, peignes et rouleaux à filer, plaques d'usure. Moules de compactage de poudres métalliques et céramiques. Galets de profilage, moules pour résines synthétiques, couteaux circulaires, cylindres de laminaires, outils pour extrusion à froid d'alliages légers, outils pour le travail du bois et des matières plastiques.

**2. Propriétés :**

Acier caractérisé par une bonne stabilité dimensionnelle. Après traitement thermique, on obtient des valeurs de résistance à la compression et à l'usure très élevées.

**3. Caractéristiques mécaniques :** Livré à environ 250 HB - Apte au traitement thermique environ 64 HRC

### **3.3.2.4 Matériaux pour pignons**

Nous avons opter pour l'Acier allié **16MnCr5**.

**1. Applications typiques :**

Acier très employé en mécanique, pour des pièces de moyennes à fortes sections, arbres, essieux, crémaillères, vilebrequins, bielles, engrenages.

**2. Caractéristiques et composition chimique :**

La composition chimique est donnée comme suit :

COMPOSITION CHIMIQUE: (analyse de coulée suivant la norme EN 10084)						
	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %
DE	0,14	-	1,00	-	-	0,80
A	0,19	0,40	1,30	0,025	0,035	1,10

FIGURE 3.23 – Composition chimique du 16MnCr5

### 3.3.2.5 Matériaux pour roulements

Le matériaux du roulement dépend du constructeur, nous avons travaillé avec les roulements **SKF** donc le matériau dépend de **SKF**.

## 3.4 Conclusion

Après avoir fini avec le dimensionnement des éléments qui constitue le broyeur et après avoir choisi leurs matériaux respectifs. Le chapitre suivant sera dédié à la conception ainsi que la simulation numérique des organes fonctionnels de notre broyeur.

Conception et simulation numérique des  
éléments du broyeur

# Chapitre 4

## Conception et simulation numérique des éléments du broyeur

### 4.1 La modélisation numérique 3D

#### 4.1.1 Introduction

La modélisation 3D permet de créer des objets en 3 dimensions sur ordinateur. Ainsi, il est possible de réaliser des objets complexes, des environnements, des personnages, des bâtiments, des paysages, etc. à partir de formes simples telles que des sphères, des polygones, des cônes ou encore des courbes qui définissent des structures. Tout est possible. Pour habiller les objets, ceux-ci sont recouverts de textures. Une fois cela fait, même si on commence à avoir des résultats, le travail n'est pas terminé. En effet, il est possible d'appliquer des caractéristiques à chaque élément créé pour le mettre en mouvement par exemple ou pour lui assigner des réactions qui surviendront dans telle ou telle situation. Des sources de lumières peuvent aussi être définies pour éclairer virtuellement les objets, les rendre plus réels et les

mettre en situation. Ainsi, la modélisation 3D permet de mettre en situation des objets avant de procéder à leur fabrication. C'est ce que l'on appelle la CAO, la conception assistée par ordinateur.

#### 4.1.2 Les logiciels de conception et ingénierie mécanique 3D

Les ingénieurs et les concepteurs utilisent des logiciels de conception et d'ingénierie mécanique pour modéliser, valider et communiquer leurs idées avant la production. Des outils supplémentaires peuvent également être intégrés dans le logiciel de CAO pour la fabrication de produits sur une machine CNC ou une imprimante 3D. Les logiciels d'ingénierie mécanique sont utilisés dans plusieurs secteurs, notamment pour la conception de machines industrielles, la construction automobile et les produits de grande consommation.

Parmi ces logiciels nous distinguons : le groupe du logiciel Autodesk, Le groupe Dassault Systèmes Solidworks et CATIA. Dans notre cas, nous allons utiliser le logiciel Solidworks pour le reste.



FIGURE 4.1 – Autodesk



FIGURE 4.2 – Dassault Systèmes

### 4.1.3 Types de conception et d'ingénierie mécanique

#### 4.1.3.1 Conception Assistée par Ordinateur CAO

La CAO est l'un des outils de conception logicielle les plus couramment utilisés. Les modèles créés avec les logiciels de CAO servent souvent de base de travail dans d'autres outils de conception et d'ingénierie mécanique. La CAO, ou conception et dessin assistés par ordinateur (CDAO), repose sur une technologie de conception et de documentation technique qui remplace le dessin manuel par un processus automatique.

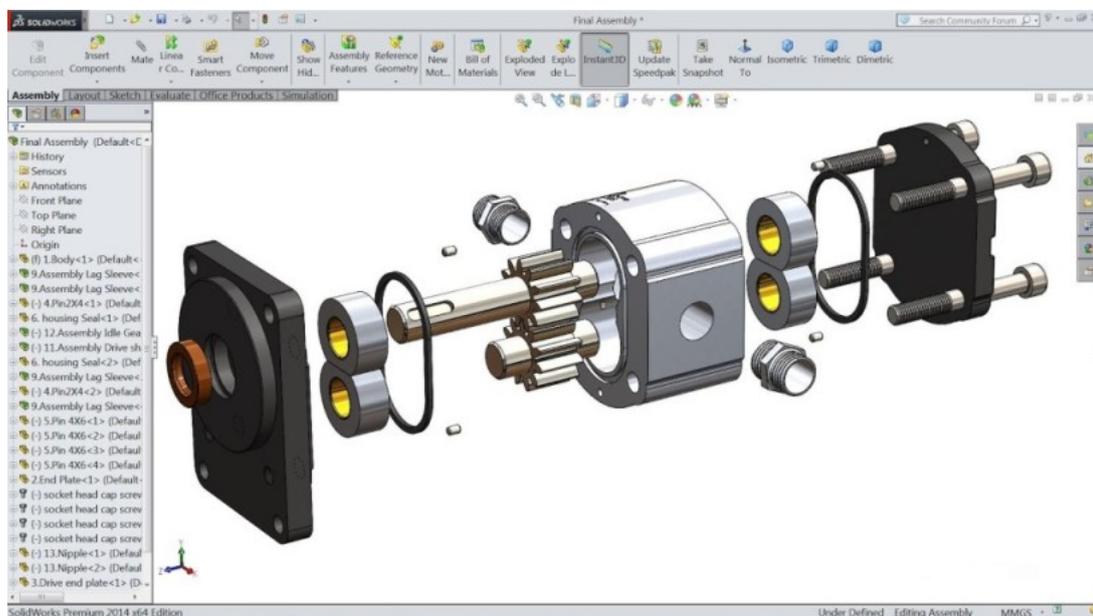
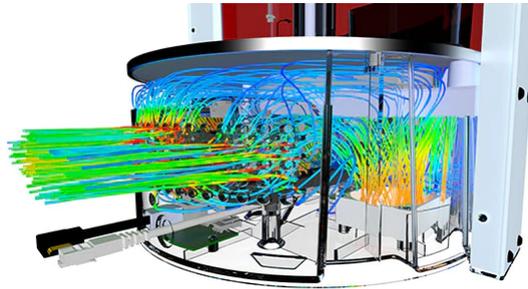


FIGURE 4.3 – Exemple de l'interface Solidworks pour la conception Assistée par Ordinateur

#### 4.1.3.2 Ingénierie Assistée par Ordinateur IA0

L'IAO couvre une large gamme d'analyses. Elle permet de réaliser virtuellement des tâches complexes, telles que des analyses par éléments finis (FEA) et des calculs de dyna-

mique des fluides (CFD), avant de créer des prototypes physiques.



**FIGURE 4.4 – Exemple de l'Ingénierie Assistée par Ordinateur IAO (Autodesk)**

#### **4.1.3.3 Fabrication Assistée par Ordinateur FAO**

La FAO fait référence à l'emploi de logiciels conçus pour automatiser le processus de fabrication. La FAO sert généralement à créer des trajectoires d'outil pour le fraisage, le tournage et le fraisage-tournage CNC 2,5 à 5 axes.



**FIGURE 4.5 – Exemple de la Fabrication Assistée par Ordinateur FAO**

#### **4.1.4 Le logiciel SolidWorks**

SolidWorks est un logiciel de conception assistée par ordinateur basé sur un modèleur géométrique 3D capable de modéliser des formes complexes.

En effet, la modélisation avec SolidWorks repose sur des esquisses dimensionnées, ce qui permet de spécifier très précisément les distances et mesures de l'objet, en ayant également la possibilité grâce à l'historique de SolidWorks d'en modifier les valeurs. Cela rend la modélisation précise et souple. L'utilisation de ce logiciel a été choisie vu qu'il est capable de réaliser les différentes formes de nos composants de machine ; de plus il nous permet d'enregistrer le modèle 3D sous les différents formats neutres (DXF, STL, STEP, IGES, etc...) afin de faire des études plus avancées sur d'autres logiciels tels que (Ansys, Abaqus, ...).

#### **4.1.4.1 Historique**

Créé en 1993 par l'éditeur américain éponyme, SolidWorks a été acheté le 24 juin 1997 par la société Dassault Systèmes. Parmi les plus grandes organisations utilisant SolidWorks, on peut citer Michelin, AREVA, Patek Philippe, MegaBlocs, Axiome, ME2C, SACMO, Le Boulch, Robert Renaud.

#### **4.1.4.2 Mode de fonctionnement**

SolidWorks utilise un modèleur 3D utilisant des formes paramétriques. Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers sont en relation. Toute modification à n'importe quel niveau du fichier traité sera répercutée directement vers tous les fichiers concernés.

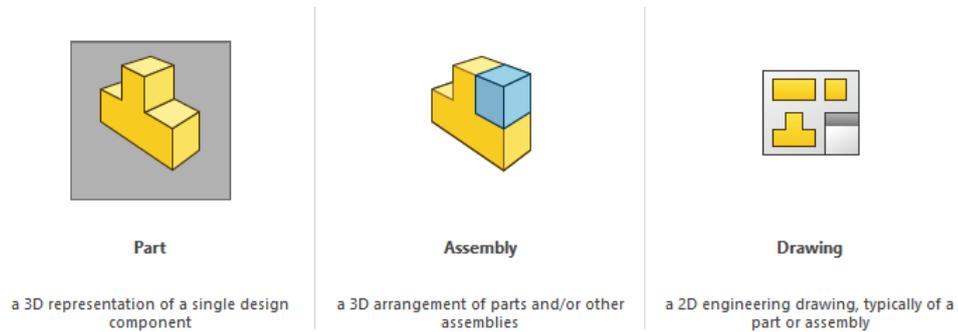


FIGURE 4.6 – Les concepts de base de SolidWorks

## 4.2 Modélisation géométriques des éléments du broyeur

### 4.2.1 Conception de la table du broyeur

Elle est composée de tubes métalliques en HLE (355) présentant une bonne résistance à la rupture ainsi qu'aux sollicitations qui sont rencontrées durant le fonctionnement. Elle est assemblée à l'aide de l'outil mécano-soudure car l'acier S355 présente une très bonne soudabilité.

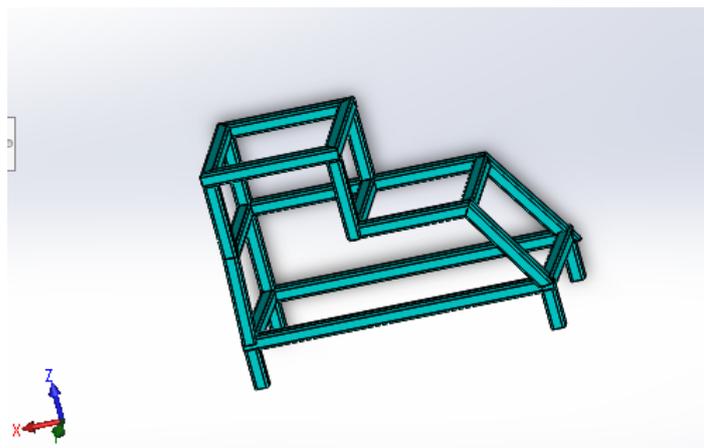


FIGURE 4.7 – Table de la machine

## 4.2.2 Conception des poulies

Vu que nous avons opter pour un système poulie-courroie pour la réduction de vitesse. Nous sommes alors tenus de modéliser les poulies (motrice et réceptrice) que nous avons préalablement dimensionnées.

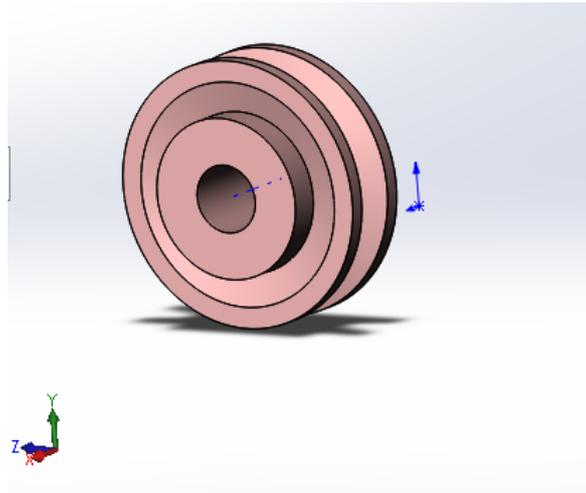


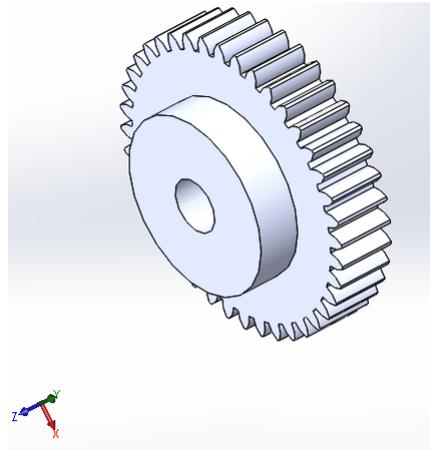
FIGURE 4.8 – Modèle de la poulie motrice

## 4.2.3 Conception des engrenages

Les engrenages ont pour but de transmettre la puissance disponible sur le moteur aux deux arbres portant les lames, ils ont été déjà dimensionnés et nous pouvons les choisir à partir de la bibliothèque de SolidWorks.

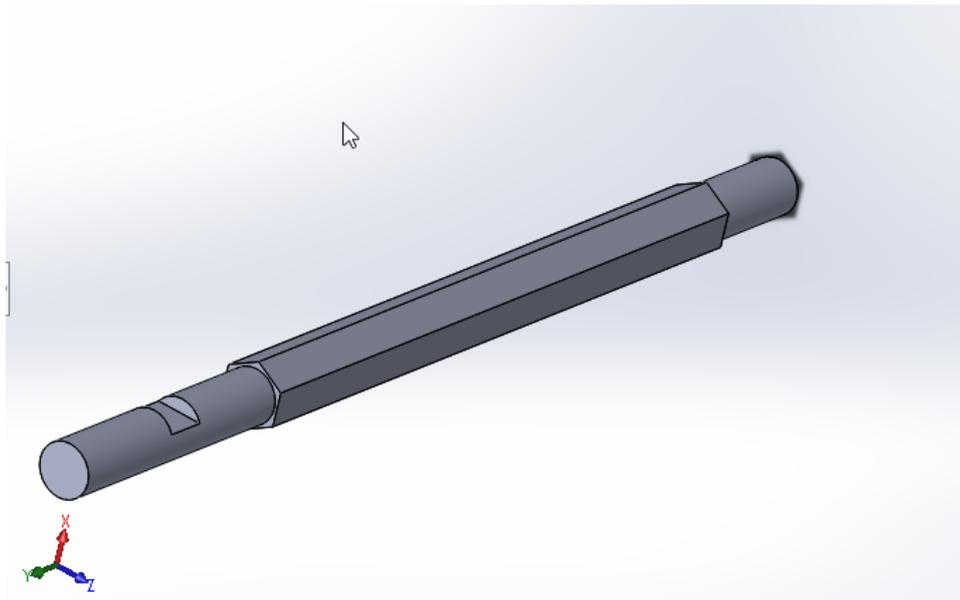
## 4.2.4 Conception de l'arbre porteur des lames

Nous avons déjà dimensionné l'arbre et nous avons opter pour une géométrie prismatique (hexagonale) pour la transmission du couple aux lames. Nous avons également prévu



**FIGURE 4.9 – Modèle de l'engrenage cylindrique à dentures droites**

une partie en bout d'arbre pour le logement des roulements.

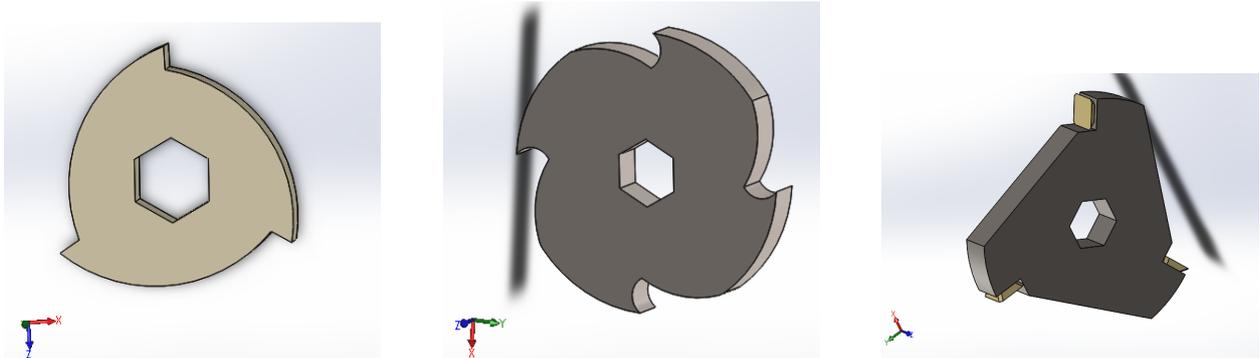


**FIGURE 4.10 – Modèle de l'arbre de transmission**

#### 4.2.5 Conception des lames

Les lames constituent la partie active et fonctionnelle dans notre machine. Afin de pouvoir optimiser le fonctionnement, nous avons opter pour trois types et configurations dif-

férentes de lames mais avec les mêmes dimensions géométriques déjà calculées et vu que nous avons bien défini les conditions de travail, nous allons effectuer dans la suite les simulations numériques afin de choisir la forme plus ou moins optimale en tenant compte également de la facilité d'usinage et le coût qui lui est associé.



#### 4.2.6 Assemblage des éléments du broyeur

Les lames sont décalées l'une par rapport à l'autre d'un angle de (120 pour une lames à 3 parties actives et de 90 pour une lame à 4 parties actives) car elle ne doivent pas travailler en même temps. L'assemblage des éléments du broyeur est détaillé dans le dessin d'ensemble suivant :

### 4.3 Simulation numérique sur ANSYS

#### 4.3.1 Introduction

Une analyse de structure permet de prédire la réponse d'un milieu (solide ou fluide) soumis à des conditions imposées par l'environnement externe (force, déplacement, flux ther-

mique,...).

Le but d'une analyse structurale est de déterminer les contraintes et déformations d'un système ou un composant auquel on applique un chargement, cela à partir des déplacements  $u$  créés par ce chargement  $F$ . Cette prédiction est basée sur la satisfaction de quelques équations fondamentales (équation d'équilibre mécanique, équation de la chaleur, loi de comportement...).

Le logiciel ANSYS, dans sa version ANSYS Mechanical ou Multiphysics, permet une gamme complète d'analyses structurales. Ainsi ANSYS gère trois types principaux d'analyse structurale mécanique, auxquelles il faut ajouter les analyses de chargement thermiques, et les analyses des réponses propres de la structure (flambement et modes de résonance propres en particulier)

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

La méthode générale utilisée pour résoudre les problèmes par éléments finis peut se décomposer :

1. **Choix de la géométrie et du maillage** Définition des points, des lignes des surfaces et des volumes ainsi que leur discrétisation. Lors de cette étape, il faut absolument prendre en compte le fait que seuls les éléments de maillage qualifiés peuvent être faire l'objet d'un post-traitement.
2. **Définition du modèle mathématique**
  - Formulation : mécanique, thermique, thermomécanique, fluide...
  - Type d'analyse : statique, transitoire, dynamique,...
  - Comportement du matériau : élastique, isotrope, plastique, ...
  - Type d'éléments : poutre, barre, coque, triangle, cube...

- Définition des propriétés des matériaux : module d'élasticité, masse volumique, coefficient de Poisson, conductivité thermique...
- Définition des propriétés géométriques : section, inerties, épaisseur,...
- Définitions des conditions aux limites : blocage des déplacements,...
- Définitions des conditions initiales et des sollicitations : chargement mécanique, thermique, électrique,...

### 3. Résolution du problème discrétisé :

- Calcul des matrices de rigidité et de masse de chaque élément fini.
- Assemblage des matrices de rigidité et de masse de la structure complète.
- Application des conditions aux limites et des chargements.
- Résolution du système d'équations.

### 4. Analyse et post-traitement des résultats :

- Quantités locales : déplacements, contraintes, déformations, ...
- Quantités globales : déformation maximale, énergie de déformation,...

## 4.3.3 Simulation numérique de l'arbre

### 4.3.3.1 L'arbre en flexion

Nous avons déjà effectué les simulations en flexion pour valider le fonctionnement de la machine (étude de rigidité de l'arbre). L'arbre est simplement appuyés en ses extrémités et les charges sont appliquées en trois points différents. Les conditions limites sont sur les déplacements de telle sorte que :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{xA} = 0 \\ U_{yA} = 0 \\ U_{zA} = 0 \end{array} \right\}$$

Et :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{xB} = Libre \\ U_{yB} = 0 \\ U_{zB} = 0 \end{array} \right\}$$

On aura alors : Avec un maillage quadratique de 1 mm, nous nous retrouvons avec

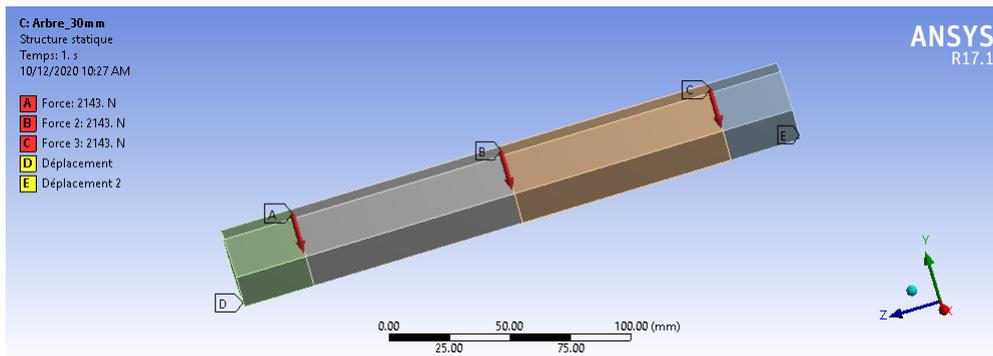


FIGURE 4.11 – Conditions sur la structure

un nombre d'éléments de 174918 et 742695 noeuds et la solution est comme suit :

Pour les déplacements :

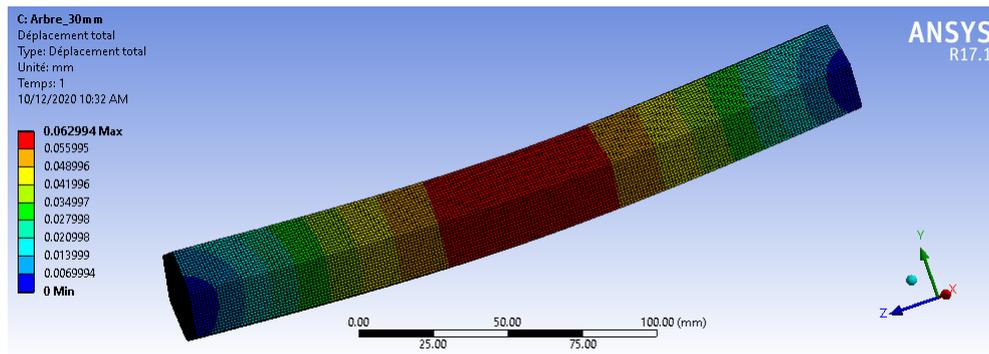


FIGURE 4.12 – Conditions sur la structure

Pour les contraintes :

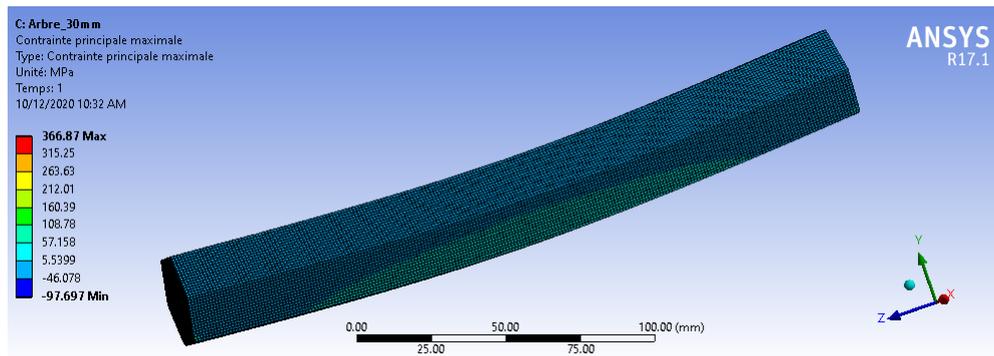


FIGURE 4.13 – Contraintes principale maximale

Pour les déformations :

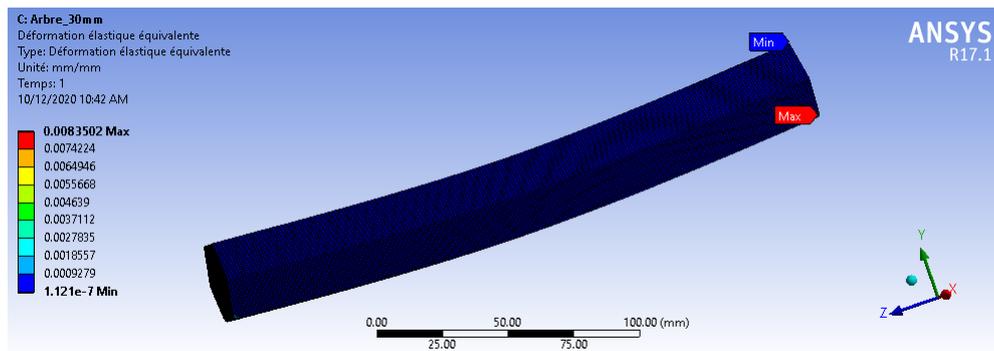


FIGURE 4.14 – Déformations élastique équivalente

### 4.3.3.2 L'arbre en torsion

Pour la torsion, nous suivons la même démarche qu'en flexion mais le chargement ainsi que les conditions limites changeront. Nous avons alors une face fixe (Support fixe) et nous appliquons un moment de torsion de 128 N.m sur l'autre extrémité. Les conditions de maillage sont désormais les mêmes.

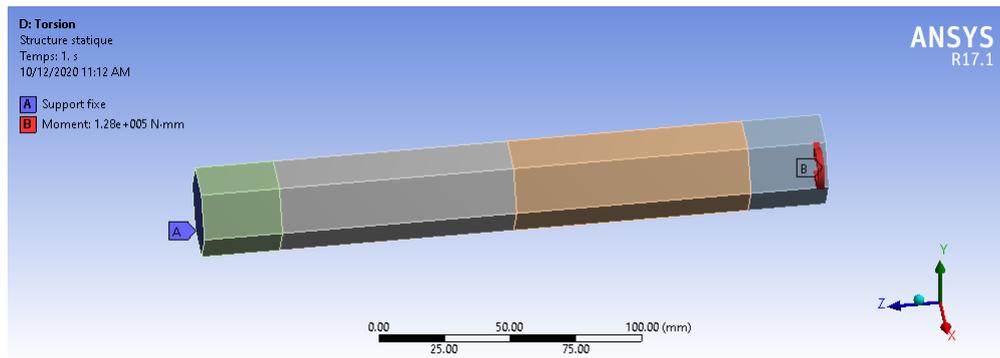


FIGURE 4.15 – Conditions de la torsion

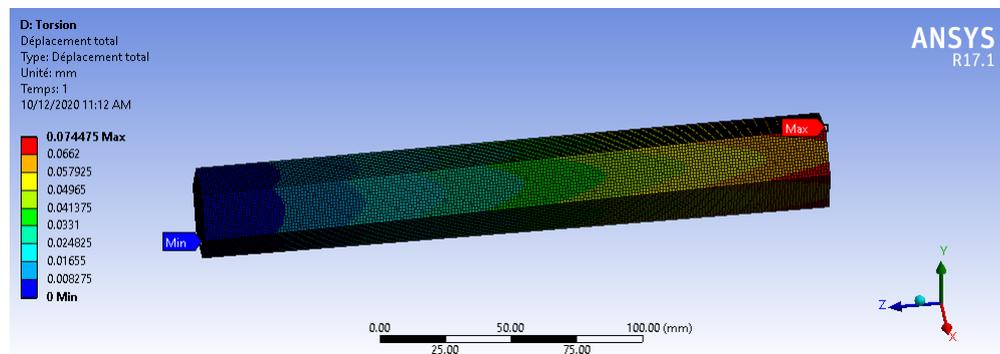


FIGURE 4.16 – Déplacement total

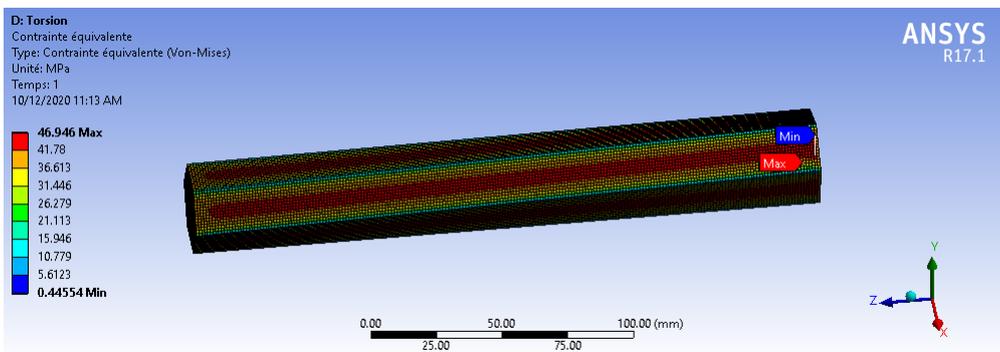


FIGURE 4.17 – Contrainte élastique équivalente

#### 4.3.4 Simulation numérique des lames

Les lames sont les éléments de coupe dans notre machine et donc ce sont les organes les plus importants dans le processus du broyage et donc il est important d'effectuer les

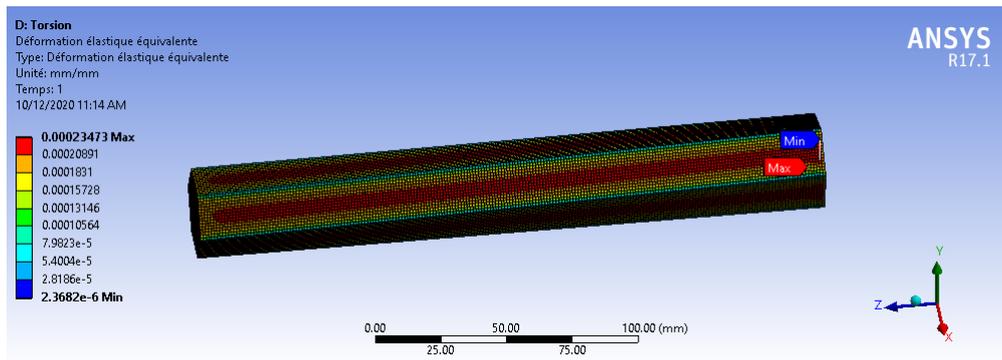


FIGURE 4.18 – Déformations élastique équivalente

simulations afin d'étudier leurs résistance par rapport aux conditions du travail. Les résultats de la simulation pour les trois types de lames sont les suivants (en considérant qu'un seul bout de lame est actif et qui est le cas en réalité).

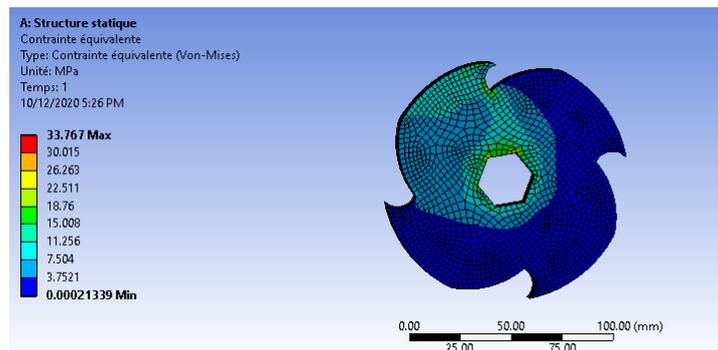


FIGURE 4.19 – Contrainte élastique équivalente de la lame à quatre parties actives

### 4.3.5 Conclusion

À partir des résultats des simulations numériques effectuées, nous pouvons conclure que le choix du matériau de l'arbre ainsi que le dimensionnement afin de choisir le diamètre de l'arbre sont justifiés. La contrainte équivalente maximale en torsion ainsi qu'en flexion sont inférieures à la limite élastique du matériau (E335) qui est de 335 MPa. Pour les lames,

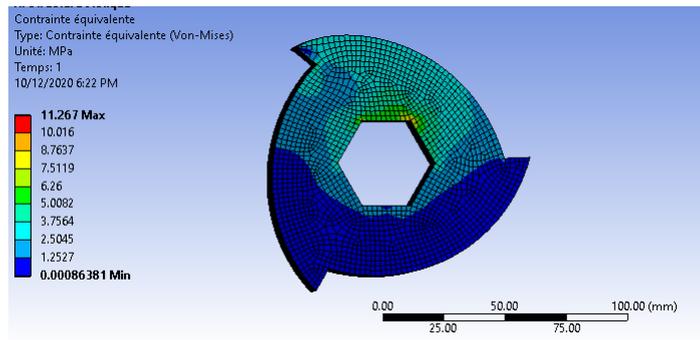


FIGURE 4.20 – Contrainte élastique équivalente de la lame à quatre parties actives

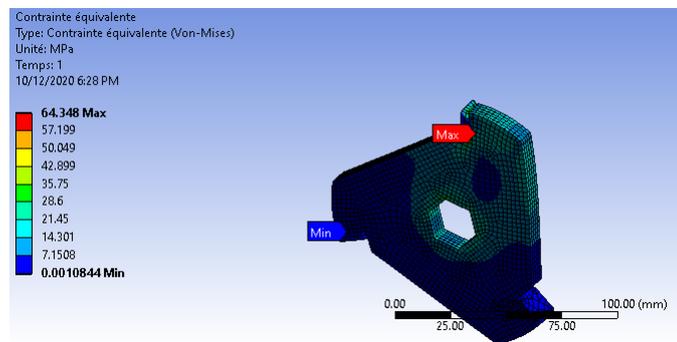


FIGURE 4.21 – Contrainte élastique équivalente de la lame avec pastilles

nous avons trois configurations différentes et il est clair qu'elles résistent toutes aux efforts appliquées mais nous avons opter pour les lames à pastilles vu la distribution des contraintes ainsi que des considérations économiques.

Plan de maintenance et analyse  
économique du broyeur

# Chapitre 5

## Plan de maintenance et procédés de fabrication

### 5.1 La maintenance

#### 5.1.1 Définition de la maintenance :

D'après la norme française NF EN 13306 X 60-319, la maintenance peut être définie comme un ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un équipement, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir sa fonction requise.

#### 5.1.2 Les objectifs de la maintenance :

Les objectifs de la maintenance sont nombreux et nous citons :

— Assurer la qualité et la quantité des produits fabriqués tout en respectant les

délais.

- Optimiser les actions de maintenance (exemple : réduire la fréquence des pannes).
- Contribuer à la création et au maintien de la sécurité au travail.
- Consolider la compétitivité de l'entreprise (exemple : améliorer la productivité)

Comme nous pouvons illustrer les objectifs dans la figure suivante :

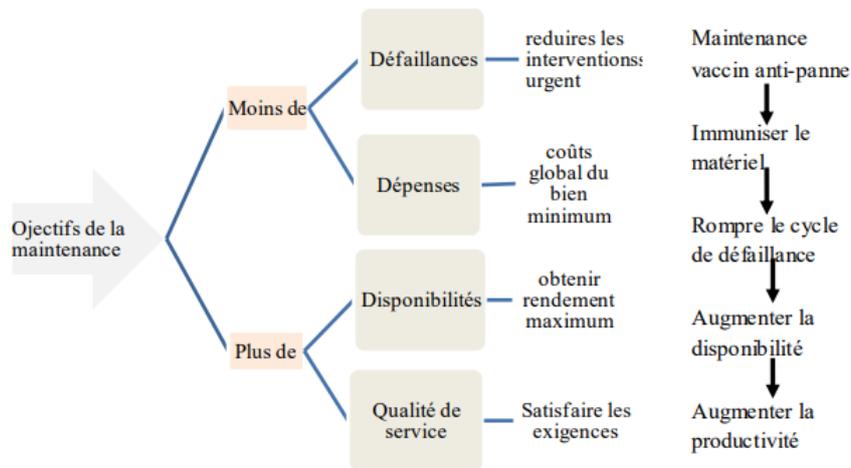


FIGURE 5.1 – Objectifs de la maintenance

### 5.1.3 Les concepts de la maintenance

L'analyse des différentes formes de maintenance repose sur 4 concepts :

1. **Les évènements** qui sont à l'origine de l'action : référence à un échéancier, relation à un type d'évènement (auto diagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc.), l'apparition d'une défaillance.
2. **Les méthodes de maintenance** qui leur seront respectivement associées : maintenance préventive systématique, maintenance préventive conditionnelle, maintenance corrective.

3. **Les opérations de maintenance** proprement dites : inspection, contrôle, dépannage, réparation, etc.
4. **Les activités connexes** : maintenance d'amélioration, rénovation, reconstruction, modernisation, travaux neufs, sécurité, etc.

La norme EN NF X 60-000 synthétise les méthodes de maintenance dans le diagramme suivant :

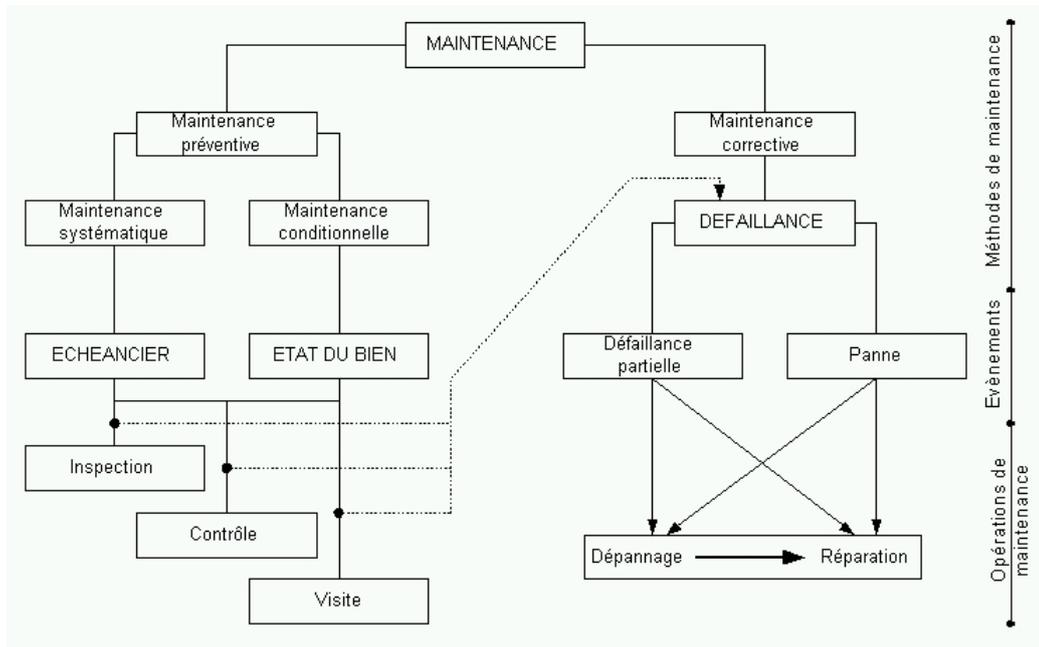


FIGURE 5.2 – Diagramme synthétisant les méthodes de maintenance

### 5.1.4 Définition du plan de maintenance

Selon la norme NF X 60-010, c'est « un document énonçant les modes opératoires, les ressources et la séquence des activités liées à la maintenance d'un matériel ». Ce document est établi dans une phase d'analyse et de conception de la maintenance à effectuer sur un matériel. Il rentre totalement dans une démarche de préparation et constitue souvent le

cœur du dossier de préparation. Le plan de maintenance doit permettre l'organisation de la maintenance du matériel et concourir à sa réalisation.

### 5.1.5 Objectifs du plan

L'établissement du plan de maintenance permet d'atteindre les objectifs suivants :

- Garantir une continuité de service.
- Garantir un niveau de disponibilité connu à un coût global maîtrisé.
- Maintenir une qualité de service contractuelle.
- Prévenir les risques.

### 5.1.6 Analyse de Modes de Défaillance selon leurs Effets et leur Criticité (AMDEC) :

#### 5.1.6.1 Introduction

La méthode AMDEC consiste à identifier les risques de mauvais fonctionnement d'une machine puis à en chercher les effets et les conséquences. Elle fait ressortir les points faibles d'un équipement et permet de poser des actions correctives justifiées. On peut aussi voir quels sont les équipements critiques de notre parc sur lesquelles on doit s'attarder de faire une bonne maintenance. Le but premier de L'AMDEC est de maîtriser les défaillances, ce qui permet par la suite de garantir une fiabilité, une maintenabilité, une disponibilité et une sécurité convenable. L'étude AMDEC-machine vise à réduire le nombre de défaillances ainsi que le temps de non-disponibilité des machines tout en améliorant la sécurité.

### 5.1.6.2 Démarche AMDEC

La méthode AMDEC suit une démarche bien définie dans la figure suivante :

#### A. Analyse fonctionnelle :

Il s'agit d'identifier clairement les éléments à étudier et les fonctions à assurer. C'est une étape indispensable car il est nécessaire de bien connaître les fonctions de la machine pour en analyser ensuite les risques de dysfonctionnement.

#### B. Mode de défaillance :

Un mode de défaillance est la manière par laquelle un dispositif peut venir à être défaillant, c'est-à-dire à ne plus remplir sa fonction. Ceci peut intervenir de quatre manières différentes :

- Plus de fonction : la fonction cesse de se réaliser.
- Pas de fonction : la fonction ne se réalise pas lorsqu'on la sollicite.
- Fonction dégradée : la fonction ne se réalise pas parfaitement : altération des performances.
- Fonction intempestive : la fonction se réalise alors qu'elle n'est pas sollicitée.

C. **Cause de défaillance** Une cause de défaillance est l'événement initial pouvant conduire à la défaillance d'un dispositif par l'intermédiaire de son mode de défaillance. Il existe trois types de cause conduisant à une défaillance :

- Causes internes au matériel.
- Causes externes dues à l'environnement et/ou à l'exploitation.
- Causes externes dues à la main d'œuvre.

D. **Effet de la défaillance** L'effet d'une défaillance est, par définition, la conséquence subie par l'utilisateur. Il est associé au couple mode-cause de la défaillance et correspond à la perception finale de celle-ci par exemple, l'arrêt de production, etc.

Nous notons que trois paramètres interviennent dans l'établissement d'un plan de

maintenance avec la méthode AMDEC qui sont : **La Gravité (G)** qui est l'impact de la défaillance sur le produit ou le processus, **la Fréquence d'Occurrence (F)** qui est la probabilité d'apparition d'une cause ou d'une défaillance et la **Non-Détection (D)** qui la probabilité de la non-perception de l'existence d'une cause ou d'une défaillance. Ces paramètres sont liés à des chiffres (cotations) selon le cas, nous présentons la grille de cotation ci-après :

(a) Pour la gravité :

niveau	valeur	définition
mineure	1	-arrêt de production : moins de 15 minutes -aucune ou peu pièce de rechange nécessaire
moyenne	2	-arrêt de production : de 15 minutes à une heure -pièces en stock
majeure	3	-arrêt de production : 1 heure à 2 heures -pièces en stock ou livraison ultra-rapide
grave	4	-arrêt de production : 2 heures et plus -long délai de livraison ou back-order

FIGURE 5.3 – Échelle de gravité

(b) Pour la fréquence :

niveau	valeur	définition
très faible	1	défaillance rare : moins de une défaillance par année
faible	2	défaillance possible : moins de une défaillance par trimestre
moyen	3	défaillance occasionnelle : moins de une défaillance par semaine
élevé	4	défaillance fréquente : plus de une défaillance par semaine

FIGURE 5.4 – Échelle de la fréquence

(c) Pour la non-détection :

niveau	valeur	définition
évident	1	détection certaine, sirène, moyens automatiques, signes évidents
possible	2	délectable par l'opérateur, par des routes d'inspections, vibrations
improbable	3	difficilement détectable, moyens complexes (démontages, appareils)
impossible	4	indétectable, aucun signes

FIGURE 5.5 – Échelle de la non-détection

### E. Modes de défaillance

Le mode de détection est la manière par laquelle un utilisateur est susceptible de détecter la présence d'une défaillance comme la détection visuelle, élévation de température, odeurs, bruits, etc.

### F. Criticité

La criticité est une évaluation quantitative du risque constitué par l'analyse du scénario mode cause-effet-détection de défaillance. La criticité est alors évaluée à partir de la combinaison de trois facteurs déjà énoncés (Gravité, fréquence d'apparition et la Non-Détection). Elle est alors donnée comme suit :

$$\text{Criticité (C)} = \text{Gravité (G)} \times \text{Fréquence (F)} \times \text{Non-Détection (D)}$$

L'échelle de la criticité est le suivant :

valeurs	définition
1-6	négligeable
8-18	moyenne
24-36	élevée
48-64	interdit

FIGURE 5.6 – Échelle de la criticité

### 5.1.6.3 Analyse AMDEC du broyeur

Dans le broyeur, nous distinguons quatre sous-ensembles importants qui sont le groupe de commande électrique (Le moteur électrique), les organes de transmission de puissance (poules, courroies, engrenages), les paliers à roulements et les éléments de coupe. Nous effectuons alors une table AMDEC pour chaque sous-ensemble afin de recenser toutes les défaillances possibles.

Pour le groupe de commande :

Ensemble : Broyeur								
Sous-ensemble : Groupe d'alimentation								
Matériels		Caractéristiques de la défaillance			Criticité			
Élément	Fonction	Défaillance	Cause	Effet	F	G	D	C
<b>Moteur électrique</b>	Entraînement de la machine	Usure des charbons ; Court-circuit	Basse ou haute tension ; Isolement endommagé	Arrêt de la machine	2	2	3	12

FIGURE 5.7 – Groupe d'alimentation

Pour le groupe du guidage :

Ensemble : Broyeur								
Sous-ensemble : Groupe de guidage								
Matériels		Caractéristiques de la défaillance			Criticité			
Élément	Fonction	Défaillance	Cause	Effet	F	G	D	C
<b>Paliers à roulements</b>	Guidage en rotation	Déformation des billes ; Grippage	Manque de lubrification ; Surcharge	Bruit ; Vibrations	1	3	3	9

Pour les organes de transmission de puissance :

Ensemble : Broyeur								
Sous-ensemble : Organe de transmission de puissance								
Matériels		Caractéristiques de la défaillance			Criticité			
Élément	Fonction	Défaillance	Cause	Effet	F	G	D	C
<b>Courroie</b>	Transmission de puissance et de mouvement	Usure prématurée des courroies ;	Défaut de fabrication ; Mauvais alignement des poulies	Perte de performance	1	2	2	4
<b>Poulie</b>	Transmission de mouvement	Sautillement	Excentricité ; Mauvais serrage sur l'arbre	Perte de performance	1	2	2	4
<b>Pignons</b>	Transmission de mouvement	Usure des dents ; Grippage des dents	Manque de lubrification ; Surcharge	Entraînement impossible Coincement	2	3	2	12

FIGURE 5.8 – Organes de transmission de puissance

Pour les éléments de coupe :

Ensemble : Broyeur								
Sous-ensemble : Éléments de coupe								
Matériels		Caractéristiques de la défaillance			Criticité			
Élément	Fonction	Défaillance	Cause	Effet	F	G	D	C
<b>Corps broyant</b>	Broyer de la matière	Usure de la pastille ; Cassure	Abrasivité des composants introduit dans la chambre du broyage	Bruit ; Diminution des performances et broyabilité ; Arrêt de la production	2	3	3	18

#### **5.1.6.4 Actions correctives à prendre :**

Après avoir recenser toutes les principales défaillances que nous pouvons rencontrer lors du fonctionnement de la machine, le plan de maintenance doit contenir les actions correctives à prendre afin de réduire la criticité des défaillances pour une durée de vie, de la machine et ses organes, plus importantes. Ces actions concernent chaque sous-ensemble séparément et ils sont les suivantes :

##### **1. Groupe de commande**

Pour résoudre le problème du bobinage, nous devons faire une inspection de voltage avant la mise en marche de la machine. Un contrôle de qualité sera également nécessaire.

##### **2. Organes de transmission de puissance**

Une vérification avant installation des poulies et courroies est indispensable ainsi que la vérification de l'alignement.

##### **3. Guidage en rotation**

Vu que la cause de défaillance majeure est le manque de lubrification, une lubrification régulière est indispensable comme mesure de correction et de prévention.

##### **4. Les éléments de coupe**

L'usure des éléments de coupe à un impact remarquable sur les performances de la machine déjà elle admet la criticité la plus élevée dans l'analyse AMDEC. Vu que nous avons opté pour des lames avec pastilles, le problème de l'usure est diminué et le changement des pastilles est une solution pratique et économique dans ce cas.

## 5.2 Procédé de fabrication

Avant de passer à la réalisation, il est à noter que nous avons besoin de prévoir le procédé d'usinage pour certaines pièces.

### 5.2.1 Choix du procédé de fabrication des lames et joints de lames

Le but est de réaliser le trou hexagonal sur les lames car nous avons opter pour un arbre hexagonal de 30 mm de diamètre. Les procédés de découpe possible sont :

- Découpe par jet d'eau
- Découpe par Plasma
- Découpe par Laser
- Découpe par fil(électroérosion) EDM

Une brève comparaison entre ces procédés est décrite dans le tableau suivant :

	<i>Jet d'eau</i>	<i>Plasma</i>	<i>Laser</i>	<i>EDM</i>
<i>Procédé</i>	Procédé d'érosion : abrasif liquide à haute vitesse	Procédé de fusion à l'aide d'un arc de gaz ionisé à haute température	Procédé de fusion à l'aide d'un rayon laser concentré	Procédé d'érosion à l'aide de décharges électriques
<i>Matériaux</i>	Tous matériaux.	Principalement l'acier, l'acier inoxydable et l'aluminium.	Principalement l'acier, l'acier inoxydable et l'aluminium. D'autres matériaux peuvent également être découpés.	Matériaux conducteurs uniquement.
<i>Épaisseur</i>	Jusqu'à 60 cm, pratiquement tous les matériaux. La contrainte de l'axe Z est la seule limite pour l'épaisseur.	Jusqu'à 5 - 7,5 cm, selon les matériaux.	Généralement 2,5 cm ou moins, selon les matériaux.	Généralement 30 cm ou moins.
<i>Précision</i>	Jusqu'à 0,025 mm	Jusqu'à 0,25 mm	Jusqu'à 0,025 mm	Jusqu'à 0,0025 mm
<i>Investissent</i>	60 000 \$ à plus de 300 000 \$	60 000 \$ à plus de 300 000 \$	200 000 \$ à plus de 1 million \$	100 000 \$ à plus de 400 000 \$

De plus, on peut comparer l'état de surface de coupe entre les procédés et on trouve :



**FIGURE 5.9 – Découpe par jet d'eau**



**FIGURE 5.10 – Découpe par Plasma**

**Remarques :**

- Nous remarquons que pour le découpage par jet d'eau et par électroérosion, une transformation secondaire est inexistante. Pour le jet d'eau, c'est un procédé de découpe à froid donc les bords sont doux et satinés. Pour l'EDM, la ZAT est très superficielle.



**FIGURE 5.11 – Découpe par Laser**



**FIGURE 5.12 – Découpe par EDM**

- Toutefois, pour le procédé de découpe par plasma, une transformation secondaire est nécessaire comme le meulage pour éliminer les ZAT.
- Pareil pour le découpage par Laser, ou une transformation secondaire est aussi nécessaire

## 5.3 Conclusion

En tenant compte des paramètres déjà énoncés, on peut conclure que les procédés de découpe par jet d'eau et par électroérosion sont les choix optimaux, pour la réalisation de l'hexagone sur les lames, économiquement et techniquement (très bonne précision avec un très bon état de surface). Toutefois, nous optons pour le découpage par électroérosion.

# Conclusion

---

## Conclusion

Cette étude apporte une contribution énorme à un besoin environnemental, le recyclage des déchets non dégradables. À travers cette étude, on a pu approfondir nos connaissances en conception et construction mécanique.

Pour l'étude de conception du broyeur, nous étions contraints à passer par différents calculs de ce système, soit en performance ou bien en résistance des matériaux.

Afin de valider cette étude, nous voulions réaliser la machine concrètement mais nous n'avons pas pu le faire avec les conditions spéciales de cette année. Nous avons alors adopté les simulations numériques, qui nous ont permis de renforcer l'étude théorique et de localiser les zones de défaillance.

Les résultats obtenus par simulation ou par calcul direct semblent satisfaisantes et répondent positivement aux contraintes imposées et donc le dimensionnement des éléments de machine ainsi que le choix des matériaux sont validés.

Par ailleurs, ce projet nous a offert la possibilité de mettre en pratique les connaissances acquises au cours de notre cycle (construction mécanique, calcul et dimensionnement, simulation des comportements mécaniques, choix et sélection des matériaux...). De plus, nous avons profité des connaissances acquises en Maintenance Industrielle pour établir un plan de maintenance de la machine.

En outre, l'accomplissement de ce travail a été une occasion pour améliorer des connaissances techniques qui concerne le recyclage en général et celui du plastique en particulier.

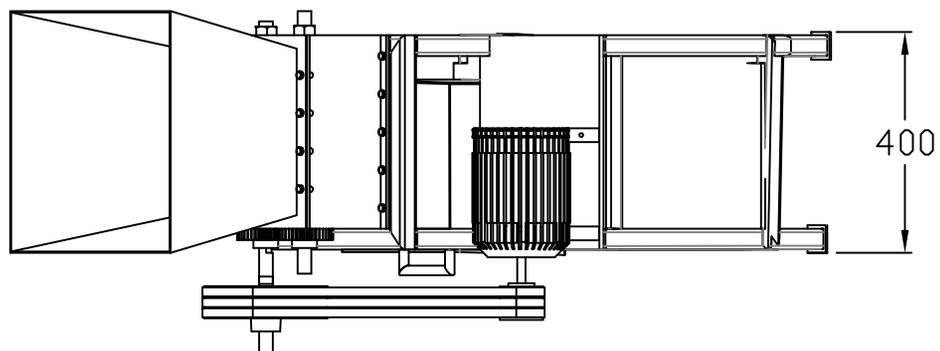
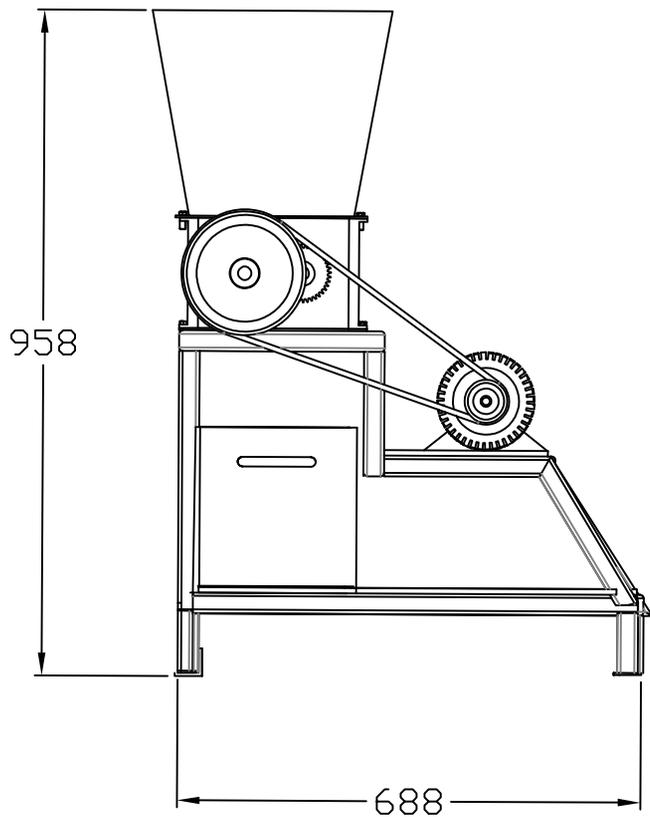
Comme il est intéressant de réaliser la machine, il est également intéressant de compléter ce travail avec :

- 
- Optimisation des formes géométriques des éléments de la machine ainsi que leurs matériaux respectifs.
  - Élaboration de la gamme d'usinage pour les différentes pièces
  - Adaptation de la machine à d'autres types de matériaux (comme le bois) et ceci en choisissons par exemple un moteur à deux vitesses
  - Étude économique du projet

# Références

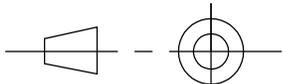
- ACIER, QUALI. *Catalogue sur les aciers*, p. 5, 9.
- AFNOR. *TEXROPE (fabricant de courroies) : Conduite de calcul des courroies (catalogue)*.  
T. 1, p. 26–102.
- ALAIN CHAMAYOU, Jacques Fages. *Broyage dans les industries agroalimentaires*.
- BÉCHET, Éric. *Dimensionnement des arbres*. ISBN : ISSN 2051-249X.
- BELKACEMI, Yacine. *Cours de Résistance des Matériaux (RDM I)*. Chap. 3.3 Flexion composée.
- BILLON, Noëlle. *Comportement mécaniques des polymères*.
- BOUAZIZ, Mohamed. *Cours de Construction Mécanique II*. Chap. 1.1 Engrenages cylindriques, p. 13–15.
- (2017). *Cours de Construction Mécanique I*. Chap. 3.1 Transmission par courroies, p. 17–21.
- BOULET, C. *Transmission par poulies et courroies. Techniques de l'Ingénieur*.
- CHEVALIER, André. *Guide du dessinateur industriel. Édition Hachette Technique*.  
*Fabrication and performace evaluation of a power (motorised) maize shelling machine*.
- FANCHON, J.-L. *Guide des sciences et technologies industrielles*, p. 161–166.
- GUERGUEB, Brahim. *Cours de Mécanique Appliquée*. Chap. Chapitre III-2 Dimensionnement des arbres soumis à des sollicitations, p. 13–15.
- HENRIOT, G. (1979). *Traité théorique et pratique des engrenages*. T. 1.

- JEAN-PIERRE MELCION, Jean-Luc Ilari (2003). *Technologie des pulvérulents dans les IAA, Lavoisier*, p. 375–406.
- KNUTH, Donald. *Déchets en plastique détails et statistique*. URL : <http://environnement.wallonie.be/rapports/owd/pwd/flux5.pdf>.
- Mémoire de Projet de Fin d'Etudes : Amélioration des caractéristiques techniques d'un broyeur pour les bouteilles en plastique* (2011).
- Mémoire de Projet de Fin d'Etudes : Etude et conception et réalisation d'un broyeur pour le recyclage des déchets plastiques* (2017).
- MOLIMARD, Jérôme (2016). *Experimental Mechanics of Solids and Structures, Édition Wiley*. ISBN : ISSN 2051-249X.
- OYEJIDE OLUWAYOMI JOEL, Atadious David et (2018 1379). *Design and Construction of a Plastic Shredder Machine for Recycling and Management of Plastic Wastes. International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 9, Issue 5*. ISBN : ISSN 2229-5518.
- 2018 IOP Conf. Ser. : Mater. Sci. Eng. 455 012119*.
- VIDAL, Jean-Baptiste. *L'Usinage à Grande Vitesse : principes, conséquences sur la conception des pièces*.



Ecole Nationale Polytechnique

Echelle 1:10

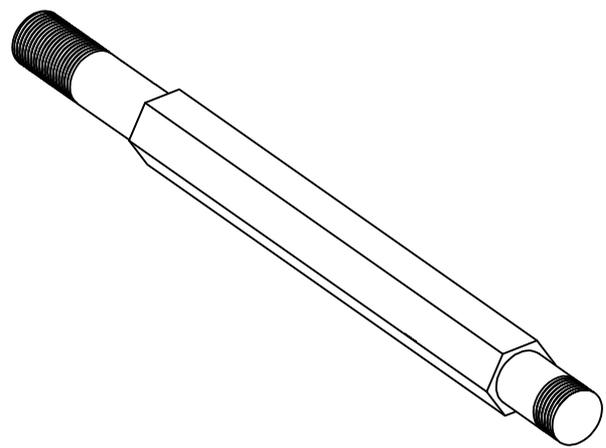
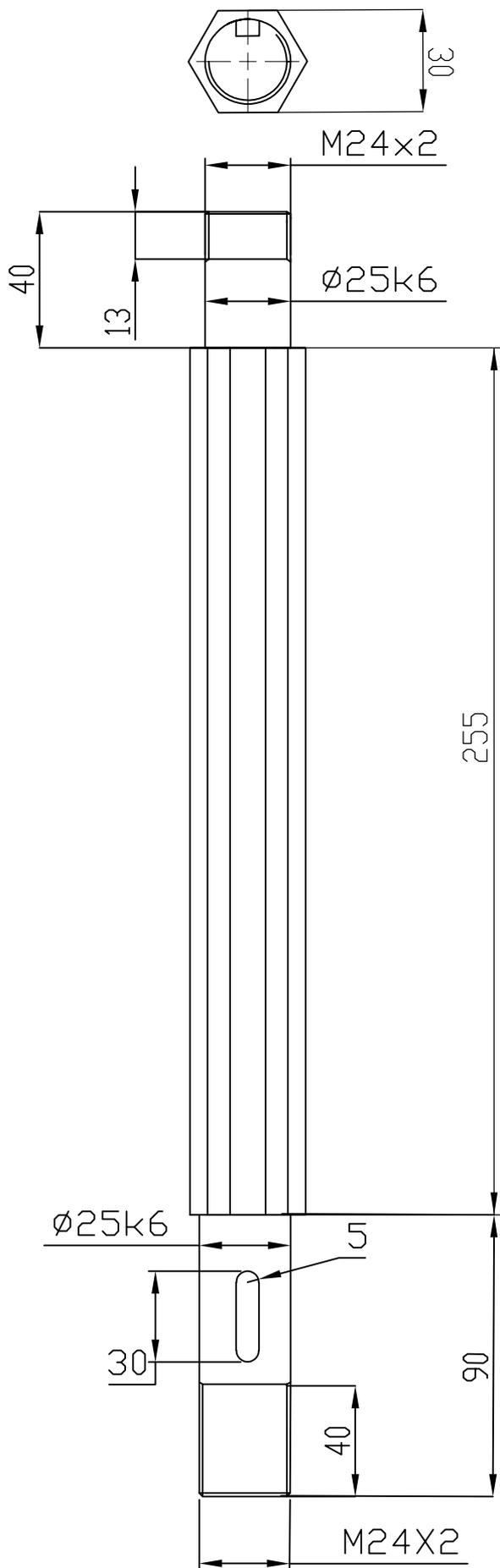


Broyeur plastique

Dpt:  
G.Mécanique

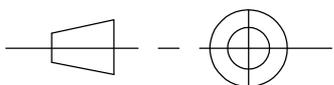
08/10/2020

MAHFOUD Mouna



Ecole Nationale Polytechnique

Echelle 1:2



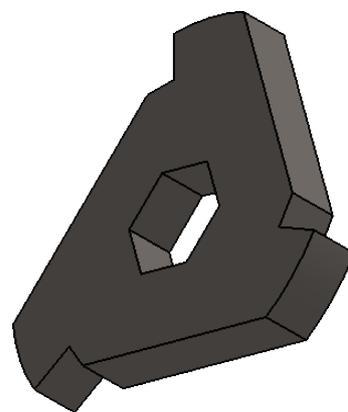
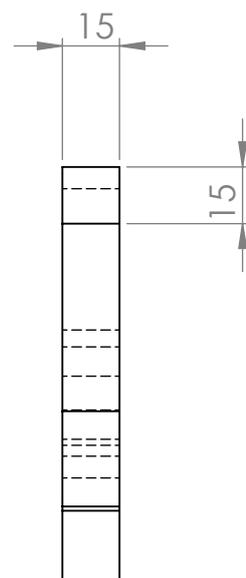
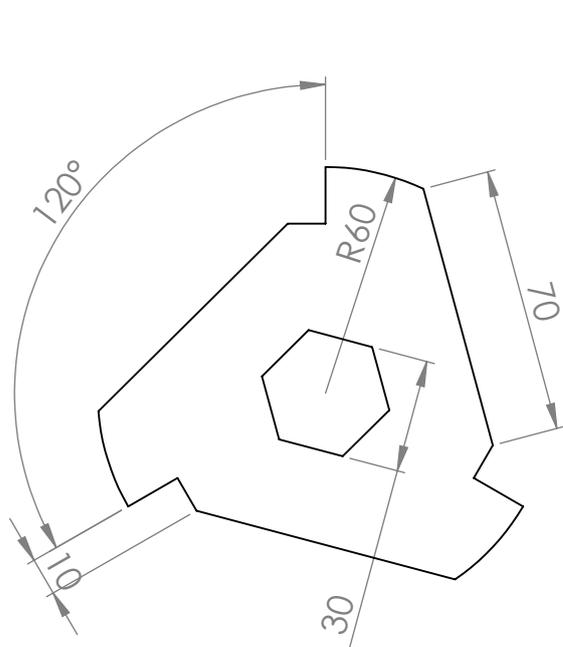
Arbre porteur

Dpt:  
G. Mécanique

08/10/2020

MAHFOUD Mouna

E335



Ecole Nationale Polytechnique

Echelle 1:2



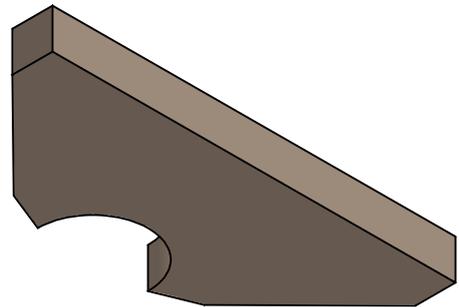
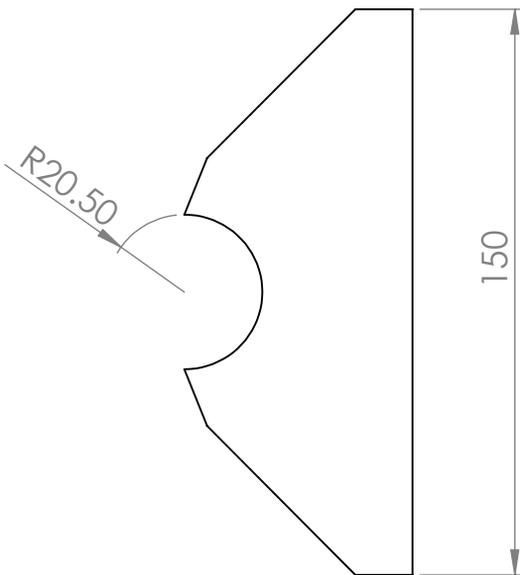
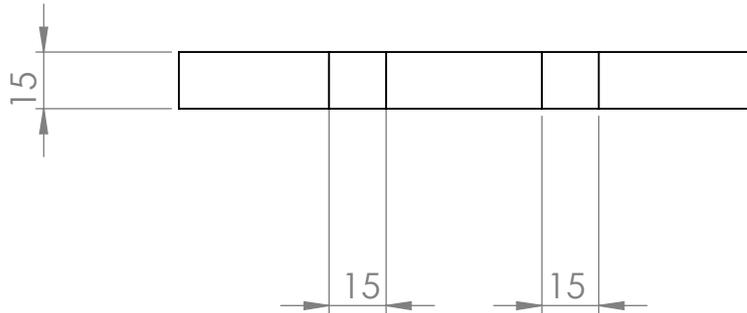
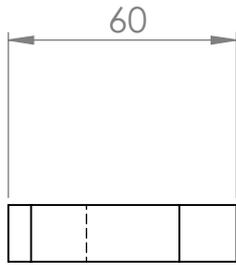
08/10/2020

Corps de lame

MAHFOUD Mouna

Dpt:  
G.Mécanique

X200Cr12



Ecole Nationale Polytechnique

Echelle 1:2



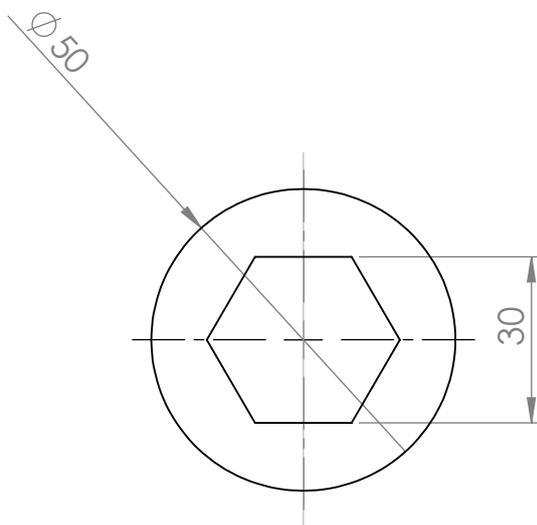
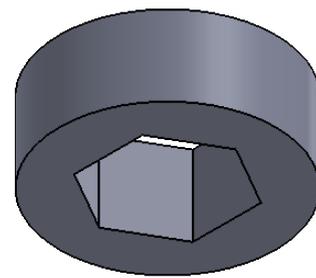
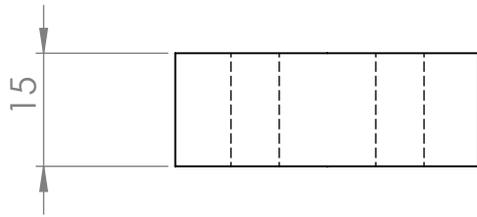
Contre lame

Dpt:  
G. Mécanique

08/10/2020

MAHFOUD Mouna

X200Cr12



Ecole Nationale Polytechnique

Echelle 1:1



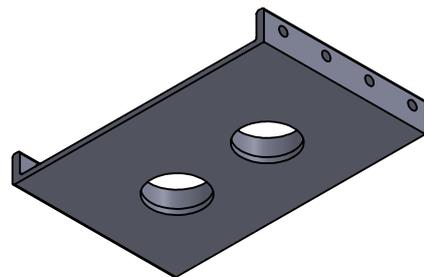
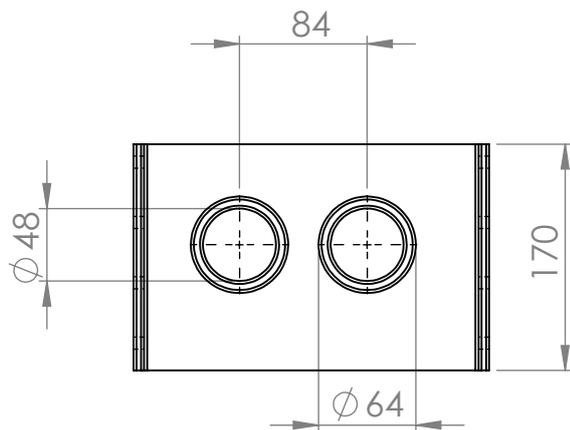
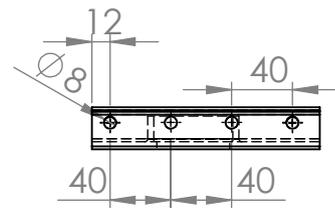
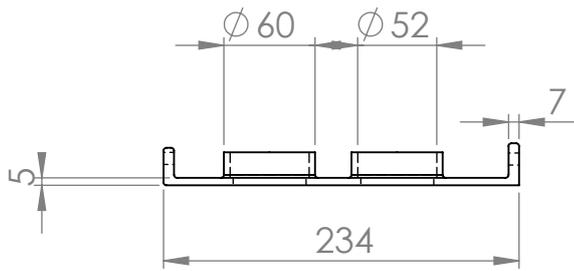
Joint Lame

Dpt:  
G. Mécanique

08/10/2020

MAHFOUD Mouna

X200Cr12



Ecole Nationale Polytechnique

Echelle 1:5



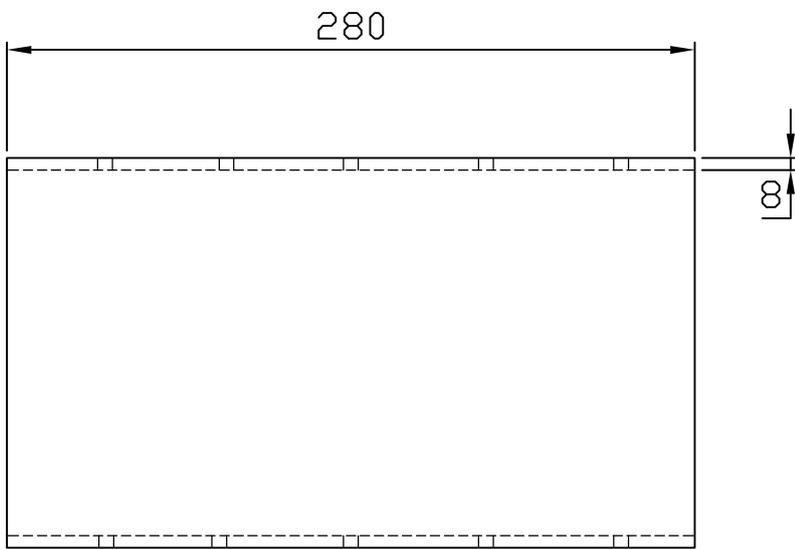
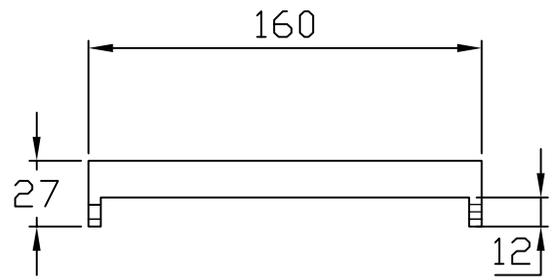
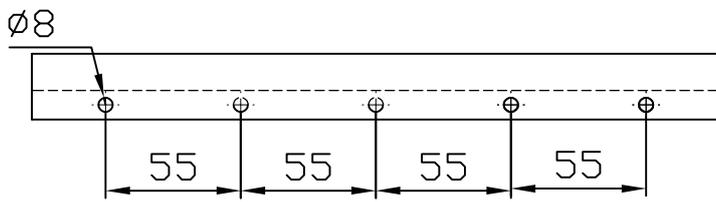
08/10/2020

Plaque avant

MAHFOUD Mouna

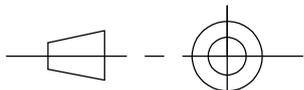
Dpt:  
G.Mécanique

E335



Ecole Nationale Polytechnique

Echelle 1:3



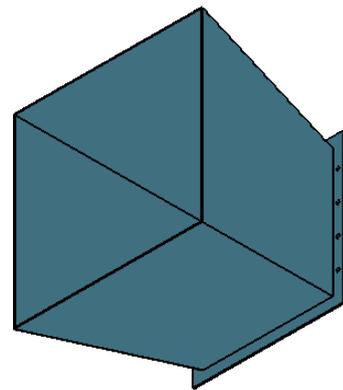
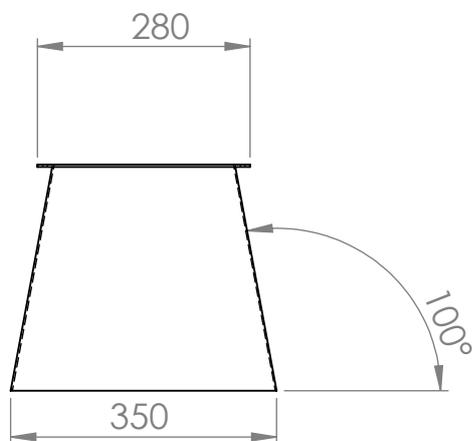
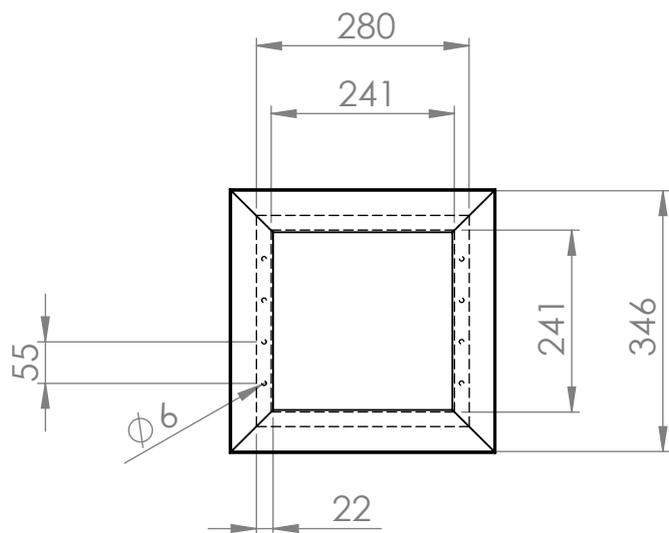
Plaque coté

Dpt:  
G.Mécanique

08/10/2020

MAHFOUD Mouna

E335



Ecole Nationale Polytechnique

Echelle 1:10



Trémie

Dpt:  
G. Mécanique

08/10/2020

MAHFOUD Mouna

Acier Ordinaire