

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

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département Génie Mécanique

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie mécanique

Étude et conception d'un mécanisme de recyclage des bouteilles en
plastique pour la production de filament d'impression 3D

Réalisé par :CHEBBAB Imen

Sous la direction de : M.Mohamed El Mahdi ZEBAR

Composition du jury :

Président	Brahim GUERGUEB	MAA	ENP
Promoteur	Mohamed El Mahdi ZEBAR	MCB	ENP
Examineur	Hamid SEDJAL	MAA	ENP

ENP 2025

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

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département Génie Mécanique

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie mécanique

Étude et conception d'un mécanisme de recyclage des bouteilles en
plastique pour la production de filament d'impression 3D

Réalisé par : CHEBBAB Imen

Sous la direction de : M. Mohamed El Mahdi ZEBAR

Composition du jury :

Président	Brahim GUERGUEB	MAA	ENP
Promoteur	Mohamed El Mahdi ZEBAR	MCB	ENP
Examineur	Hamid SEDJAL	MAA	ENP

ENP 2025

ملخص

يهدف هذا المشروع إلى دراسة وإنشاء نموذج ثلاثي الأبعاد باستخدام أدوات التصميم بمساعدة الحاسوب لماكينة يمكنها تحويل القارورات البلاستيكية إلى خيوط للطباعة ثلاثية الأبعاد. يهدف هذا المشروع أيضاً إلى إعادة تدوير البلاستيك من أجل تقليل النفايات على المستوى العالمي. تنقسم هذه الماكينة إلى ثلاث مراحل: تمزيق القارورات البلاستيكية، ثم بثق الخيط البلاستيكي، وأخيراً تخزينه باستخدام جهاز لف. تتضمن هذه الدراسة استخدام معادلات نظرية لتحديد أبعاد العناصر المختلفة للماكينة. يتم استخدام برنامج SolidWorks كأداة تصميم لإعطاء تمثيل ثلاثي الأبعاد للماكينة.

الكلمات المفتاحية: نموذج ثلاثي الأبعاد، خيوط الطباعة ثلاثية الأبعاد، برنامج، SolidWorks البثق البلاستيكي.

Abstract

This project aims to study and design a machine that can transform plastic bottles into 3D printing filament. The machine is divided into three parts: shredding the plastic bottles, extruding the filament, and finally storing it using a winding device. This study involves using theoretical formulas to determine the dimensions of the different elements of the machine. As a CAD tool, SOLIDWORKS software was used to provide a 3D representation of the machine.

Key words: Filament, CAD modeling, SolidWorks, extrusion.

Résumé

Ce projet a pour objectif d'étudier et de concevoir une machine capable de transformer des bouteilles en plastique en filament pour l'impression 3D. La machine est divisée en trois parties : le broyage des bouteilles en plastique, l'extrusion du filament, et enfin son stockage à l'aide d'un système d'enroulement. Cette étude repose sur l'utilisation de formules théoriques pour dimensionner les différents éléments de la machine. Le logiciel SOLIDWORKS a été utilisé comme outil de DAO afin de fournir une représentation 3D de la machine.

Mots clé : DAO, Filament, Extrusion, SOLIDWORKS

Remerciements

Louange à Allah, le Tout-Puissant, qui m'a accordé la santé, la patience et la force nécessaires pour mener à bien ce travail modeste.

Je tiens également à exprimer ma sincère reconnaissance à Monsieur ZEBAR Mohamed El Mahdi pour son encadrement, ses conseils précieux et sa disponibilité durant toutes les étapes de ce projet.

Mes remerciements vont également aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Je remercie chaleureusement l'ensemble des enseignants, ainsi que toute l'équipe pédagogique du département génie mécanique de l'Ecole Nationale Polytechnique, pour la qualité de l'enseignement dispensé au cours de ma formation.

Dédicaces

À la mémoire de mon cher grand-père, qui demeure à jamais vivant dans mon cœur. Son absence me rappelle chaque jour l'importance de la sagesse, de la patience et de la bonté qu'il incarnait. Je lui dédie humblement ce travail, en signe de gratitude, d'amour et de fidélité à ses valeurs.

À mes parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien constant, leurs sacrifices silencieux et leurs prières qui m'ont portée dans les moments les plus difficiles.

Rien de tout cela n'aurait été possible sans vous.

À mes frères, merci pour votre présence, vos encouragements, votre patience et votre confiance en moi tout au long de ce parcours.

*À toute ma famille,
oncles, tantes, grands-mères... merci pour vos mots, votre bienveillance et vos pensées qui m'ont toujours portée vers l'avant.*

*À mes amies Amina, Doua, Rayhane,
merci pour votre présence, votre écoute et votre amitié sincère, qui ont rendu ce chemin plus léger et plus beau.*

*À toute personne, de près ou de loin,
qui m'a apporté aide, soutien, conseil ou encouragement durant ce parcours*

*Et à tous les étudiants de Gaza,
qui, malgré leur courage et leur détermination, n'ont pas eu la chance
d'achever leurs études à cause de la guerre et de l'injustice.*

Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Introduction générale	12
Chapitre 1 Généralités sur les plastiques	15
1. Matières plastiques	15
1.1. Définition du plastique	15
1.2. Origines des matières plastique.....	15
1.3. La fabrication du plastique.....	16
1.4. Classification des plastiques	17
1.5. Types du plastique	18
1.6. Les propriétés du plastique	21
1.7. Avantages et inconvénient du plastique.....	24
2. Gestion des déchets plastiques et Recyclage	24
3. Les types de recyclages des plastiques	25
3.1. Recyclage mécanique	25
3.2. Recyclage chimique.....	26
3.3. Recyclage énergétique	26
3.4. Avantages et limitations.....	26
4. Procédés de recyclage.....	26
4.1. Injection	27
4.2. Le thermoformage	27
4.3. Moulage par compression.....	28
4.4. Moulage rotatif (Rotomoulage).....	28
4.5. Extrusion.....	29
4.6. Techniques de déposition plastique	29
Conclusion	30
Chapitre 2 Etude théorique et technique	32
1. Principe	32
2. Lignes d'extrusion.....	33

2.1.	Extrusion-soufflage	34
2.2.	Extrusion-calandrage	34
2.3.	Extrusion-gonflage	34
2.4.	Extrusion réactive	35
2.5.	Co-extrusion	35
3.	Éléments constitutants de l'extrudeuse	35
3.1.	La vis d'extrusion	35
3.2.	Cylindre ou fourreau	36
3.3.	Éléments chauffants	37
3.4.	Tête d'extrusion et filières	37
3.5.	Système d'entraînement	38
4.	Types d'extrudeuse	39
4.1.	Extrudeuse mono-vis	39
4.2.	Extrudeuse bi-vis	39
5.	Défauts d'extrusion	40
6.	Matières extrudées	41
7.	Comportement du PET	42
	Conclusion	42
Chapitre 3: Dimensionnement du mécanisme de recyclage		44
1.	Introduction	44
2.	Matière utilisée :	44
3.	Description	44
3.1.	Le principe de fonctionnement	44
3.2.	Les parties du mécanisme	45
4.	Broyage	45
4.1.	Broyeur à cisaille	46
4.2.	Schéma cinématique du broyeur	46
4.3.	Choix du moteur	47
4.4.	Dimensionnement de l'arbre porte-lames	50
4.5.	Système d'engrènement	55
4.6.	Roulements	56
5.	Extrusion	57
5.1.	La Géométrie de la vis	57

5.2. Choix du motoréducteur	58
5.3. Sélection du matériau	61
5.4. Système de chauffage	62
6. Bobinage	67
6.1. Choix du moteur.....	67
6.2. Mécanisme guide-fil	70
Conclusion	71
Chapitre 4: Conception du mécanisme de recyclage	73
1. Introduction.....	73
2. Processus de conception	73
3. Logiciel utilisé.....	74
4. Présentation de SolidWorks	74
4.1. Boite de dialogue Bienvenu	74
4.2. Interface utilisateur :	75
4.3. Modélisation des pièces et d'assemblage	76
5. La conception de la machine.....	79
5.1. Conception du broyeur	79
5.2. La conception de l'extrudeuse	83
5.3. La conception de la bobineuse.....	85
5.4. La conception du mécanisme	86
6. Simulation du fonctionnement mécanique	86
6.1. Simulation de la sollicitation en torsion de la vis.....	87
6.2. Simulation de la sollicitation de l'arbre du broyeur	89
6.3. Simulation de la sollicitation de l'arbre et lames du broyeur	92
Conclusion	95
Références.....	98
ANNEXE	100

Table des figures

Chapitre 1 Généralités sur les plastiques

Figure 1. 1: Constitution des polymères.....	15
Figure 1. 2 : Structure morphologique semi-cristalline.	18
Figure 1. 3 : Chaînes (a) linéaire, (b) ramifiée, (c) réticulée.	18
Figure 1. 4: Effet de la température sur le module de Young des plastiques.....	21
Figure 1. 5: Courbe de viscosité en fonction du taux de cisaillement.	22
Figure 1. 6:-Modèles mécaniques du comportement viscoélastique	23
Figure 1. 7: Diagramme contrainte/deformation.	23
Figure 1. 8: Gestion des déchets plastiques en fonction du cycle de vie des produits polymères	25
Figure 1. 9 :Procédé de l'injection plastique.....	27
Figure 1. 10: Procédé de thermoformage.	28
Figure 1. 11: Procédé de moulage par compression.....	28
Figure 1. 12: Procédé de rotomoulage.	29
Figure 1. 13: Procédé d'extrusion.....	29
Figure 1. 14: Techniques de déposition du plastique :(a) dépôt du filament fondu , (b) dépôt du granulés fondu	30

Chapitre 2 Etude théorique et technique du processus d'extrusion

Figure 2. 1: Schéma simplifié d'une extrudeuse monovis	33
Figure 2. 2: Procédé d'extrusion-soufflage.....	34
Figure 2. 3: Procédé d'extrusion-gonflage.....	34
Figure 2. 4: Procédé de co-extrusion.....	35
Figure 2. 5: -Un schéma d'une monovis typique.....	36
Figure 2. 6: L'emplacement des orifices de dégazage.....	37
Figure 2. 7: Coupe d'une filière d'extrudeuse.	38
Figure 2. 8: Différents élément de mélange.	39
Figure 2. 9: Les principales dispositions des bi-vis	40
Figure 2. 10: Défauts d'extrusion a) de surface, b) de volume	41

Chapitre 3 Dimensionnement du mécanisme de recyclage

Figure 3. 1: Les modes de sollicitation en broyage	46
Figure 3. 2: Schéma cinématique du broyeur	47
Figure 3. 3: Les différents types des moteurs électriques	48
Figure 3. 4: Schéma représentatif des efforts appliqués sur l'arbre	51
Figure 3. 5: Diagrammes d'effort tranchant et moment fléchissant	53

Figure 3. 6: Représentation des dimensions caractéristiques d'une vis d'extrudeuse	58
Figure 3. 7: Fonctionnement des thermocouples	64
Figure 3. 8: Schéma-bloc fonctionnel du système de régulation PID de température d'une extrudeuse	65
Figure 3. 9: Régulateur PID.....	66
Figure 3. 10: Relais statique	67

Chapitre 4 Conception du mécanisme de recyclage

Figure 4. 1: Le processus de la conception.....	74
Figure 4. 2: Boite de dialogue Bienvenue	75
Figure 4. 3: Interface utilisateur de SOLIDWORKS	75
Figure 4. 4: Les étapes de modélisation des pièces	77
Figure 4. 5: Modélisation des assemblages	78
Figure 4. 6: Mise en plan sur SOLIDWORKS	79
Figure 4. 7: Assemblage du broyeur	80
Figure 4. 8: Assemblages des deux arbre porte lames	82
Figure 4. 9: Assemblage de la carcasse, des roulements et des contre-lames	82
Figure 4. 10: Raccordement du moteur.....	83
Figure 4. 11 : Assemblage finale de l'extrudeuse.....	83
Figure 4. 12: Raccordement de la vis au moteur	85
Figure 4. 13: Assemblage finale de la bobineuse.....	85
Figure 4. 14: Assemblage de la machine finale	86
Figure 4. 15: Création de la géométrie de la vis	87
Figure 4. 16: Le maillage de la vis.....	87
Figure 4. 17: Conditions aux limites aux déplacements	88
Figure 4. 18: Condition aux limites d'effort	88
Figure 4. 19: La contrainte équivalente de Von-Mises.....	88
Figure 4. 20: Le déplacement équivalent	89
Figure 4. 21: La déformation équivalente	89
Figure 4. 22: La géométrie de l'arbre	90
Figure 4. 23: Les paramètres volumétriques de l'arbre	90
Figure 4. 24: Maillage de l'arbre	90
Figure 4. 25: Application des conditions aux limites.....	91
Figure 4. 26: La contrainte de Von-Mises équivalente.....	91
Figure 4. 27: Le déplacement équivalent	91
Figure 4. 28: La déformation équivalente	92
Figure 4. 29: Assemblage de l'arbre et les lames	92
Figure 4. 30: Maillage de l'assemblage	93
Figure 4. 31: Application des conditions aux limites à l'assemblage.....	93
Figure 4. 32: La contrainte équivalente de Von-Mises.....	94
Figure 4. 33: Le déplacement équivalent	94
Figure 4. 34: La déformation équivalente	94

Liste des tableaux

Chapitre 1 Généralités sur les plastiques

Table 1. 1Avantages et limitations des différents procédés de recyclage.....	26
--	----

Chapitre 3 Dimensionnement du mécanisme de recyclage

Table 3. 1:Les composants du broyeur	47
Table 3. 2: Propriétés du matériau de l'arbre porte-lames	50
Table 3. 3: Caractéristiques des roues dentées.....	55
Table 3. 4: Les paramètres géométriques de la vis	58
Table 3. 5: Types des thermocouples	65
Table 3. 6: Caractéristiques de la transmission entre le moteur et la bobine.....	69

Chapitre 4 Conception du mécanisme de recyclage

Table 4. 1: Les différents organes du broyeur	81
Table 4. 2:Les éléments constitutifs de l'extrudeuse	83
Table 4. 3:Montage du fourreau et installation des colliers chauffants.....	85
Table 4. 4: Montage de la buse et la trémie	85
Table 4. 5:Paramètres volumétriques de la vis	87

Introduction générale

Introduction générale

Le développement industriel est porté par le souci permanent de trouver de nouvelles procédures de fabrication pour des produits présentant un rapport qualité/prix de plus en plus amélioré. La fabrication des pièces qui se fait par enlèvement de matière sur des machines-outils prend beaucoup de temps de fabrication et demande une grande expérience des opérateurs pour arriver à une qualité (précision) d'une pièce juste moyenne.

De nos jours, l'industrie des plastiques occupe une position de premier plan et est considérée comme un leader parmi les industries pétrochimiques modernes. Elle offre une vaste gamme d'applications dans notre vie quotidienne, grâce à ses propriétés et caractéristiques qui en font une alternative efficace à de nombreux matériaux traditionnels tels que le fer et le bois. Les avantages distinctifs de ces matériaux ont contribué à leur diffusion croissante.

Les plastiques se distinguent par leur prix abordable, leur légèreté, leur résistance à la corrosion, leur facilité de mise en forme, leur isolation thermique et électrique, leur dureté élevée, leur résistance aux produits chimiques et aux solvants, ainsi que leur grande flexibilité. En raison de ces caractéristiques, ils sont devenus un concurrent sérieux pour de nombreuses autres industries et une alternative privilégiée dans de nombreuses utilisations.

Par exemple, les plastiques sont utilisés dans la fabrication des parties avant des vaisseaux spatiaux, remplaçant les métaux, afin de réduire la chaleur résultant du frottement. De plus, ils offrent la possibilité d'être utilisés dans la fabrication de certains organes humains endommagés.

L'industrie des plastiques a su répondre aux besoins de divers secteurs, offrant des solutions économiques et techniquement avancées. Cependant, il est important de reconnaître que ces matériaux ont un impact significatif sur la pollution de l'environnement en raison de plusieurs facteurs. Dont les suivants :

- Selon les estimations il y aurait 300 millions de tonnes de plastique dans les océans et chaque année 10 millions de tonnes de plastique sont déversées dans les océans, si on ne fait rien en 2050 il y aura plus de plastique que des poissons [1].
- La remontée des fumées, des gaz et du plancton solide, suffocant et toxique lors de la fabrication des plastiques et de la combustion de ses déchets.
- La difficulté de décomposer les polymères, ce qui les fait détruire l'environnement et affecter négativement les organismes vivants.
- L'augmentation continue de la fabrication de matières plastiques de toutes sortes, formes et tailles, et les déchets nombreux et variés qui en résultent

Pour résoudre ces problèmes environnementaux, Les déchets plastiques peuvent être valorisés par la méthode de recyclage.

La méthode de recyclage et de mise en forme des déchets est l'une des plus réussies des trois méthodes : cette méthode basée sur la collection, le tri et le moulage de déchets afin de reformer en nouveaux produits plastiques.

Le recyclage nécessite une unité complète qui contient plusieurs machines du broyage au moulage, l'une de ces machines est la machine d'extrusion qui fait la fabrication des profilés.

Dans ce projet nous proposons un processus de recyclage, c'est une machine d'extrusion qui transforme les déchets de matières plastiques (PET) en nouveaux produits pour la valorisé, Cette machine permet de fabriquer les filaments d'imprimante 3D.

A cet effet et depuis les années 80, un nouveau procédé d'usinage de pièces qui se fait par ajout de matière a été développé. Ce procédé est appelé impression 3D. Il permet de fabriquer des objets avec une grande précision à partir de fichiers en trois dimensions conçus numériquement. Cette technologie a également été adoptée à des fins de prototypage rapide pour l'industrie, grands noms du désigne.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre représente des généralités sur les plastiques et leurs recyclages, où en met le point sur les différents procédés de recyclage

Le deuxième chapitre est réservé aux connaissances fondamentales sur le processus d'extrusion et ses composants, son fonctionnement l'analyse des matières premières utilisées et la modélisation des phénomènes physiques.

Le troisième chapitre c'est une étude théorique du fonctionnement et du dimensionnement de notre machine et ses composants

Le quatrième chapitre contient la description, la conception et la construction de la machine sur SolidWorks.

Le mémoire et finalisé par une conclusion et perspectives.

CHAPITRE 1
GENERALITES SUR LES PLASTIQUES

Chapitre 1 Généralités sur les plastiques

Dans ce chapitre, nous visons tout d'abord à présenter une description approfondie de ce que l'on appelle un plastique, ainsi que le processus d'élaboration de ce matériau et les différents critères de classification. Ensuite, nous abordons le principe du recyclage et les différentes méthodes de valorisation de ce matériau. Enfin, nous discuterons des différents procédés permettant de transformer le plastique recyclé en nouveaux produits.

1. Matières plastiques

1.1. Définition du plastique

Le terme plastique désigne un matériau synthétique composé de molécules organique appelées polymères. Il comprend une variété de compositions, chacune développée pour répondre aux exigences du marché. Les polymères sont formés par un procédé appelé polymérisation, dans lequel des petites molécules, nommées monomères, se lient chimiquement (sous pression et/ou température) pour former des chaînes moléculaires. Un polymère est composé de centaines de ces chaînes [2].

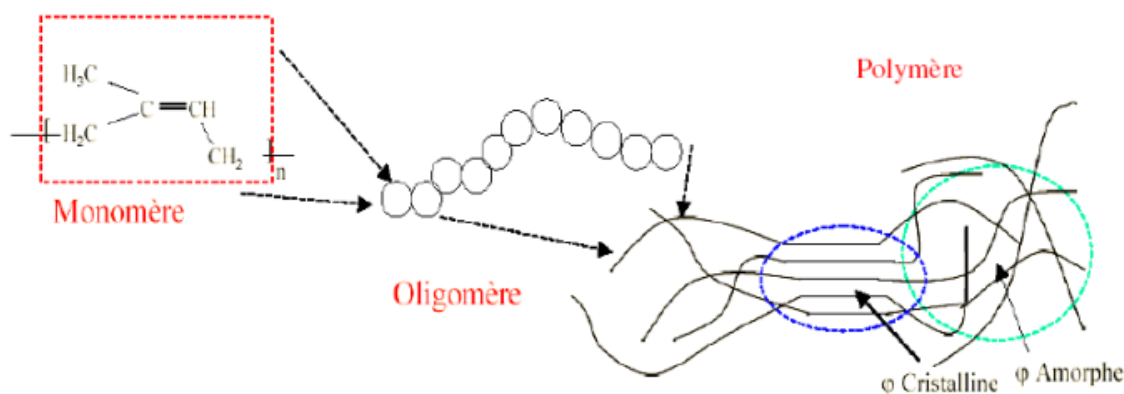


Figure 1. 1: Constitution des polymères [3].

1.2. Origines des matières plastique

Les plastiques peuvent être naturels, semi-synthétiques ou totalement synthétiques, selon l'origine du polymère.

a) Origine naturelle :

Ce sont des polymères d'origine animale, extraits du lait, ou végétale, comme le bois, le coton, la cellulose, l'ambre et la poix. Ils sont appelés biopolymères.

b) Origine semi-synthétique :

Ils sont issus de sources naturelles, cependant ils subissent des modifications chimiques afin d'apporter des propriétés spécifiques, comme la rayonne qui est classée parmi les fibres semi-synthétiques, car elle est produite à partir de cellulose naturelle extraite de la pulpe de bois ou d'autres végétaux, puis transformée chimiquement en fibre textile.

c) Origine synthétique :

Ce type de polymères est entièrement élaboré par synthèse chimique. Ils sont fabriqués à partir du pétrole, du gaz naturel et du charbon, représentant 90 % des matières plastiques.

1.3. La fabrication du plastique

La fabrication du plastique commence par l'extraction du naphta à partir du pétrole, ensuite une opération de fragmentation qui permet d'obtenir les monomères, qui seront enfin transformés en polymères par polymérisation.

1. Du pétrole au naphta :

En premier, le pétrole passe par un processus de raffinage où ses constituants sont séparés selon leur point d'ébullition. En effet, le raffinage est basé sur le principe de distillation fractionnée, où le pétrole brut est chauffé à haute température, il s'évapore et est envoyé dans la tour de distillation. À l'intérieur de cette tour, un gradient de température (chaud en bas, froid en haut) permet la condensation des composants du pétrole à des différentes hauteurs, selon leur point d'ébullition. La séparation se fait comme suit :

- Les produits les plus légers (gaz, naphta) en haut,
- Les produits moyens (kérosène, gazole) au milieu,
- Les produits lourds (résidus, fioul lourd) en bas.

2. Du naphta aux monomères :

Après la séparation, le naphta subit une opération de vapocraquage qui sert à fragmenter les grosses molécules d'hydrocarbures en monomères. Cela se fait à haute température (800 °C) suivie par un refroidissement brutal. Cette opération permet d'obtenir des molécules de faible taille ou des hydrocarbures légers comme l'éthylène.

3. Du monomère au polymère :

La dernière étape de la production d'une matière plastique est la polymérisation qui sert à assembler les monomères entre eux formant des macromolécules. Après cette opération, les polymères sont obtenus sous forme granulés, poudres, parfois liquides visqueux (résines). [4]

La polymérisation comprend deux types principaux :

- Polymérisation par étapes : Réactions de condensation successives entre des monomères, avec libération d'une petite molécule (comme l'eau) à chaque étape.
- Polymérisation en chaîne : Addition progressive de monomères à une chaîne active, sans formation de sous-produit.

Les polymères représentent la matière de base des plastiques, cependant, l'amélioration de leurs propriétés physiques et chimiques nécessite l'ajout d'additifs et d'adjuvants comme suit :

- 1) Additifs : représentent une partie importante de la matière plastique, avec un pourcentage qui dépasse 50 %. On distingue :
 - Les renforts et les charges : se présentent sous forme de fibres organiques (polyamide aromatique) et inorganiques (verre, amiante et carbone), ou de paillettes. Leur incorporation fournit une bonne résistance mécanique à la traction, de bonnes propriétés à la fatigue ainsi qu'une remarquable inertie chimique et une excellente isolation électrique.
 - Les agents gonflants : leur ajout a pour objectif la diminution de la densité du matériau. Ce sont des substances chimiques qui se décomposent sous action de la chaleur ou d'une réaction chimique, en libérant des bulles de gaz formant ainsi une structure mousseuse.
- 2) Adjuvants : permettent de modifier les propriétés chimiques (comme la plastification) et physiques (comme la stabilité) du matériau. Parmi les adjuvants, on trouve :
 - Les plastifiants : leur but est de diminuer la rigidité du matériau et d'augmenter sa souplesse. Ils permettent aussi de diminuer la température de transition vitreuse ainsi que la température de fragilité.
 - Les anti-oxygènes : souvent utilisés en proportion inférieure à 1 % dans les polymères hydrocarbonés. Ils ont pour rôle de ralentir l'oxydation thermique durant les phases de transformation et d'utilisation.
 - Stabilisants lumière : ils sont destinés à la protection des pièces sensibles aux rayons UV. Il existe plusieurs types de stabilisants lumière : le noir de carbone, les absorbeurs UV et les extincteurs.
 - Colorants ou pigments : les colorants sont des substances solubles, tandis que les pigments sont insolubles. Les pigments sont préférables car ils offrent une meilleure stabilité à long terme que les colorants.
 - Les anti-chocs : ils sont utilisés pour renforcer la résistance aux chocs.
 - Les antistatique : les antistatiques consistent à limiter l'accumulation des charges électriques à la surface des polymères, et donc à éliminer la fixation de la poussière ainsi que la production d'étincelles.[5]

1.4. Classification des plastiques

Les plastiques sont classés selon plusieurs critères :

- Cristallinité : À l'échelle macromoléculaire, on peut distinguer deux structures morphologiques différentes : amorphe et semi-cristalline. Dans le premier cas, l'enchevêtrement des chaînes est désordonné et non uniforme. La distance entre elles n'est pas constante, ainsi qu'une absence de régularité dans leur orientation. Tandis que

les semi-cristallins sont caractérisés par la régularité du parallélisme des chaînes. Ce comportement se retrouve dans un ensemble de lamelles cristallines séparées par des zones amorphes.[6]

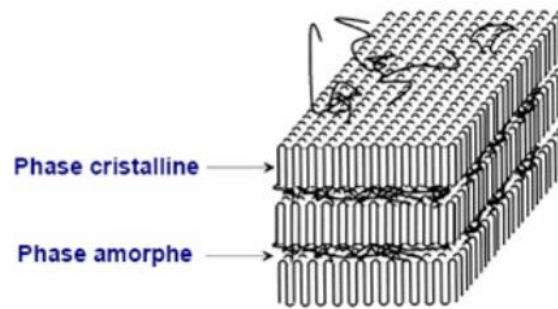


Figure 1. 2 : Structure morphologique semi-cristalline[6].

- Architecture macromoléculaire : Les chaînes peuvent se trouver sous trois formes : linéaires, réticulées ou ramifiées. Une chaîne est dite linéaire lorsque les molécules s'ajoutent progressivement en formant une ligne continue principale sans branches. Lorsque la chaîne principale est greffée par de courtes chaînes secondaires ou des branches, on parle de chaîne ramifiée. Une chaîne réticulée représente un réseau tridimensionnel formé par des liaisons covalentes entre plusieurs chaînes linéaires ou ramifiées.



Figure 1. 3 : Chaînes (a) linéaire, (b) ramifiée, (c) réticulée.

- Structure chimique : La structure chimique fait référence au type de monomères dans la macromolécule. Elle peut être homopolymère lorsqu'elle est constituée de monomères identiques, ou copolymère lorsqu'elle contient deux ou plusieurs types différents de monomères.
- Comportement thermique : On distingue les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères. Ils diffèrent par leurs propriétés, ce qui les rend adaptés à différentes applications selon les contraintes thermiques et mécaniques.

1.5. Types du plastique

Les plastiques disponibles sur le marché sont classés selon leur comportement thermique, afin de déterminer leur manière de réagir à la chaleur, ce qui influence leur utilisation, leur transformation et leur recyclage.

1. Les thermoplastiques

Les thermoplastiques se caractérisent par leur capacité à perdre leur rigidité sous l'effet de la chaleur et à durcir en refroidissant, un processus qu'ils peuvent subir de manière répétée. La diminution des forces de liaison moléculaires avec l'élévation de la température explique leur malléabilité [7].

De nos jours, une large gamme de thermoplastiques est disponible, offrant une variété de propriétés.

a) Polyéthylènes (PE) :

Les polyéthylènes sont des matériaux semi-cristallins (chaînes moléculaires partiellement alignées), dont leurs propriétés se différencient selon la méthode de polymérisation.

L'ISO 1133 classe les polyéthylènes en fonction de leur densité, qui dépend du degré de cristallinité [8]. Dans l'industrie, les principaux types utilisés sont :

- Polyéthylène haute densité (PEHD) : Il est utilisé dans la fabrication de films et de bouteilles. On le retrouve dans les bouteilles produites ménagères comme les liquides vaisselles et les adoucissants.
- Polyéthylène basse densité (PEBD) : Il est principalement utilisé pour la fabrication de films et de revêtements. On le retrouve notamment dans la production de sacs de transport et de sacs-poubelle en raison de sa flexibilité et de sa résistance aux déchirures.

b) Polypropylène (PP) :

Le PP est polymérisé à partir de propylène. Il s'agit aussi d'un matériau semi-cristallin comme le PE; cependant, il présente une résistance et une rigidité plus élevées. Il est couramment employé dans l'automobile pour la fabrication de boîtiers de batteries, de câbles de batterie et de feux de signalisation. On le retrouve également dans des objets du quotidien tels que les brosses et les grattoirs à glace.

c) Polystyrène (PS) :

C'est un amorphe et considéré comme un plastique résistant aux hautes températures. Il existe plusieurs types de polystyrène :

- Polystyrène expansé (PS-E) : Un matériau constitué de billes expansées d'un diamètre de 0.2 à 3 mm utilisé principalement pour l'emballage et la fabrication de blocs isolants.
- Polystyrène extrudé (XPS) : Mousse rigide à cellules fermées avec une peau dense. Il présente une bonne résistance à la compression, faible absorption d'eau et faible inflammabilité, souvent utilisé pour l'isolation thermique et les emballages légers.
- Polystyrène structuré : Matériau transparent dit PS-cristal souvent utilisé pour fabriquer des contenants alimentaires rigides, des gobelets transparents, des boîtiers de CD/DVD et divers produits électroniques.

d) Polyéthylène téréphtalate (PET) :

Selon son processus de fabrication, le PET peut exister sous deux formes : semi cristallin ou amorphe. Il est largement utilisé pour la fabrication de bouteilles destinées aux boissons et aux huiles alimentaires en raison de sa transparence et de sa robustesse.

e) Acrylonitrile butadiène styrène (ABS) :

La raison pour laquelle cette substance est employée dans de nombreux domaines est qu'elle a une variété de propriétés. En raison de sa résistance aux chocs, elle est utilisée dans la fabrication des casques de sécurité des motos ; elle est également appliquée au capotage des appareils électroménager et la téléphonie.

f) Acide polylactique (PLA) :

L'acide polylactique est un polymère biosourcé obtenu à partir de sources naturelles souvent l'amidon de maïs. Il aussi biodégradable, ce qui en fait le premier choix en chirurgie pour les sutures et les stents biodégradable [9]. Il est également utilisé dans l'emballage alimentaire.

2. Les thermodurcissables

Contrairement aux thermoplastiques, les thermodurcissables ne traversent qu'une seule phase de malléabilité avant de durcir de manière irréversible. Cela s'explique par le fait que, lors du durcissement des résines sous l'effet de la chaleur, les chaînes moléculaires forment de fortes liaisons chimiques entre elles [7]. Les principaux thermodurcissables largement disponibles dans le marché sont :

a) Résines époxy (EP) :

Les résines époxy sont réservées à la fabrication des éléments soumis à de fortes contraintes mécaniques et thermiques [8]. Elles sont utilisées comme adhésifs polyvalents, liants dans le ciment et les mortiers, ainsi que pour les revêtements industriels.

b) Résines phénoliques (PF) :

Les PF ont été les premières résines synthétiques commercialisées. Elles sont utilisées dans la fabrication des circuits imprimés et des panneaux composites. Elles sont également utilisées pour la protection thermique des modules spatiaux grâce à leurs résistances aux contraintes thermiques.

c) Résines polyester insaturées (UP) :

Souvent utilisées dans la fabrication des matériaux composites renforcés par des charges, elles se retrouvent également dans les gelcoats (enduits gélifiés) destinés aux bateaux, à l'automobile et aux équipements de salle de bain.

3. Les élastomères

Les élastomères possèdent des propriétés élastiques similaires à celles du caoutchouc. Au repos, leurs longues chaînes moléculaires se replient sur elles-mêmes. Sous contrainte, les

molécules peuvent glisser les uns par rapport aux autres et se déformer [10]. Ils sont utilisés dans de nombreux domaines, notamment les amortisseurs d'automobile, les semelles de chaussures de sport et les joints d'étanchéité.

1.6. Les propriétés du plastique

1. Propriétés thermiques :

- Température de vitreuse et température de la fusion :

Le comportement thermique des plastiques est lié principalement par la chaleur. Les plastiques non cristallins se caractérisent par une température de transition vitreuse à laquelle ils passent progressivement d'un état rigide à un état hyperélastique. À basse température, les amorphes se trouvent à l'état vitreux, avec un module de Young moyen de 1000 MPa. Lorsque cette température s'approche du point de transition vitreuse, le plastique devient caoutchouteux. Le dépassement de cette température permet au plastique de devenir un fluide visqueux.

Concernant les plastiques semi-cristallins, ils présentent également une température de fusion. Quand ils sont entre les deux températures, ils deviennent souples mais en même temps résistants, avec un module de Young d'environ 700 MPa. Cela s'explique par la présence de la phase amorphe dans les polymères semi-cristallins [6].

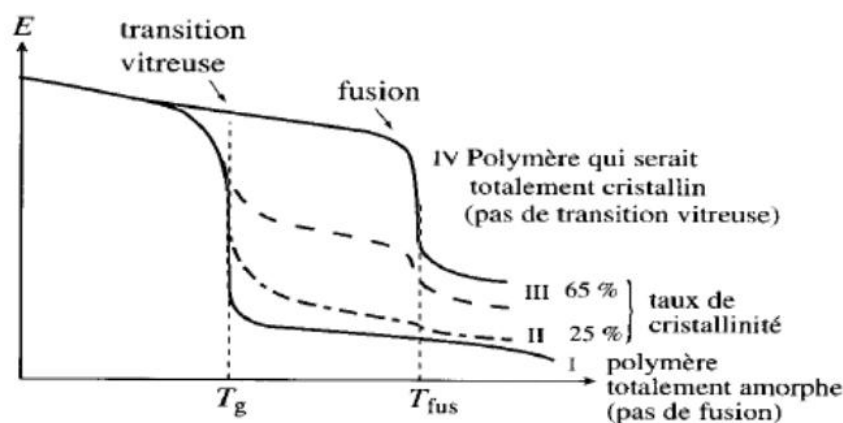


Figure 1. 4: Effet de la température sur le module de Young des plastiques.

- Conductivité thermique :

Par rapport aux métaux, les plastiques possèdent une conductivité thermique beaucoup plus faible. Les valeurs de conductivité thermique varient considérablement selon le type de plastique et la plage de températures considérée. L'ajout de charges influence également cette conductivité : des matériaux tels que la poudre de silice, le verre, le métal, la poudre de nitrure d'aluminium et les fibres de carbone l'augmentent, tandis que le moussage à l'air, au CO_2 ou avec d'autres agents gonflants permet d'améliorer l'isolation thermique [11].

2. Propriétés mécaniques :

Les propriétés mécaniques correspondent à la manière dont les plastiques réagissent aux sollicitations physiques telles que la pression, la torsion et l'allongement.

- Viscosité :

La viscosité fait référence à la fluidité d'un matériau. Elle traduit la résistance de celui-ci à l'écoulement lorsqu'il est soumis à des forces extérieures. Un fluide avec une viscosité élevée est plus résistant à l'écoulement qu'un fluide moins visqueux. Plusieurs facteurs peuvent affecter la viscosité des plastiques, tels que la température, la vitesse de déformation, la composition chimique, etc.

Le plastique fondu est considéré comme un fluide non newtonien, ce qui signifie que sa viscosité dépend du taux de cisaillement. En fait, la viscosité est le rapport entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement ; elle décroît fortement lorsque ce taux est élevé, ce qui confère au plastique un comportement pseudoplastique. Cependant, à de faibles taux de cisaillement, le plastique peut être considéré comme un fluide newtonien, car dans ce cas, la viscosité ne dépend pas du taux de cisaillement : c'est ce qu'on appelle la zone de plateau newtonien [12].

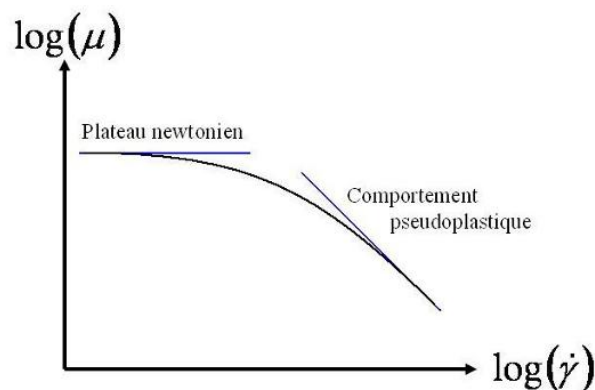


Figure 1. 5: Courbe de viscosité en fonction du taux de cisaillement [12].

- Viscoélasticité :

La viscoélasticité joue un rôle crucial dans la transformation des plastiques. Elle est responsable de la stabilisation de l'étirage du plastique fondu. Un matériau viscoélastique se comporte comme un solide élastique et un fluide visqueux à la fois.

Deux modèles servent à modéliser le comportement viscoélastique du plastique, en se basant sur : la loi de Hooke et la loi de Newton, par un ressort représentant le comportement élastique et un amortisseur représentant le comportement visqueux.

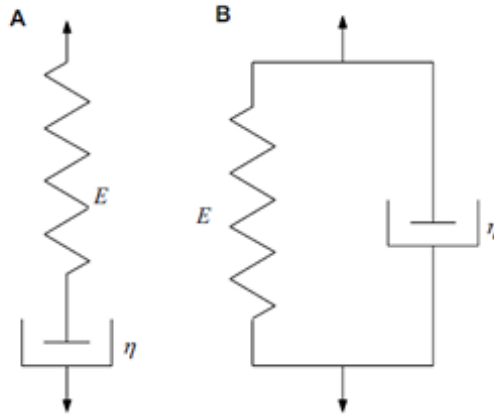


Figure 1. 6:-Modèles mécaniques du comportement viscoélastique

(a) modele de Maxwell, (b) modèle de Kelvin-Voigt.

- Diagramme contrainte/déformation :

Le diagramme contrainte/déformation permet de caractériser le comportement mécanique des matériaux en représentant graphiquement la relation entre la force appliquée par unité de surface et l'allongement relatif.

Dans notre cas, les courbes diffèrent selon la nature du plastique. On distingue :

1. La courbe (I) : caractérise les plastiques fragiles ou les thermodurcissables. Les thermoplastiques peuvent se comporter comme les thermodurcissables à haute température et à haute vitesse de sollicitation.
2. La courbe (II) : représente les thermoplastiques ductiles avec seuil d'écoulement. Ce dernier correspond à l'apparition de la striction.
3. La courbe (III) : représente les thermoplastiques ductiles mais sans seuil d'écoulement. Ce sont souvent des matériaux semi-cristallins, souples, utilisés dans des applications nécessitant de la résilience et de la déformation sans rupture brutale.
4. La courbe (IV) : cette courbe caractérise les matériaux caoutchouteux comme les élastomères ainsi que les amorphes à une température supérieure à la température vitreuse.

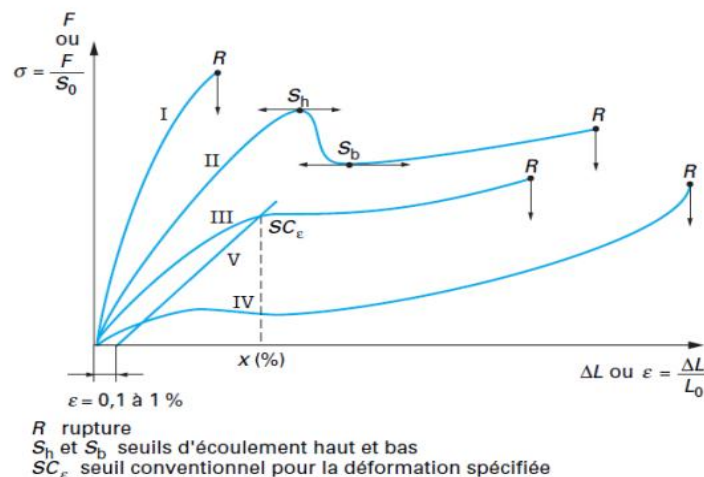


Figure 1. 7: Diagramme contrainte/deformation.

1.7. Avantages et inconvénient du plastique

L'utilisation de la matière plastique est due de plusieurs raisons notamment :

- Coût de production faible, ce qui les rend un choix économique pour les consommateurs.
- Contrairement aux métaux, le plastique est reconnu pour sa résistance à la corrosion, ce qui en fait le premier choix dans les équipements de traitement d'eau comme les réservoirs et la tuyauterie.
- Les plastiques se trouvent dans une gamme infinie, assurant la diversité des propriétés et une grande flexibilité.
- La variété des procédés de mise en œuvre facilite la production de pièces complexes pour différentes applications.
- Les plastiques sont largement utilisés dans l'emballage et l'alimentation en raison de leur hygiène et de leur capacité à limiter le gaspillage, permettant ainsi de prolonger la durée de vie des aliments.

Toutefois, l'utilisation incontrôlée de cette matière pose des défis environnementaux importants liés à leur durabilité, leur recyclage et leur impact écologique.

- Les plastiques sont des matériaux non biodégradables, ils ne se décomposent pas dans la nature.
- Aujourd'hui, la production des plastiques repose que sur la consommation de ressources fossiles et non renouvelables comme le pétrole et le gaz, ce qui entraîne leur épuisement.
- La fabrication du plastique génère des gaz et des substances toxiques, contribuant ainsi à la pollution.

2. Gestion des déchets plastiques et Recyclage

Une approche globale est adoptée afin de réduire la consommation de nouvelles ressources et minimiser les déchets : c'est l'économie circulaire. Contrairement à l'économie linéaire, un modèle non durable basé sur les trois étapes : prendre, fabriquer et jeter, l'économie circulaire vise à réduire le gaspillage en prolongeant la durée de vie des produits.

Ce concept repose sur six principes connus sous l'acronyme des 6R qui sont :

- Réduire : réduire la quantité des produits à utiliser.
- Réutiliser : trouver d'autres façons d'adapter les produits à un autre usage.
- Recycler : transformer les déchets pour en faire des matières premières pour d'autres produits ou industries.
- Réparer : réparer les objets endommagés au lieu de les jeter.
- Refuse : éviter d'acheter et de consommer des produits inutiles.
- Repenser : concevoir les produits de manière qu'ils soient multifonctionnels.

3. Les types de recyclages des plastiques

Il existe trois types de recyclage des déchets plastique : recyclage mécanique, chimique et énergétique. Ces trois méthodes interviennent à différents stades de cycle de vie des matériaux plastiques, selon leur état et possibilité de valorisation.

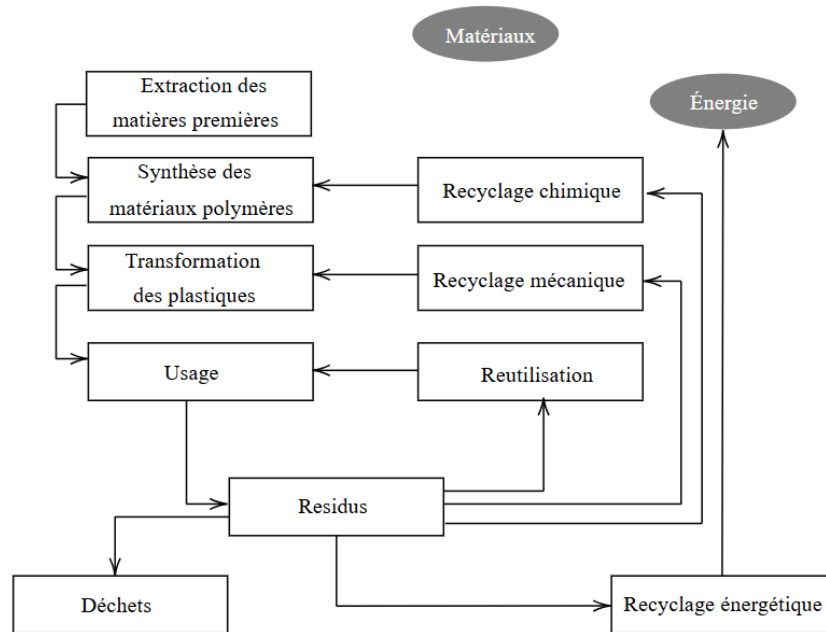


Figure 1. 8: Gestion des déchets plastiques en fonction du cycle de vie des produits polymères [13].

3.1. Recyclage mécanique

Le recyclage mécanique est un mode de valorisation qui s'agit à transformer les plastiques de manière physique, sans changement de leurs compositions chimique. Il comprend les étapes suivantes :

1. **Collecte et transport** : Les déchets sont récupérés et transportés vers les centres de tri ou de recyclage.
2. **Tri** : Ils sont triés selon du type de polymère (PEBD, PEHD, PET...) et leur couleur.
3. **Broyage** : Cette phase sert à couper le plastique en forme de paillettes afin de réduire son volume.
4. **Lavage et Séchage** : Les paillettes sont lavées à l'aide de l'eau chaude ou avec des détergents pour enlever les contaminants et les imputés (comme les colles). Et enfin, elles sont séchées pour éviter toute humidité, car cela pourrait affecter la qualité finale du plastique.
5. **Extrusion et granulation** : Le plastique séché passe dans une extrudeuse où la température est élevée, supérieure à la température de fusion du plastique, pour le faire fondre et le transformer en filaments qui sont ensuite refroidis, puis granulés, représentant ainsi une nouvelle matière première.

3.2. Recyclage chimique

Le recyclage chimique comprend plusieurs procédés qui permettent de transformer les matériaux plastiques en molécules plus courtes, sous forme liquide ou gazeuse, qui peuvent être utilisées à nouveau pour la production de produits pétrochimiques et des plastiques [14].

- Pyrolyse : Un processus qui se déroule à des températures élevées et en l'absence d'oxygène, permettant de décomposer la macrostructure du polymère pour former molécules plus légères.
- Gazéification : Les polymères sont oxydés en présence d'un agent oxydant (O_2 , $\{CO\}_2$ ou de la vapeur d'eau) sous hautes températures pour produire des gaz de synthèse (syngas).
- Hydrocraquage : Ce procédé consiste à ajouter de l'hydrogène aux polymères à haute pression et à haute température pour décomposer les molécules lourdes en présence d'un catalyseur acide-base permettant de faciliter la rupture des liaisons chimiques.

3.3. Recyclage énergétique

Les matériaux plastiques possèdent un pouvoir calorifique très élevé, constituant une source d'énergie sous forme de chaleur et d'électricité. Ce processus représente une solution pour les plastiques composés d'un mélange de polymères.

3.4. Avantages et limitations

Table 1. 1Avantages et limitations des différents procédés de recyclage.

Types de recyclage	(+) Avantages et (-) limitations
Recyclage mécanique	(+) Plus économique comparé aux autres procédés (+) Impact environnemental réduit (-) Dégradation des propriétés du plastique (-) Limité aux thermoplastiques
Recyclage chimique	(+) Permet le recyclage des plastiques complexes (-) Coût élevé (-) Réactions complexes
Récupération énergétique	(+) Valorisation des plastiques non recyclables (+) Diminution de la dépendance aux combustibles fossiles (-) Peut générer des gaz toxiques (-) Coût des installations élevé

4. Procédés de recyclage

Le recyclage sert à transformer des déchets en plastique en autre produits ou objets pour des différentes utilisations grâce à plusieurs techniques de mise en forme.

4.1. Injection

Cette technique, brevetée en 1872 par l'Américain John Wesley Hyatt, est destinée à la production de pièces aux géométries complexes et en très grande quantité. Dans ce procédé, la matière plastique ou le recyclât, souvent des thermoplastiques, est chauffée et fondue dans une machine dite presse d'injection, puis injectée sous haute pression dans un moule fermé contenant l'empreinte de la pièce à réaliser. Le moule est alimenté par un système de refroidissement où circule un fluide frigorigène, généralement de l'eau, permettant d'absorber la chaleur du moule et d'assurer la solidification de la pièce. Une fois que cette dernière est refroidie, le moule s'ouvre et elle est éjectée à l'aide d'un système d'éjection.

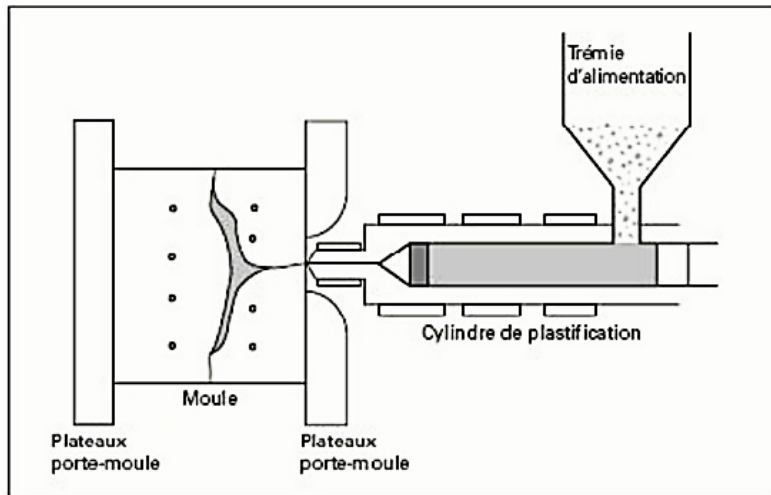


Figure 1. 9 : Procédé de l'injection plastique.

4.2. Le thermoformage

Le thermoformage est un procédé de mise en forme qui permet de réaliser toutes pièces creuses de faibles épaisseurs comme les barquettes, les pots de yaourts et aussi les pare chocs. Il consiste à utiliser des feuilles ou des plaques semi-finies pour réaliser des objets finis. En effet, les plaques sont chauffées entre deux plateaux chauffants à une température qui dépasse la température de transition vitreuse du matériau utilisé, ce qui permet de transformer le plastique à un état caoutchoutique, facilitant ainsi le formage. Dès que les plaques sont chauffées, le moule s'élève et l'air entre le moule et la plaque est aspiré, assurant l'adhérence au moule. Les plaques thermoformées sont refroidies et le décollage ou le démoulage des pièces se fait par un air soufflé à l'intérieur du moule. Les pièces sont ensuite débarrassées de l'excès de matière.

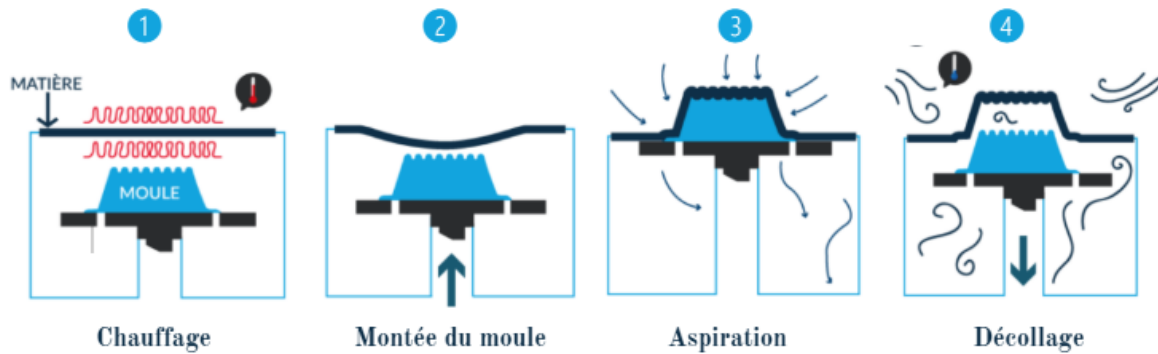


Figure 1. 10: Procédé de thermoformage.

4.3. Moulage par compression

Ce procédé de fabrication n'est pas limité par la réalisation des pièces à base des thermoplastiques vierges ou recyclés mais aussi des thermodurcissables. Son principe consiste à appliquer de la chaleur et de la pression pour former les pièces. La matière préchauffée est placée dans la cavité d'un moule également chauffé et ouvert. Ensuite, les deux parties du moule sont comprimées en exerçant une pression sur la matière pour qu'elle prenne la forme du moule, et l'excès du plastique est évacué dans des canalisations. Et comme toutes les techniques précédentes, le moule s'ouvre lentement après la baisse de la température de la pièce. Cette technique de fabrication ne possède pas trop d'excès de matière contrairement aux autres procédés, cependant elle nécessite un temps de cycle plus long.

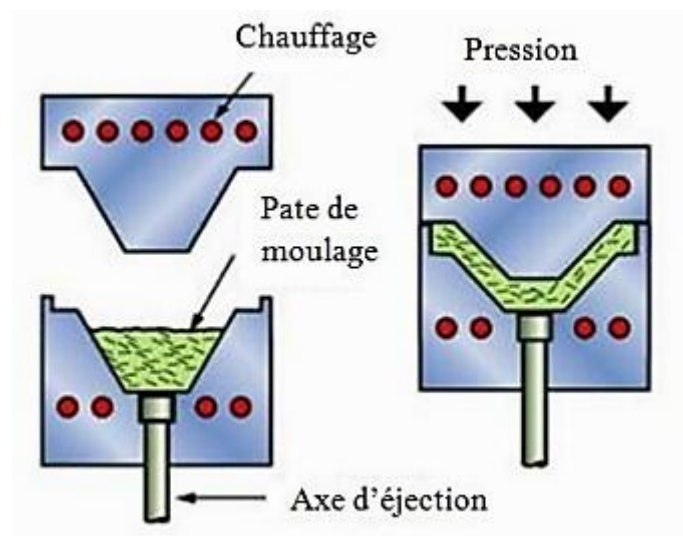


Figure 1. 11: Procédé de moulage par compression.

4.4. Moulage rotatif (Rotomoulage)

Le moulage rotatif est une technique de mise en forme qui sert à fabriquer des corps creux de petites à grandes tailles grâce à un système de rotation. Dans cette méthode, la matière, de masse prédéfinie selon l'épaisseur de la pièce souhaitée, est chargée dans un moule creux à parois minces. Le moule se ferme et tourne autour de deux axes perpendiculaires dans un milieu chaud. Cette chaleur est apportée par la convection de l'air chaud dans un four ou parfois par des résistances électriques. La bonne répartition de la matière dans le moule est liée à une faible vitesse de rotation. Le refroidissement se fait en dehors du four, par contact

avec l'air froid et parfois par pulvérisation de gouttelettes d'eau afin de refroidir le moule et donc la matière fondue. Une fois la pièce est refroidie, elle est retirée du moule à la main et découpée de toute bavure.

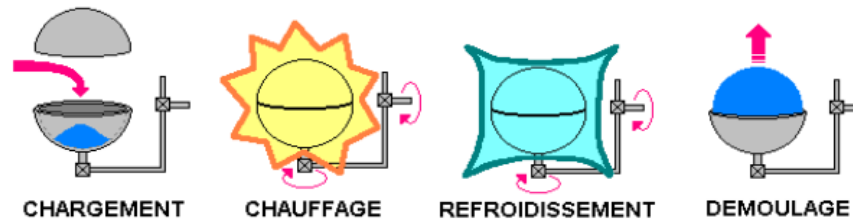


Figure 1. 12: Procédé de rotomoulage[15].

4.5. Extrusion

L'extrusion est le procédé le plus utilisé dans l'industrie, car toute matière plastique est extrudée au moins une fois lors de sa préparation. Elle est utilisée dans la fabrication d'objets semi-finis comme les feuilles, les tubes et les plaques. Son processus commence par le remplissage d'un cylindre chauffé avec la matière ou le recyclât. Ce cylindre contient une vis rotative entourée d'éléments chauffants qui génèrent de la chaleur pour assurer que le plastique passe de l'état solide à l'état fondu. La pression du plastique augmente progressivement et il est forcé de passer par une filière qui lui donne sa forme, puis il est refroidi à l'aide de l'air ou de l'eau.

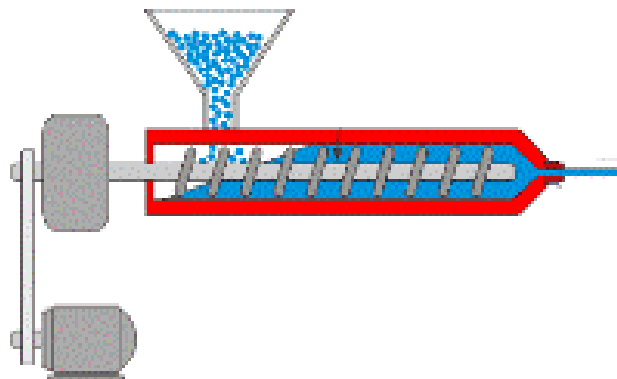


Figure 1. 13: Procédé d'extrusion.

4.6. Techniques de déposition plastique

Les techniques de déposition de plastique fait référence aux procédés de fabrication des objets couche par couche en déposant du plastique fondu.

4.6.1. Dépôt du filament fondu :

Cette méthode était principalement utilisée pour le prototypage, cependant aujourd'hui elle est employée pour la fabrication des pièces fonctionnelles dans l'industrie et également dans le domaine médical pour la fabrication des prothèses. C'est la catégorie de la fabrication additive la plus utilisée et accessible au grand public, en raison de son faible coût et de sa simplicité.

Son principe repose sur la fusion de la matière sous forme des filaments qui est ensuite déposé sur une plateforme, formant ainsi une couche bidimensionnelle superposée à d'autres couches successives pour créer un objet tridimensionnel.

4.6.2. Dépôt de granulés fondus :

Cette technique est une variante de la méthode de dépôt de filament fondu, qui utilise des granulés comme matière première au lieu des filaments. Dans ce cas, les granulés sont transportés vers une trémie, où ils sont ensuite alimentés par gravité vers une vis. Lorsque la vis tourne, les granulés sont pressés à travers un cylindre comportant plusieurs zones de chauffage, ce qui permet au matériau de chauffer progressivement et de fondre. La pression augmente à l'intérieur de l'extrudeuse et force le matériau fondu à sortir par une buse métallique suivant le trajet d'outil défini numériquement.

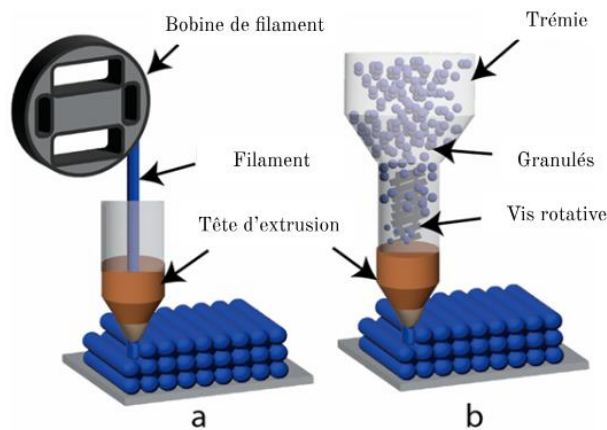


Figure 1. 14: Techniques de déposition du plastique :(a) dépôt du filament fondu , (b) dépôt du granulés fondu [16].

Conclusion

Ce chapitre nous offre une compréhension approfondie des différentes matières plastiques et des processus de transformation. Dans ce qui suit, nous allons aborder plus en détail l'un des procédés de recyclage, en particulier la méthode d'extrusion, qui permet de valoriser les déchets plastiques en leur donnant une nouvelle forme utile.

CHAPITRE 2
ÉTUDE THEORIQUE ET TECHNIQUE DU
PROCESSUS D'EXTRUSION

Chapitre 2 Etude théorique et technique

L'extrusion des polymères est le procédé le plus utilisé dans l'industrie plastique, pour la production des pièces dites semi-finies comme les tubes, tuyaux, films, plaques et autres produits. Une large gamme de thermoplastiques passe par le procédé d'extrusion, mais seule une partie est destinée à la fabrication d'objets finis

Dans ce processus, la matière première est forcée à travers une filière métallique, prenant ainsi une forme définie une fois fondue. Une seule machine peut effectuer plusieurs opérations unitaires, telles que le mélange, le chauffage, le malaxage, le cisaillement, la réaction et la mise en forme [16]. Par exemple, une extrudeuse monovis est équipée d'une vis de plastification quelle tourne permettant de chauffer et de malaxer le polymère. Ensuite, le polymère fondu passe dans la filière, où il se refroidit au contact de l'air libre [12].

1. Principe

L'extrusion se réalise à l'aide d'une machine appelée extrudeuse, conçue pour remplir plusieurs fonctions, telles que l'alimentation du plastique le long de la vis d'extrusion, la fusion du plastique à l'intérieur du cylindre à l'aide des éléments chauffants, et enfin la mise en forme pour obtenir l'objet souhaité.

Une extrudeuse se divise en trois parties :

- Zone de convoyage : elle est composée d'une trémie qui alimente la vis de plastification avec la matière première thermoplastique sous forme de granulés ou poudre.
- Zone de plastification : cette partie de la machine comprend une chambre chauffante appelée fourreau, où se trouvent des résistances permettant de transférer la chaleur à la vis (ou aux deux vis, selon le type d'extrudeuse). Les vis tournent pour chauffer et pousser la matière vers la filière [18].
- Pompage : la matière poussée sort de la filière selon la forme de celle-ci et se refroidit à l'air libre, parfois avec de petits jets d'eau.

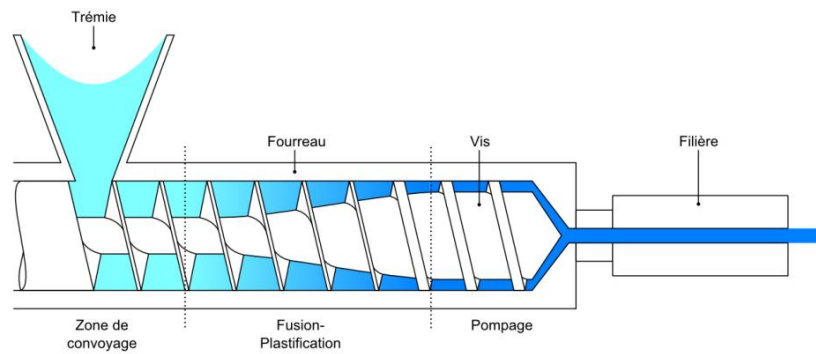


Figure 2. 1: Schéma simplifié d'une extrudeuse monovis [12].

Donc une extrudeuse est composée d'une seule vis (ou plusieurs vis selon le type de l'extrudeuse), appelée vis d'Archimède, entraînée par un moteur électrique. L'avancement de la matière le long du cylindre se fait par l'action des filets de la vis sur celle-ci. Il est nécessaire de s'assurer que la matière frotte contre les parois du cylindre et non contre la vis. Le collage du plastique sur la vis provoque une mauvaise extrusion, car dans ce cas, la matière tourne avec la vis au lieu d'être transportée vers la filière. Tandis que l'adhérence avec le cylindre assure le glissement, favorisant ainsi le processus d'écoulement.

Le chauffage et la fusion du plastique est dus :

- Au frottement et aux forces de cisaillement créées par la rotation de la vis à l'intérieur du cylindre, qui génèrent une chaleur par dissipation visqueuse ;
- Aux résistances électriques réparties le long du cylindre.

Le rapport entre ces deux source d'énergie est connues par le nombre de brinkman, tel que :

$$B_r = \frac{\eta V_F^2}{\lambda (T_F - \bar{T})} \quad (2.1)$$

Où:

- η : La viscosité (Pa.s),
- V_F^2 : La vitesse linéaire de la vis au sommet du filet (m/s),
- λ : Conductivité thermique du polymères (W/m°C),
- T_F : Température de fourreau (°C),
- $\bar{T}$: Température moyenne de polymères.

La matière fondue est ensuite poussé à travers une filière qui lui donne sa forme souhaitée. Le profilé obtenu est refroidi afin de maintenir sa température et de conserver sa forme finale, car à chaud, il reste déformable.

2. Lignes d'extrusion

L'extrusion est un procédé largement utilisé dans les différentes industries pour transformer la matière thermoplastique aux produits semi-ouvrés ou semi-finaux. Les lignes de l'extrusion sont nombreuses selon le produit à fabriquer :

2.1. Extrusion-soufflage

L'extrusion-soufflage est une technique qui permet de fabriquer des corps creux tels que les bouteilles et les flacons. Elle consiste à extruder la matière sous forme d'un tube appelé paraison, qui est ensuite placé dans un moule ayant la forme souhaitée. Le moule se referme sur la paraison, puis de l'air comprimé est injecté à l'intérieur, permettant au matériau d'épouser l'empreinte du moule. Un système de refroidissement, alimenté par de l'eau, permet de solidifier la pièce. Un couteau est utilisé pour découper la paraison, le moule s'ouvre et la pièce est éjectée. L'opération suivante peut commencer. Cette technique est utilisée pour la fabrication des bouteilles, des bidons et des réservoirs.

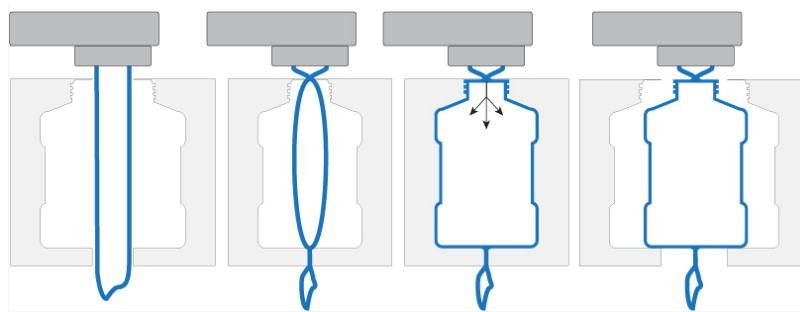


Figure 2. 2: Procédé d'extrusion-soufflage.

2.2. Extrusion-calandrage

Extrusion-calandrage est une opération qui consiste à extruder le matériau sous forme de films continus d'épaisseur uniforme, puis à le comprimer entre deux rouleaux tournants chauffés. Cette technique est utilisée dans la fabrication des feuilles et des plaques.

2.3. Extrusion-gonflage

C'est une technique de mise en forme utilisée pour la fabrication de sacs plastiques et de films. La matière première est extrudée à travers une filière annulaire, puis gonflée sous l'action de l'air comprimé et refroidie. Enfin, le gain tubulaire obtenu est enroulé en bobine.

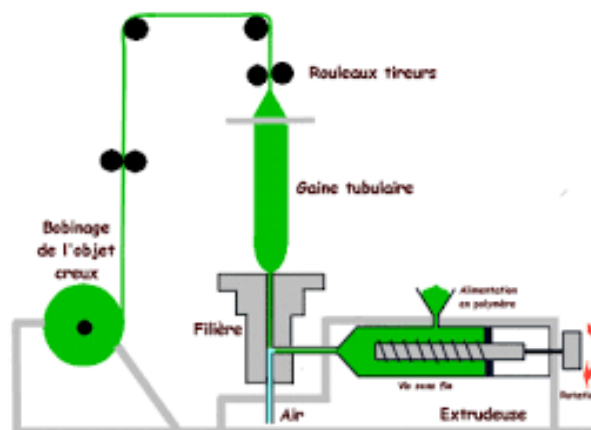


Figure 2. 3: Procédé d'extrusion-gonflage.

2.4. Extrusion réactive

Cette technique consiste à considérer l'extrudeuse comme un réacteur chimique. Pour cela, les extrudeuses bivia sont les plus utilisées en raison de leur capacité de mélange élevée, ce qui permet de réaliser des réactions chimiques. Ce procédé est utilisé pour la fabrication de copolymères et de composites fonctionnalisés.

2.5. Co-extrusion

La co-extrusion permet d'obtenir des produits avec différentes textures. Cela se fait en assemblant deux ou plusieurs extrudeuses contenant des matières aux couleurs, compositions ou propriétés différentes, qui alimentent une même filière, formant ainsi une pièce aux textures variées.

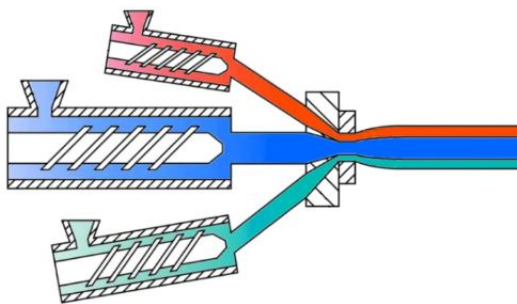


Figure 2. 4: Procédé de co-extrusion.

3. Eléments constitutifs de l'extrudeuse

Une extrudeuse mono-vis possède les éléments suivants :

3.1. La vis d'extrusion

Les vis sont généralement fabriquées en aciers alliés traités thermiquement pour assurer une bonne résistance à l'usure et à la corrosion. Elles sont définies par leur diamètre D , leur longueur L et le rapport longueur/diamètre L/D , qui joue un rôle essentiel dans la qualité de l'extrusion.

La vis possède une géométrie bien définie qui garantit la fusion et l'homogénéisation du polymère, réduisant ainsi les défauts dans les produits extrudés. Elle est divisée en trois zones principales :

- Zone d'alimentation : située près de la trémie, elle est caractérisée par une profondeur de canal constante et importante H . Son rôle est de compacter et transporter le polymère solide le long du canal hélicoïdal de la vis.
- Zone de compression : ici, la profondeur du canal diminue progressivement. Le polymère commence à fondre sous l'effet de la chaleur générée par les colliers chauffants du fourreau et du travail mécanique de la rotation de la vis.
- Zone d'homogénéisation : cette section possède une profondeur de canal faible mais constante h . Elle permet d'homogénéiser le polymère fondu et de générer la pression nécessaire pour l'extrusion à travers la filière [19].

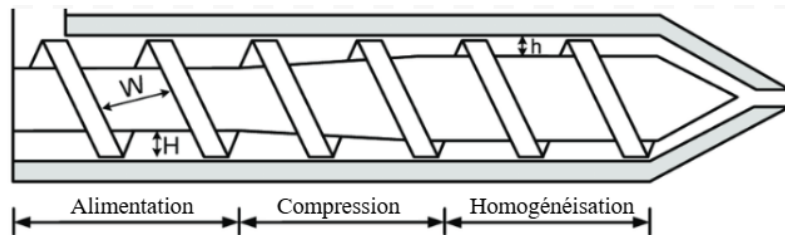


Figure 2. 5: -Un schéma d'une monovis typique [19].

Les vis se caractérisent généralement par trois paramètres qui peuvent affecter la fusion des polymères.

$$\text{Rapport de compression} = \frac{H}{h} \quad (2.2)$$

$$\text{Taux de compression} = \frac{H-h}{M} \sin(\theta_b) \quad (2.3)$$

$$\tan(\theta_b) = \frac{L}{\pi D} \quad (2.4)$$

Avec :

M représentant la longueur de la zone de compression et θ_b l'angle d'inclinaison du filet de vis.

Il existe plusieurs types de vis dépendant de la matière à extruder, la filière montée et l'application visée. On distingue les vis à pas constant, les vis à pas successifs différents. On trouve également des vis coniques et à diamètres différents.

Le noyau de la vis peut intégrer un canal de refroidissement percé qui permet d'empêcher le collage des granules de plastique sur la vis.

3.2. Cylindre ou fourreau

Le cylindre est un élément essentiel dans le processus d'extrusion. Il est équipé d'un système de couplage avec le bâti de l'extrudeuse d'un côté, et d'un dispositif de fixation de la tête d'extrusion de l'autre côté. Son rôle est d'assurer une répartition uniforme de la température.

La géométrie des fourreaux est simple d'un diamètre constant et une longueur bien définie pour qu'elle soit adaptée à la vis. Un système de refroidissement (souvent par circulation de l'eau) est introduit dans l'extrémité du cylindre autour de l'orifice de l'alimentation afin d'éviter la formation de voutes de matière à la sortie de la trémie.

Dans la zone de compression, le plastique peut dégager des corps volatils (l'humidité, l'air, les gaz, ou les vapeurs d'additifs), réduisant ainsi le rendement du processus d'extrusion et la qualité du produit final. Par conséquent, des zones de dégazage sont intégrées dans le cylindre.

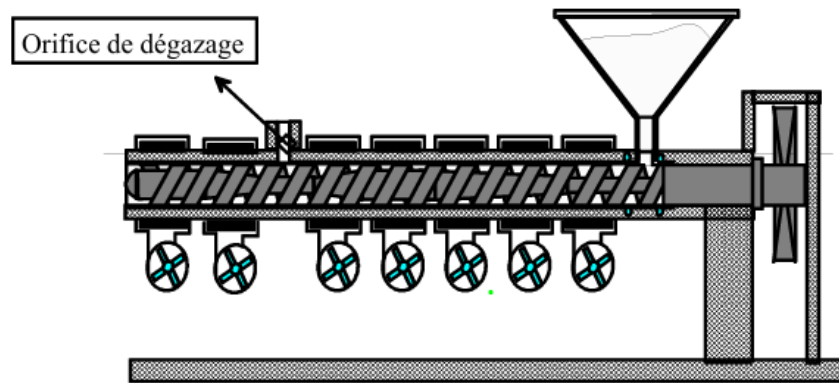


Figure 2. 6: L'emplacement des orifices de dégazage.

Le fourreau est soumis à des contraintes mécaniques dues à la poussée exercée par la vis pour transporter la matière, générant ainsi une forte pression interne. De plus, le frottement entre la matière et les parois du cylindre engendre des contraintes de cisaillement.

Il est également soumis à des contraintes thermiques liées au gradient de température entre l'intérieur, qui doit être chaud pour fusionner la matière, et l'extérieur, souvent refroidi ou régulé thermiquement. Pour cela, les cylindres doivent être conçus et fabriqués de façon à résister à la corrosion et à l'usure par abrasion. Ils sont réalisés en acier allié dur, avec une dureté dépassant 60 HRC, et capables de résister à une pression à chaud pouvant atteindre 700 bars [5].

3.3. Éléments chauffants

Les éléments chauffants des extrudeuses sont responsables de fournir la chaleur au sein du fourreau. Ils ont une forme cylindrique contenant des résistances électriques. On distingue trois types de colliers chauffants :

- Les colliers chauffants en mica : contenant un ruban résistif isolé entre deux plaques de mica. Ce type peut atteindre une température jusqu'à 350 °C.
- Les colliers chauffants en céramique : ils résistent à une température allant jusqu'à 400 °C. Contrairement au premier cas, ce type de colliers offre un serrage sensible pour éviter la casse des stéatites.
- Les colliers chauffants blindés : Ils sont très robustes, offrent une bonne dissipation thermique et sont bien adaptés aux environnements exigeants. Leur plage de température peut atteindre jusqu'à 500 °C, et ils sont particulièrement utilisés dans les applications nécessitant une forte densité de puissance et une longue durée de vie.

3.4. Tête d'extrusion et filières

La tête d'extrusion est l'élément principal qui doit assurer l'obtention d'un produit parfaitement uniforme [19]. Elle est montée à l'extrémité du cylindre permettant au matériau fondu de passer par la filière tout en lui donnant sa forme.

Une grille de répartition peut être installée entre la tête d'extrusion et la filière, afin de filtrer les impuretés et d'augmenter la pression en bout de vis. Cette grille joue également un rôle de centrage entre la tête et le fourreau.

Il existe plusieurs types de têtes selon le produit à fabriquer :

- les têtes droites, utilisées pour l'extrusion de tubes et de profilés ;
- les têtes d'équerre verticales, adaptées à l'extrusion soufflage ou à l'extrusion gonflage ;
- les têtes d'équerre horizontales, destinées au revêtement des câbles ;
- ainsi que des têtes spéciales utilisées pour la fabrication de plaques et de feuilles [5].

On peut également classer trois types de filières :

- les filières plates, utilisées pour la fabrication des plaques et des feuilles ;
- les filières cylindriques, utilisées dans la fabrication des tubes et des câbles ;
- et les filières de profilés [20].

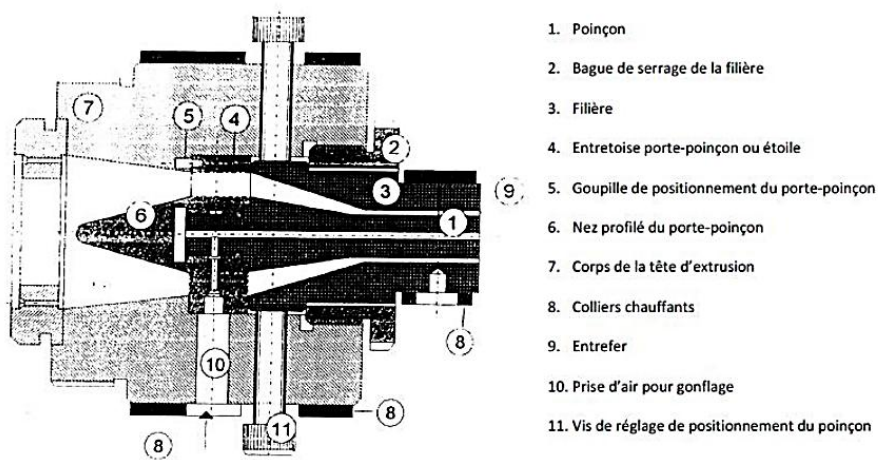


Figure 2. 7: Coupe d'une filière d'extrudeuse.

3.5. Système d'entraînement

La transmission de puissance à la vis se fait par un système d'entraînement composé de moteur et d'un réducteur. Le moteur est monté sur le bâti de l'extrudeuse et lié à un réducteur souvent poulies-courroie. Le processus de l'extrusion nécessite une vitesse de rotation de la vis stable et non influencé par la charge de la vis. Par conséquent, les moteurs électriques sont choisis car ils offrent un contrôle bien précis de la vitesse et le couple. Généralement, les moteurs électriques utilisés sont :

- Moteur électrique à courant alternatif à vitesse non variable ;
- Moteur électrique à courant continu avec variateur de vitesse ;
- Moteur électrique à courant alternatif avec variateur de fréquence.

Dans la majorité des systèmes d'extrusion, les moteurs à courant continu étaient les plus utilisés grâce à leur facilité de variation de vitesse et leur coût abordable jusqu'au milieu des années 1990. Depuis, les moteurs asynchrones, associés à des variateurs de fréquence, sont de plus en plus utilisés pour les puissances inférieures à 60 kW. Leur avantage est un entretien minime par rapport aux moteurs à courant continu (balais charbon), mais leur contrôle du couple reste moins précis à basse vitesse [21].

La vitesse de démarrage, la vitesse de fonctionnement et le couple doivent être réglés avec une grande précision pour garantir la protection de la vis, car la zone la plus sensible dans le système vis-fourreau est l'entrée de la zone d'alimentation, où le diamètre de la vis est le plus faible et donc fragile, pouvant se rompre en cas de surcharge [22] .

4. Types d'extrudeuse

4.1.Extrudeuse mono-vis

Ce type d'extrudeuse est le plus répandu dans l'industrie en raison de sa conception simple et de sa facilité d'entretien, ce qui en fait une solution économique pour la production à grand volume. Elle comporte une seule vis qui tourne à l'intérieur d'un fourreau chauffé pour faire fondre la matière.

Les extrudeuses mono-vis sont limitées par leur faible capacité de malaxage, ce qui signifie que le mélange des plastiques n'est pas très efficace, sauf si la vis est spécialement conçue avec des zones ou éléments de mélange intégrés. En effet, le chenal de la vis n'est pas suffisamment efficace pour l'opération de mélange tandis qu'une extrusion homogène et sans défaut nécessite :

- Mélange dispersif : pour casser les agglomérats et réduire la taille des particules comme les charges et les colorants.
- Mélange distributif : pour la répartition uniforme des particules dans le matériau [23].

Les constructeurs trouvent une solution en plaçant des éléments dits de mélange en tête de la vis, dans la zone de pompage. Ces éléments permettent d'assurer un cisaillement important pour disperser les agglomérats, ainsi que de favoriser la séparation et la recombinaison du flux de matière, améliorant ainsi l'homogénéisation du matériau [24].

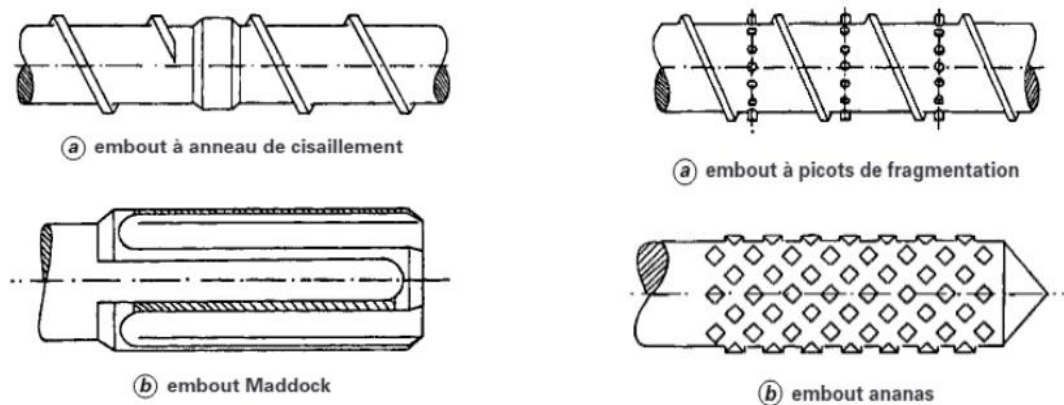


Figure 2. 8: Différents éléments de mélange[24].

4.2.Extrudeuse bi-vis

Les extrudeuses bi-vis assurent la fusion et un meilleur malaxage de la matière. Elles possèdent deux vis parallèles à l'intérieur du fourreau. Leur coût est plus élevé que celui des extrudeuses

monovis. Cependant, elles sont plus utiles pour les matières plus rigides, les profilés de grande dimension, ainsi que pour les produits nécessitant des débits importants.

Il existe plusieurs façons de disposer les bi-vis :

- Vis non interpénétrées : Les vis sans interpénétration de filets sont des vis dans lesquelles les filets ne s'engrènent pas l'un dans l'autre. Elles sont tangentes au niveau de leurs sommets, ce qui signifie que le contact entre les deux vis est limité.
- Vis interpénétrées : Contrairement au premier cas, les vis interpénétrées sont celles dont les filets s'engrènent dans le chenal (l'espace entre les filets) de l'autre vis.
- Vis contre-rotatives : Les vis tournent en sens opposé, favorisant une pression élevée d'extrusion.
- Vis co-rotatives : Les vis tournent dans le même sens, assurant un fort malaxage.

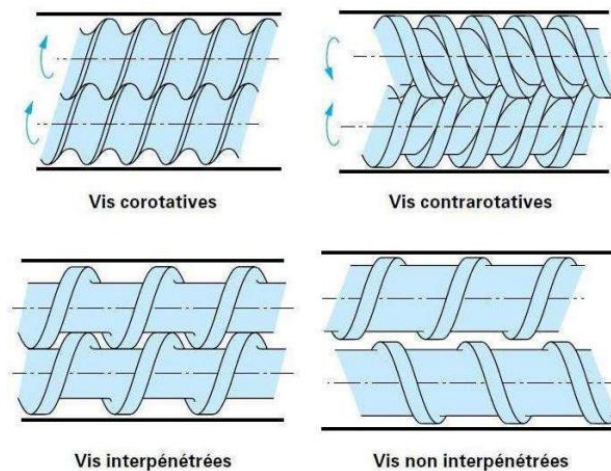


Figure 2. 9: Les principales dispositions des bi-vis

5. Défauts d'extrusion

Les défauts d'extrusion sont souvent observés lorsque la vitesse d'extrusion et le débit sont élevés. Ils sont dus à une instabilité de l'écoulement. Il est montré aussi que la non-conformité de l'extrudat dépend aussi de la section de la filière [20], [25].

L'inspection visuelle de ces défauts a conduit à l'introduction de plusieurs terminologies descriptives telles que : défaut oscillant ou chaotique, peau de crocodile, rayures en forme de tigre, perte de brillance, bouchon, aspect mat, peau de requin, défaut hélicoïdal, brume, ou encore peau d'orange.

Dans la pratique, on distingue deux types de défauts :

- Défauts de surface : Correspondent à des irrégularités de surface qui apparaissent sous forme d'ondulations fines ou de fissures, parfois hélicoïdales, bien que l'extrudat conserve une forme rectiligne en sortie.
- Défauts de volume : Les déformations de volume affectent l'ensemble de l'extrudat, contrairement aux déformations de surface. Dans ce cas, l'extrudat peut prendre un aspect

onduleux de forme hélicoïdale régulière, avec une périodicité reproductible et une surface lisse, ou apparaître comme un extrudat tordu combiné à des déformations de surface [25].

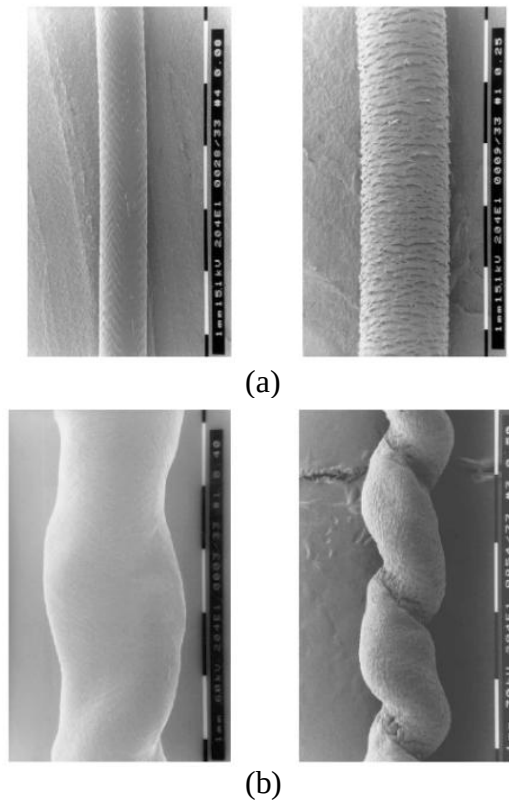


Figure 2. 10: Défauts d'extrusion a) de surface, b) de volume[25]

6. Matières extrudées

Actuellement, tous les thermoplastiques peuvent être extrudés ; cependant, l'application souhaitée limite le choix des matériaux transformés et augmente les spécifications ainsi que les exigences de la machine et de ses équipements[5].

Par exemple, dans l'extrusion des films, les thermoplastiques adaptés à cette application sont ceux qui présentent une bonne flexibilité, comme le PEBD, le PEHD, le PE et le PET, tandis que le PVC ne peut pas être utilisé.

L'extrusion présente une étape fondamentale pour transformer une matière recyclée à un nouvel objet. Elle permet de recycler une large gamme de thermoplastique en une nouvelle forme utile granulée, filaments ou produits finis.

Dans le cadre de notre étude, le PET, représentant la matière première utilisée dans les bouteilles, est le matériau le plus récupéré/recyclé pour utilisations en grande quantité [26]. Cette capacité à être recyclé est liée à la conservation de ses propriétés mécaniques et thermiques après extrusion et réutilisation.

7. Comportement du PET

Le PET est généralement transformé à l'état fondu, à des températures comprises entre 270 et 290 °C. À ces niveaux thermiques, le polymère est sujet à une dégradation thermique pouvant altérer de manière significative et irréversible ses propriétés rhéologiques. Cette dégradation dépend fortement des conditions de mise en œuvre au moment de la fusion. Il est montré que la diminution de la viscosité était directement corrélée à l'augmentation des groupements carboxyliques, eux-mêmes issus de la dégradation du matériau. Pour limiter ce phénomène, un séchage rigoureux du PET est nécessaire avant sa mise en œuvre, généralement à environ 150 °C pendant plusieurs heures. Pendant la transformation, certaines précautions peuvent également être prises, telles que la réduction du temps de séjour à l'état fondu et l'utilisation d'une atmosphère contrôlée, afin de minimiser les risques d'oxydation.

Conclusion

L'étude du processus d'extrusion nous permet de définir les composants et les besoins techniques de notre machine, qui se base sur ce principe, en connaissant ses éléments constitutifs et son principe de fonctionnement. En comprenant les différents éléments du système (comme la vis d'extrusion, le fourreau chauffant, la buse, etc.) et leur rôle dans le fonctionnement global, nous avons pu identifier les paramètres essentiels tels que la température de fusion du plastique, la vitesse de rotation de la vis, ainsi que la pression nécessaire pour assurer une extrusion continue et homogène du filament.

CHAPITRE 3
DIMENSIONNEMENT DU MECANISME DE
RECYCLAGE

Chapitre 3: Dimensionnement du mécanisme de recyclage

1. Introduction

Les filaments 3D représentent la matière première pour la réalisation des objets tridimensionnels. Ils sont fondus sur l'effet de chaleur pour devenir liquides, puis extrudés à travers une buse fine afin de créer des couches précises qui forment la pièce finale imprimée en 3D. La qualité des pièces finales dépend des propriétés de la matière des filaments utilisée ce qui nécessite une ligne de production de ces filaments efficace et optimisée.

Donc l'objectif de ce chapitre est de concevoir les différentes parties de la machine de recyclage permettant le broyage des bouteilles, l'extrusion de la matière, le refroidissement et le bobinage des filaments.

2. Matière utilisée :

Dans ce projet, la matière première utilisée pour la production du filament est issue du recyclage de bouteilles en polyéthylène téréphtalate (PET). Ces bouteilles, généralement destinées à contenir de l'eau, des boissons gazeuses ou de l'huile de table, ont un volume compris entre 1 et 1,5 litre.

Après collecte, elles subissent un tri sélectif, puis un lavage à l'eau chaude, afin d'éliminer les impuretés, étiquettes et résidus organiques. Ensuite, elles sont séchées pour éviter toute humidité résiduelle qui pourrait nuire à la qualité de l'extrusion. Enfin, les bouteilles sont broyées en paillettes (flakes), qui servent ensuite de matière première pour l'extrudeuse.

3. Description

Dans cette section, on va étudier les différents composants de la machine de recyclage ainsi que son principe de fonctionnement, en examinant les exigences de la conception.

3.1. Le principe de fonctionnement

La machine de recyclage pour la fabrication des filaments permet de transformer les bouteilles en filament en passant par des étapes clés affectant l'efficacité des filaments.

Les étapes de ce processus sont:

1. Chargement des déchets plastiques : Les bouteilles en plastiques lavées et séchées sont versées dans une trémie d'entrée afin d'alimenter le broyeur.
2. Broyage des déchets : Cette étape permet de découper et ainsi réduire la taille des bouteilles en les transformant à des petites paillettes, souvent dites flakes, facilitant le processus de l'extrusion.

3. Alimentation des paillettes : Les paillettes issues de la deuxième étape sont introduites dans une autre trémie qu'elle ensuite par son rôle transférer les paillettes à la zone d'alimentation de la vis d'extrusion.
4. Homogénéisation et extrusion : La matière est transportée le long de la vis d'extrusion, grâce à la géométrie de cette dernière, ensuite passe par la zone de compression, permettant la fusion de la matière par la chaleur transmise par les éléments chauffants et l'effet de cisaillement, avant d'atteindre la zone d'homogénéisation assurant la bonne malaxation du matériau.
5. Mise en forme : Le plastique est forcé à travers une filière à un diamètre bien précis donnant la forme finale du filament. Ce diamètre peut affecter de façon directe la précision des couches lors l'impression 3D et donc la qualité de la pièce finale.
6. Refroidissement : Un système de refroidissement intégré par air ou eau permet d'assurer la solidification rapide et donc l'uniformité du diamètre du filament.
7. Stockage : Les filaments refroidis sont enfin enroulés sur une bobine de façon automatique afin de stocker et faciliter l'utilisation lors de l'impression.

3.2. Les parties du mécanisme

La machine de recyclage se décompose en 4 parties essentielles :

1. Broyage : Consiste à un système de déchiquetage des bouteilles en plastique.
2. Extrusion : Cette partie assure la fusion et le mélange du matériau.
3. Refroidissement : Assure la solidification de filament.
4. Bobinage : Permet le stockage des filaments à la fin de l'extrusion.

4. Broyage

Les matériaux subissent une fragmentation qui les transforme en paillettes ou copeaux en appliquant des charges mécaniques provoquant la rupture du matériau au-delà de sa limite. Cela peut être en différents modes de sollicitation comme illustré dans la figure suivante.

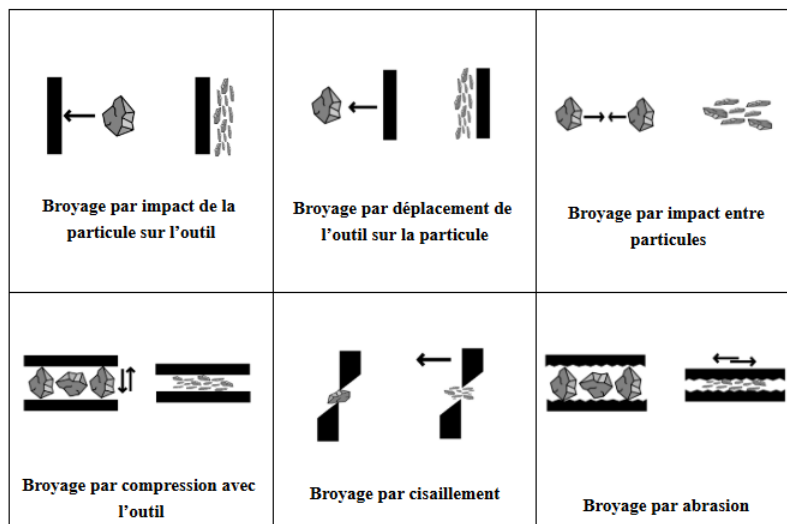


Figure 3. 1: Les modes de sollicitation en broyage

Dans notre étude, le mode de cisaillement est le plus conforme pour le broyage des bouteilles en plastiques, pour plusieurs raisons :

- Le broyage par cisaillement utilise des éléments tranchants pour le découpage du plastique, ce qui permet d'obtenir des paillettes de taille plus uniforme, en réduisant l'usure de ses éléments.
- Dans ce mode de broyage, le matériau se coupe en une seule passe, et donc la consommation d'énergie sera moins importante que les autres modes.
- Le broyage par cisaillement est plus idéal pour les matières plastiques résistantes comme le PET.
- Le découpage par cisaillement génère moins de chaleur que le broyage par impact ou compression, évitant donc le ramollissement inutile du plastique qui pourrait affecter ses propriétés.

4.1. Broyeur à cisaille

Les broyeurs à cisaille sont équipés des éléments à cisailles qui tournent à faible vitesse et à couple élevé assurant le découpage des plastiques. Il existe plusieurs types de broyeurs à cisaille selon le matériau à traiter, l'application industrielle, nombre du rotor et la géométrie et disposition des cisailles.

1. Broyeur à un arbre : Il est équipé d'un seul rotor muni des couteaux ou des lames tournant à une grande vitesse permet de déchiqueter le matériau en le frappant contre une grille ou un contre-couteau fixe.
2. Broyeur à deux arbres : Ce type de broyeurs est largement utilisé dans l'industrie pour le traitement des déchets industriels banals, des pneus, des métaux légers ainsi que les déchets électriques et électroniques. Dans ces broyeurs, deux rotors tourne en sens inverse découpent les déchets en petite morceaux.
3. Broyeur à trois et quatre arbres : Ils sont rarement employés en raison de leur composition complexe et donc de leurs coûts élevés. Cependant, il offre une bonne finition et uniformité des coupeaux.

Dans notre cas, le type le plus approprié est le broyeur à lames à deux arbres, vu que les bouteilles en plastique ont une résistance élevée nécessitant une grande force de cisaillement.

4.2. Schéma cinématique du broyeur

Le schéma cinématique consiste à identifier les relations et le type de liaison entre les pièces d'un mécanisme et à déterminer les types de mouvement afin d'analyser son fonctionnement. La modélisation schématique de notre broyeur est :

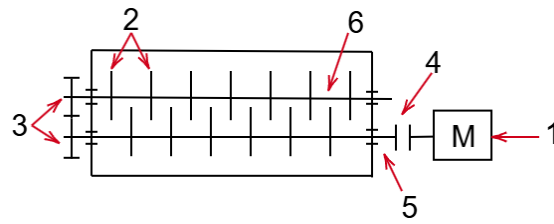


Figure 3. 2: Schéma cinématique du broyeur

Où ses éléments sont résumés dans la table suivante :

Table 3. 1: Les composants du broyeur

Numéro	Désignation	Numéro	Désignation
1	Motoréducteur	4	Accouplement
2	Lames	5	Roulement
3	Engrenages	6	Arbre porte-lames

Le broyeur se compose d'un motoréducteur électrique qui transmet la puissance aux autres éléments. Sa rotation est transmise à un premier arbre à l'aide d'un accouplement rigide. Chaque arbre porte un engrenage à son extrémité. La rotation du premier arbre entraîne ainsi la rotation du second arbre grâce à l'engrènement de deux roues dentées identiques.

Les lames, montées sur les arbres, tournent en sens opposé, ce qui permet un déchiquetage efficace des bouteilles en PET.

Des roulements sont disposés de part et d'autre des arbres pour assurer une rotation fluide, réduire les frottements et supporter les charges radiales générées pendant le broyage.

4.3. Choix du moteur

- Type du moteur :

Actuellement, étant le type le plus demandé par l'industrie, les moteurs électriques sont utilisés en raison de leur haut rendement, qui assure une production stable et de qualité. Ils transforment l'électricité en travail mécanique utile, avec une faible perte d'énergie.

Il existe plusieurs types de moteurs électriques, mais pour chaque machine, il est optimal d'utiliser un moteur d'un type spécifique, en fonction des besoins en couple, vitesse, puissance, précision, coût et conditions de fonctionnement. Pour notre broyeur, le moteur électrique à courant alternatif de type triphasé est le plus conforme à ce type de machine, car il fournit un couple élevé, une grande robustesse, et cela à moindre coût.

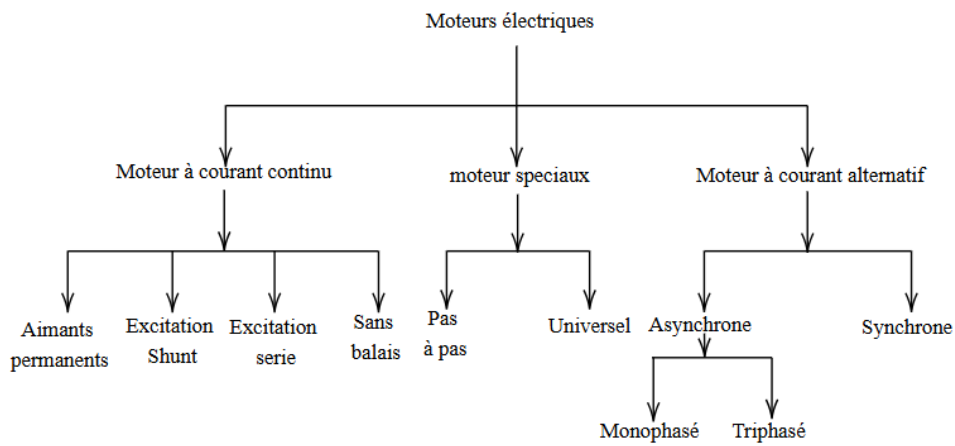


Figure 3. 3: Les différents types des moteurs électriques

Ce type de moteur peut être combiné avec un système réducteur à engrenages cylindrique, dans lequel la vitesse de rotation en sortie du moteur est transmise à une vitesse réduite à la sortie du réducteur.

- Caractéristiques du moteur :

Pour choisir un motoréducteur convenable à notre application on doit calculer la vitesse de rotation des arbres porte lames qui assurer le déchiquetage du plastique. La vitesse de coupe des plastiques commence à 3m/min et peut atteindre jusqu'à 900m/min pour les plastiques renforcés en fibres. Pour un broyeur de bouteilles en PET, nous choisissons une vitesse de coupe de 50m/min. Ce choix s'appuie sur des considérations thermomécaniques et fonctionnelles. À partir de 100 m/min, la vitesse périphérique des lames entraîne un échauffement important au point de contact avec la matière, ce qui peut induire un ramollissement local du PET et favoriser le collage du matériau sur les outils. De plus, l'augmentation de la vitesse accélère l'usure des arêtes de coupe, ce qui réduit la durée de vie des lames et augmente les coûts de maintenance. À l'inverse, une vitesse trop faible limiterait le débit de broyage, nuisant au rendement global du système.

La vitesse de coupe est donnée par :

$$V_c = \omega_c R \quad (3. 1)$$

Avec :

- V_c : la vitesse de coupe en m/s.
- ω_c : la vitesse angulaire de coupe (rd/s),
- R: le rayon des lames de coupe, on donne 110 mm de diamètre.

Donc, nous déduisons la vitesse angulaire de l'équation :

$$\omega_c = \frac{V_c}{R} \quad (3. 2)$$

Or, la vitesse angulaire est donnée par :

$$\omega_c = \frac{2\pi N}{60} \quad (3. 3)$$

Est donc :

$$N = \frac{60 \times V_c}{2\pi R} \quad (3.4)$$

Par application numérique :

$$N = \frac{60 \times 50 / 60}{2 \times \pi \times 55 \times 10^{-3}}$$

$$N = 144 \text{ tr/min}$$

Pour calculer la puissance du moteur nécessaire, nous devons estimer la force appliquée par les lames sur le plastique afin de le couper. Cette dernière est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$F = \tau \times S \quad (3.5)$$

Où :

F : La force de coupe (N),

τ : La contrainte de cisaillement du PET,

S : La surface du plastique à couper est calculée comme le produit de l'épaisseur du plastique par la longueur effective de coupe par lame.

$$S = e \times l_{\text{lame}} \quad (3.6)$$

Pour un surdimensionnement, nous devons choisir la valeur maximale de l'épaisseur présente dans les bouteilles. Celle-ci se trouve généralement au niveau du goulot, et varie selon le standard de fabrication des bouteilles. Les bouteilles fabriquées à partir de préformes PCO 1810, utilisées notamment pour les boissons gazeuses, présentent l'une des plus grandes épaisseurs au niveau du col, atteignant 4,24 mm.. Par simplification et surdimensionnement, nous considérons donc : $e = 5$ mm.

Pour notre broyeur, nous avons également choisi des lames de 9 mm d'épaisseur, ce qui permet d'obtenir des paillettes de petite taille et de forme uniforme, facilitant ainsi la deuxième étape du procédé : l'extrusion.

Et donc, nous pouvons maintenant calculer la force de coupe appliquée par les lames sur le plastique à broyer :

$$F = 39.9 \times 9 \times 5$$

$$F = 1795.5N$$

Cette valeur nous permet de calculer la puissance du moteur nécessaire pour notre broyeur :

$$P = F \times R \times \frac{\pi N}{30} \quad (3.7)$$

Et par application numérique, on trouve :

$$P = 1489 W$$

Pour un moteur de puissance standard, nous choisissons un motoréducteur de puissance 1.5 kW et vitesse de sortie de 145tr/min.

- Puissance : 1.5 kW
- Vitesse de rotation à la sortie du moteur : 750 tr/min
- Vitesse de rotation nominale à la sortie du moteur : 715 tr/min
- Vitesse de rotation à la sortie du réducteur : 145 tr/min
- Rendement : 78.7%
- Couple nominale : 99 Nm
- Fréquence assignée : 50 Hz

4.4. Dimensionnement de l'arbre porte-lames

Nous devons calculer le diamètre de l'arbre porte-lames, qui doit supporter la charge des éléments de coupe et garantir la bonne transmission de puissance. L'arbre est soumis à la fois à la flexion et à la torsion.

- Matériau de l'arbre :

Pour notre arbre, il est nécessaire d'opter pour un acier traité, offrant une haute résistance à la fatigue et à l'usure. Notre choix s'est porté sur l'acier 42CrMo4, largement utilisé dans des applications nécessitant une bonne résistance mécanique, telles que les engrenages, les essieux, les vilebrequins, etc. Il présente les caractéristiques suivantes :

Table 3. 2: Propriétés du matériau de l'arbre porte-lames

Composition chimique (EN 10083-3)			La limite d'élasticité MPa	Résistance à la traction MPa
C (0.38-0.45) %	Cr (0.9-1.2) %	Mo (0.15-0.30) %	750	1000-1200

En consultant le site de la société PIMA, nous constatons que notre choix ne représente pas un coût élevé, étant donné que cet acier présente un prix indicatif moyen, ce qui facilite la réalisation de cette machine

- Effort de coupe :

Pour la puissance du moteur choisie, il convient de recalculer l'effort de coupe en considérant que la transmission par courroie est parfaite, ce qui implique que la puissance fournie par le moteur est égale à la puissance absorbée par l'arbre.

$$P_{moteur} = P_{arbre} \Rightarrow P_m = F_t \frac{d}{2} \omega \quad (3.8)$$

Où ω est la vitesse angulaire de l'arbre, et donc :

$$F_t = \frac{2 \times P_m}{d \times \omega} \quad (3.9)$$

Nous obtenons :

$$F_t = 1796.1 N$$

- Les réactions sur les paliers :

L'arbre récepteur porte 15 lames de 9mm de l'épaisseur et 16 joints aussi de 9mm d'épaisseur, il a donc une longueur de portée de lames est 279mm. L'arbre est conçu pour que les lames soient réparties en deux groupes, avec un décalage de position ou de phase. Ainsi, 8 lames sont engagées simultanément pendant la première phase de coupe, puis les 7 autres prennent le relais dans une seconde phase.

Cette configuration permet de répartir les efforts de coupe de façon équilibrée, d'éviter les pics de couple, et d'assurer une coupe régulière tout au long de la rotation de l'arbre comme représenté dans la figure ci-dessous.

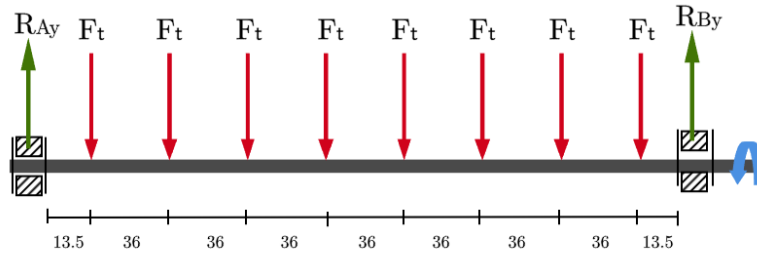


Figure 3. 4: Schéma représentatif des efforts appliqués sur l'arbre

Nous établissons les équations d'équilibre en force :

$$\sum \vec{F}_{ext} = 0 \quad (3.10)$$

En projetant sur l'axe x :

$$\sum F_{/x} = 0 \Rightarrow R_{Ax} = R_{Bx} = 0 \quad (3.11)$$

En projetant sur l'axe y :

$$\sum F_{/y} = 0 \Rightarrow R_{Ay} + R_{By} - 8 \times F_t = 0 \quad (3.12)$$

D'où :

$$R_{Ay} + R_{By} = 8 \times F_t \quad (3.13)$$

Nous allons maintenant établir les équations d'équilibre des moments appliqués en point A :

$$\sum \vec{M}_{/A} = 0 \quad (3.14)$$

Nous aurons :

$$(36 \times 7 + 13.5 \times 2)R_{By} - F_t \times (13.5 \times 8 + 28 \times 36) = 0 \quad (3.15)$$

$$\Rightarrow R_{By} = 7184.4N$$

Nous obtenons ainsi la valeur des deux réactions :

$$R_{Ay} = 8 \times F_t - R_{By} = 7184.4N$$

- Diagrammes d'effort tranchant et moment fléchissant :

L'arbre porte-lames est sollicité par 8 forces réparties le long de l'arbre créent 9 tronçons distincts dans l'analyse mécanique. Chaque tronçon est délimité par deux points d'application de charges ou

d'appui. Nous résumons dans le tableau suivant les valeurs des efforts tranchants et des moments fléchissant aux différents points d'application des charges le long de l'arbre.

Table 3. 3: Valeurs des efforts tranchants et moments fléchissants le long de l'arbre

Tronçons	$x(mm)$	$T(x)[N]$	$M_f(x)[N.m]$
1	0	-7184.4	0
	13.5	-7184.4	96.98
2	13.5	-5388.3	96.98
	49.5	-5388.3	290.96
3	49.5	-3592.2	290.96
	85.5	-3592.2	420.28
4	85.5	-1796.1	420.28
	121.5	-1796.1	484.94
5	121.5	0	484.94
	157.5	0	484.94
6	157.5	1796.1	484.94
	193.5	1796.1	420.28
7	193.5	3592.2	420.28
	229.5	3592.2	290.96
8	229.5	5388.3	290.96
	265.5	5388.3	96.98
9	265.5	7184.4	96.98
	279	7184.4	0

En traçant ainsi les diagrammes des efforts tranchants et des moments fléchissants :

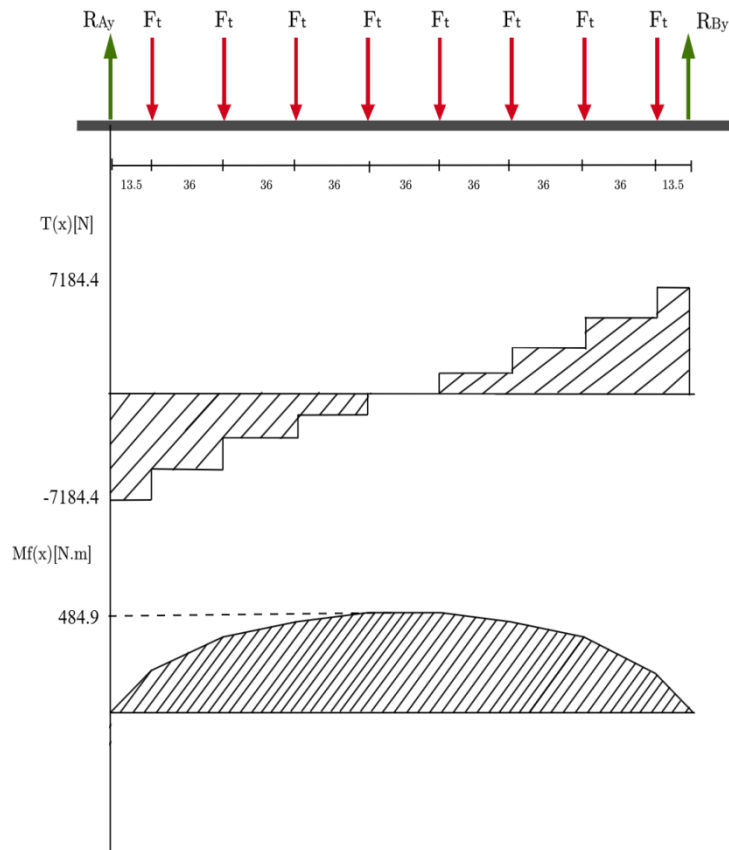


Figure 3. 5: Diagrammes d'effort tranchant et moment fléchissant

À partir du diagramme nous pouvons donc déduire la valeur du moment fléchissant maximal :

$$M_{f_{max}} = 484.9 Nm$$

Ce moment va nous permettre de calculer la contrainte normale maximale et ainsi de déterminer le diamètre minimal de l'arbre.

- Le diamètre minimal de l'arbre :

Pour dimensionner l'arbre porte-lames, il est nécessaire de prendre en compte à la fois la flexion et la torsion, car l'arbre subit les deux sollicitations simultanément. Le diamètre final sera donc déterminé à partir des contraintes combinées. Pour ce type de sollicitation combinée, il est nécessaire d'utiliser les critères de plasticité afin de garantir que l'arbre reste dans le domaine élastique, ce qui permet de prédire la limite d'élasticité effective dans des conditions de sollicitation complexes. Pour les matériaux ductiles, on trouve deux critères principaux utilisés : le critère de Von Mises et le critère de Tresca. Le premier est basé sur une approche énergétique ; il limite la distorsion élastique, tandis que le second critère est basé sur la contrainte de cisaillement maximale. Pour notre arbre, nous appliquons le critère de Von Mises, car il possède une contrainte admissible plus élevée que celle de Tresca.

Le critère de Von-Mises est donné par la formule suivante :

$$\sigma_{\text{éq}} \leq \frac{R_p}{S} \quad (3. 16)$$

Où :

- $\sigma_{\acute{e}q}$: la contrainte équivalente de Von-Mises (MPa), elle est donnée par la formule suivant :

$$\sigma_{\acute{e}q} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (3.17)$$

- σ : les contraintes normales de traction et de flexion (MPa), comme suit :

$$\sigma = \sigma_{traction} + \sigma_{flexion} \quad (3.18)$$

- τ : les contraintes tangentielles de cisaillement et de torsion (MPa):

$$\tau = \tau_{cisaillement} + \tau_{torsion} \quad (3.19)$$

Dans notre cas, l'arbre est sollicité que par la flexion et la torsion donc :

$$\sigma_{\acute{e}q} = \sqrt{\sigma_{flexion}^2 + 3 \tau_{torsion}^2} \quad (3.20)$$

Avec :

$$\sigma_{flexion} = \frac{M_{fmax}}{I_{gz}/v} \quad (3.5)$$

- I : le moment d'inertie de la section par rapport à l'axe de flexion (mm^4).
 ➤ v : distance entre l'axe neutre et la fibre la plus éloignée de la section (mm).

Et :

$$\tau_{torsion} = \frac{M_t}{I_0/r} \quad (3.22)$$

- I_0 : Moment quadratique polaire (mm^4)..
 ➤ r : Rayon de l'arbre (mm).
 ➤ M_t : Moment de torsion que l'arbre devra transmettre, il est calculé par la formule suivante :

$$M_t = F_t \frac{d}{2} = 98.78 \text{ Nm} \quad (3.23)$$

Le rapport $\frac{R_p}{s}$ représente la contrainte admissible où s est le coefficient de sécurité. Pour ce type de machine un coefficient de 3 est le plus conforme en raison des charges dynamiques et conditions de fonctionnement instables.

$$\sigma_{\acute{e}q} = \sqrt{\left(\frac{M_{fmax}}{I_{gz}/v}\right)^2 + 3 \left(\frac{M_t}{I_0/r}\right)^2} \quad (3.24)$$

En fonction du diamètre de l'arbre :

$$\sigma_{\acute{e}q} = \frac{32}{\pi D^3} \sqrt{(M_{fmax})^2 + 3M_t^2} \leq \frac{R_e}{s} \quad (3.6)$$

On trouve le diamètre minimal :

$$D \geq 27.56 \text{ mm}$$

Donc nous optons pour un diamètre de 30 mm pour notre arbre.

4.5. Système d'engrènement

La transmission de la rotation de l'arbre primaire, relié au moteur vers l'arbre secondaire, s'effectue ensuite par un système d'engrènement. Dans ce système, une roue dentée droite est montée sur l'arbre primaire, et une autre roue identique, de même taille et du même nombre de dents, est montée sur l'arbre secondaire. Ainsi, les deux arbres tournent à la même vitesse mais en sens inverse, ce qui permet d'assurer le cisaillement du plastique.

- Diamètre primitif :

Les deux roues ont le même diamètre et égale à l'entraxe entre les deux arbres. Donc nous pouvons écrire :

$$D_1 = D_2 = E = 90mm$$

- Le module :

Le module peut être calculé par la formule suivante :

$$m = 2.34 \sqrt{\frac{F_t}{k.R_{p_e}}} \quad (3.7)$$

Où :

F_t : C'est l'effort tangentiel transmis par la denture. Il dépend du couple transmis et du rayon primitif. Nous obtenons : $F_t = 2195.24N$

R_{p_e} : Résistance pratique à l'extension du matériau des dents, c'est une propriété mécanique du matériau. Pour un coefficient de sécurité égale 2, on trouve $R_{p_e} = 240MPa$

k : C'est le coefficient de la largeur de denture. Valeur choisie entre 6 et 10, nous prenons $k=10$.

Par calcul, nous obtenons :

$$m = 2.23 \text{ mm} \Rightarrow 2.5mm$$

Nous pouvons maintenant calculer les paramètres de notre roue en les résumant dans le tableau suivant :

Table 3. 4: Caractéristiques des roues dentées

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
Module (mm)	2.5	Diamètre de tête (mm)	95
Diamètre primitif (mm)	90	Diamètre de pied (mm)	83.75
Hauteur de saillie (mm)	2.5	Pas primitif (mm)	7.85
Hauteur de creux (mm)	3.125	Nombre de dents	36

4.6. Roulements

- Choix du roulement

Parmi les différents types de roulements existants (roulements à rouleaux, à aiguilles, coniques, etc.), le roulement à billes est souvent le plus approprié pour les broyeurs de petite à moyenne taille, et cela pour plusieurs raisons :

- Les roulements à billes sont capables de supporter à la fois des charges radiales et des charges axiales modérées,
- Ils offrent une excellente performance pour des vitesses de rotation élevées, ce qui est souvent requis dans les broyeurs pour obtenir une bonne efficacité de coupe ou de réduction.
- Faible frottement et bon rendement

- Caractéristiques du roulement :

Nous choisissons un roulement SKF de diamètre d'alésage est 30mm et référence 6006 dont ses caractéristiques dans le tableau :

Dimensions d'encombrement			Charges de base		Limite de fatigue	Vitesses de base		Masse	Désignation
d	D	B	C _d	C ₀	P _u	Vitesse de référence	Vitesse limite		
mm			kN		kN	tr/min		kg	—
25	37	7	4,36	2,6	0,125	38 000	24 000	0,022	61805
	42	9	7,02	4,3	0,193	36 000	22 000	0,045	61905
	47	8	8,06	4,75	0,212	32 000	20 000	0,06	* 16005
	47	12	11,9	6,55	0,275	32 000	20 000	0,078	* 6005
	52	15	14,8	7,8	0,335	28 000	18 000	0,13	* 6205
	52	15	17,8	9,8	0,4	28 000	18 000	0,12	6205 ETN9
	62	17	23,4	11,6	0,49	24 000	16 000	0,23	* 6305
	62	17	26	13,4	0,57	24 000	16 000	0,22	6305 ETN9
	80	21	35,8	19,3	0,815	20 000	13 000	0,54	6405
28	58	16	16,8	9,5	0,405	26 000	16 000	0,17	62/28
	68	18	25,1	13,7	0,585	22 000	14 000	0,3	63/28
30	42	7	4,49	2,9	0,146	32 000	20 000	0,025	61806
	47	9	7,28	4,55	0,212	30 000	19 000	0,049	61906
	55	9	11,9	7,35	0,31	28 000	17 000	0,089	* 16006
	55	13	13,8	8,3	0,355	28 000	17 000	0,12	* 6006
	62	16	20,3	11,2	0,475	24 000	15 000	0,2	* 6206
	62	16	23,4	12,9	0,54	24 000	15 000	0,18	6206 ETN9
	72	19	29,6	16	0,67	20 000	13 000	0,35	* 6306
	72	19	32,5	17,3	0,735	22 000	14 000	0,33	6306 ETN9
	90	23	43,6	23,6	1	18 000	11 000	0,75	6406

- Durée de vie :

Elle est calculée par :

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^n \quad (3.8)$$

Où :

- L_{10} : est la durée de vie nominale en millions de tours,
- C : charge de base dynamique en N,

- P : charge radiale équivalente en N,
- n : pour les roulements à billes égale 3.

En faisant une application numérique :

$$L_{10} = \left(\frac{35800}{7184} \right)^3$$

Nous obtenons :

$$L_{10} = 123.75 \text{ Millions de tours}$$

En heurs :

$$L_{10h} = \frac{10^6 L_{10}}{60 N} \quad (3. 28)$$

On trouve :

$$L_{10} = 14200 \text{ heurs}$$

5. Extrusion

Dans cette partie, les palettes issues du broyage sont transformées en filament en passant par plusieurs étapes :

- Alimentation de la trémie : les paillettes sont introduites dans la trémie de l'extrudeuse pour l'alimenter.
- Transport de la matière : la géométrie de la vis d'extrudeuse assure le transfert de la matière le long de l'extrudeuse à travers les trois zones de convoyage, de fusion, et de pompage.
- Fusion du plastique : un transfert de chaleur à l'intérieur du fourreau à l'aide des colliers chauffants permet de fondre le plastique en passant de l'état solide à l'état fondu.
- Formation des filaments : La matière fondue est poussée à l'intérieure d'une buse ou filière capillaire avec un débit réglé en prenant la forme du filament.

5.1. La Géométrie de la vis

Comme citée précédemment, la géométrie de la vis joue un rôle crucial dans le processus de l'extrusion. Elle dépend de plusieurs facteurs ainsi que la matière à extruder qui nous permet de déterminer les dimensions finales de notre vis :

- Rapport de compression : Les extrudeuses destinées pour la fabrication des pièces en PET ont un rapport de compression de 3 à 3.25. Pour notre vis on choisit un rapport de compression de 3.
- Le rapport L/D : L'extrusion du PET nécessite une longueur de 24 à 30 fois le diamètre de la vis. Afin de minimiser l'encombrement nous choisissons un rapport de 24.
- L'angle du filet : l'angle qui fait le filet avec le plan perpendiculaire à l'axe de la vis est optimisé dans un intervalle de 17° à 24°. On choisit un angle de 17.7° pour lequel le pas est égal au diamètre de la vis.

- La longueur des zones de la vis : La vis est divisée en 3 zones de longueurs bien définie. La longueur de la zone d'alimentation représente 40% de la longueur totale de la vis ou la zone de compression représente 30% tandis que la zone d'homogénéisation représente 30%.

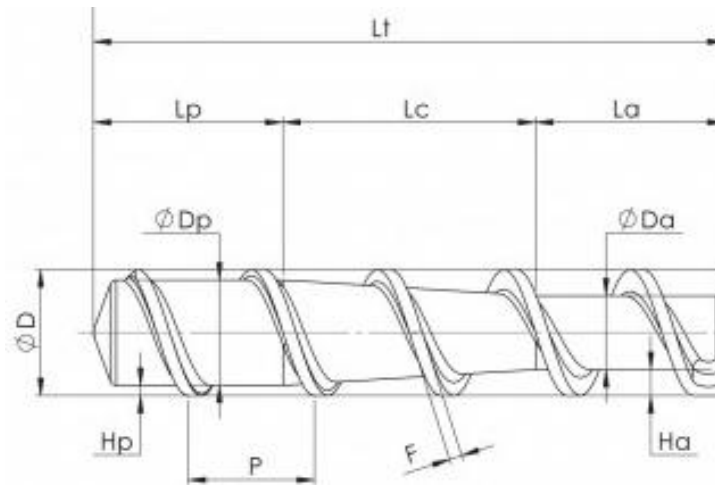


Figure 3. 6: Représentation des dimensions caractéristiques d'une vis d'extrudeuse

Nous résumons les paramètres de notre vis dans le tableau suivant :

Table 3. 5: Les paramètres géométriques de la vis

Paramètre	Désignation	Formule	Valeurs
Diamètre extérieure (mm)	D	/	30
Epaisseur du filet (mm)	e	/	2
Diamètre du corps (mm)	d	/	26
Angle du filet (°)	ϑ	/	17.7
Longueur (mm)	L	$24 \times D$	720
Pas (mm)	P	$\tan(\vartheta) \times \pi \times D$	30
Longueur de la zone d'alimentation (mm)	L_a	$4 \times D$	288
Longueur de la zone de compression (mm)	L_c	$10 \times D$	216
Longueur de la zone d'homogénéisation (mm)	L_h	$10 \times L$	216
La profondeur du chanal dans la zone d'homogénéisation (mm)	H_p	$\frac{(D - d)}{2}$	2
La profondeur du chanal dans la zone d'alimentation (mm)	H_a	$3 \times H_p$	6

5.2.Choix du motoréducteur

Le choix du motoréducteur est dépend de la puissance nécessaire pour entraîner la vis ainsi que de sa vitesse de rotation qui garantit la fusion et la poussée de la matière.

- Le débit d'extrusion et la vitesse de rotation de la vis:

Les bobines de filament en PET pour l'impression 3D se trouvent en deux poids différents : 750 g ou 1 kg, ainsi que les diamètres de filament sont 1,75 mm et 2,85 mm. Dans notre étude, nous optons pour des filaments de 1,75 mm de diamètre car ils sont les plus utilisés et nous précisons un poids de 1 kg pour les bobines.

On souhaite fabriquer deux bobines en une heure, soit un débit de 2 kg de PET solide par heure. Le débit massique de matière fondue à l'intérieur de la vis est égal au débit massique sortant de la filière en filament ce qui nous permet d'écrire :

$$\dot{m}_{solide} = \dot{m}_{fondu} = 2 \text{ kg/h} \quad (3.29)$$

Cependant, le débit volumique n'est pas constant, car la densité du PET varie entre l'état solide et l'état fondu. On calcule le débit volumique à l'intérieur de la vis comme suit :

$$\dot{m}_{solide} = Q_{vis} \cdot \rho_{fondu} \quad (3.30)$$

Donc le débit volumique est :

$$Q_{vis} = \frac{\dot{m}_{solide}}{\rho_{fondu}} \quad (3.31)$$

Où :

ρ_{fondu} : C'est la densité du PET recyclé à l'état fondu, elle est environ 1170 kg/ m³.

En faisant une application numérique, nous trouvons :

$$\begin{aligned} Q_{vis} &= 1.709 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h} \\ &= 4.74 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

En effet, le débit dans la vis d'extrusion est la superposition de deux débits :

- **Débit de traînée** : c'est le débit responsable du déplacement de la matière vers l'avant, de la trémie jusqu'à la filière. Il dépend uniquement de la géométrie de la vis et de sa vitesse de rotation. Il est donné par la formule suivante :

$$Q_d = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 N H \sin \vartheta \cos \vartheta \quad (3.32)$$

Où :

N : est la vitesse de rotation de la vis (tr/s)

- **Débit de pression** : c'est le débit de retour d'une partie de la matière, dû à la restriction rencontrée dans la zone de compression et la zone d'homogénéisation avant la filière. Il agit donc dans le sens opposé au mouvement principal du plastique. Ce débit dépend non seulement de la géométrie de la vis, mais aussi de la pression et de la viscosité du matériau. Il est donné par :

$$Q_p = \frac{\pi D H^3 \sin^2 \vartheta}{12 \eta} \frac{P}{L} \quad (3.33)$$

Avec :

- P : C'est la pression exercée sur la matière plastique (Pa) ;
- η : est la viscosité du matériau (Pa.s).

Alors le débit dans la vis d'extrusion est :

$$Q_{vis} = Q_d - Q_p \quad (3.34)$$

Et donc :

$$Q_{vis} = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 N H \sin \vartheta \cos \vartheta - \frac{\pi D H^3 \sin^2 \vartheta}{12 \eta} \frac{P}{L} \quad (3.35)$$

Les extrudeuses sont caractérisées par un point de fonctionnement où la capacité de la vis à convoier la matière fondue vers la buse est égale au débit que la filière peut laisser passer à une certaine pression. Donc on peut écrire que ce point de fonctionnement implique:

$$Q_{vis} = Q_{buse} \quad (3.36)$$

Où le débit accepté par la filière est donné par :

$$Q_{buse} = \frac{\pi R_d^4}{8 \eta L_d} P \quad (3.37)$$

Avec :

- R_d : est le rayon de la buse qui implique le rayon du filament ;
- L_d : est la longueur de la buse, pour notre cas nous prenons égale 5mm.

Extraire l'expression de la pression à partir de l'équation (3.9) et l'égalité (3.10):

$$P = \frac{8 \eta L_d}{\pi R_d^4} Q_{vis} \quad (3.38)$$

En l'introduisant dans l'équation (3.47), nous obtenons :

$$Q_{vis} = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 N H \sin \vartheta \cos \vartheta - \frac{8}{12} \frac{D H^3 \sin^2 \vartheta L_d}{R_d^4 L} Q_{vis} \quad (3.39)$$

Nous tirons la vitesse de rotation:

$$N = \frac{(1 + \frac{8 D H^3 \sin^2 \vartheta L_d}{12 R_d^4 L})}{\frac{1}{2} \pi^2 D^2 H \sin \vartheta \cos \vartheta} Q_{vis} \quad (3.40)$$

En calculant maintenant sa valeur :

$$N = \frac{(1 + \frac{8}{12} \times \frac{0.03 \times 0.002^3 \times \sin^2(17.7) \times 0.005}{0.000875^4 \times 0.72})}{\frac{1}{2} \pi^2 \times 0.03^2 \times 0.002 \times \sin(17.7) \times \cos(17.7)} \times 4.74 \times 10^{-7}$$

Nous obtenant :

$$N = 0.21 \text{ tr/s}$$

$$N = 13 \text{ tr/min}$$

Pour cette application, nous choisissons un motoréducteur de 0.55kW et vitesse de sortie de 14tr/min ayant les caractéristiques suivantes :

- Puissance :0.55 kW
- Vitesse de rotation nominale a la sortie du moteur:710 tr/min
- Vitesse de rotation a la sortie du réducteur : 14 tr/min

- Rendement : 77.7%
- Couple nominale : 380 Nm
- Fréquence assignée : 50 Hz.

Pour la nouvelle vitesse de rotation de la vis nous calculons le débit volumique et ensuite le débit massique comme suit :

$$Q_{vis} = \frac{\frac{1}{2}\pi^2 D^2 H \sin\theta \cos\theta N}{(1 + \frac{8}{12} \frac{DH^3 \sin^2\theta}{R_d^4 L})} \quad (3.41)$$

Et donc :

$$Q_{vis} = \frac{\frac{1}{2}\pi^2 \times 0.03^2 \times 0.002 \times \sin(17.7) \times \cos(17.7) \times \frac{14}{60}}{(1 + \frac{8}{12} \times \frac{0.03 \times 0.002^3 \times \sin^2(17.7) \times 0.005}{0.000875^4 \times 0.72})}$$

$$Q_{vis} = 5.11 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$$

Et donc le débit massique sera :

$$\dot{m}_{solide} = Q_{vis} \cdot \rho_{fondu} \quad (3.42)$$

$$\dot{m}_{solide} = 5.97 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$$

5.3. Sélection du matériau

Les vis d'extrusion aussi que les fourreaux sont fabriqués en acier alliées, ainsi nous optons pour notre extrudeuse l'acier 34CrAlNi7 dont on résume sa composition chimique et ses propriétés mécaniques dans le tableau suivant :

Composition chimique (EN 10085: 2001)				La limite conventionnelle d'élasticité MPa	Résistance à la traction MPa
C (0.3 - 0.37) %	Cr (1.5 - 1.8) %	Al (0.8 - 1.2)%	Ni (0.85 - 1.15) %	680	900-1100

La vis est soumise à un couple de torsion fourni par le moteur, ce qui engendre une contrainte de cisaillement. Il est donc nécessaire de vérifier que la vis peut fonctionner en toute sécurité, en résistant au couple maximal transmis par le moteur. Ce dernier est donné comme suit :

$$T_{max} = \frac{P_{max}}{\frac{2\pi}{60} N_{vis}} \quad (3.43)$$

Où :

- T_{max} : Le couple maximal transmis par le moteur (Nm);
- P_{max} : La puissance maximale du moteur (W);
- N_{vis} : La vitesse de rotation de la vis (tr/min).

En calculant :

$$T_{max} = \frac{0.55 \times 10^3}{\frac{2\pi}{60} \times 14}$$

$$T_{max} = 375.15 \text{ Nm}$$

La contrainte de cisaillement maximale doit être inférieure à la contrainte de cisaillement admissible, donc :

$$\tau_{max} \leq \tau_{adm} \quad (3.44)$$

Avec τ_{max} est la contrainte de cisaillement maximale, elle est calculée à l'aide du couple maximale T_{max} :

$$\tau_{max} = \frac{T_{max}}{W_p} \quad (3.45)$$

En considérant que la vis est un cylindre de diamètre égal au diamètre du noyau de la vis dans la zone d'alimentation, nous calculons le moment de résistance polaire W_p :

$$\begin{aligned} W_p &= \frac{\pi}{16} d^3 = \frac{\pi}{16} \times 0.018^3 \\ &= 1.145 \times 10^{-6} m^3 \end{aligned} \quad (3.46)$$

Alors la contrainte maximale de cisaillement est :

$$\begin{aligned} \tau_{max} &= \frac{375.15}{1.145 \times 10^{-6}} \\ &= 327.64 \text{ MPa} \end{aligned}$$

La contrainte de cisaillement admissible est calculée en fonction de la contrainte conventionnelle d'élasticité par :

$$\begin{aligned} \tau_{adm} &= 0.65 R_{e0.2} \\ &= 0.65 \times 680 = 442 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (3.47)$$

En comparant les deux contraintes, on constate que la contrainte de cisaillement maximale est inférieure à la contrainte admissible, avec un coefficient de sécurité d'environ 1,3. Cela confirme que la vis peut fonctionner en toute sécurité pour la puissance maximale fournie par le moteur, assurant ainsi le bon fonctionnement de l'extrudeuse.

5.4. Système de chauffage

Le chauffage du plastique au sein du fourreau est dû à des résistances électriques de forme cylindrique placées autour du fourreau, générant la chaleur par conduction. Ces éléments sont répartis le long du cylindre, fournissant l'énergie qui permet d'amener le PET recyclé à l'état fondu. Pour cette raison, nous devons calculer la quantité de chaleur totale nécessaire pour fusionner le plastique, et ainsi déterminer la puissance de ces colliers chauffants aussi que leur disposition.

L'énergie à fournir est la chaleur totale dissipée par ces éléments en tenant en compte des pertes thermiques. Elle est calculée comme suit :

$$Q_{reel} = \frac{Q_{totale}}{\eta} \quad (3. 48)$$

Où:

- Q_{reel} : est la chaleur à fournir réellement à l'intérieur du fourreau (W),
- Q_{totale} : Énergie théorique pour amener le PET à l'état fondu (W),
- η : est le rendement thermique dans l'extrudeuse.

L'énergie totale correspond à la superposition de deux contributions :

- La chaleur sensible requise pour porter le plastique de la température ambiante à sa température de fusion ;
- La chaleur latente nécessaire pour le changement d'état, de solide à fondu, sans variation de température.

Donc :

$$Q_{totale} = Q_{latente} + Q_{sensible} \quad (3. 49)$$

La chaleur sensible est donnée par la formule suivante :

$$Q_{sensible} = \dot{m} C_p (T_f - T_i) \quad (3. 50)$$

Où:

- $\dot{m}$: est le débit massique à l'intérieure du fourreau,
- C_p : est la chaleur spécifique du PET,
- T_f : est la température de fusion du PET recyclé, elle est environ 252.5°C.
- T_i : est la température ambiante.

Nous calculons ainsi la chaleur sensible :

$$Q_{sensible} = 5.97 \times 10^{-4} \times 1170 \times (252.5 - 20)$$

$$Q_{sensible} = 162.4W$$

Afin de calculer la chaleur latente, nous utilisons la formule suivante :

$$Q_{latente} = \dot{m} L_m \quad (3. 51)$$

Où :

- L_m : est la chaleur latente spécifique, 140J/g pour le PET.

Ainsi :

$$Q_{latente} = 140 \times 10^3 \times 5.97 \times 10^{-4}$$

$$Q_{latente} = 83.58 W$$

Donc la chaleur nécessaire pour chauffer le PET recyclé dans le cylindre est :

$$Q_{totale} = 162.4 + 83.58$$

$$Q_{totale} = 245.98W$$

L'extrudeuse peut présenter des pertes thermiques. Pour cette raison, son rendement thermique se situe généralement entre 65 % et 85 %. Dans notre cas, le rendement est estimé à 70 %, donc :

$$Q_{reel} = \frac{245.98}{0.7}$$

$$Q_{reel} = 351.4W$$

Donc, nous devons avoir des colliers chauffants ayant une puissance totale de 351,4 W. Pour cela, nous choisirons des colliers selon la répartition suivante :

- Zone d'alimentation: 100W
- Zone de compression : 130W
- Zone de dosage : 130W.

En ajoutant des cylindres en aluminium entre le fourreau et les colliers chauffants, nous pouvons réduire les pertes de chaleur et améliorer la répartition thermique. Cela permet de mieux conserver la chaleur autour du fourreau et d'augmenter l'efficacité énergétique du chauffage.

La température du plastique fondu est l'un des paramètres les plus critiques dans le processus d'extrusion. Elle est également difficile à estimer, puisqu'elle est influencée par plusieurs paramètres comme l'usure du cylindre, la vitesse de rotation de la vis, etc. Pour cette raison, nous pouvons intégrer plusieurs instruments et accessoires au système de chauffage, qui nous permettent de contrôler la température du matériau afin d'éviter les défauts d'extrusion et la dégradation thermique du polymère. Parmi ces accessoires, nous optons :

- Les thermocouples :

Représentant des capteurs de température, un thermocouple est constitué de deux fils métalliques de nature différente, soudés à une extrémité appelée jonction chaude. C'est cette jonction qui est placée au point de mesure, c'est-à-dire là où l'on veut connaître la température. L'autre extrémité, appelée jonction froide, est reliée à un système d'acquisition de données. Lorsque la jonction chaude est exposée à une température différente de celle de la jonction froide, une tension (en millivolts) est générée. Cette tension dépend uniquement de la différence de température entre les deux jonctions.

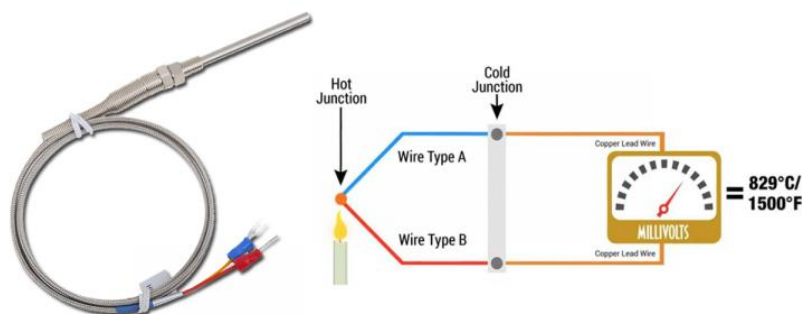


Figure 3. 7: Fonctionnement des thermocouples

Le thermocouple est généralement protégé par une gaine métallique (souvent en acier inoxydable) ou une isolation céramique, selon l'environnement d'utilisation, ce qui lui permet de résister aux

températures élevées, aux chocs mécaniques et à la corrosion. Il se trouve en différents types selon la plage d'utilisation, la composition métallique ainsi que le type d'isolation.

Table 3. 6: Types des thermocouples

Types	Composition métallique	Plage de température
K	Chromel/Alumel	-200°C à 1 372°C
J	Fer/Constantan	-40°C à 760°C
T	Cuivre/Constantan	-200°C à 350°C
E	Chromel/Constantan	-270°C à 1 000°C
N	Nicrosil/Nisil	-200°C à 1300°C
S	Platine/Rhodium – 10%/90%	0°C à 1 600°C
R	Platine/Rhodium – 13%/87%	0°C à 1 600°C
B	Platine/Rhodium 30%/70%	0°C à 1 700°C

Nous optons pour un thermocouple de type K, car il s'agit du type le plus utilisé dans les extrudeuses commerciales en raison de sa stabilité à haute température et de sa précision, avec une tolérance d'environ ± 1 °C.

- Régulateur PID :

Les thermocouples sont responsables de la mesure de la température au niveau du cylindre. Cependant, des variations de température indésirables peuvent perturber le bon déroulement du processus d'extrusion. Pour anticiper et corriger ces écarts, des systèmes de régulation thermique sont installés. La régulation de la température est assurée par un système PID, un algorithme de contrôle thermique dont le principe consiste à comparer la température mesurée par les thermocouples avec la température souhaitée. Ce système permet une réponse stable, précise et rapide, en combinant trois actions de correction entre la valeur mesurée et la valeur de consigne :

- Action proportionnelle : Plus l'erreur est grande, plus la correction est forte.
- Action intégrale : Permet d'éliminer le décalage de régulation à long terme.
- Action dérivée : Empêche les dépassements et limite les oscillations autour de la consigne.

Nous pouvons expliquer le fonctionnement de ces régulateurs à l'aide du schéma suivant :

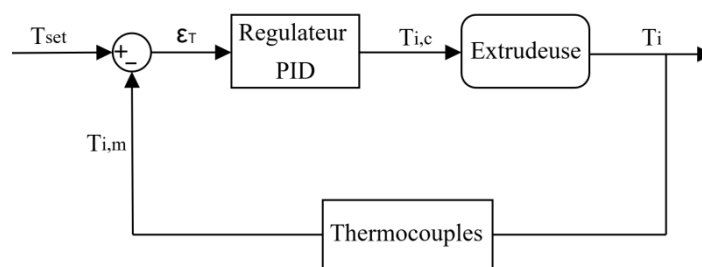


Figure 3. 8: Schéma-bloc fonctionnel du système de régulation PID de température d'une extrudeuse

Ou :

- T_{set} : représente la consigne, ou la température voulue ;
- T_i : est la température du cylindre au niveau d'un collier chauffant i ;
- $T_{i,m}$: est la valeur de la température mesurée par les thermocouples ;
- ε_T : c'est l'erreur, la différence entre la consigne ou la température mesurée ;
- $T_{i,c}$: est la température corrigée.

Donc, comme il est présenté dans le schéma-bloc, le régulateur reçoit la température mesurée à différents endroits des éléments chauffants, puis génère une erreur, c'est-à-dire l'écart entre la température mesurée et la température de consigne. Enfin, il envoie un signal à un actionneur, qui a pour rôle d'ajuster la puissance des colliers chauffants afin d'atteindre la valeur de consigne. Le régulateur fonctionne en boucle fermée, et cette opération se répète en continu dans le temps.



Figure 3. 9: Régulateur PID

- Relais statique (Solide State Relay):

Le relais statique (SSR) représente l'actionneur dans ce système ; il agit comme un interrupteur électronique rapide qui permet d'allumer ou d'éteindre le chauffage selon les instructions envoyées par le contrôleur PID. Lorsque la température mesurée dépasse la consigne, le PID interrompt l'envoi des signaux, ce qui fait que le SSR ouvre le circuit électrique et coupe l'alimentation des résistances chauffantes. À l'inverse, lorsque la température est inférieure à la consigne, le PID augmente la durée ou la fréquence des impulsions, ce qui permet au SSR de rester fermé plus longtemps, alimentant ainsi la résistance jusqu'à atteindre la température souhaitée.



Figure 3. 10: Relais statique

6. Bobinage

Une fois le filament extrudé et refroidi, il est automatiquement enroulé sur une bobine dont la vitesse de rotation s'ajuste à celle de l'extrusion. Cela permet de répartir le filament uniformément sur toute la largeur de la bobine, tout en évitant qu'il ne casse ou ne se relâche.

6.1. Choix du moteur

La bobine est entraînée par un moteur pas à pas, qui constitue un bon choix car il offre une vitesse précise et adaptable pour des applications nécessitant une faible vitesse de rotation.

Sa vitesse linéaire est équivalente à la vitesse d'écoulement du filament. Cependant, la vitesse de rotation n'est pas constante car elle dépend du diamètre actuel de la bobine : plus celle-ci se remplit, plus elle doit tourner lentement pour garder une même vitesse linéaire. Pour cela, nous devons déterminer la relation entre la vitesse de rotation et le rayon actuel du bobinage.

On peut écrire :

$$V_{\text{filament}} = V_{\text{linéaire}} \quad (3. 52)$$

Où :

- V_{filament} : la vitesse du filament enroulé (m/s),
- $V_{\text{linéaire}}$: la vitesse linéaire de la bobine (m/s).

La vitesse du filament est calculée comme suit :

$$V_{\text{filament}} = \frac{Q}{S} \quad (3. 53)$$

Avec :

- Q : le débit du filament à la sortie de la buse (m^3/s),
- S : la section de la buse (m^2).

En calculant cette valeur, nous trouvons :

$$V_{\text{filament}} = 0.172 \text{ m/s}$$

Or, la vitesse linéaire de la bobine est reliée à sa rotation par :

$$V_{\text{linéaire}} = r \times \omega = r \times \frac{2\pi N}{60} \quad (3.54)$$

Où :

- r : le rayon de bobinage (m)
- N : la vitesse de rotation (tr/min)

Nous pouvons maintenant déterminer l'expression de la vitesse de rotation en fonction du rayon de bobinage :

$$N = \frac{60}{2\pi} \frac{V_{\text{linéaire}}}{r} \quad (3.55)$$

En utilisant l'égalité (3.51):

$$N = \frac{60}{2\pi} \times \frac{0.172}{r} \quad (3.56)$$

Et donc :

$$N(r) = \frac{1.68}{r}$$

On peut exprimer le rayon de bobinage comme suit :

$$r = r_i + n \times d_f \quad (3.57)$$

Avec :

- r_i : est le rayon intérieur de la bobine (0.05 m)
- n : est le nombre de couche de filament déjà enroulées,
- d_f : est le diamètre du filament (m).

Nous devons maintenant donner un intervalle au n_{max} dont est le nombre de couche maximale pour remplir la bobine avec 1kg de filament, pour cela il est bien évidemment de déterminer la longueur du filament comme suivant :

$$L = \frac{V}{S} \quad (3.58)$$

Avec:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (3.59)$$

Alors la longueur est :

$$L = \frac{m}{S \times \rho} \quad (3.60)$$

Où :

- m : est la masse du filament dans une bobine,

- S : est la section du filament,
- ρ : est la masse volumique du PET recyclé solide.

Donc :

$$L = \frac{1}{\pi \times \frac{0.00175^2}{4} \times 1340}$$

$$L = 310.26m$$

Chaque couche de filament a une longueur égale au nombre de spires fois circonférence et la longueur totale est la somme de la longueur de chaque couche:

$$L = \sum_0^{n_{max}} l_i \quad (3.61)$$

Avec :

$$l_i = n_s \times p_i \quad (3.62)$$

Pour notre bobine, nous donnons une longueur de 59.5 mm pour avoir 34 spires.

La circonférence en fonction du nombre de couche est :

$$p_i = 2\pi r = 2\pi(r_i + n \times d_f) \quad (3.63)$$

Et donc :

$$L = \sum_0^{n_{max}} 34 \times 2\pi(r_i + n \times d_f) \quad (3.64)$$

En faisant une application numérique nous trouvons un nombre de couche maximale est de 23.

Le moteur doit stabiliser sa vitesse de rotation pour une durée de temps afin de remplir une couche complète de 34 spires, on peut estimer cette durée par :

$$t = \frac{34}{N} \quad (3.65)$$

Entre l'arbre du moteur pas à pas et la bobine nous proposons une transmission par courroie afin d'augmenter le couple et stabiliser la vitesse de rotation vu que la bobine devient remplie et nécessite un couple plus grand. Nous posons un rapport de transmission de 3.27 , et on résume les diamètres des poulies dans le tableau suivant :

Table 3. 7: Caractéristiques de la transmission entre le moteur et la bobine

Rapport de transmission	3.27
Diamètre de la poulie motrice (mm)	21.01
Diamètre de la poulie réceptrice (mm)	68.75

On opte un moteur pas à pas de type NEMA 23 ayant la référence JK57HS82-3004-3.4A et les caractéristiques suivante :

- Référence: JK57HS82-3004
- Nombre de phases: 2
- Structure: Hybrid

- Angle du pas: 1.8°
- Hauteur du moteur: 57 mm
- Couple nominal: 2.2N.m

Pour contrôler la variation de la vitesse du bobine nous devons lier le moteur pas à pas les composants suivants :

- Carte Arduino UNO :

Un bloc de contrôle programmé en langage C++ permet, à chaque fin de durée calculée pour une couche, d'incrémenter le nombre de couches enroulées, de mettre à jour le rayon actuel de la bobine, puis de recalculer la fréquence des impulsions à envoyer au driver du moteur pas à pas, assurant ainsi un ajustement dynamique de la vitesse de rotation en fonction du diamètre croissant de l'enroulement. La vitesse de rotation ainsi que la direction de rotation (dans notre cas n'est pas changeable) sont générées sous forme des signaux STEP et DIR respectivement.

- Driver (Type A4988):

Ce composant joue le rôle d'interface entre la carte de commande et le moteur. Il reçoit les signaux logiques de commande (impulsions) et les convertit en courants électriques nécessaires pour alimenter les phases du moteur. Il peut protéger le moteur de toute surchauffe en réglant le courant envoyé à la bobine.

6.2. Mécanisme guide-fil

Afin d'aider le filament à se répartir le long de la bobine, nous proposons un guide-fil mobile à travers lequel passe le filament, fixé sur un chariot pouvant se déplacer latéralement d'un côté à l'autre. Le mouvement de va-et-vient linéaire de ce chariot est obtenu grâce à la transformation d'un mouvement rotatif généré par une vis sans fin hélicoïdale. En tournant, cette vis entraîne le chariot sur lequel est monté le guide-fil, assurant ainsi une répartition régulière du filament sur toute la largeur de la bobine.

La vis aussi doit avoir la vitesse linéaire égale à la vitesse du filament, et en donnant un diamètre de 40mm à cette vis, nous pouvons calculer sa vitesse de rotation :

$$V_{linéaire} = r_v \times \frac{2\pi N_v}{60} \quad (3.66)$$

Et donc :

$$N_v = V_{linéaire} \times \frac{60}{2\pi r_v} \quad (3.67)$$

$$N_v = 0.172 \times \frac{60}{2\pi \times 0.02}$$

$$N_v = 82.123 \text{ tr/min}$$

Pour l'entraînement de cette vis sans fin on opte un autre moteur pas à pas dont ses caractéristiques sont :

- Référence : NEMA 17 Stepper Motor JK42HS48-1684
- Angle du pas: 1.8°
- Hauteur du moteur: 48 mm
- Couple nominal: 0.18N.m

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les différents éléments de notre machine, ainsi que leur dimensionnement et les exigences liées à la conception. Cela nous conduit au chapitre suivant, où nous allons passer à la réalisation de l'objectif de cette étude.

CHAPITRE 4
CONCEPTION DU MECANISME DE
RECYCLAGE

Chapitre 4: Conception du mécanisme de recyclage

1. Introduction

Ce chapitre constitue la partie principale de notre étude, puisqu'il est consacré à la réalisation du modèle numérique du mécanisme à l'aide d'un logiciel de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur). L'objectif est de matérialiser les composants étudiés dans le chapitre précédent sous forme d'un assemblage 3D, en précisant l'outil utilisé et la démarche adoptée pour passer de la conception théorique à une représentation visuelle exploitable.

2. Processus de conception

La conception et la validation d'un mécanisme suivent cinq étapes principales que l'on peut citer comme suit :

- **Modélisation 3D des pièces individuelles :** Chaque composant du mécanisme est d'abord modélisé séparément, avec ses dimensions réelles, en trois dimensions à l'aide d'un logiciel de CAO.
- **Assemblage des composants :** Une fois les pièces créées, elles sont insérées dans un fichier d'assemblage. On y définit les liaisons mécaniques (**mates**) entre les composants, ce qui permet de vérifier l'ajustement, l'encombrement et l'interaction entre les différentes parties du mécanisme.
- **Vérification du mécanisme :** À ce stade, on contrôle la cohérence des liaisons mécaniques entre les composants (rotules, glissières, pivots, etc.). Cette vérification assure que le mécanisme fonctionne comme prévu et que les mouvements sont possibles sans interférences.
- **Simulation :** L'objectif de cette étape est de s'assurer de la fiabilité de la conception en conditions réelles. À l'aide des outils de simulation intégrés dans le logiciel de CAO, il est possible d'analyser les contraintes mécaniques, les déformations, la résistance des matériaux, ainsi que les comportements thermiques ou dynamiques. Ces simulations permettent d'anticiper les défaillances potentielles et d'optimiser la conception avant la phase de fabrication.
- **Mise en plan 2D des pièces et assemblages :** Enfin, les modèles 3D sont convertis en plans 2D détaillés.

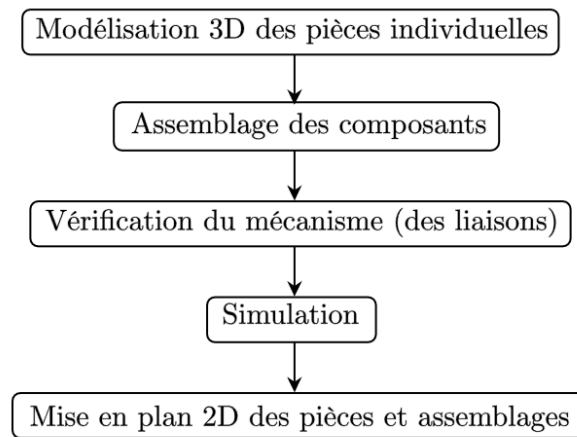


Figure 4. 1: Le processus de la conception

3. Logiciel utilisé

Dans l'industrie et en ingénierie de manière générale, il est essentiel d'utiliser un logiciel capable de concevoir aussi bien des pièces de petite taille, de quelques millimètres, que des pièces de grande dimension, pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres. La précision de ces logiciels joue également un rôle crucial, car elle permet une visualisation détaillée des pièces, facilitant ainsi la détection d'erreurs ou de sous-dimensionnements avant de lancer le processus de fabrication. Pour notre machine, nous avons utilisé le logiciel SOLIDWORKS car il offre une large gamme de fonctionnalités destinées à la modélisation, l'analyse et la documentation de systèmes mécaniques :

- Il permet la modélisation 3D paramétrique de pièces et d'assemblages, ce qui facilite la création de modèles précis et modifiables à tout moment.
- SolidWorks intègre des fonctionnalités d'assemblage mécanique, avec la possibilité de simuler les mouvements entre les pièces, détecter les collisions et vérifier l'ajustement global du système.
- Il propose aussi des modules de simulation pour analyser le comportement mécanique, thermique ou dynamique des composants, ce qui permet de valider la conception avant toute fabrication.
- Avec le module Flow Simulation, il est possible d'étudier l'écoulement de fluides et les échanges thermiques, utile notamment pour les systèmes de refroidissement ou les machines comme les extrudeuses.

4. Présentation de SolidWorks

4.1. Boîte de dialogue Bienvenu

La boîte de dialogue *Bienvenue sur SolidWorks* est la première interface qui s'affiche lors du lancement du logiciel. Cette fenêtre nous permet de créer un nouveau document (pièce, assemblage ou mise en plan), d'ouvrir un fichier existant, ou encore d'accéder à des ressources récentes (projets récemment utilisés). Elle contient également des liens utiles vers des tutoriels, des exemples, l'aide en ligne, et d'autres ressources pour faciliter la prise en main du logiciel.

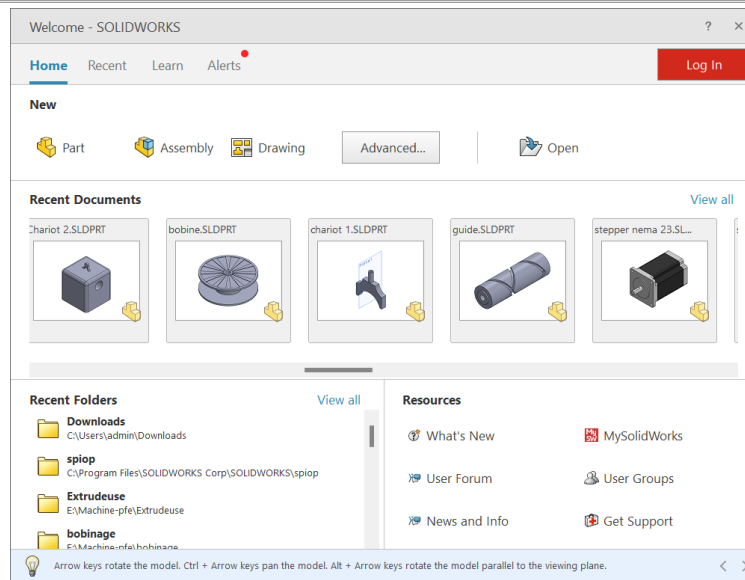


Figure 4. 2: Boîte de dialogue Bienvenue

4.2. Interface utilisateur :

SolidWorks se distingue par son interface conviviale et intuitive, ce qui le rend accessible aussi bien aux débutants qu'aux utilisateurs expérimentés.

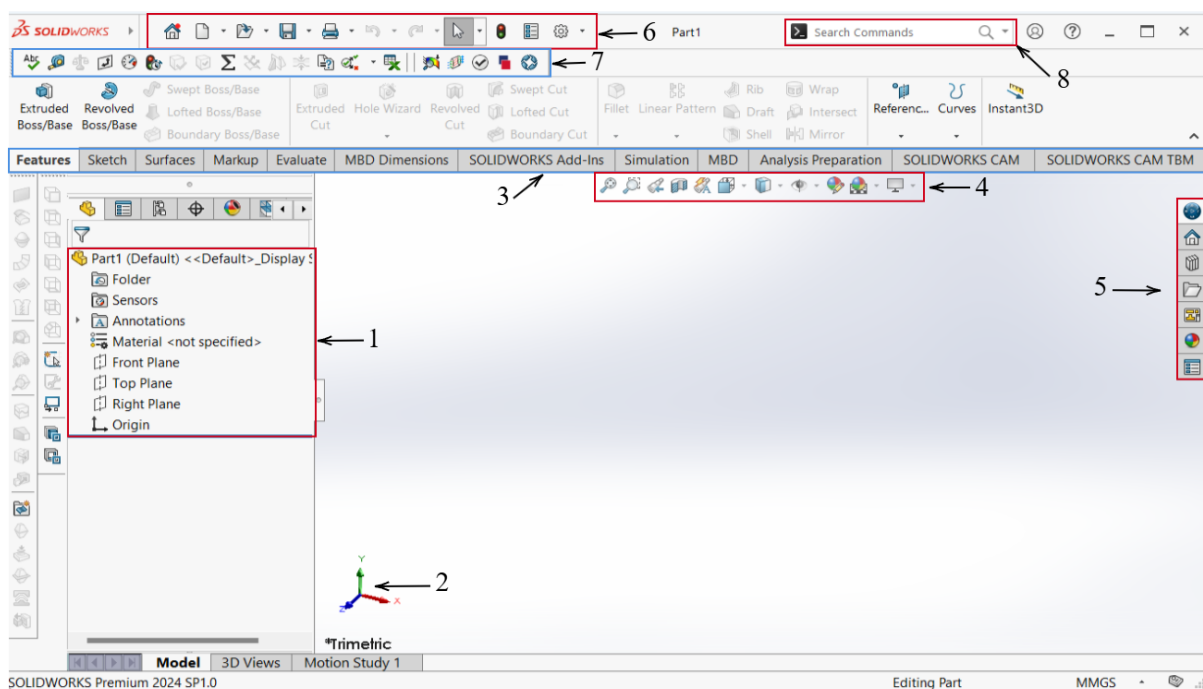


Figure 4. 3: Interface utilisateur de SOLIDWORKS

1. Arbre de création FeatureManager : L'arbre de création, situé à gauche de l'écran, affiche la liste chronologique des opérations réalisées sur une pièce ou un assemblage. Il permet de visualiser la structure du modèle (sketchs, fonctions, corps...), modifier une fonction ou une esquisse en double-cliquant dessus et supprimer ou réordonner des étapes.
2. Trièdre de référence : Le trièdre de référence est un repère 3D affiché dans la zone graphique, généralement en bas à gauche. Il indique les directions des axes X, Y et Z. Cet outil aide à

comprendre l'orientation du modèle dans l'espace. Il est particulièrement utile lors de la création de pièces symétriques ou pour positionner des éléments par rapport à un axe ou un plan spécifique.

3. Onglets du gestionnaire de commande: Les onglets du gestionnaire de commandes se trouvent en haut de la fenêtre de SolidWorks. Ils regroupent les outils par catégories fonctionnelles, comme (Esquisse), (Fonctions), (Assemblage), ou encore (Évaluation). Chaque onglet donne accès à des commandes spécifiques adaptées à l'étape de conception en cours. Par exemple, l'onglet "Esquisse" contient les outils pour dessiner des formes 2D, tandis que l'onglet "Fonctions" permet d'extruder ou de percer des volumes.
4. Barre d'outils (Affichage de type visée haute) : La barre d'outils d'affichage, souvent appelée (visée haute), permet de manipuler la visualisation du modèle. Elle contient les options pour faire pivoter, zoomer, afficher des coupes, ou changer le mode de rendu (ombré, filaire, avec arêtes visibles, etc.).
5. Volet des tâches : Le volet des tâches se situe à droite de l'interface. Il donne accès à plusieurs ressources comme la bibliothèque de composants (Design Library), les apparences et matériaux, la Toolbox (éléments normalisés comme vis, écrous), ainsi que des liens vers l'aide en ligne et les ressources SolidWorks
6. Menus déroulants de la barre de menu : En haut de l'écran, on trouve la barre de menu contenant les menus déroulants classiques : (Fichier), (Édition), (Insertion), (Outils), (Affichage), etc. Ces menus offrent un accès complet à toutes les fonctionnalités de SolidWorks, y compris les options d'enregistrement, d'import/export de fichiers, d'activation de modules, ou encore les paramètres de configuration du logiciel.
7. Barre d'outils : En plus des onglets de commandes, SolidWorks propose des barres d'outils que l'on peut personnaliser selon ses besoins. Elles permettent d'accéder rapidement aux fonctions les plus couramment utilisées, comme les cotations, les fonctions d'esquisse ou les vues. L'utilisateur peut ajouter, déplacer ou supprimer des icônes pour adapter l'interface à son mode de travail, ce qui améliore la productivité.
8. Recherche SOLIDWORKS : L'outil de recherche intégré, situé en haut à droite, permet de retrouver rapidement une commande, une fonction ou un fichier sans devoir parcourir manuellement les menus. Cet outil propose même un guidage visuel pour montrer où se trouve la commande recherchée dans l'interface.

4.3. Modélisation des pièces et d'assemblage

- Modélisation des pièces :

SolidWorks est un outil de modélisation de pièces qui permet de créer un nouveau fichier de type "Part", servant de base à la réalisation d'un composant en trois dimensions. L'utilisateur choisit ensuite un plan de travail pour tracer la forme 2D de la pièce à l'aide d'éléments géométriques simples comme des lignes, des cercles ou des rectangles. Une fois la forme dessinée, elle est cotée et contrainte afin de définir précisément ses dimensions et sa géométrie. La forme est ensuite transformée en volume grâce à une fonction 3D, et des détails supplémentaires tels que des chanfreins, perçages, découpes ou arrondis peuvent être ajoutés pour compléter la pièce. Une fois la géométrie finalisée, un matériau est appliqué à la pièce pour permettre des calculs de masse ou de résistance, tout en lui donnant un aspect réaliste. La pièce

est ensuite enregistrée au format .SLDPRT, ce qui permet de l'utiliser dans les étapes suivantes, comme l'assemblage ou la mise en plan.

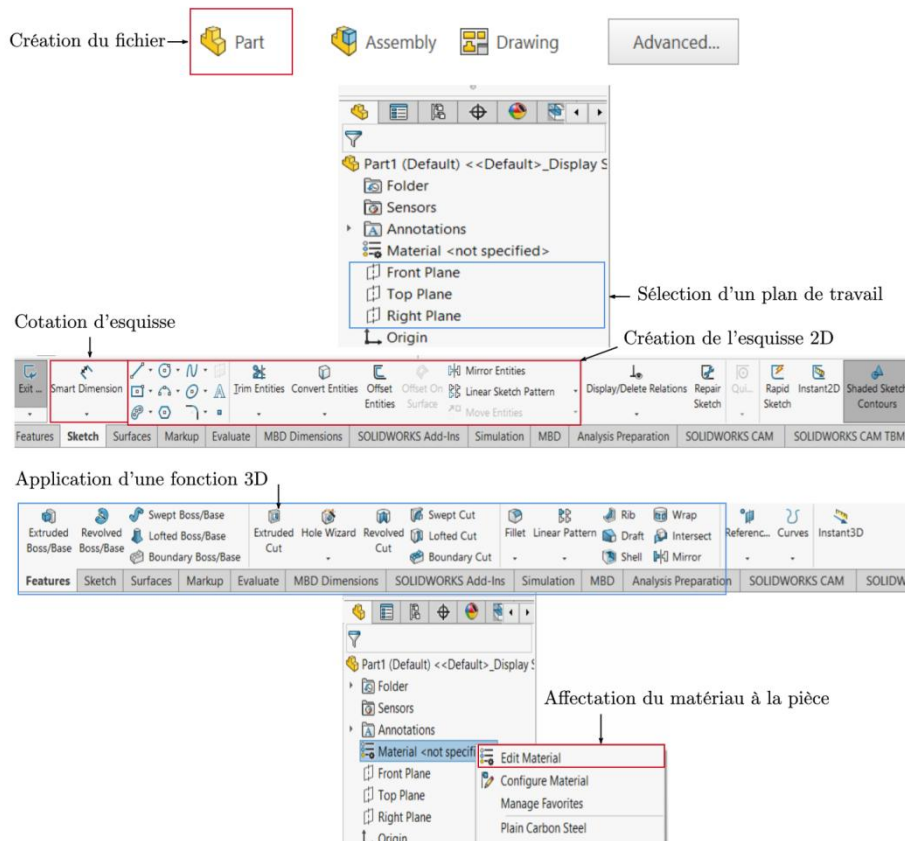


Figure 4. 4: Les étapes de modélisation des pièces

- Modélisation des assemblages :

Le processus commence par la création d'un nouveau fichier de type "Assembly" (.SLDASM) dans lequel on insère différentes pièces préalablement modélisées (.SLDPRT). La première pièce insérée est généralement fixée comme référence dans l'espace, tandis que les autres sont positionnées à l'aide de liaisons mécaniques, appelées "mates" (coïncidence, concentricité, distance, parallélisme). Ces liaisons permettent de définir les degrés de liberté et d'assurer un positionnement précis entre les composants. Une fois l'assemblage défini, il est possible de vérifier la mobilité du mécanisme, de détecter les interférences ou collisions et de garantir un ajustement géométrique correct. L'assemblage peut ensuite être enregistré, analysé, ou utilisé pour générer une mise en plan complète incluant la nomenclature, les vues éclatées et les scénarios d'explosion.

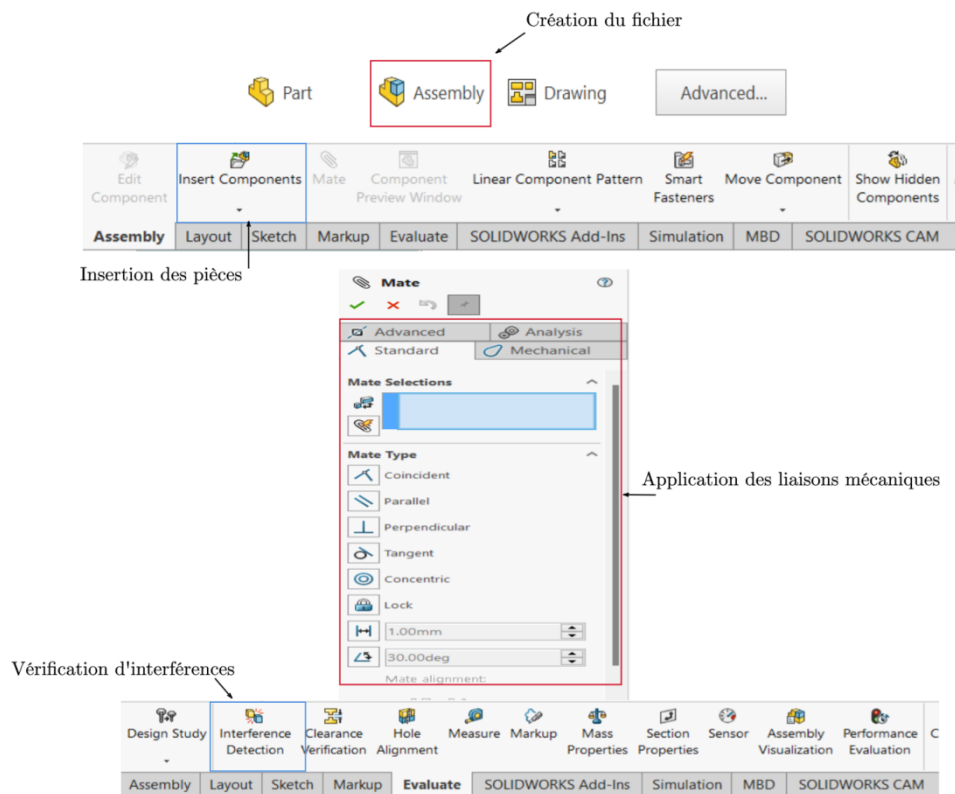


Figure 4. 5:Modélisation des assemblages

- Mise en plan :

La mise en plan est une étape essentielle qui permet de générer un document technique 2D à partir du modèle 3D d'une pièce ou d'un assemblage. Dans SolidWorks, cette opération se fait en créant un nouveau fichier de type "Drawing" (.SLDDRW). L'utilisateur y insère différentes vues projetées du modèle (vue de face, de dessus, de droite, isométrique, etc.), puis ajoute les cotes, tolérances, symboles normalisés, et autres annotations techniques nécessaires à la fabrication. Il est également possible d'ajouter une nomenclature automatique dans le cas d'un assemblage, ainsi que des vues éclatées pour faciliter le montage. La mise en plan peut ensuite être imprimée ou exportée aux formats standards tels que PDF ou DWG/DXF, selon les besoins de l'atelier ou du bureau d'étude.

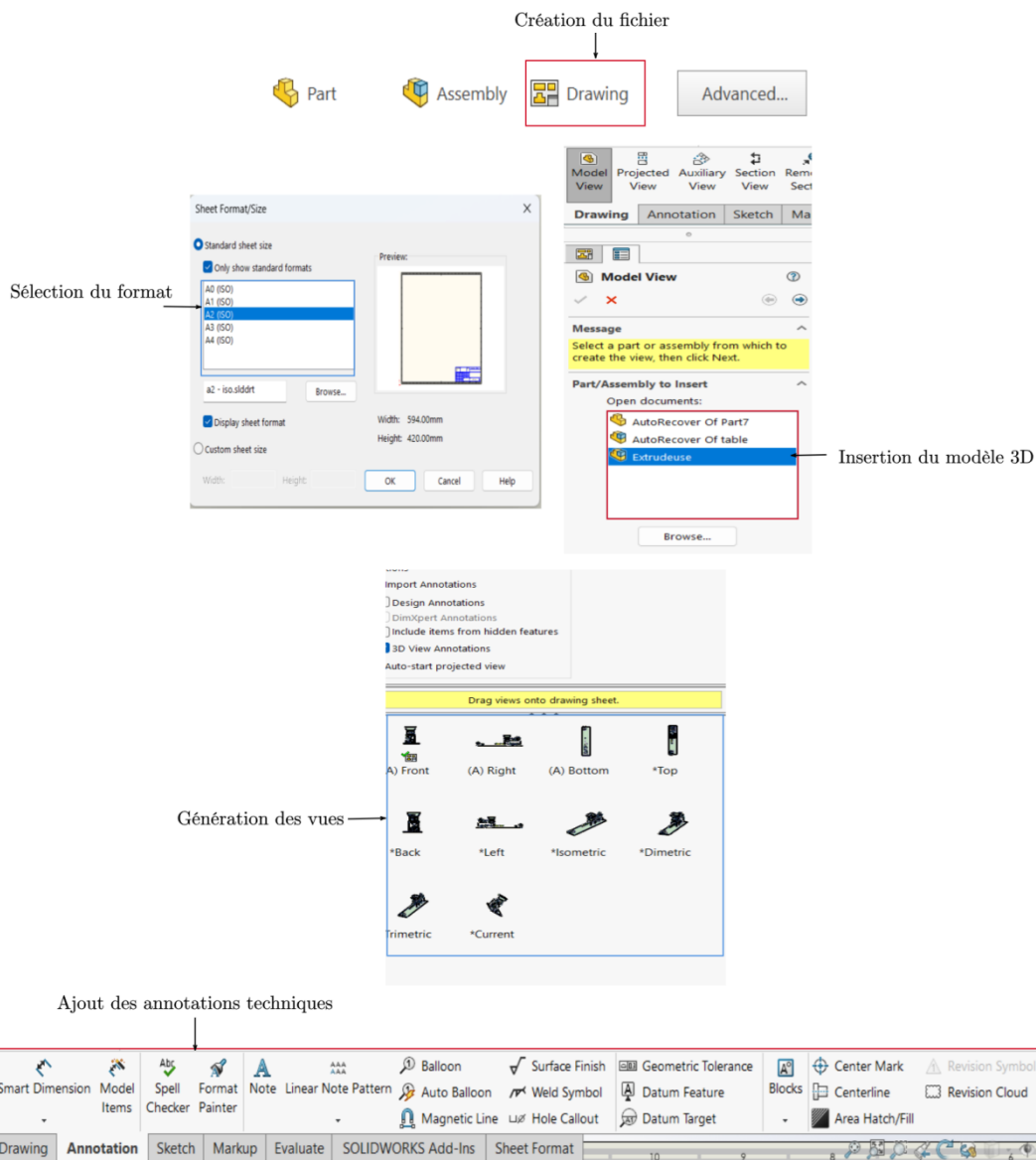


Figure 4. 6: Mise en plan sur SOLIDWORKS

5. La conception du mécanisme

Notre machine est composée de trois modules principaux : le broyeur, l'extrudeuse et la bobineuse. Afin de faciliter la conception et l'organisation du travail, nous avons débuté en dessinant et en assemblant chaque partie séparément. Nous avons pu vérifier de manière individuelle la géométrie, la position des éléments internes, ainsi que le bon fonctionnement de chaque sous-système.

Une fois les trois assemblages partiels terminés (broyeur, extrudeuse, bobineuse), nous avons procédé à leur intégration dans un assemblage global, représentant la machine complète. Cette étape nous a permis d'ajuster les interfaces entre les modules, de vérifier l'encombrement total, les liaisons mécaniques, et d'assurer la cohérence du système dans son ensemble.

5.1. Conception du broyeur

1. Assemblage final :

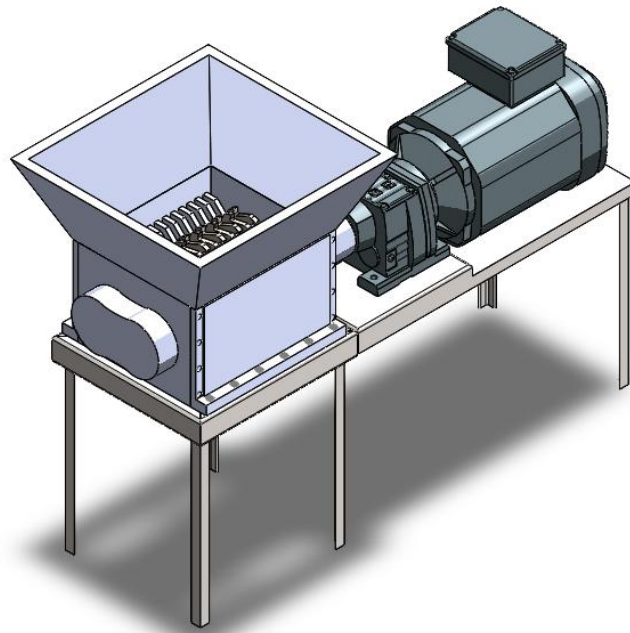


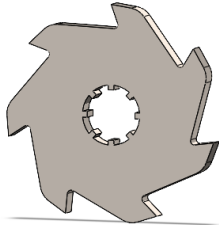
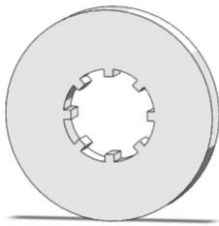
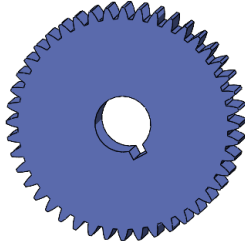
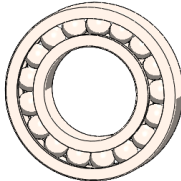
Figure 4. 7: Assemblage du broyeur

2. Modélisation des différents éléments du broyeur :

➤ La conception des organes :

La première étape de la modélisation du broyeur consiste en la conception des différents organes du broyeur, en se basant sur les dimensions déterminées et présentées dans le chapitre 3. Dans ce qui suit, nous présentons quelques pièces principales du broyeur.

Table 4. 1: Les différents organes du broyeur

Composant	Représentation 3D	Dimension
Lame		Diamètre extérieure: 110mm Diamètre de perçage: 30mm Epaisseur: 9mm
Entre-lame		Diamètre extérieur: 68mm Diamètre de perçage : 30mm Epaisseur: 9mm
Arbre porte-lames		Longueur active: 279mm Diamètre: 30mm
Engrenage		Diamètre primitif : 90mm Diamètre d'alésage : 22mm Nombre de dents : 36
Roulement		Référence :6405 Diamètre d'alésage :25mm

➤ Assemblage des deux arbres portant les lames :

Les deux arbres portent 31 éléments, composés de lames et d'entretoises (entre-lames). Lors de leur assemblage, il est essentiel de respecter le sens de rotation de l'arbre. La face coupante de chaque lame doit être orientée de manière à entrer en contact avec la matière dans le sens de la rotation, afin d'assurer un cisaillement efficace.

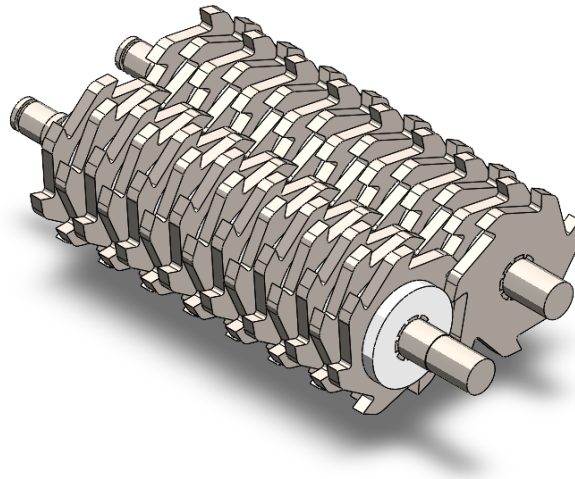


Figure 4. 8: Assemblages des deux arbre porte lames

➤ Insertion de la carcasse :

L'étape suivante consiste à ajouter la carcasse du corps du broyeur, ainsi que les roulements et les contre-lames, qui sont fixés sur les deux parois internes de la carcasse. Les roulements sont positionnés à chaque extrémité de l'arbre porte-lames, dans des logements usinés sur les parois latérales internes de la carcasse du broyeur. Leur rôle est de maintenir l'alignement de l'arbre, tout en permettant sa rotation fluide et stable sous l'effet du couple moteur.

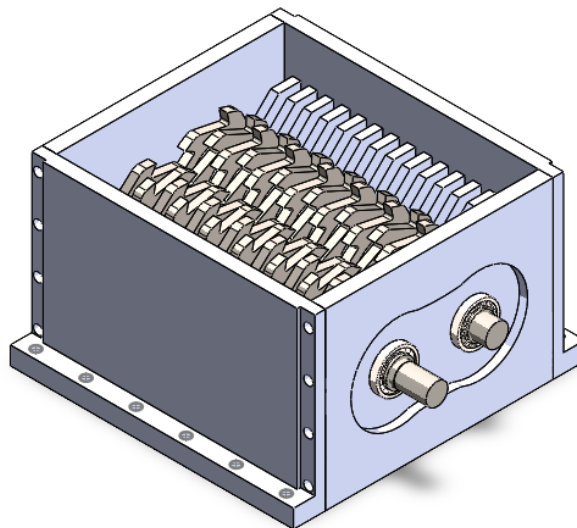


Figure 4. 9: Assemblage de la carcasse, des roulements et des contre-lames

➤ Raccordement du moteur :

La dernière étape de l'assemblage du moteur consiste au raccordement du moteur à l'arbre porte-lames, à l'aide d'un accouplement mécanique.

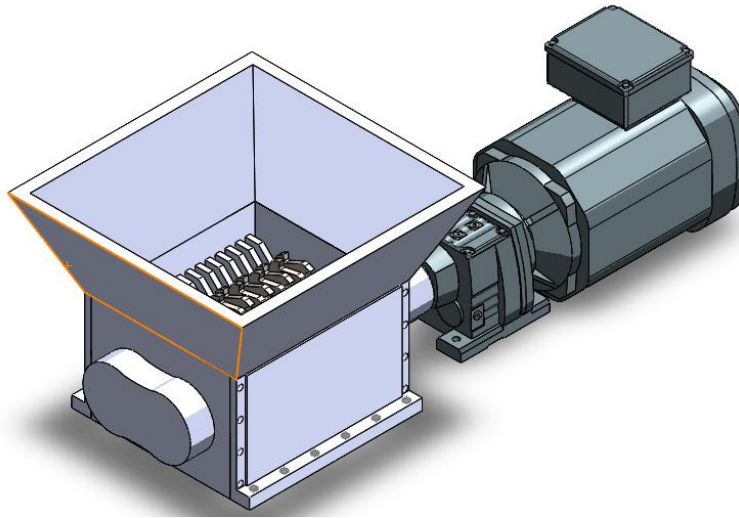


Figure 4. 10: Raccordement du moteur

5.2. La conception de l'extrudeuse

1. Assemblage final :

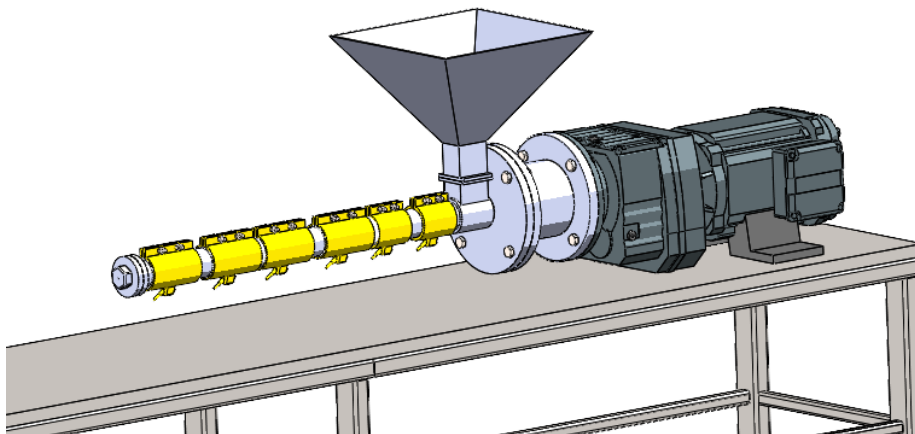


Figure 4. 11 : Assemblage finale de l'extrudeuse

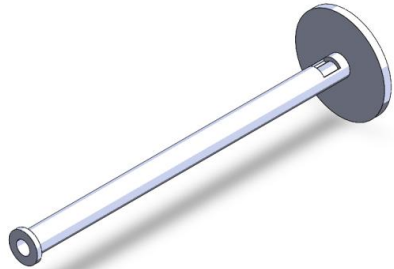
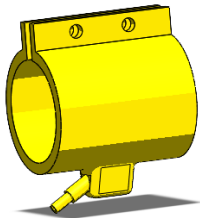
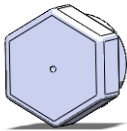
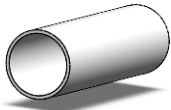
2. Modélisation des différents éléments de l'extrudeuse :

➤ La conception des éléments constitutifs de l'extrudeuse :

Nous présentons dans le tableau suivant les différents éléments constitutifs de notre extrudeuse :

Table 4. 2: Les éléments constitutifs de l'extrudeuse

Composant	Représentation 3D	Dimension
-----------	-------------------	-----------

Vis d'extrusion		Diamètre extérieure: 30mm Longueur active: 790mm
Fourreau		Diamètre extérieur: 45mm Diamètre de perçage : 33mm
Collier chauffant		Puissance: 65W
Buse		Diamètre : 1.75mm
Cylindre en Aluminium		Diamètre de perçage: 45 mm Epaisseur : 5mm

➤ Raccordement de la vis avec le moteur :

La première étape consiste à monter la vis en la raccordant au moteur à l'aide d'un accouplement rigide.

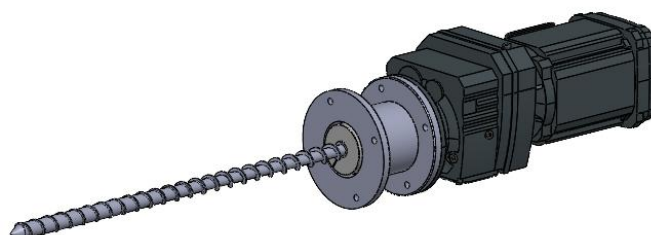


Figure 4. 12: Raccordement de la vis au moteur

- Montage du fourreau et installation des colliers chauffants :

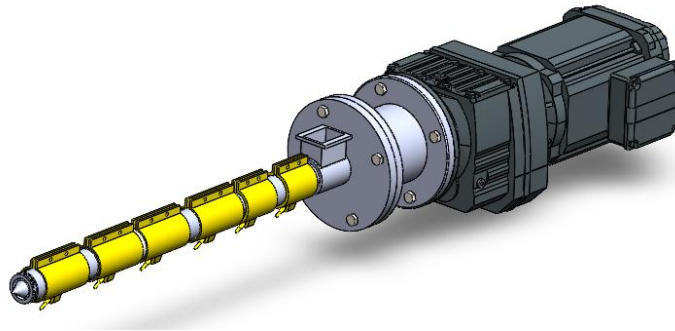


Table 4. 3: Montage du fourreau et installation des colliers chauffants

- Montage de la buse et la trémie :

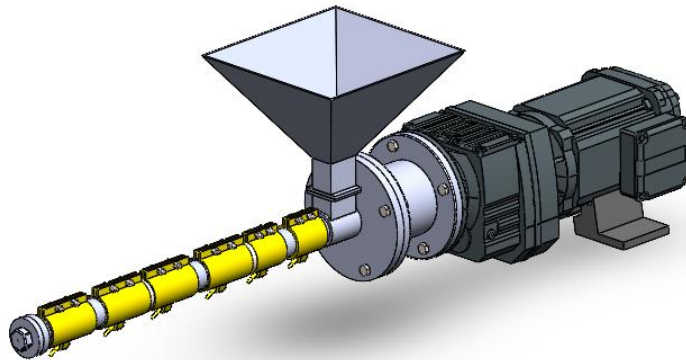


Table 4. 4: Montage de la buse et la trémie

5.3. La conception de la bobineuse

1. Assemblage finale :

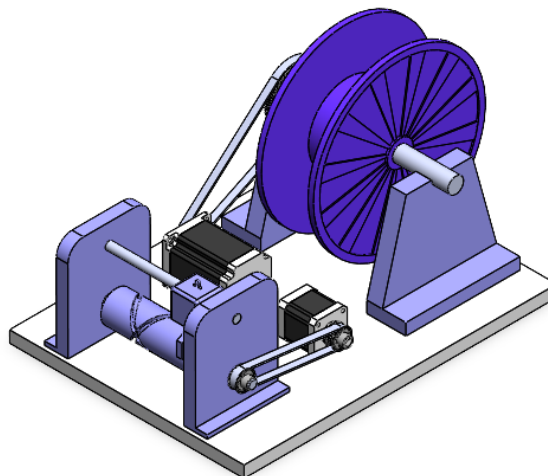


Figure 4. 13: Assemblage finale de la bobineuse

5.4. La conception du mécanisme

En assemblant les trois parties, nous obtenons le modèle complet représenté dans la figure suivante. Pour assurer le refroidissement du filament, on opte pour un refroidissement à air en plaçant des ventilateurs répartis le long de la distance entre la sortie de la buse et le système de bobinage. Aussi, pour le guidage entre l'extrudeuse et la bobine, des poulies sont utilisées afin d'orienter et de maintenir le filament sur un trajet contrôlé, prévenant ainsi tout risque de frottement ou de contact avec le socle de la machine.

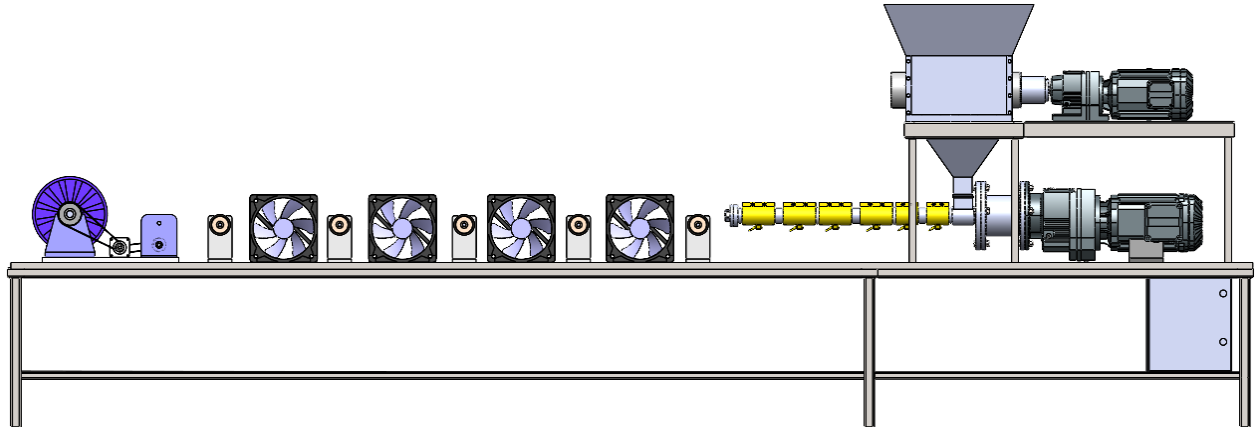


Figure 4. 14: Assemblage du mecanisme finale

6. Simulation du fonctionnement mécanique

La simulation du fonctionnement de n'importe quel mécanisme est une modélisation numérique qui permet de prévoir le comportement de ce dernier lors de son utilisation. Cet outil est crucial dans tous les secteurs industriels, car il permet d'éviter les erreurs ou les sous-dimensionnements liés au système, avant même l'étape de fabrication. Les types de simulations sont nombreux : elles peuvent être mécaniques, thermiques, fluidiques, etc.

La modélisation numérique repose sur le principe des éléments finis et ou des volumes finis. La pièce ou le système à étudier est alors divisé en petits éléments triangulaires, quadratiques ou de différentes formes, appelés mailles. Une modélisation numérique suit une démarche bien précise pour obtenir les résultats souhaités. Le processus commence par la création du modèle géométrique, suivi du maillage, de la définition des conditions aux limites, puis du lancement du calcul. On résume les étapes de la modélisation numérique comme suit :

- Création de la géométrie : Elle constitue la première étape du processus de simulation, au cours de laquelle on modélise soit la pièce ou le mécanisme, si l'on souhaite étudier son comportement mécanique (comme la distribution des contraintes, les déformations, etc.), soit le domaine occupé par le fluide, dans le cas d'une simulation thermique ou d'écoulement.
- Le maillage : Il consiste à diviser la géométrie modélisée en un grand nombre de petits éléments simples appelés mailles (ou éléments finis). Ces éléments peuvent être de forme triangulaire, quadrilatérale, tétraédrique, hexaédrique, etc., selon le type de géométrie et la méthode utilisée.
- Définition des conditions aux limites : Elles permettent de définir comment la pièce ou le domaine interagit avec son environnement extérieur. Autrement dit, ce sont les contraintes

physiques ou mécaniques appliquées à certaines zones de la géométrie (forces, températures, fixations, débits, etc.).

- Lancement du calcul et analyse des résultats : La dernière étape consiste à exécuter la simulation, puis à analyser les résultats afin de vérifier que les conditions de travail de la pièce sont conformes à son domaine d'utilisation et qu'elle peut fonctionner en toute sécurité.

Dans notre étude, nous cherchons à analyser le comportement mécanique de la vis, car elle est soumise au couple transmis par le moteur.

6.1. Simulation de la sollicitation en torsion de la vis

La vis est soumise au couple transmis par le moteur, qui assure sa rotation et pousse le plastique le long du fourreau jusqu'à la buse. Cette action génère des contraintes de torsion dans la vis. Afin de garantir que celle-ci fonctionne en toute sécurité, il est nécessaire de modéliser numériquement son comportement mécanique, pour s'assurer que la contrainte maximale reste inférieure à la limite admissible en torsion, et que la déformation reste dans des limites acceptables.

1. Création de la géométrie :



Figure 4. 15: Création de la géométrie de la vis

On résume les paramètres volumétriques et les propriétés du matériau dans la table suivante :

Table 4. 5: Paramètres volumétriques de la vis

Paramètres volumétriques	Propriétés du matériau
Masse volumique: 7800 kg/m^3 Volume : 324081.35 cm^3 Masse : 2.52kg	Référence: 34CrAlNi7 Limite élastique: 680MPa Limite à la traction: 900 MPa

2. Maillage :

Pour obtenir des résultats plus précis, on choisit un maillage plus fin, notamment dans les zones critiques de la pièce.

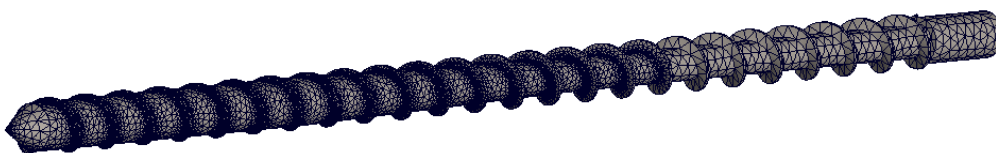


Figure 4. 16: Le maillage de la vis

3. Condition aux limites :

La vis est fixée à son extrémité par l'accouplement et libre à l'autre extrémité.

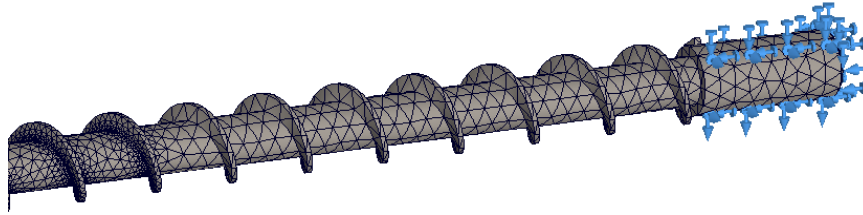


Figure 4. 17: Conditions aux limites aux déplacements

Maintenant, nous appliquons le couple calculé dans le chapitre précédent $T_{max} = 375.15 \text{ Nm}$:

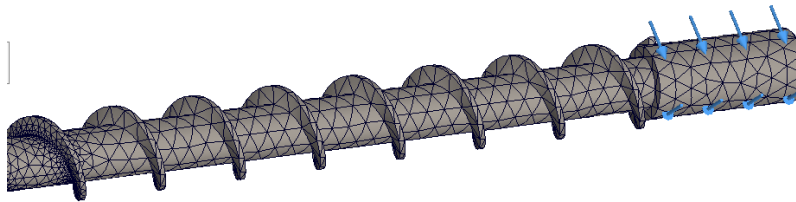


Figure 4. 18: Condition aux limites d'effort

4. Résultats et interprétation :

En exécutant la simulation, nous obtenons la distribution de la contrainte équivalente de Von Mises, ainsi que le déplacement et la déformation correspondants, comme présenté ci-dessous :

- La contrainte équivalente :

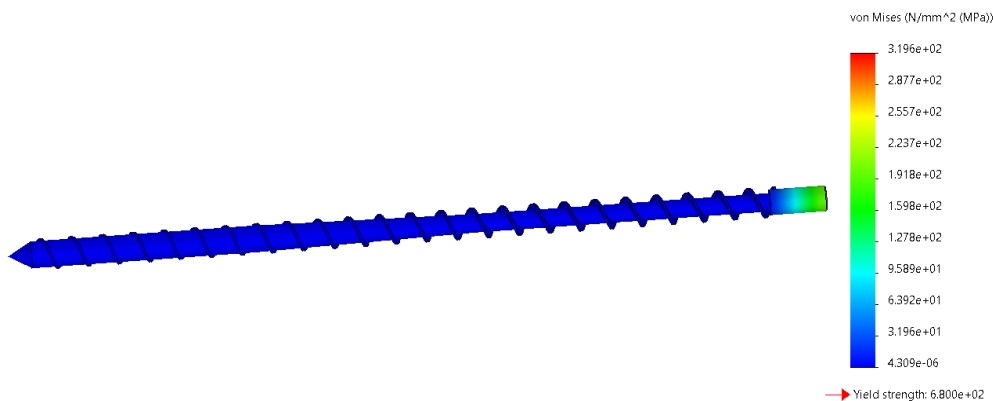


Figure 4. 19: La contrainte équivalente de Von-Mises

- Le déplacement équivalent :

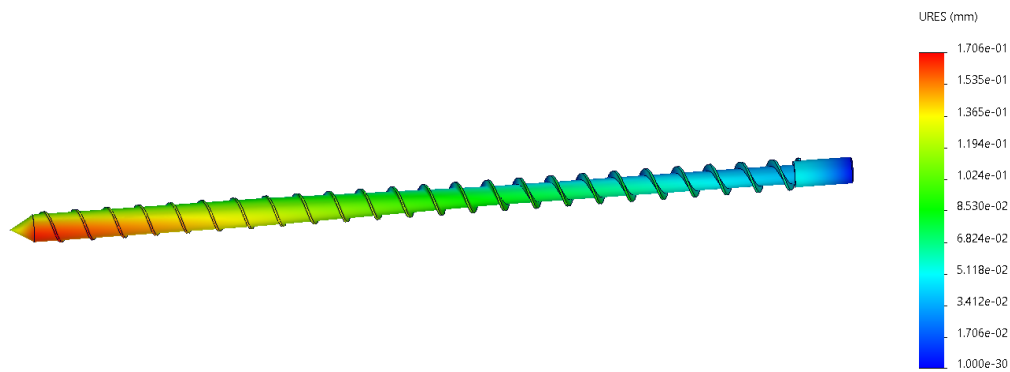


Figure 4. 20: Le déplacement équivalent

- La déformation équivalente :

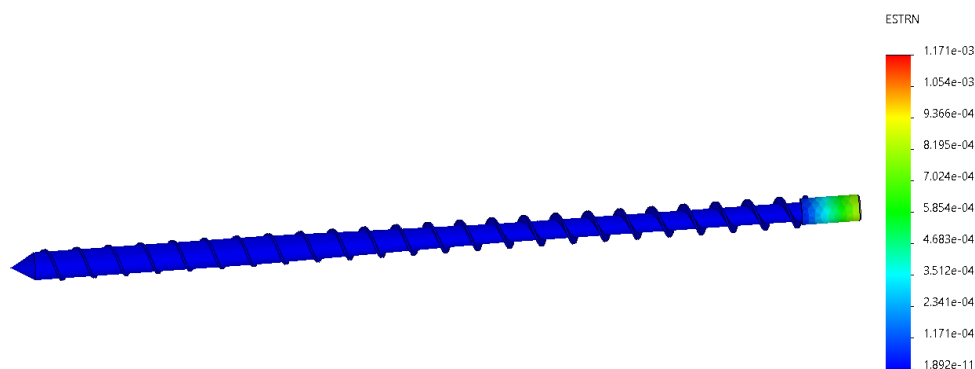


Figure 4. 21: La déformation équivalente

La contrainte de Von Mises maximale (319 MPa) reste largement inférieure à la limite élastique du matériau (680 MPa), ce qui indique un coefficient de sécurité d'environ 2,13. Ce résultat est satisfaisant pour garantir la tenue mécanique en service, la vis restant en régime élastique. Un coefficient supérieur à 2 est généralement recommandé pour les vis d'extrusion, compte tenu des incertitudes liées aux charges, aux températures élevées et aux effets d'usure. Il n'y a donc pas de risque de déformation plastique, et la pièce est mécaniquement bien dimensionnée.

Le déplacement maximal obtenu est de 0,17 mm pour une longueur totale de 790 mm, soit une flèche relative de 0,013 %, ce qui traduit une bonne rigidité de la pièce. Ce faible déplacement est cohérent avec la contrainte équivalente de Von Mises observée, confirmant ainsi la validité du résultat obtenu pour la déformation équivalente.

6.2. Simulation de la sollicitation de l'arbre du broyeur

L'arbre du broyeur est soumis à la fois à des contraintes de torsion et de flexion. Il est donc nécessaire de réaliser une simulation des efforts appliqués afin de confirmer son bon fonctionnement en toute sécurité.

1. Création de la géométrie :

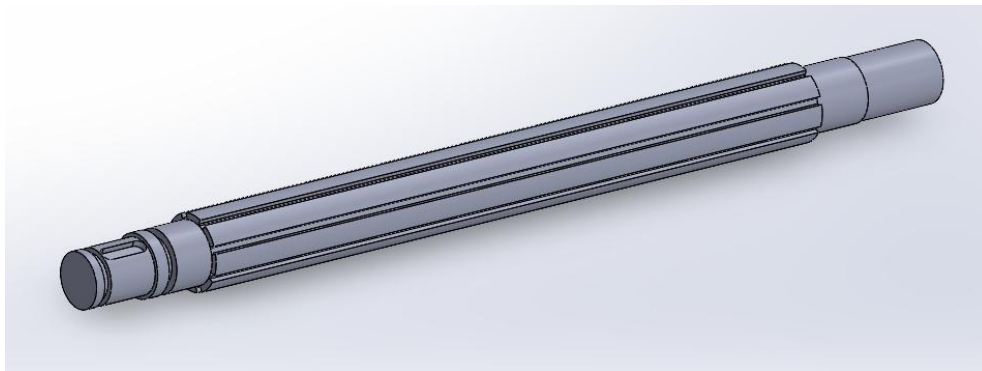


Figure 4. 22: La géométrie de l'arbre

Paramètres volumétriques	Propriétés du matériau
Masse volumique: 7800 kg/m^3 Volume : 233007.12 cm^3 Masse : 1.817kg	Référence: 42CrMo4 Limite élastique: 750MPa Limite à la traction: 900 MPa

Figure 4. 23: Les paramètres volumétriques de l'arbre

2. Maillage :

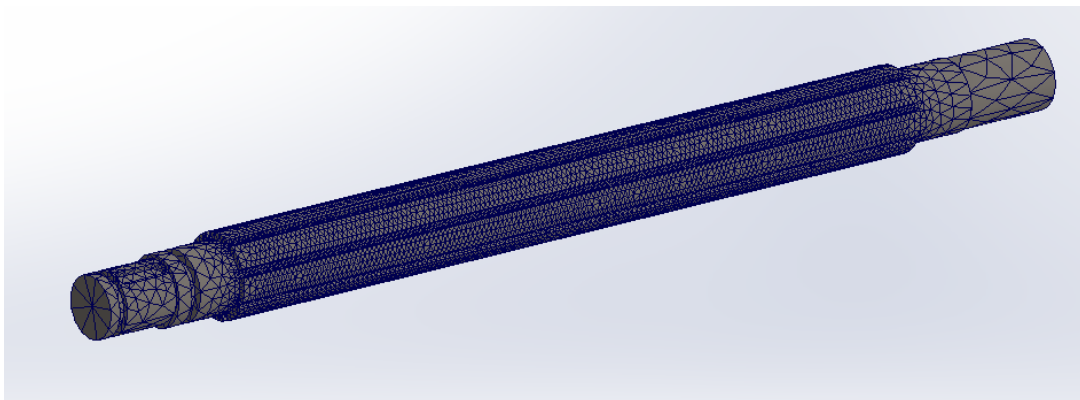


Figure 4. 24: Maillage de l'arbre

3. Conditions aux limites :

L'arbre est fixé à l'aide de roulements aux deux extrémités et est soumis au couple transmis par le moteur ainsi qu'aux forces de coupe appliquées par les lames.

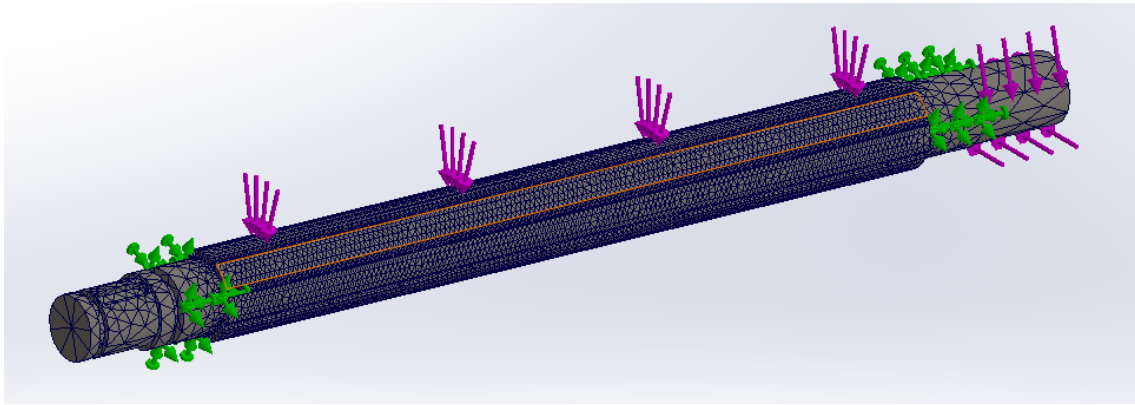


Figure 4. 25: Application des conditions aux limites

4. Résultats et interprétations :

En exécutant la simulation, nous obtenons les résultats suivants :

- La contrainte de Von-Mises équivalente :

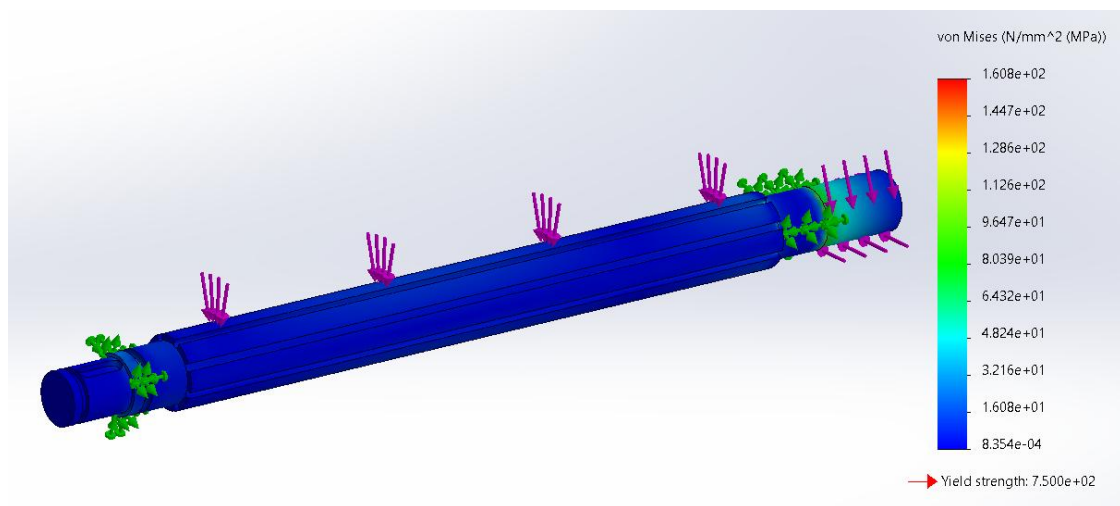


Figure 4. 26: La contrainte de Von-Mises équivalente

- Le déplacement équivalent :

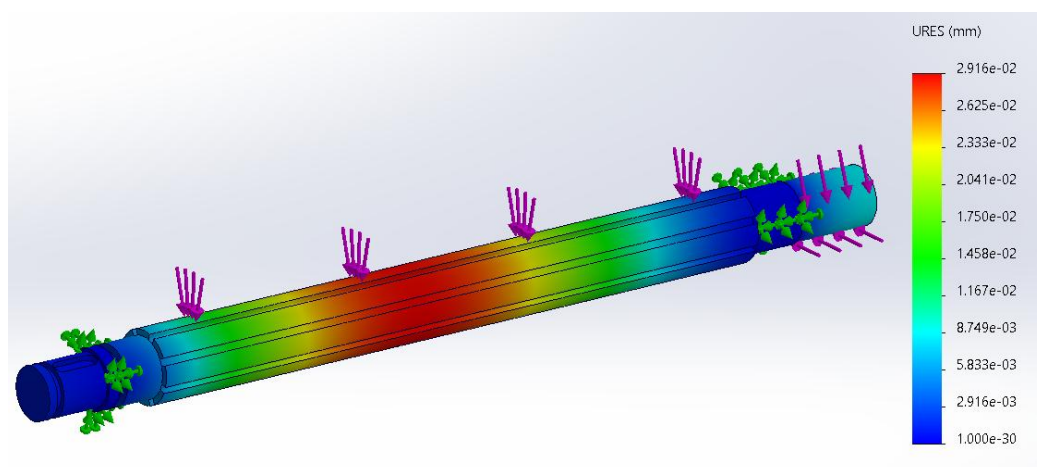


Figure 4. 27: Le déplacement equivalent

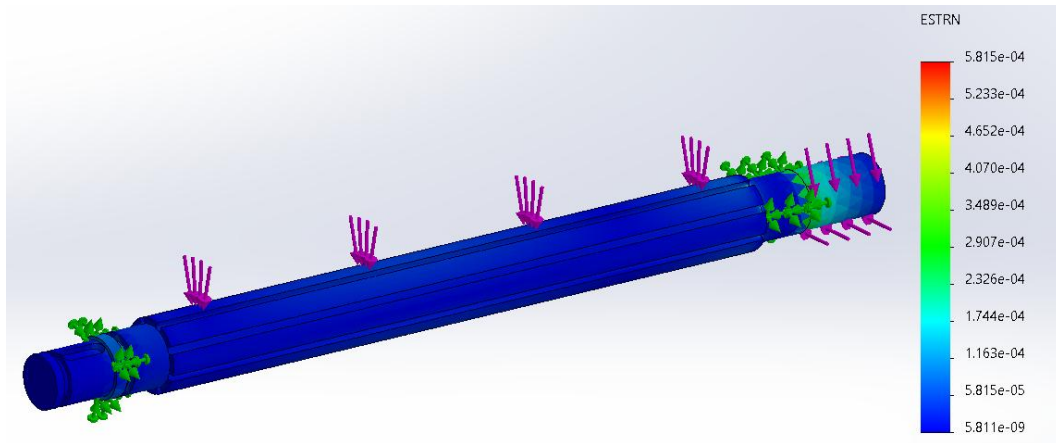


Figure 4. 28: La déformation équivalente

Les résultats obtenus nous permettent d'affirmer que l'arbre fonctionne en toute sécurité, puisque la contrainte maximale est de 160.8 MPa, bien inférieure à la limite élastique de 750 MPa. De plus, le déplacement reste faible (0,029 mm), ce qui confirme le bon choix du diamètre.

6.3. Simulation de la sollicitation de l'arbre et lames du broyeur

L'objectif est désormais de simuler le comportement global de l'arbre et des lames, considérés comme un ensemble, afin d'analyser leur interaction sous les efforts appliqués.

1. Création de la géométrie :



Figure 4. 29: Assemblage de l'arbre et les lames

2. Maillage :

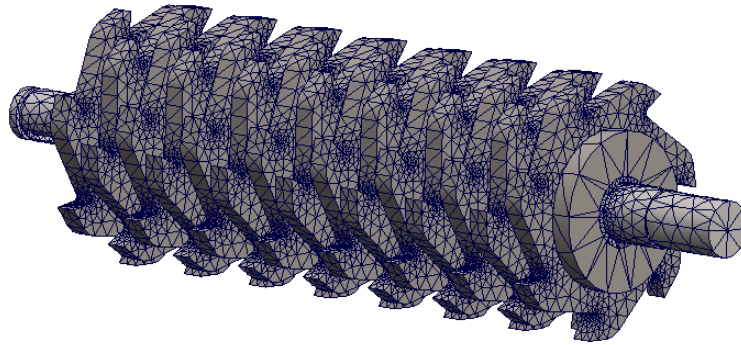


Figure 4. 30: Maillage de l'assemblage

3. Conditions aux limites :

Les forces de coupe sont appliquées sur les lames, ainsi que le couple transmis par le moteur. L'arbre est fixé au niveau des roulements, et le degré de liberté entre l'arbre et les lames est également pris en compte dans la simulation.

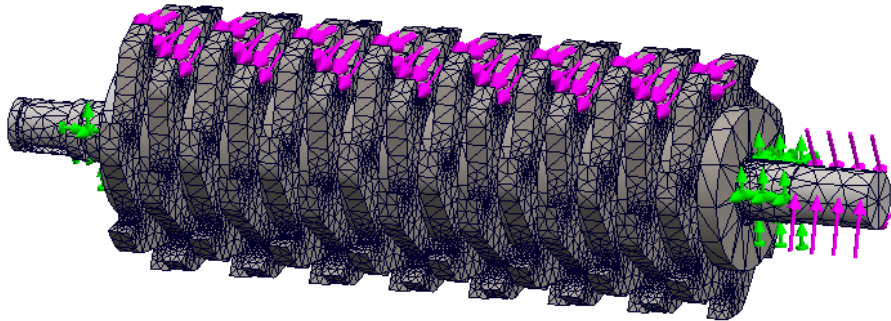


Figure 4. 31: Application des conditions aux limites à l'assemblage

4. Résultats et interprétation :

- La contrainte équivalente de Von-Mises :

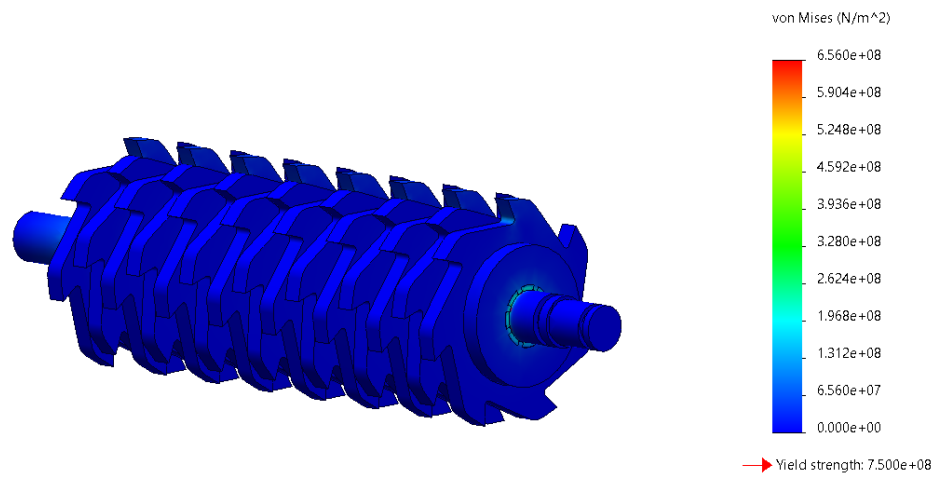


Figure 4. 32:La contrainte equivalente de Von-Mises

- Le déplacement équivalent :

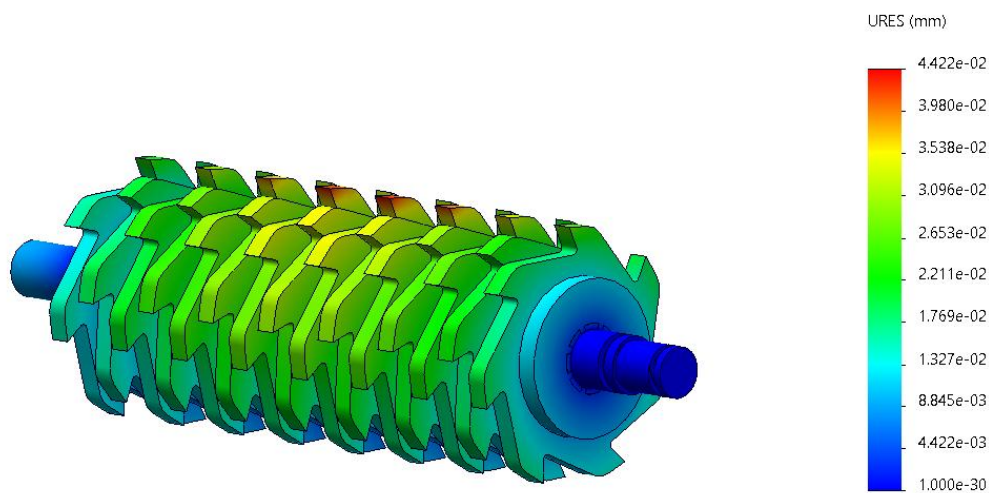


Figure 4. 33:Le déplacement équivalent

- La déformation équivalente :

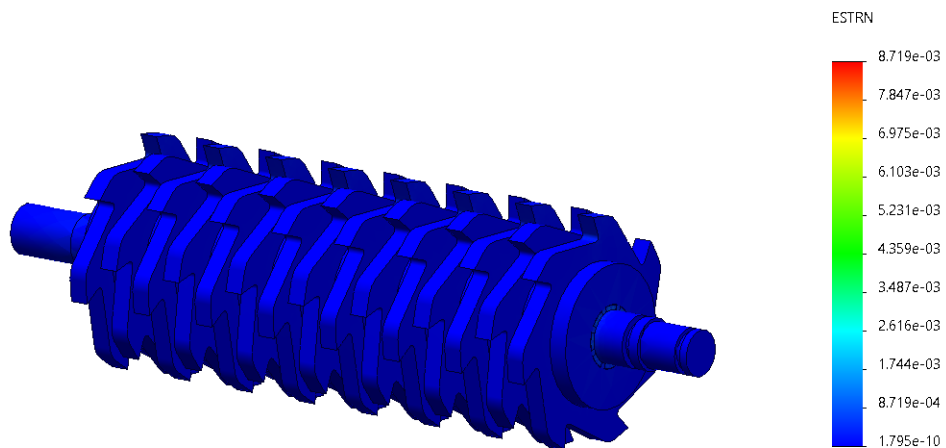


Figure 4. 34:La déformation équivalente

La contrainte de Von Mises maximale est localisée dans la zone de liaison entre les lames et l'arbre, ce qui indique une concentration des efforts mécaniques dans cette région. Cela s'explique par la transmission directe des forces de coupe et du couple moteur. Le faible déplacement observé garantit le bon fonctionnement de l'ensemble arbre-lames.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé les pièces de notre machine ainsi que l'assemblage final. Nous avons également simulé le comportement mécanique de notre vis et l'arbre du broyeur lors de ses fonctionnements, ce qui nous permet de vérifier qu'elles fonctionnent en toute sécurité.

CONCLUSION GENERALE

En conclusion, notre projet a porté sur une étude et conception d'un mécanisme qui permet de transformer les bouteilles en plastique en filament destiné pour l'impression 3D. Ce mécanisme contient trois parties essentielles pour atteindre notre objectif : commençant par le broyage des bouteilles, ensuite la fusion et la mise en forme des filaments, et enfin la partie de l'enroulement où le filament peut être stocké dans une bobine.

En premier lieu, nous avons présenté des généralités sur l'un des matériaux les plus utilisés dans le monde : le plastique. Nous avons également abordé l'intérêt du recyclage ainsi que ses différentes méthodes, ce qui nous a permis de mieux comprendre et analyser la matière sur laquelle nous allions travailler. Ensuite, nous avons étudié les principes de base du processus de transformation, qui permet de convertir le plastique en un produit semi-fini.

Dans un second temps, nous avons procédé au dimensionnement des éléments constituant de notre mécanisme, en tenant compte de nos besoins et exigences. Cette étape nous a permis de mettre en pratique les connaissances théoriques acquises tout au long de notre formation en ingénierie.

Une fois le dimensionnement achevé, nous sommes passés à la phase de conception assistée par ordinateur, qui constitue une partie essentielle de notre projet. À l'aide du logiciel SOLIDWORKS, nous avons modélisé toutes les pièces étudiées précédemment, ce qui nous a permis de concevoir l'assemblage complet du mécanisme.

Enfin, une modélisation numérique a été adoptée afin de simuler le comportement mécanique de la vis et du broyeur lors de ses fonctionnements, dans le but de garantir la sécurité et la fiabilité de l'ensemble du dispositif.

Ce travail démontre la faisabilité de réaliser, à partir de plastique recyclé, des filaments pouvant être utilisés dans un domaine vaste qu'est l'impression 3D, dans lequel de nombreux matériaux sont utilisés, notamment les polymères avancés de hautes performances employés en aéronautique, ainsi que la céramique, qui représente un enjeu majeur pour les chercheurs ces dernières années.

Afin de l'évolution de ce projet, on cite quelques perspectives qui permettent d'optimiser notre mécanisme, notamment l'intégration de capteurs laser de diamètre de filament pour minimiser l'intervalle de tolérance, l'étude de l'adaptation de ce système à d'autres plastiques autres que les PET, et l'utilisation de matériaux isolants thermiques le long du fourreau, qui peuvent empêcher les pertes thermiques.

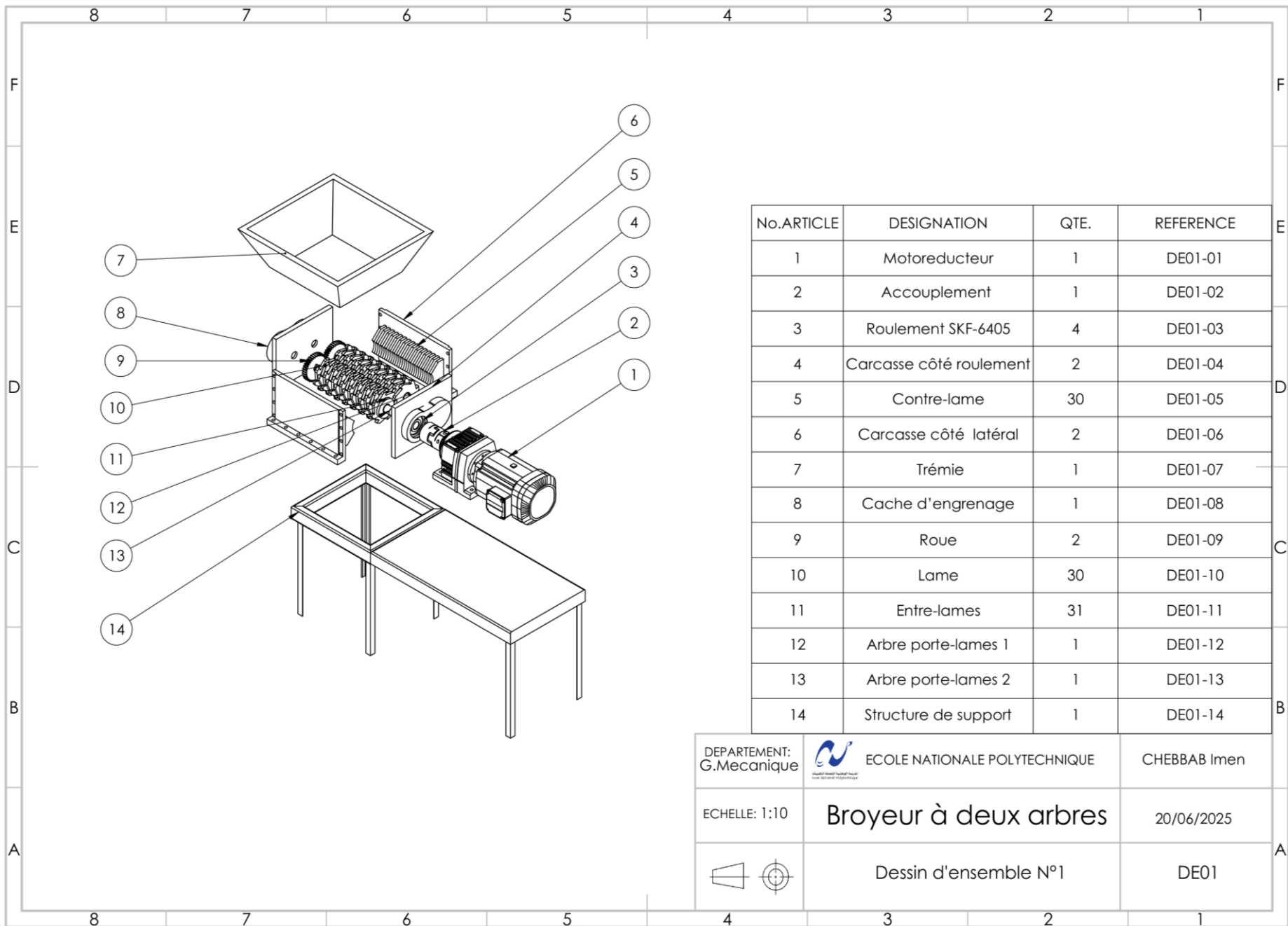
Références

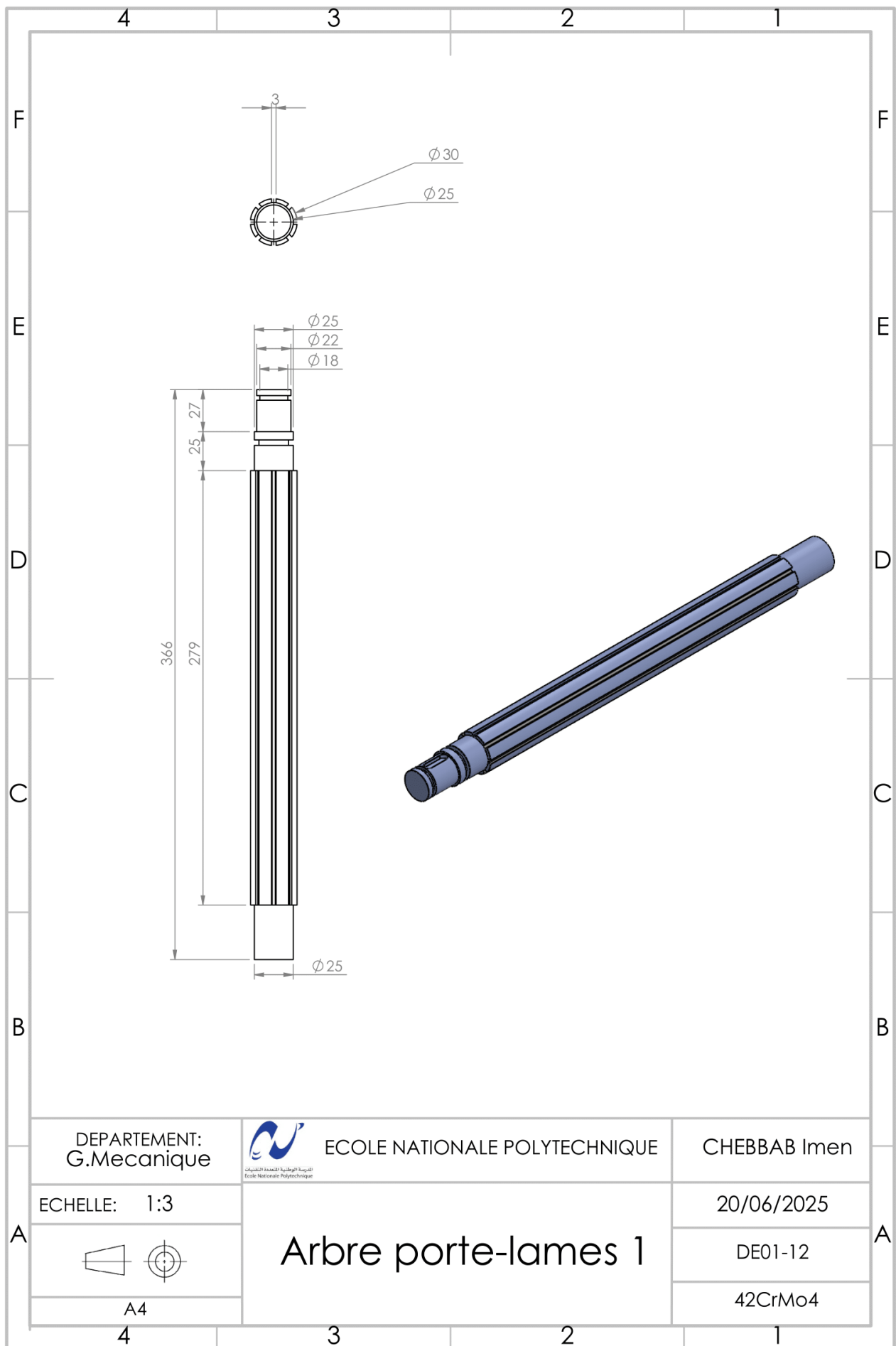
- [1] WWF France, *Pollution plastique : à qui la faute ?*, WWF France, 2022.
- [2] A. Shrivastava, « 2 - Polymerization », in *Introduction to Plastics Engineering*, A. Shrivastava, Éd., in Plastics Design Library. , William Andrew Publishing, 2018, p. 17-48.
- [3] Chabane, Foued, « CONTRIBUTION A LA MODELISATION DE TRANSFERT DE CHALEUR LORS DU REMPLISSAGE D'UN MOULE », 2009.
- [4] BENHARIGA Yassine et BENZIANE Aida Hanane, « Confection d'un micro system de recyclage de Plastique en polyéthylène téréphtalate pour Production de filament d'imprimante 3D », Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, 2023.
- [5] Alexandre Dobraczynski, Michel Piperaud, T. Jean-Pierre, et Jacques Verdu, *Les matières plastiques*, L'usine nouvelle CEP. 1982.
- [6] Oussama Zaki, « Contribution à l'étude et à la modélisation de l'influence des phénomènes de transferts de masse sur le comportement mécanique de flacons en polypropylène », Université Paris-Est, 2008.
- [7] F. J. Heger et P. A. Sharff, « Buildings: Plastics and Composites », in *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, K. H. J. Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, B. Ilschner, E. J. Kramer, S. Mahajan, et P. Veyssière, Éd., Oxford: Elsevier, 2001, p. 833-841. doi: <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00160-1>.
- [8] E. Baur, T. A. Osswald, et N. Rudolph, « 5 - Plastic Materials », in *Plastics Handbook*, E. Baur, T. A. Osswald, et N. Rudolph, Éd., Hanser, 2019, p. 337-578.
- [9] A. E. A. Mostafa, R. Emadi, D. Shirali, M. Khodaei, H. Emadi, et A. Saboori, « Printed polylactic acid/akermanite composite scaffolds for bone tissue engineering; development and surface modification », *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 284, p. 138097, janv. 2025,
- [10] R. Hsissou, R. Seghiri, Z. Benzekri, M. Hilali, M. Rafik, et A. Elharfi, « Polymer composite materials: A comprehensive review », *Composite Structures*, vol. 262, p. 113640, 2021, doi:
- [11] E. Baur, T. A. Osswald, et N. Rudolph, « Plastics Handbook », in *Plastics Handbook*, E. Baur, T. A. Osswald, et N. Rudolph, Éd., Hanser, 2019, p. I-XXI.
- [12] Y. Wielhorski, « Heat transfer in a polymer flow through a cylindrical die in non stationary - Application to extrusion and injection processes », PhD Thesis, 2009.
- [13] F. Vilaplana et S. Karlsson, « Quality Concepts for the Improved Use of Recycled Polymeric Materials: A Review », *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 293, p. 274-297, avr. 2008.
- [14] S. M. Al-Salem, P. Lettieri, et J. Baeyens, « Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review », *Waste Management*, vol. 29, n° 10, p. 2625-2643, 2009.
- [15] Estelle Pérot, « Optimisation et modélisation du procédé de rotomoulage », Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA Lyon), 2006.
- [16] A. Kassab, D. Al Nabhani, P. Mohanty, C. Pannier, et G. Y. Ayoub, « Advancing Plastic Recycling: Challenges and Opportunities in the Integration of 3D Printing and Distributed Recycling for a Circular Economy », *Polymers*, vol. 15, n° 19, p. 3881, sept. 2023,
- [17] C. Mbaocha, A. Nosiri, et P. Eze, « Design of a Plastic Extrusion System Controller », *International Journal of Scientific and Engineering Research*, mars 2021.
- [18] M. Hannachi et M. Nechiche, « Conception et réalisation d'une miniextrudeuse pour l'élaboration des matériaux composites », Mémoire de fin d'études, Université Mouloud

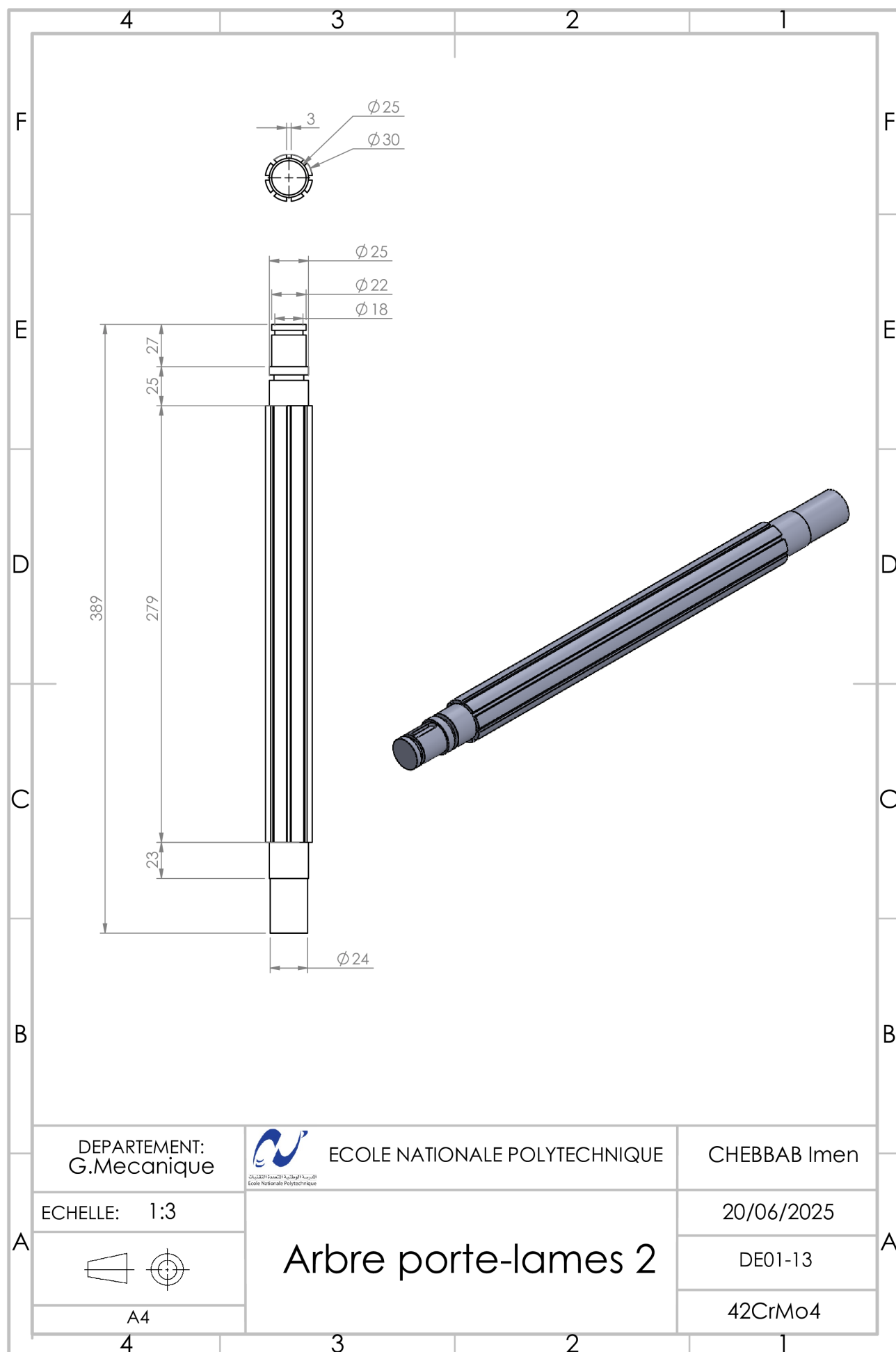
Mammeri de Tizi Ouzou, Faculté de Génie de la Construction, Département de Génie Mécanique, 2020.

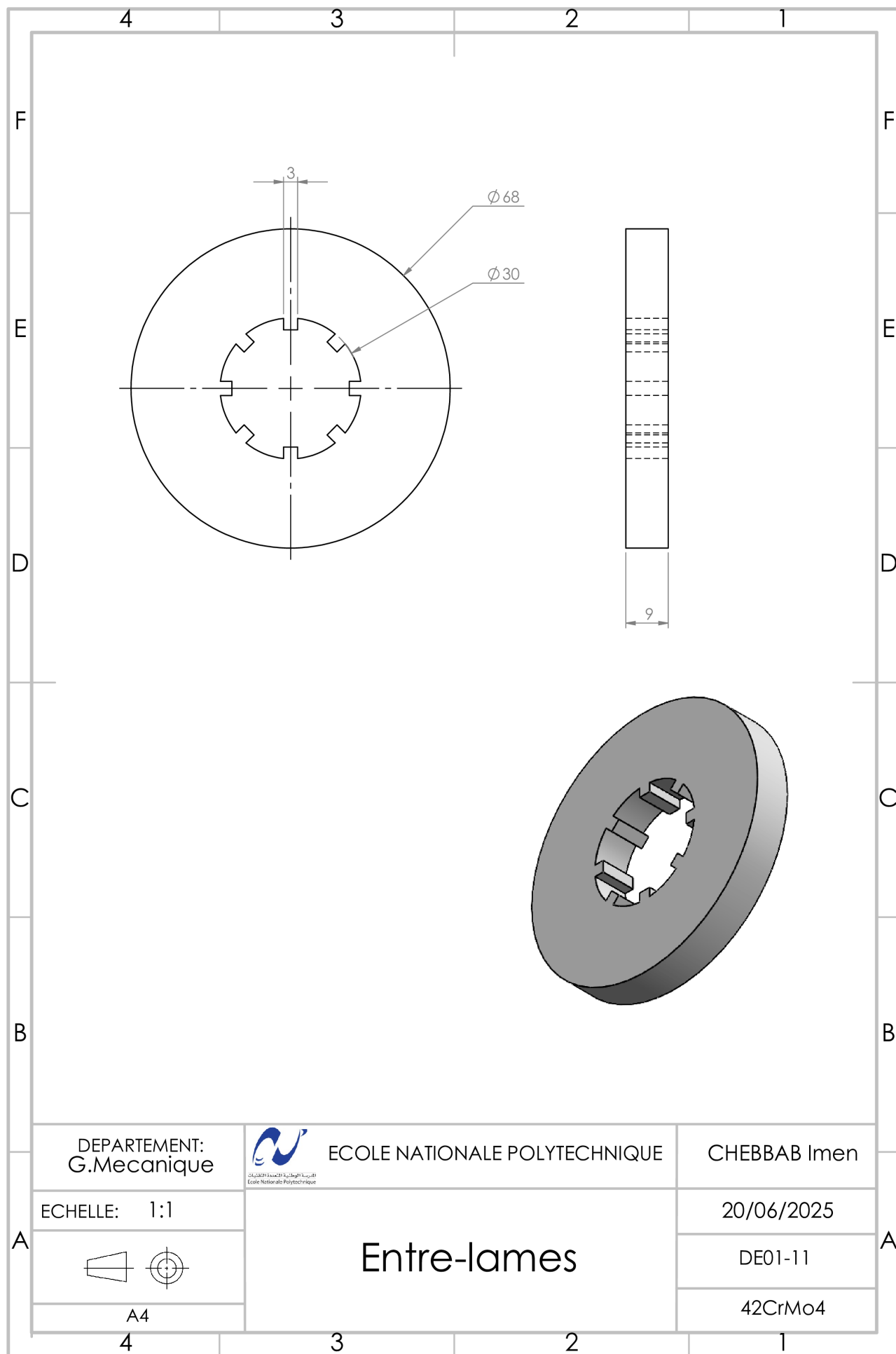
- [19] A. Altınkaynak, « Three dimensional finite element simulation of polymer melting and flow in a single-screw extruder : optimization of screw channel geometry », PhD Thesis, 2010.
- [20] N. Lebaal, « Optimisation de la tête d'extrusion pour la fabrication de pièces thermoplastiques », Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL, 2007.
- [21] B. VERGNES et S. P. PUISSANT, « Extrusion monovis (partie 2) », 2003.
- [22] John Goff et Tony Whelan, *The Dynisco Extrusion Processors Handbook*, Don DeLaney.
- [23] Natália Lage Domingues, « Mixing in Single Screw Extrusion: Modelling and Optimization », Escola Superior de Tecnologia e Gestão, 2011.
- [24] Bruno VERGNES, et Stéphan PUISSANT, « Extrusion monovis (partie 1) », 2002.
- [25] R. KOOPMANS, « Défauts d'extrusion », 2002.
- [26] Agence Nationale des Déchets (AND), *Regard croisé sur les plastiques à usage unique*, Algérie, 2020.

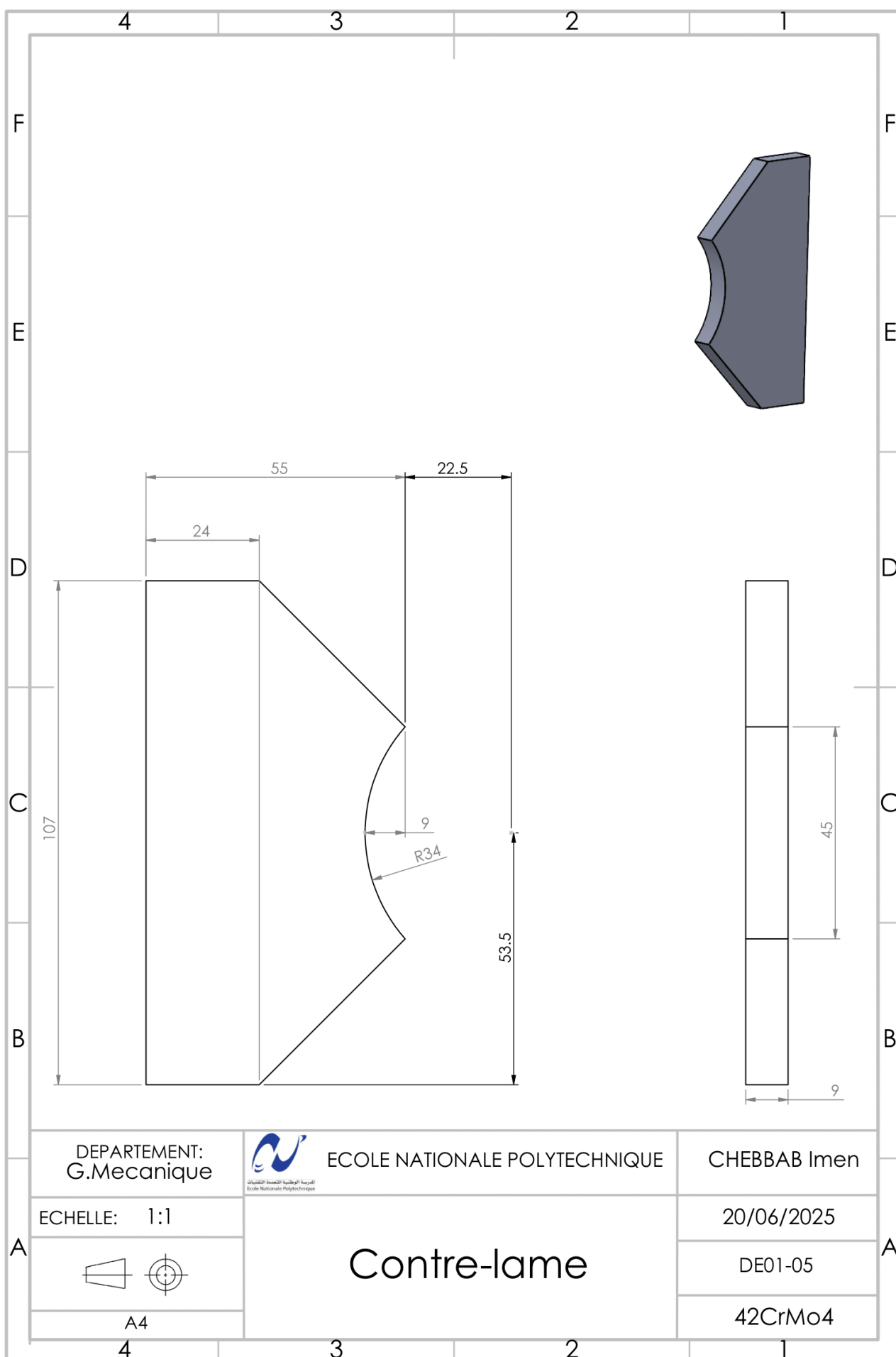
ANNEXE

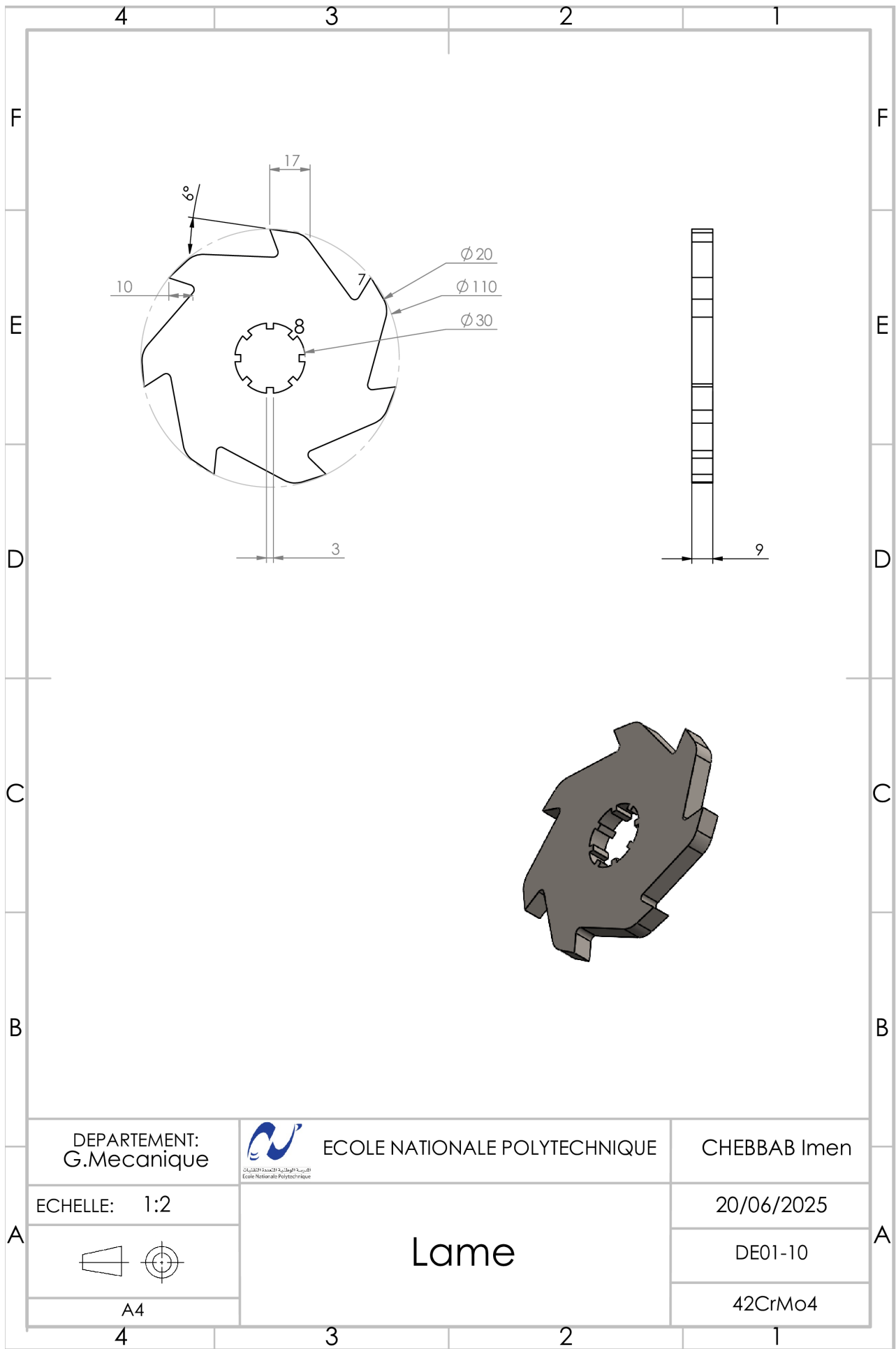


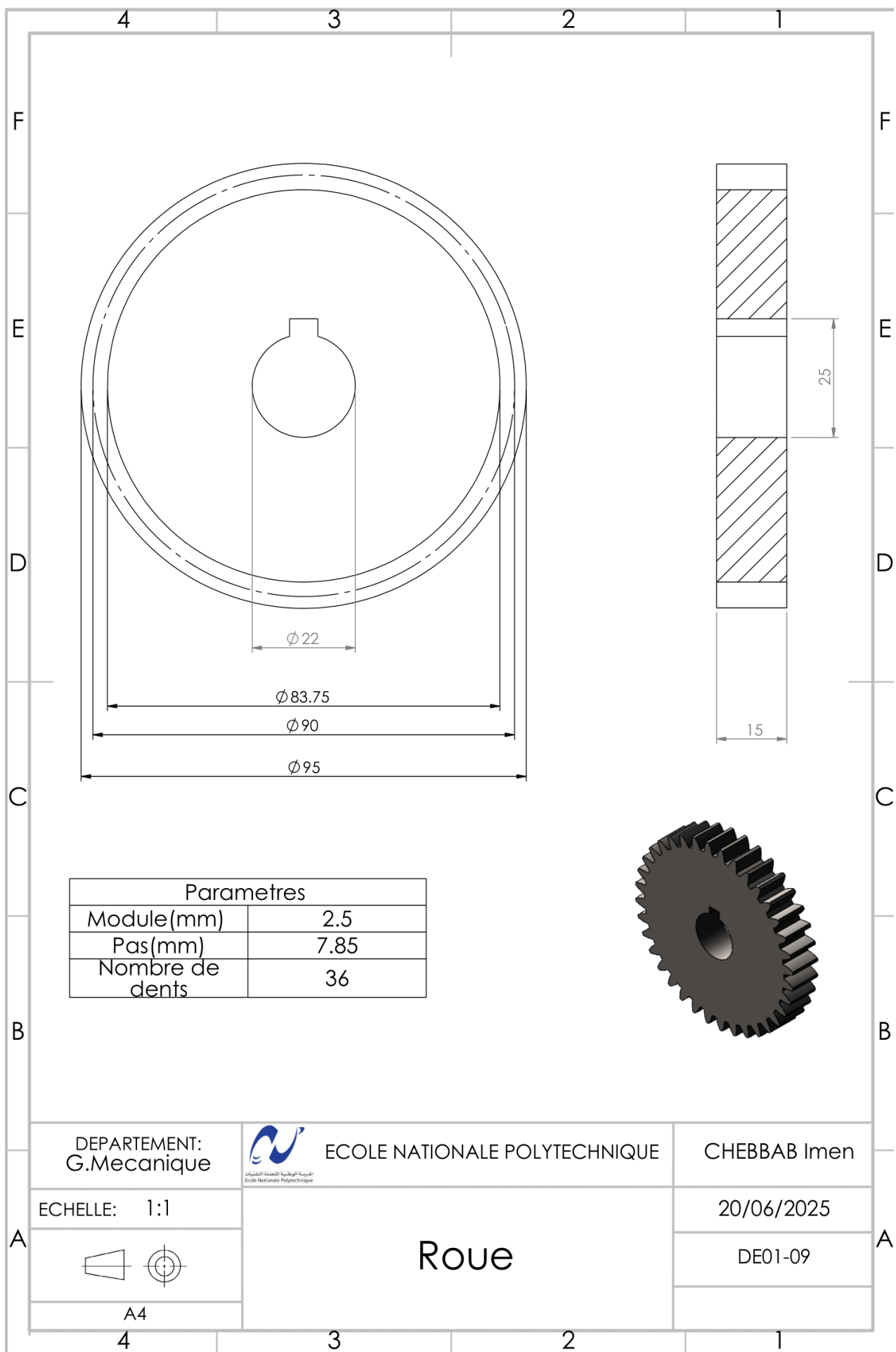


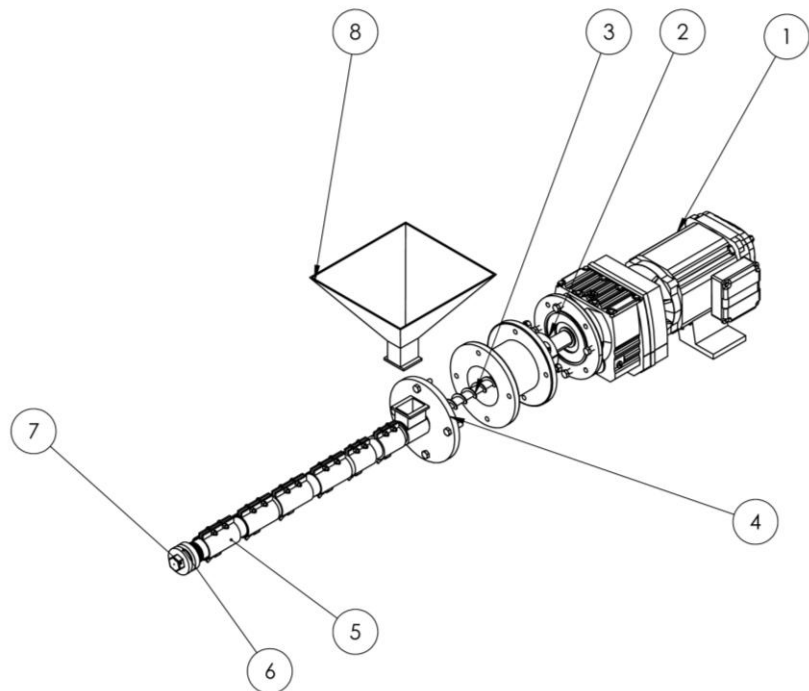




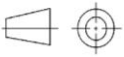


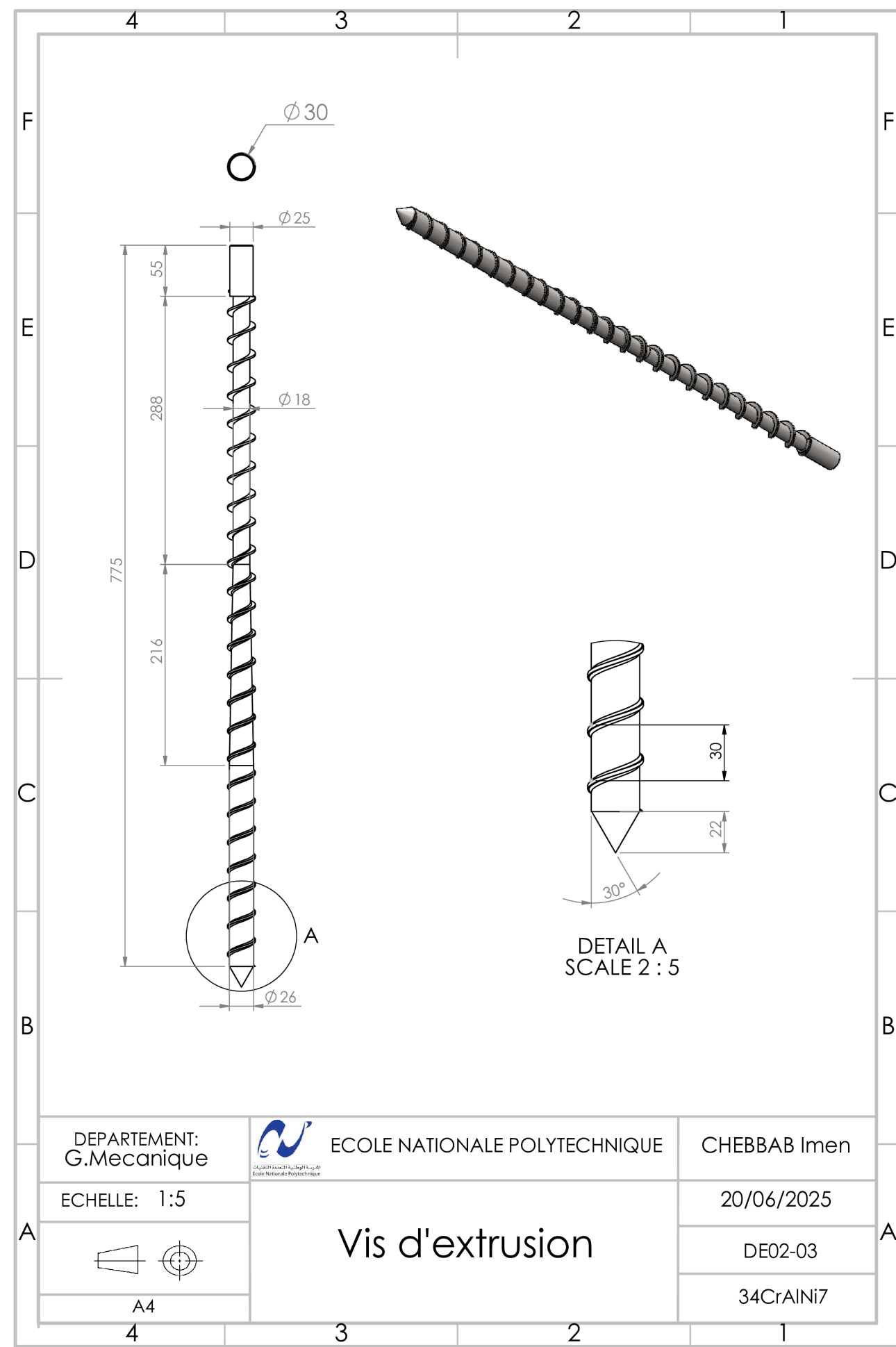


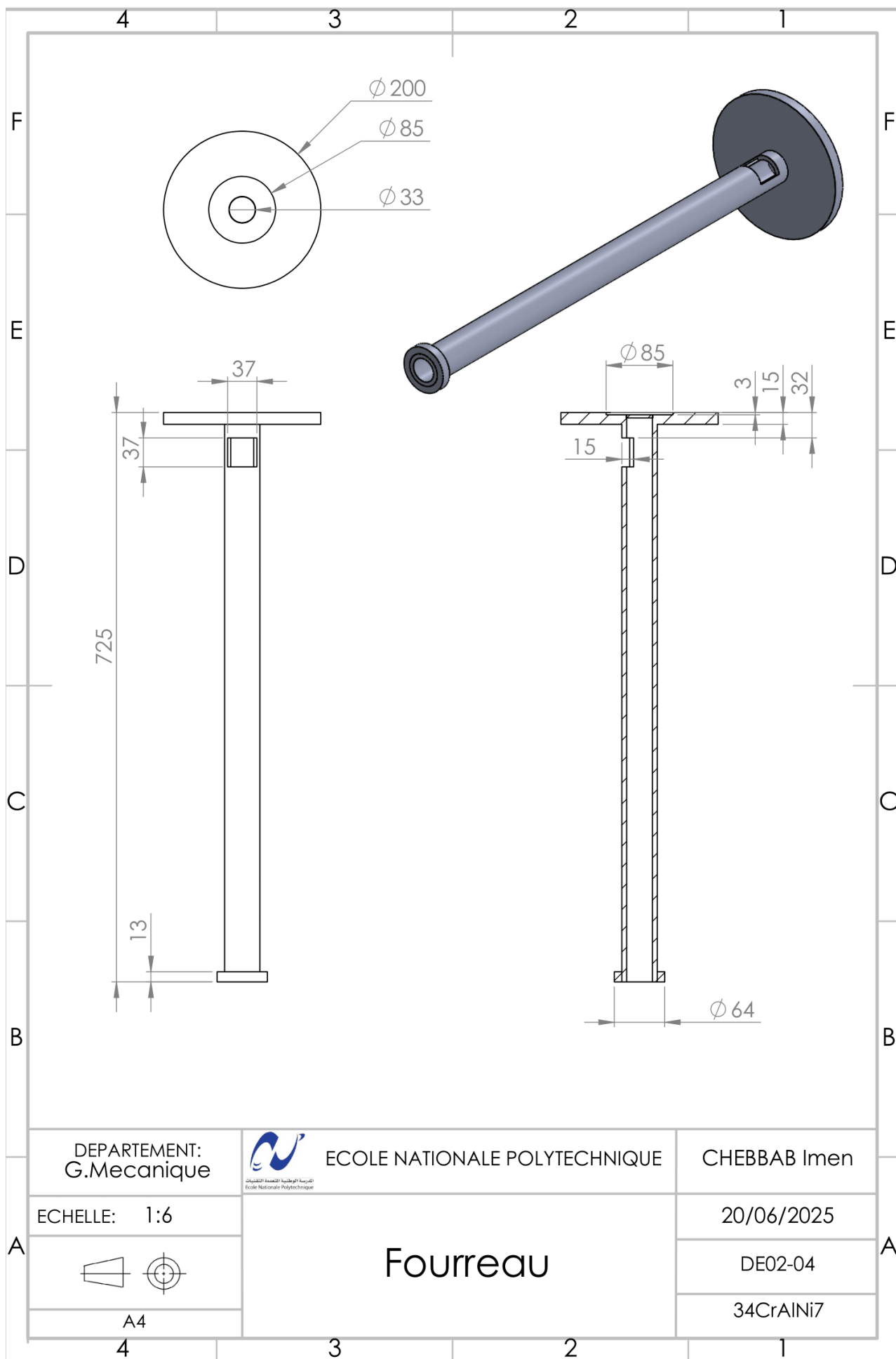


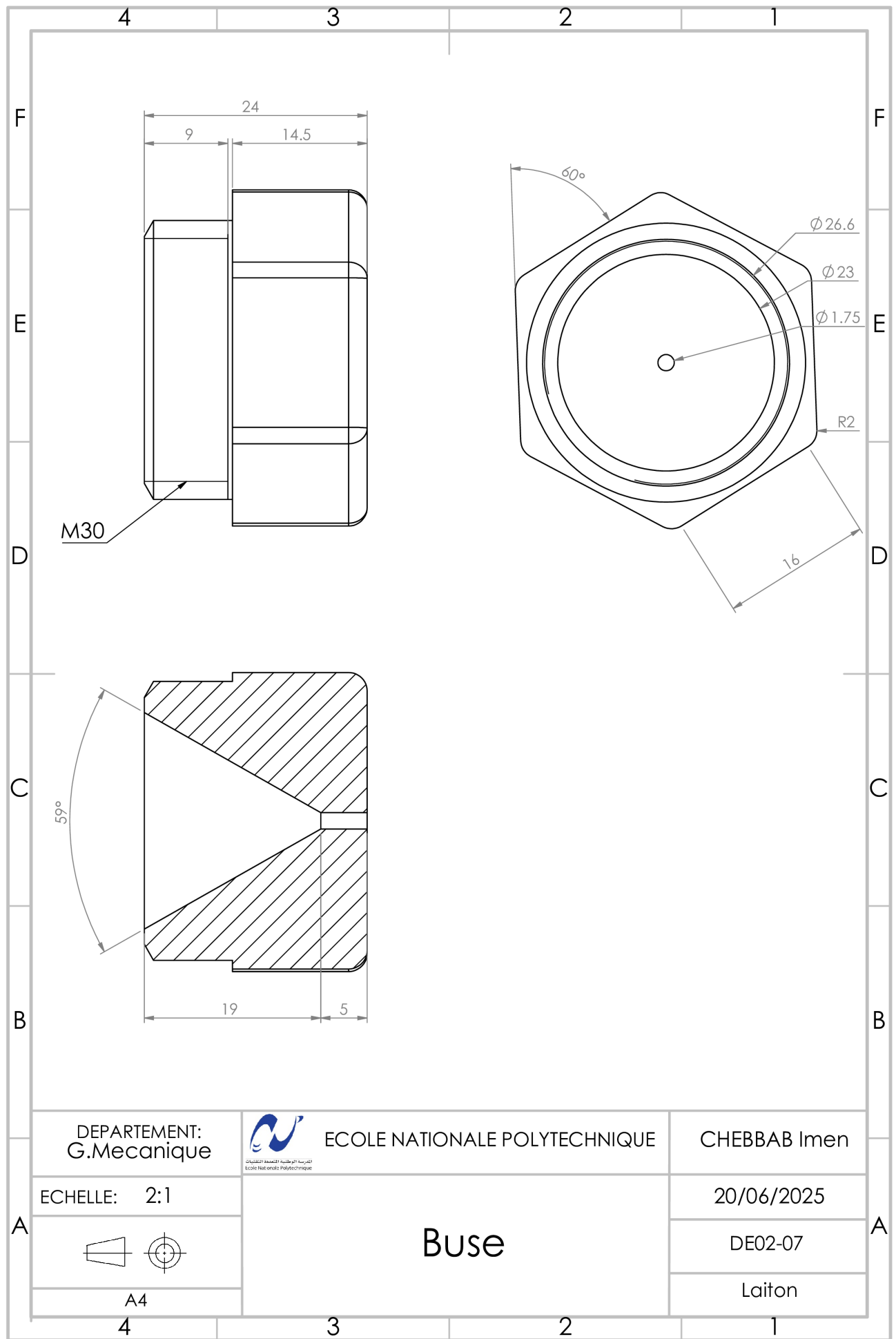


No.ARTICLE	DESIGNATION	QTE.	REFERENCE
1	Motoreducteur	1	DE02-01
2	Accouplement	1	DE02-02
3	Vis d'extrusion	1	DE02-03
4	Fourreau	1	DE02-04
5	Collier chauffant	6	DE02-05
6	Porte buse	1	DE02-06
7	Buse	1	DE02-07
8	Tremie	1	DE02-08

DEPARTEMENT: G.Mecanique	 ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE المؤسسة الوطنية للتكنولوجيا Ecole Nationale Polytechnique	CHEBBAB Imen
ECHELLE: 1:10	Extrudeuse	20/06/2025
	Dessin d'ensemble N°2	DE02







Buse

