



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de maintenance en Electromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie industriel
Spécialité : Maintenance-Fiabilité-Qualité

Thème

**Confection d'un micro system de recyclage de
Plastique en polyéthylène téréphtalate pour
Production de filament d'imprimante 3D**

Présenté et soutenu publiquement par :

- BENHARIGA Yassine

- BENZIANE Aida Hanane

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
CHENNOUFI Mohamed	Maitre de conférence	IMSI/Univ-Oran2	Président
ABDI Ghezail	Maitre de conférence	IMSI/Univ-Oran2	Examineur
MOULAI Khatir Anes	Maitre de conférence	IMSI/Univ-Oran2	Examineur
CHAREF Djilali	Maitre de conférence	IMSI/Univ-Oran2	Encadrant

Année 2022/2023

Remerciements

Nous remercions avant tout ALLAH le tout puissant de nous avoir donnés la foi, la Volonté et le courage de mener à bien ce modeste travail.

*Nous tenons à remercier notre encadrant, Professeur **Charef Djilali**, pour sa patience, et surtout pour sa confiance, ses remarques et ses conseils, sa disponibilité et sa bienveillance.*

Qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude.

Je voudrais également remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques, ainsi que le personnel et les enseignants de l'institut de maintenance et de sécurité industrielle

A tous mes enseignants qui m'ont initié aux valeurs authentiques, en signe d'un profond respect et d'un profond amour !!!

Merci à vous tous

Dédicace

Avec tous mes sentiments de respects, avec l'expérience de ma connaissance, je dédie ma remise de diplôme et ma joie

À mon paradis, à la prunelle de mes yeux à la source de ma joie, et mon bonheur, ma lune et le fil d'espoir qui allume mon chemin, ma moitié.

Maman.

À l'homme qui m'a fait une femme, qui était toujours à mes côtés pour m'encourager. À mon papa.

À mes petites sœurs Fella et Meriem qui m'ont redonné la force pour continuer à chaque fois.

À ma chère copine Miyassa qui étais à mes côtés dans chaque période de ma vie, je suis ta chanceuse de l'avoir dans ma vie

À toutes les membres de ma famille, mes oncles, mes tantes et mes cousines.

À mon encadreur Mr Charef Djilali.

Sans oublier mon binôme Yassine qui a donné tout ce qu'il a pour réaliser ce beau travail.

À tous mes collègues de promotion de 2^{ème} année master maintenance fiabilité qualité.

À tous ceux qui ont participé à ma réussite et tous ceux qui m'aiment.

Hanane

Dédicace

À la merveilleuse femme qui m'a donné la vie,

À celle qui a toujours été là, jour et nuit

Tu as été mon guide, ma boussole dans le chaos,

À travers les hauts et les bas, les joies et les tracas,

Ton amour inconditionnel a toujours été mon repère

Et aujourd'hui, je dédie ma remise de diplôme à toi mon paradis

Maman

À l'homme qui a été mon pilier depuis le premier jour, qui m'a montré le chemin avec amour,

À mon père,

À mes compagnons de vie, À travers les années, nous avons grandi côte à côte, Partageant des souvenirs, des secrets. Vous êtes mes confidents, mes amis les plus proches je dédie ce travail à vous aussi

Mes chers frères et sœurs.

À mes amis chers, mes complices de chaque instant.

À mon binôme de travail, avec qui nous avons fait face aux obstacles

À tous mes collègues de promotion de 2eme année master.

À tous ce qui ont participé à ma réussite et tous ce qui m'aiment.

Yassine

Résumé

Cette mémoire présente une solution de recyclage pour les déchets de plastique PET, en utilisant une machine d'extrusion pour fabriquer des filaments d'imprimante 3D. Les chapitres abordent les généralités sur les plastiques et leur recyclage, les types de filaments 3D et les imprimantes, l'étude théorique de la machine, la conception et la construction sur SolidWorks, ainsi que la sécurité de la machine. Ce projet vise à réduire la pollution environnementale et à valoriser les déchets plastiques en leur donnant une nouvelle utilité.

Mots clés : Recyclage, Plastique, Polyéthylène Téréphtalate, Imprimante 3D, Extrudeur

Abstract

This memory presents a recycling solution for PET plastic waste, using an extrusion machine to manufacture 3D printer filaments. The chapters cover general information on plastics and their recycling, types of 3D filaments and printers, the theoretical study of the machine, the design and construction on SolidWorks, and the safety of the machine. This project aims to reduce environmental pollution and recover plastic waste by giving it a new use.

Keywords: Recycling, Plastic, Polyethylene Terephthalate, 3D Printer, Extruder

ملخص

تقدم هذه المذكرة حلول لإعادة تدوير النفايات البلاستيكية من نوع البولي ثيلان تيريفتالات، باستخدام آلة بثق لتصنيع خيوط الطابعة ثلاثية الأبعاد. تغطي الفصول معلومات عامة عن البلاستيك وإعادة تدويره، وأنواع الخيوط والطابعات ثلاثية الأبعاد، والدراسة النظرية للآلة، والتصميم والبناء على صوليد وورك، وسلامة الآلة. يهدف هذا المشروع إلى تقليل التلوث البيئي واستعادة النفايات البلاستيكية من خلال منحها استخدامًا جديدًا.

الكلمات المفتاحية: إعادة التدوير، بلاستيك، بولي إيثيلين تيريفتاليت، طابعة ثلاثية الأبعاد، آلة بثق

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les plastiques	
I.1. Généralités sur les plastiques	3
I.1.1. Introduction.....	3
I.1.2. Historique de plastique	3
I.1.3. Définition de plastique	5
I.1.4. Fabrication du plastique	6
I.1.5. Types de plastiques	7
I.1.6. Transformation du plastique	9
I.1.7. Recyclage de plastique.....	10
I.1.8. Indication de recyclage	11
I.1.9. Avantages de recyclages du plastique.....	12
I.2. Le polyéthylène téréphtalate (PET)	13
I.2.1. Présentation du PET.....	13
I.2.2. Procédés de synthèse du PET	13
I.2.3. Structure cristalline du polyéthylène téréphtalate.....	15
I.2.4. Propriétés générales du PET	17
a) Principales propriétés du PET	17
b) Propriétés physiques du PET	17
c) Propriétés chimiques du PET	19
d) Propriétés thermiques du PET	19
e) Propriétés thermomécaniques du PET	20
f) Propriétés rhéologiques	21
I.2.5. Dégradation du PET.....	22
a) Dégradation thermique	22
b) Dégradation hydrolytique	22
c) Dégradation thermo-oxydative.....	23
I.2.6. Application du PET.....	23
I.2.7. Autres utilisations courantes	24

I.3. Recyclage du PET	24
I.3.1. Recyclage et valorisation du PET	25
A) Recyclage chimique	25
b) Valorisation énergétique	26
c) Recyclage mécanique avec décontamination du PET	27
I.3.2. Contaminants du PET recyclé	28
I.3.3. Points critiques dans l'évaluation de la chaîne du recyclage	30
a) Collecte	30
b) Tri	30
c) Régénération	31
I.3.4. Procédés de décontamination du PET	31
I.3.5. Risques associés à l'utilisation du PET recyclé	31
I.3.6. Propriétés nécessaires au PET recyclé	32
I.3.7. Domaines d'applications du PET recyclé	32
I.4. Conclusion	33

Chapitre II : Technologie de l'impression 3D

II.1. Filament 3D	34
II.1.1. Introduction	34
II.1.2. Définition de filaments	34
II.1.3. Types de filament	35
a) Le PLA (Polylactic Acide)	35
b) L'ABS (Acrylonitrile Butadiène Styène)	37
c) Le HIPS (high-impact polystyrène)	38
d) Le PETG (polyéthylène téréphtalate)	40
e) Le Nylon (poly hexaméthylène adipamide)	41
f) Le Polycarbonate (PC)	43
II.2. Imprimante 3D	44
II.2.1. Définition de l'imprimante 3D	44
II.2.2. Historique	45
II.2.3. Types d'imprimantes 3D	47
a) Types d'imprimantes 3D selon les technologies d'impression	47

b) Types d'imprimantes 3D selon les matériaux.....	48
c)Selon les usages.....	50
II.2.4. Fonctionnement d'une imprimante 3D.....	51
II.2.5. Les avantages des imprimantes 3D.....	52
II.2.6. Les limites d'une imprimante 3D.....	52
II.3. L'impression et le PETG.....	53
II.3.1. Définition.....	53
a) Sélection des paramètres d'impression.....	53
b) Post-traitement et finition.....	54
II.4. Conclusion.....	55

Chapitre III : Dimensionnement de la machine

III.1. Introduction.....	56
III.2. Objectif de projet.....	56
III.3. Les composants de la machine.....	57
III.3.1. Moteur et vis sans fin.....	57
a) Moteur.....	57
b) Vis sans fin.....	59
III.3.2 la chambre et la trémie.....	60
a) La trémie.....	60
b) La chambre.....	61
III.3.3. L'élément chauffant.....	63
Calculs théoriques.....	64
III.3.4. La buse.....	68
III.3.5. System de refroidissement.....	70
III.3.6. Bobinage :.....	71

Chapitre IV : Conception de la machine sur SolidWorks

IV.1. Introduction.....	73
IV.2. SolidWorks.....	73
IV. 2.1. La conception.....	73
IV. 2.2. Historique.....	73

IV. 2.3. Fonctionnement	73
a) Les barres d'outils	74
b) LE MODULE ASSEMBLAGE :	75
IV.3. Présentation de la machine	76
IV.4. Présentation du prototype graphique de la machine	76
IV.5. Les étapes d'assemblage de la machine :	81
IV.6. Schéma électrique simplifié de la machine :	85
IV.7. Schéma de circuit de commande de la machine	87
IV.8. Conclusion.....	90

Chapitre V : Risques et sécurité de la machine

V.1. Introduction	91
V.2. Définition d'une machine	91
V.3. Définition d'un risque	91
V.4. Définition de la sécurité des machines	92
V.5. Risques liés à notre machine	92
V.5.1. Risques électriques.....	92
V.5.2. Risques mécaniques	93
V.5.3. Risques thermiques	94
V.6. Application des consignes de sécurité sur notre machine	94
V.6.1. Prévention du risque électrique.....	94
V.6.2. Prévention des risques mécaniques	96
V.6.3. Prévention des risques thermiques	96
V.7. Conclusion	97
Conclusion générale	98

Liste des figures

Figure I.1 : produits plastiques	05
Figure I.2 : Schéma des différentes méthodes de synthèse des thermoplastiques	07
Figure I.3 : Symbole de recyclage.....	11
Figure I.4 : les symboles qui représentent les types de plastique.....	12
Figure I.5 : Motif de répétition du polyéthylène téréphtalate	13
Figure I.6 : Synthèse du PET à partir de l'acide téréphtaliques et de l'éthylène glycol	14
Figure I.7 : Synthèse du PET à partir du diméthyle téréphtalate et de l'éthylène glycol.....	15
Figure I.8 : Conformation trans du PET.....	16
Figure I.9 : Conformations gauche du PET.....	16
Figure I.10 : Représentation de la structure cristalline du PET	17
Figure I.11 : Evolution de la viscosité du PET à l'état fondu au cours du temps et en fonction des conditions de mise en œuvre.....	21
Figure I.12 : Schéma réactionnel de la dégradation du PET par scission de chaîne	22
Figure I.13 : Dégradation du PET par hydrolyse	23
Figure I.14 : Dégradation thermo-oxydative du PET.....	23
Figure I.15 : Glycolyse du PET.....	25
Figure I.16 : Méthanolyse du PET	26
Figure I.17 : différentes étapes du recyclage mécanique des bouteilles en PET	28
Figure I.18 : La source de l'acide chlorhydrique HCL	29
Figure II.1 : Filament 3D.....	35
Figure II.2 : Filament type PLA	36
Figure II.3 : Filament type ABS	38
Figure II.4 : Filament type HIPS	40
Figure II.5 : filament type PETG	41
Figure II.6: Filament type NYLON.....	43

Figure II.7: Filament type PC.....	44
Figure II.8: exemple d'une imprimante 3d.....	45
Figure II.9 : imprimante 3D métal X de markforged	49
Figure II.10 : imprimante 3D alimentaires	50
Figure III.1 : Moteur d'entraînement	58
Figure III.2 : System poulie-courroie et engrenage.....	59
Figure III.3: Schéma d'une vis sans fin avec caractéristiques géométriques.	60
Figure III.4 : Conception de la trémie	61
Figure III.5 : conception de la chambre et les bandes chauffantes.....	64
Figure III.6 : Un modèle simplifié de la chambre, de l'élément chauffant (une seule bande chauffante) et du plastique intérieur a été utilisé pour les calculs de transfert de chaleur.	64
Figure III.7 : diagramme de la géométrie interne de la buse.....	69
Figure III.8 : Rendu 3D de la géométrie interne de la buse	69
Figure III.9 : Ventilateur de refroidissement	70
Figure III.10 : Bobine.....	72
Figure IV.1 : Logo SOLIDWORKS	73
Figure IV.2 : Choix du module.....	74
Figure IV.3 : la barre d'outils Esquisse	74
Figure IV.4 : la barre d'outils Fonction	75
Figure IV.5 : la barre d'outils affichage.....	75
Figure IV.6 : la barre d'outils Assemblage	76
Figure IV.7 : Vue 3D de la machine	77
Figure IV.8 : Vue de face de la machine.....	77
Figure IV.9 : Vue de droite de la machine.....	78
Figure IV.10 : Vue de dessus de la machine.....	78
Figure IV.11 : vue de coupe de la machine	79

Figure IV.12 : Les composants du moteur.....	82
Figure IV.13 : Assemblage du moteur.....	82
Figure IV.14 : Les composants de la machine.....	83
Figure IV.15 : Assemblage de la machine.	83
Figure IV.16 : Liaison de la machine au support	84
Figure IV. 17 : Machine finale	84
Figure IV.18 : DC Circuit.....	85
Figure IV.19 : AC Circuit	86
Figure IV.20 : Circuit final	87
Figure IV.21 : PLC Controller.....	87
Figure IV.22 : programme c++	89
Figure IV.23 : Schéma de commande de la machine	90
Figure V.1: Triangle des risques mécaniques	93

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Types de plastiques.....	09
Tableau I.2 : Application du PET en fonction de sa viscosité	18
Tableau I.3 : Propriétés physiques et thermiques du PET	18
Tableau I.4 : Propriétés mécaniques du PET	20
Tableau I.5 : Propriétés mécaniques d'un PET recyclé en fonction du taux de PVC dans la matrice	29
Tableau I.6 : Minimum requis pour la transformation à l'état fondu des paillettes de PET recyclé	32
Tableau I.7 : Viscosité intrinsèque du PET en fonction de son application	33
Tableau II.1 : Caractéristiques, Paramètres d'impression et application de PLA.....	35
Tableau II.2 : Caractéristiques, Paramètres d'impression et application de L'ABS	37
Tableau II.3 : Caractéristiques, Paramètres d'impression et application de HIPS.....	39
Tableau II.4 : Caractéristiques, Paramètres d'impression et application de PETG	40
Tableau II.5 : Caractéristiques, Paramètres d'impression et application de Nylon	42
Tableau II.6 : Caractéristiques, Paramètres d'impression et application de Polycarbonate	43
Tableau III.1 : Paramètre de moteur	58
Tableau III.2 : polie-courroie/engrenages	58
Tableau III.3 : Paramètres des matériaux de la chambre.....	61
Tableau III.4 : Analyse des compromis entre les bandes chauffantes et les serpents chauffants	63
Tableau III.5 : les calculs de quantité de chaleur	67
Tableau IV.1 : Information sur le logiciel utiliser pour la conception.....	76
Tableau IV.2 : Les composants de la machine.....	80
Tableau V.1: classes des matériaux Électriques	92

Liste des abréviations

PET : Le Polyéthylène Téréphtalate

PEHD : Le Polyéthylène Haute Densité

PVC : Le chlorure de polyvinyle

LDPE : Le Polyéthylène Basse Densité

PP : Le polypropylène

PS : Le polystyrène

AT : l'acide téréphtalique

EG : l'éthylène glycol

DMT : téréphtalate de diméthyle

PC : le polycarbonate

PU : Le polyuréthane

PLA : l'acide poly lactique

L'OCDE : Organisation de coopération et de développement économiques

EPI : équipements de protection individuelle

TBTS : type très basse tension de sécurité

TBTP : type très basse tension de protection

Introduction générale

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.
- 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.

Cette mémoire est organisée en cinq chapitres :

Le premier chapitre représente des généralités sur les plastiques et leurs recyclages, où en mit le point sur le procédé de recyclage des bouteilles en polyéthylène téréphtalate

Le deuxième chapitre est réservé aux types de filament 3d, et aux imprimantes dans lesquelles on va les utiliser.

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

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

Le cinquième chapitre parle de sécurité de la machine et de l'élément.

Chapitre I
Généralités sur les plastiques

I.1. Généralités sur les plastiques

I.1.1. Introduction

Aujourd'hui, les matières plastiques sont présentes dans presque tous les secteurs de l'activité humaine.

Ils sont devenus, ces dernières années indispensables dans de nombreux domaines de haute technologie.

Les très nombreuses techniques de transformation des matières plastiques brutes permettent d'obtenir toute une gamme de produits finis adaptés à l'usage. On apprécie leur maniabilité, leur esthétique, leur façonnage aisé pour le design, leurs qualités, qui ont font souvent des concurrents de l'acier et des autres métaux notamment grâce à leur légèreté à l'absence de corrosion et à la tenue dans le temps.

Cependant, l'utilisation excessive de plastiques à usage unique a entraîné une pollution généralisée de l'environnement, y compris les océans et les écosystèmes naturels. Il est donc crucial de trouver des solutions durables pour minimiser l'utilisation des plastiques à usage unique et promouvoir des pratiques de recyclage responsables.

I.1.2. Historique de plastique

Le plastique, une invention remarquable apparue en 1860 grâce à Alexander Parks, est devenu un matériau omniprésent dans notre vie quotidienne. Rien qu'en Europe, nous utilisons chaque année 24,7 tonnes de plastique, ce qui illustre la popularité et l'importance de ce matériau.

1496 : Racontant les événements du deuxième voyage de Christophe Colomb, il est rapporté qu'il y a un arbre en Amérique qui produit un jus laiteux appelé ça-hu-chu par les Amérindiens, qu'ils utilisent pour fabriquer des boules de gomme élastique comme outil pour des jeux amusants.

1838 : Pour la première fois de l'histoire, le chimiste et physicien français Henri Victor Regnault fabrique du PVC. Mais le processus a traversé de nombreuses étapes avant de réussir.

1839 : Le chimiste américain Charles Goodyear invente le procédé de vulcanisation, qui est un procédé chimique qui vise à convertir les polymères apparentés en matériaux avec

un degré de tolérance plus élevé en ajoutant du soufre. Cet ajout conduit à la formation de chaînes de réticulation dans la structure du caoutchouc (pour les caoutchoucs vulcanisés).

1860 : Le scientifique Alexander Parkes a mis au point un matériau qui pouvait être solide, liquide, rigide, élastique, hydrofuge et opaque, appelé PARAXINE. Il la présenta ensuite au public à l'Exposition internationale de Londres en 1862.

1865 : Paul Schutzenberger a préparé de l'acétate de cellulose, et le plus gros problème était qu'il était difficile de le dissoudre et ne pouvait donc pas être utilisé. Cependant, ce matériau présente de nombreux avantages, tels que le fait d'être ininflammable et de mieux préserver sa transparence et ses couleurs.

1870 : Lorsque la guerre a empêché l'importation de l'ivoire d'éléphant, Phelan & Cullinder, le fabricant de boules de billard, a lancé un concours pour savoir qui pouvait trouver un matériau alternatif pour l'ivoire, et a promis 10000 \$ au gagnant, qui était John Wesley Hayatt et son frère, en inventant le celluloid.

1880 : le PVC ou le polychlorure de vinyle est développé. Il est devenu plus flexible, plus facile à fabriquer et recyclable.

1890 : les Anglais Cross et Bewan découvrent une matière très filable et de consistance très sirupeuse qu'ils appellent Viscose

Après la Première Guerre mondiale (1918) : Le prix du pétrole diminue et il devient donc la matière première utilisée pour fabriquer le plastique. De plus, c'est le matériau le plus facile à transformer. C'est le début de la pétrochimie.

1930 : En Wallace Carothers invente le Polyamide et le Polystyrène. Ce dernier a de bonnes performances thermiques, est léger, facile à travailler, insensible à l'humidité et perméable à la vapeur d'eau.

1941 : la mélamine est créée. Son succès n'est pas immédiat mais apparaît dans l'immédiat après-guerre grâce à ses propriétés exceptionnelles de résistance à la chaleur, à la lumière, aux produits chimiques, à l'abrasion et au feu.

Après la Seconde Guerre mondiale (1945) : Les PVC, nylon, formica, tergal arrivent sur le marché pour pouvoir tout reconstruire vite et remplacer les matériaux tels que le bois, le métal, le verre ou les tissus naturels.

1954 : Giulio Natta et Karl Rehn, deux chimistes respectivement italien et allemand, obtiennent, un polypropylène à structure géométrique cristalline régulière.

Aujourd'hui : Les déchets plastiques constituent plus de 7% de la masse totale des ordures ménagères ; mais, malheureusement, ils ne sont pas biodégradables. Ils sont incassables, imputrescibles et ne craignent ni le gel, ni l'assèchement. Ils sont donc une source durable de pollution. Ils rejettent lors de leur dégradation des produits toxiques pour notre environnement et notre santé. Il est à présent urgent de résoudre ce problème et de réduire notre consommation de plastique. [1]

I.1.3. Définition de plastique

Le plastique est un matériau synthétique fabriqué à partir de polymères, qui sont des macromolécules composées de nombreuses unités répétées. Les plastiques peuvent être moulés, formés et façonnés en une variété de formes et de tailles différentes, et sont souvent utilisés pour fabriquer des produits tels que des emballages, des jouets, des pièces d'automobile, des articles ménagers et des équipements médicaux.

Les plastiques peuvent être produits à partir de différentes sources, notamment le pétrole brut, le gaz naturel et les plantes, et peuvent être classés en différents types en fonction de leur structure chimique et de leurs propriétés physiques.



Figure I.1 : produits plastiques. [1]

I.1.4. Fabrication du plastique

Le plastique est toujours élaboré à partir d'éléments naturels, qui sont ensuite transformés : Comme Le gaz naturel, la cellulose, le charbon, et le pétrole brut (c'est un le principal composant naturel utilisé pour produire du plastique, son raffinage permet d'extraire Le naphta, matière première dans le procédé de polymérisation).

La production de plastique commence par le processus de raffinage du pétrole brut, qui permet d'extraire différentes fractions, dont le naphta qui est le principal composant utilisé pour produire le plastique. Les plasturgistes doivent soumettre ce liquide issu du pétrole à une opération de craquage, qui consiste en un chauffage à 800°C suivi d'un refroidissement rapide à 400°C dans des vapocraqueurs, afin de pouvoir l'exploiter. Ce traitement permet de fragmenter les grosses molécules d'hydrocarbures qui le composent en molécules plus légères, qui peuvent ensuite être utilisées pour produire du plastique.

Ces molécules ou monomères sont ensuite polymérisés en les assemblant avec des catalyseurs et dans les conditions de température et de pression appropriées. Après la réaction, qui peut être soit une "addition" ou une "condensation", les monomères se combinent pour ne former qu'une seule macromolécule, à savoir le polymère.

Lorsqu'ils quittent la raffinerie, les polymères peuvent se présenter sous forme de granulés, de liquides ou de poudres. Afin de compléter la production de plastique, l'ajout d'adjuvants et d'additifs est nécessaire. Ces produits peuvent être minéraux, métalliques, organiques ou chimiques, avec des propriétés lubrifiantes, colorantes ou encore ignifugeantes dans ce dernier cas, par exemple.

Leur fonction est d'offrir au plastique les meilleures propriétés (thermoplastiques, thermodurcissables, élastomères, etc.) pour l'application prévue.

Le plastique est ensuite coulé et mis en forme par différentes méthodes : le moulage, l'extrusion, le thermoformage ou encore l'injection.

Dans certaines situations, il est également faisable de produire du plastique à partir de matière recyclée. Cette opération consiste à broyer le plastique en petites paillettes, à le laver, à l'essorer, à le sécher, à le tamiser, puis à le régénérer en granulés.[2]

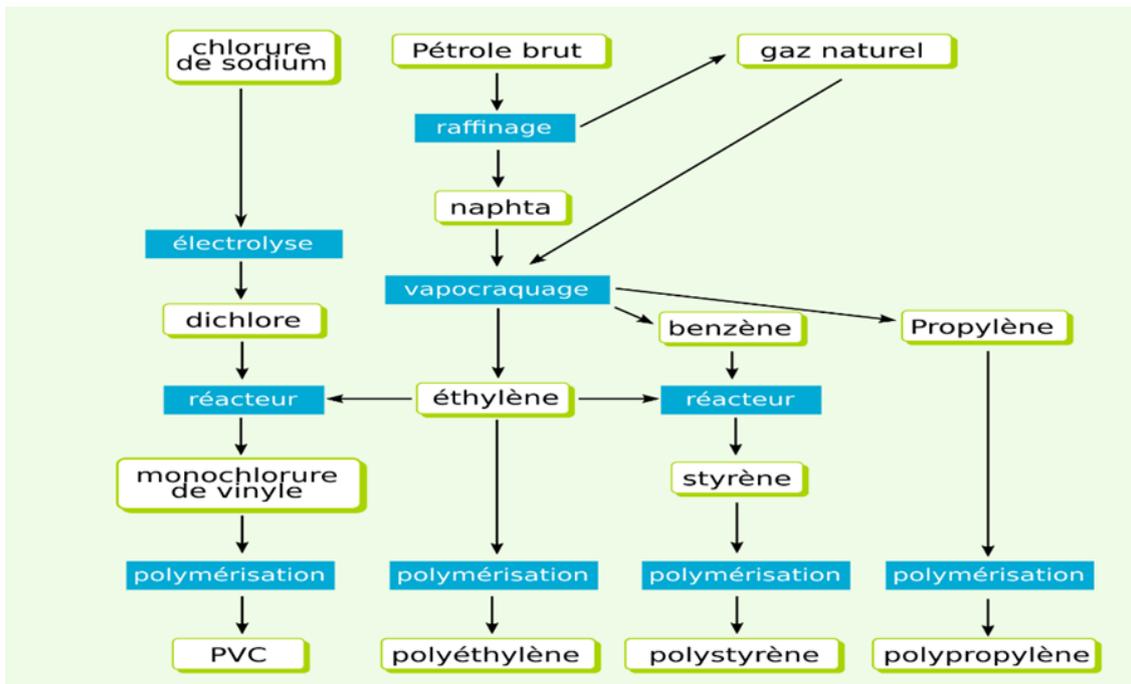


Figure I.2 : Schéma des différentes méthodes de synthèse des thermoplastiques.[2]

I.1.5. Types de plastiques

Il existe de nombreux types de plastiques différents, chacun ayant ses propres propriétés et applications. Voici quelques-uns des types de plastiques les plus courants :

- Le Polyéthylène Téréphtalate (PET) :

Est l'un des matériaux plastiques les plus couramment utilisés, présent sous différentes formes telles que des bouteilles et des emballages. Après utilisation, le PET peut être recyclé pour produire des bouteilles d'eau, mais également des plateaux, des tapis et même des vêtements tels que des polaires, des chaussettes et des pantalons. Le recyclage du PET est essentiel pour réduire les déchets plastiques et limiter la consommation de matières premières.

- Le Polyéthylène Haute Densité (PEHD) :

Est un matériau thermoplastique polymère qui présente une grande flexibilité ainsi qu'une forte résistance aux acides. Il est couramment utilisé dans la fabrication de bouteilles de lait, de jus de fruits, mais également dans des articles ménagers tels que des bouteilles de lessive, des savons et des shampoings. Le PEHD est très apprécié pour sa résistance et sa durabilité, ce qui en fait un choix populaire pour de nombreuses applications industrielles et domestiques.

Le PEHD est ensuite recyclé sous forme de granulés et pourra être réutilisé sous forme de bouteilles de pots de fleurs ou encore en mobilier de jardin.

- Le chlorure de polyvinyle (PVC) :

Est un polymère thermoplastique qui est couramment utilisé pour fabriquer des tuyaux de canalisation, des revêtements muraux, des câbles de chargeur et des revêtements de sol. Le PVC possède des propriétés qui permettent de le rendre rigide ou souple selon l'utilisation souhaitée. Après utilisation, le PVC peut être recyclé pour produire de nouveaux tuyaux de canalisation ou revêtements muraux.

- Le Polyéthylène Basse Densité (LDPE) :

Est un type de plastique qui est apprécié pour son élasticité et est couramment utilisé pour fabriquer des emballages alimentaires tels que des sachets, des films et des sacs poubelles. Après utilisation, le LDPE peut être recyclé pour produire de nouveaux sachets et films plastiques, mais pas pour des applications alimentaires.

Il est important de suivre les instructions de recyclage et de trier les déchets en fonction de leur matériau pour un recyclage efficace et responsable.

- Le polypropylène (PP) :

Est un polymère thermoplastique qui est non toxique et possède une excellente résistance chimique. Il est également apprécié pour ses propriétés isolantes et est souvent utilisé dans l'habitacle des voitures, comme pour les tableaux de bord et les intérieurs de portes. Dans l'industrie alimentaire, le polypropylène est couramment utilisé pour fabriquer des pots de yaourt et des contenants pour le beurre, tandis que dans le secteur du mobilier de jardin, il est utilisé pour créer des chaises, des tables et des bacs de rangement. Après utilisation, le polypropylène peut être recyclé pour produire d'autres pièces automobiles.

- Le polystyrène (PS) :

Est un matériau plastique largement utilisé pour ses nombreux avantages. Lorsqu'il est expansé, il est souvent utilisé comme emballage pour le transport de produits fragiles ou lourds. Il est également utilisé dans des secteurs comme le bâtiment et les travaux publics, où il est utilisé pour la fabrication de cloisons et de toitures. En raison de sa capacité à être facilement nettoyé et de son imperméabilité, le polystyrène est un matériau de choix dans de

nombreuses applications. De plus, il est également utilisé dans l'industrie nautique pour sa résistance à l'eau.

- Les autres :

Le symbole 7 est utilisé pour désigner les autres types de plastiques qui ne sont pas mentionnés précédemment. Certains exemples incluent le polycarbonate (PC), le polyuréthane (PU) et l'acide poly lactique (PLA). Il est important de noter que chaque type de plastique a ses propres propriétés et caractéristiques de recyclage, il est donc important de vérifier les instructions de recyclage appropriées pour chaque type de plastique. [3]

Tableau I.1 : Types de plastiques. [3]

Symbole	Désignation	Nom
 PETE	PET	Polytéréphtalate d'éthylène
 HDPE	HDPE	Polyéthylène haut densité
 V	PVC	Polychlorure de vinyle
 LDPE	LDPE	Polyéthylène basse densité
 PP	PP	Polypropylène
 PS	PS	Polystyrène
 Other	AUTRE	/

I.1.6. Transformation du plastique

La transformation du plastique peut se faire de plusieurs façons en fonction des besoins et des objectifs visés. Voici quelques-unes des techniques les plus courantes :

- Moulage par injection : cette technique consiste à faire fondre des granulés de plastique dans une machine spéciale, puis à les injecter dans un moule pour créer une pièce en plastique.
- Extrusion : cette méthode est utilisée pour créer des profilés en plastique tels que des tubes, des tuyaux ou des feuilles. Les granulés de plastique sont fondus puis poussés à travers une filière pour obtenir la forme désirée.
- Soufflage : cette méthode est utilisée pour créer des bouteilles, des conteneurs et des récipients en plastique. Elle consiste à faire fondre le plastique et à le souffler dans un moule pour obtenir la forme souhaitée.
- Thermoformage : cette technique est utilisée pour créer des objets tels que des emballages et des récipients en plastique. Elle consiste à chauffer une feuille de plastique jusqu'à ce qu'elle devienne molle, puis à la presser dans un moule pour obtenir la forme souhaitée.
- Recyclage : le plastique peut être recyclé en le faisant fondre et en le transformant en granulés réutilisables. Cela permet de réduire les déchets et d'utiliser les matériaux existants pour créer de nouveaux produits.
- Impression 3D : cette technique utilise une imprimante 3D pour créer des objets en plastique en superposant des couches successives de matériau fondu.

I.1.7. Recyclage de plastique

En plus des conséquences sur la faune marine et la santé humaine, la prolifération des déchets plastiques dans la nature engendre un coût considérable en capital naturel, entraînant au moins 13 milliards de dollars. Les secteurs des pêches et du tourisme subissent des pertes économiques importantes, et la dépollution des plages nécessite également du temps et des ressources. La production des plastiques contribue à l'exploitation des ressources non renouvelables telles que le pétrole, ainsi qu'à la consommation d'énergie et à la production de gaz à effet de serre, accélérant le réchauffement climatique.

Certains types de plastiques, tels que le PVC et le Bisphénol A, peuvent être toxiques en raison de leur composition chimique et provoquer des maladies telles que le cancer. Les plastiques dégradables peuvent également produire des gaz à effet de serre et des lixiviats qui polluent l'eau, l'air, le sol et affectent la santé humaine.

Bien que les produits plastiques présentent des avantages tels que la résistance aux produits chimiques et l'isolation thermique et électrique, leur production et leur utilisation génèrent des déchets qui ont des conséquences néfastes pour l'environnement et la santé humaine. Il est donc indispensable de gérer ces déchets adéquatement dans une optique de développement durable. Les pays de l'OCDE et de l'UE ont ainsi préconisé une hiérarchie de traitement des déchets qui privilégie le recyclage afin d'économiser les matières premières et d'utiliser les déchets comme matières secondaires. [4]

I.1.8. Indication de recyclage

L'anneau de möbius : c'est un logo universel des matériaux plastiques recyclables, mis en lieu depuis 1970, pour désigner que le matériau est valorisable. En effet, il peut être recyclé ou incinéré dans des usines de production d'énergie.

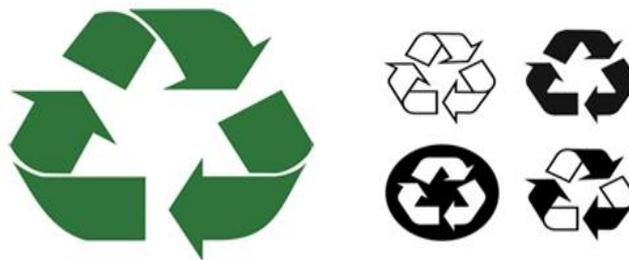


Figure I.3 : Symbole de recyclage.[6]

Cependant, un pourcentage peut figurer sur le triangle (exemple 65%), ce qui signifie le produit ou l'emballage contient un certain pourcentage de matières recyclées.

. Codes d'identification : sur les emballages en plastique figure un système de marquage par type de matériau plastique afin d'identifier le type de plastique et la possibilité de sa valorisation.

Dans la théorie tous les plastiques sont recyclables mais dans la pratique seulement certains types d'entre eux le sont essentiellement (le PET, PP, PS, PVC, PEHD et le PEBD) d'où l'importance des codes d'identification pour faciliter le tri et par conséquent le recyclage de ces catégories de déchets.[6]

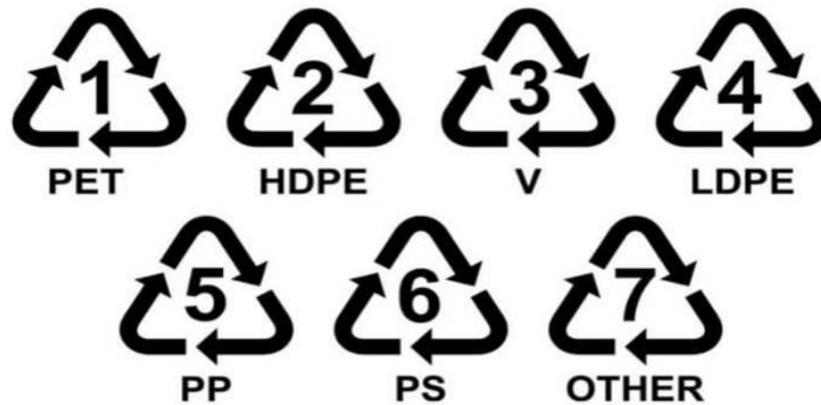


Figure I.4 : les symboles qui représentent les types de plastique.[3]

I.1.9. Avantages de recyclages du plastique

- Selon Lavoisier « Rien ne se perd, rien ne se créé, tout se transforme », ainsi les déchets peuvent se transformer en ressource en les recyclant et en les réintégrant dans le processus de production.
- Le recyclage constitue l'une des solutions la plus adéquate pour le traitement des déchets mais il doit être précédé d'un tri sélectif afin d'éviter des éventuelles impuretés affectant négativement les déchets et limitant ainsi leurs récupérations.
- C'est une activité industrielle qui permet de trier et préparer les déchets pour en faire des matières premières secondaires (MPS) et par conséquent il contribue à la création de postes d'emploi et de réduire la pollution.
- Le recyclage est une activité industrielle qui contribue à la création d'emplois et à la réduction de la pollution. Selon l'OCDE, l'industrie du recyclage gère plus de 500 millions de tonnes de déchets et emploie plus de 1,5 million de personnes, pour un chiffre d'affaires annuel de 160 milliards USD. Le recyclage peut donc contribuer au développement socioéconomique et à la protection de l'environnement des pays qui l'adoptent.
- Le recyclage offre également de nombreux avantages aux entreprises, notamment la diversité des sources d'approvisionnement, qui facilite la négociation des prix d'achat et garantit la sécurité des approvisionnements. Par exemple, 1 tonne d'emballages plastiques (PET) recyclée permet de fabriquer 725 couettes, tandis que 1 tonne d'emballages plastiques (PEHD) recyclée permet de fabriquer 68 bacs de collecte. En résumé, le recyclage est une pratique essentielle pour la protection de l'environnement, la création d'emplois et le développement durable des entreprises.[7]

I.2. Le polyéthylène téréphtalate (PET)

I.2.1. Présentation du PET

Le polyéthylène téréphtalate (PET) est un polymère largement utilisé dans de nombreuses applications. Il est produit en effectuant soit une estérification lente entre l'acide téréphtalique (AT) et l'éthylène glycol (EG), soit une transestérification catalysée entre le téréphtalate de diméthyle (DMT) et l'EG. Avant la transestérification, il est nécessaire de purifier le DMT par recristallisation afin d'obtenir du PET de haute masse molaire (> 20000 g/mol). Ce seuil de masse molaire est essentiel pour garantir au polymère des propriétés mécaniques optimales [8].

I.2.2. Procédés de synthèse du PET

Le polyéthylène téréphtalate (PET) est un polyester linéaire dont l'unité de répétition est représentée sur la figure 5. La présence d'un groupement rigide dans le squelette de la chaîne a une importance capitale sur la cohésion du polymère. Sa structure chimique lui confère ainsi une grande rigidité.

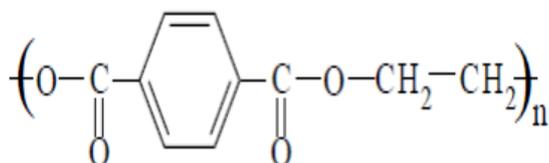


Figure I.5 : Motif de répétition du polyéthylène téréphtalate [9].

Les deux principaux procédés de fabrication du PET dans l'industrie sont : la synthèse à partir du diméthyle téréphtalate (DMT) et l'éthylène glycol (EG), et la synthèse à partir de l'acide téréphtalique (AT) et de l'éthylène glycol (EG). Ces deux procédés comportent deux étapes, la première consiste en la synthèse du monomère bis hydroxyléthyl téréphtalate (BHET) et la deuxième la polycondensation de ce dernier en polymères [10].

- **Procédé d'estérification**

La synthèse du PET peut également être réalisée par estérification directe de l'acide téréphtalique (AT) et de l'éthylène glycol (EG). Ce processus implique le chauffage du mélange de diacide et de diol jusqu'à une température propice à l'estérification, ce qui donne un polyester et de l'eau. Dans la pratique, la température est souvent augmentée de 150°C à une valeur optimale qui représente un équilibre entre la nécessité de favoriser la réaction dans

une phase homogène et le risque de dégradation thermique pendant la période requise pour atteindre le poids moléculaire souhaité [12].

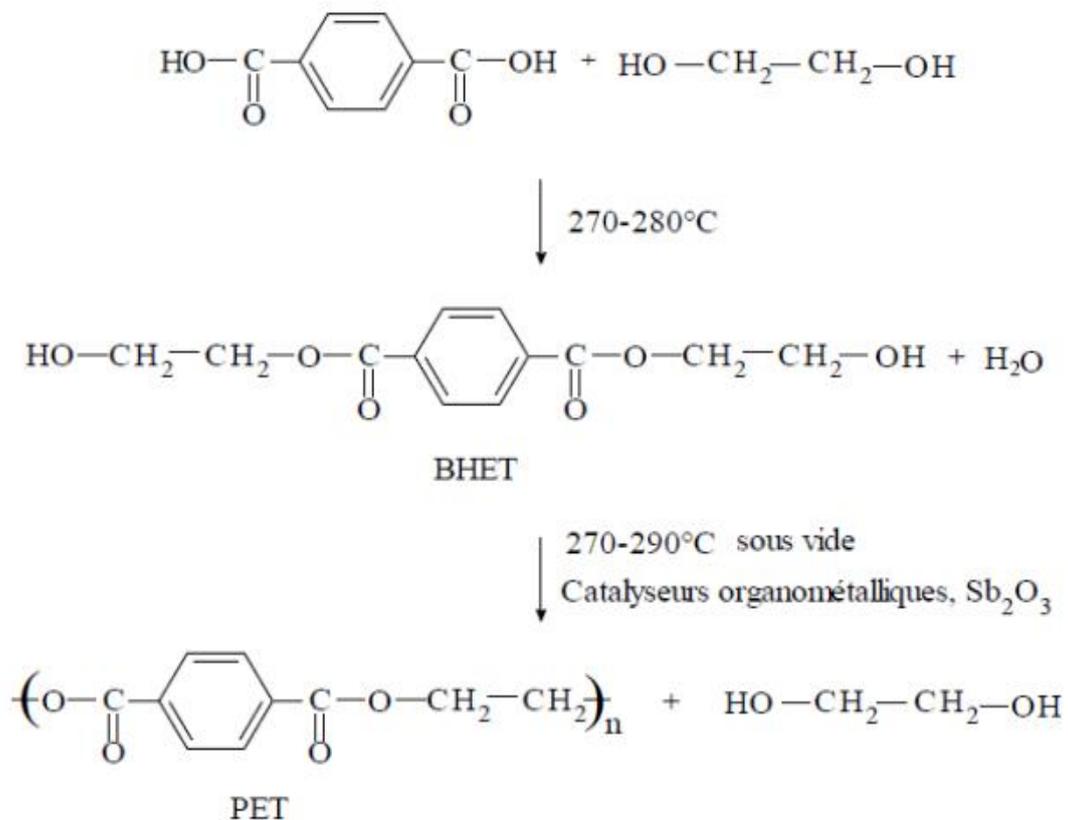


Figure I.6 : Synthèse du PET à partir de l'acide téréphtaliques et de l'éthylène glycol [11].

- **Procédé d'échange d'ester ou transestérification**

Un mélange de DMT et de diol dans les proportions molaires 2,1/2,2 est chauffé en présence d'un catalyseur généralement le trioxyde d'antimoine (Sb_2O_3), à une température variant de 150 à 200°C. Le méthanol résultant sous forme de vapeur est évacué à travers un système de condensation, favorisé par le léger excès de diol. Le produit de la réaction est principalement le BHET qui est transféré dans un réacteur de polycondensation opérant à une haute température et sous une pression réduite. Cette réaction se produit à une température de 270-290°C, sous une pression de 0,5-1mmHg [11].

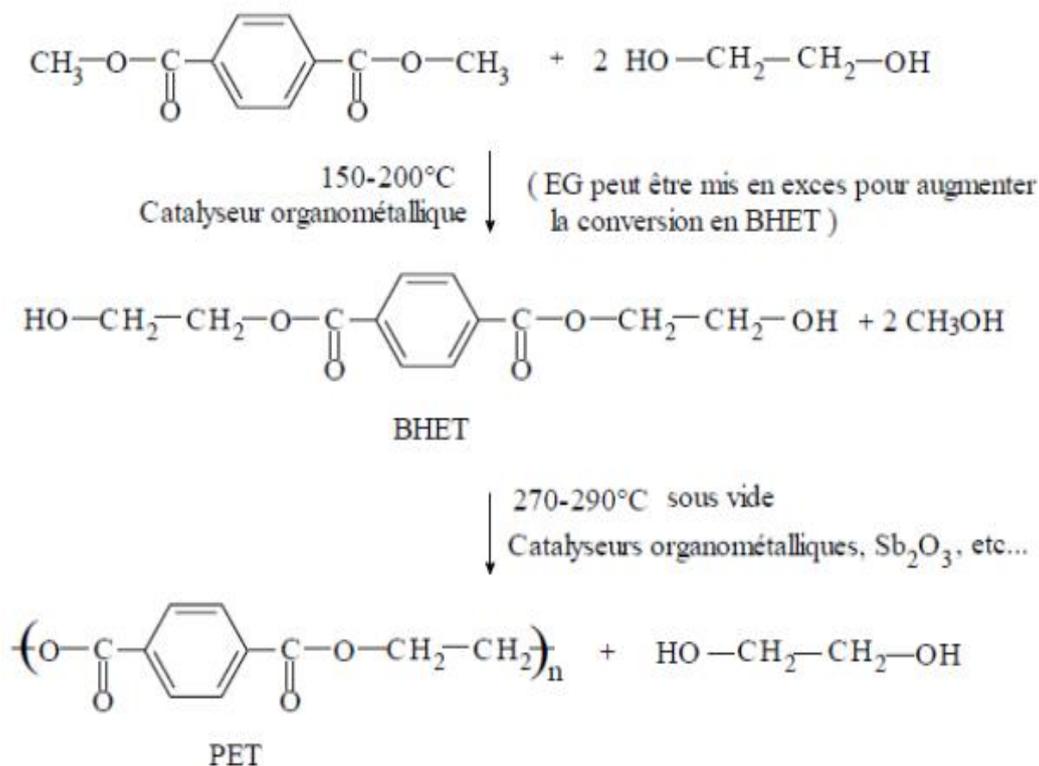


Figure I.7 : Synthèse du PET à partir du diméthyle téréphtalate et de l'éthylène glycol.

La polymérisation, décrite par les réactions données la figure 7, est contrôlée par les mesures du couple et ce par un instrument connecté à l'agitateur qui indique l'augmentation de la viscosité à l'état fondu. La réaction est interrompue quand la viscosité atteint la valeur désirée et alors le produit est évacué dans un système de refroidissement où il est solidifié puis réduit en granulés [11].

I.2.3. Structure cristalline du polyéthylène téréphtalate

Le PET est un polymère qui peut être obtenu sous deux structures différentes :

- Une structure complètement amorphe lorsque le PET subit un refroidissement brutal de l'état fondu à l'état solide,
- Une structure semi-cristalline lorsque le PET est refroidi lentement, le taux de cristallinité maximum atteignant alors 50 % à 60 %. Dans la phase amorphe, deux conformations de chaînes sont possibles [13].

Elles peuvent être détectées par des mesures de spectroscopie infrarouge :

- Une conformation trans (1340 cm⁻¹ dans la zone d'absorbance), (figure 8).

- Une conformation gauche (1370 cm⁻¹ dans la zone d'absorbance), (figure 9).

Dans la phase cristalline, la minimisation de l'énergie potentielle impose une seule conformation possible : la conformation trans.

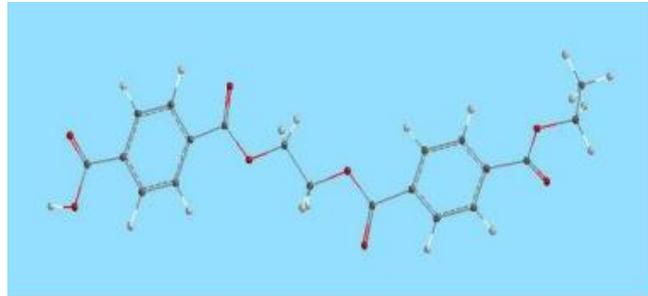


Figure I.8 : Conformation trans du PET.

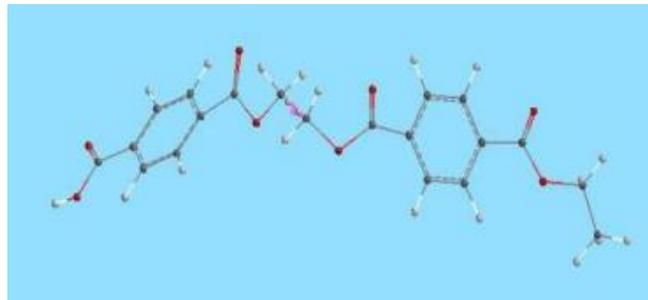


Figure I.9 : Conformations gauche du PET.

Enfin, de récents travaux proposent l'existence d'une phase mésomorphe constituée de conformères trans. Dès les années 50, les paramètres de la maille cristalline du PET ont été déterminés par Daubigny et Al. [14]. Ainsi la structure cristalline s'organise selon une maille triclinique définie par :

$$a= 0.456\text{nm}; b= 0.974\text{nm}; c= 1.075\text{nm}; \alpha= 98.5^\circ; \beta= 118^\circ; \gamma= 119^\circ$$

La chaîne macromoléculaire s'oriente parallèlement à l'axe c, (Figure 10).

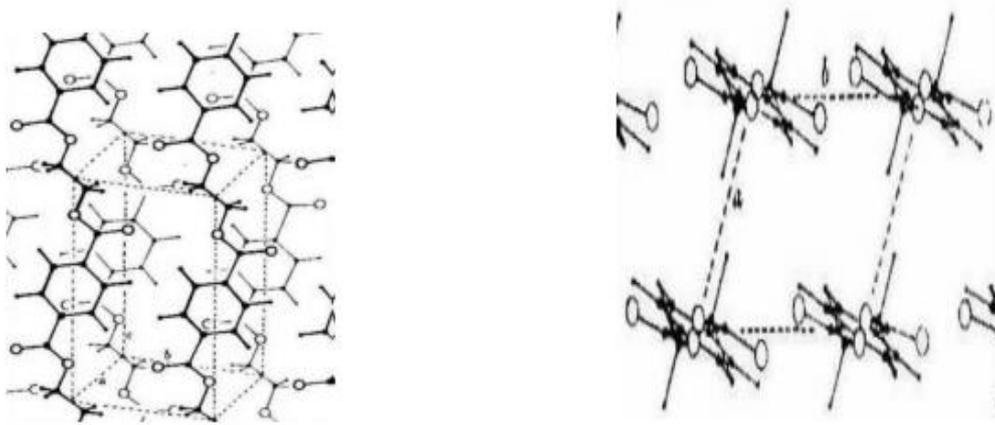


Figure I.10 : Représentation de la structure cristalline du PET [14].

I.2.4. Propriétés générales du PET

Le PET est devenu l'un des polymères les plus largement utilisés dans l'industrie du film, des fibres et de l'emballage en raison de ses excellentes propriétés électriques, chimiques et physiques. Il s'agit d'un matériau rigide qui présente une bonne stabilité dimensionnelle. Le PET possède également de bonnes propriétés barrière et une résistance chimique satisfaisante. Sa cristallinité peut varier de l'amorphe à relativement cristallin. Il peut être très transparent et incolore, mais les parties épaisses sont généralement opaques et blanchâtres [10].

a) Principales propriétés du PET

- Le PET possède des caractéristiques spécifiques qui sont :
- Transparence.
- Brillance.
- Résistance aux chocs.
- Cristalline, légèreté, solidité et longue durée de vie.
- Résistance à la traction.
- Résistance à la pression et aux gaz [12].

b) Propriétés physiques du PET

• Viscosité

L'une des propriétés les plus importantes du PET est sa viscosité intrinsèque. Elle dépend de la longueur des chaînes de polymères. Plus les chaînes sont longues, plus le matériau est dur et donc sa viscosité augmente. Selon sa viscosité, le PET ne va pas être

utilisé dans le même domaine. Le tableau 1 représente les applications du PET en fonction de sa viscosité :

Tableau I.2 : Application du PET en fonction de sa viscosité [15]

Application	Indices de viscosité (ml/g)
Fibres	55-68
Films	57-66
Bouteilles	72-85

- **Cristallisation**

La température de cristallisation du PET est un facteur crucial dans la fabrication des fibres. On cherche généralement à maximiser cette température. La température de cristallisation du PET peut varier entre 160 et 180°C et dépend de plusieurs facteurs. Des études ont montré que la température de cristallisation augmente lorsque le PET est ramifié par rapport à sa forme linéaire, pouvant atteindre 190°C. Par ailleurs, les propriétés barrière du PET s'améliorent avec un taux de cristallinité plus élevé, qui se situe généralement entre 20 et 50 %. Cependant, il est possible d'obtenir des taux de cristallinité allant jusqu'à 90 % grâce à des traitements sous pression [16].

Le tableau suivant présente quelques caractéristiques du PET en fonction de sa structure cristalline :

Tableau I.3 : Propriétés physiques et thermiques du PET [17].

Propriétés	PET amorphe	PET semi- cristallin
Masse volumique (g/cm ³)	1,335	1.455 – 1.515
Transition vitreuse (°C)	67	81 – 125 (orienté)
Indice de réfraction	1,576 (25°C)	1.64 (23°C)
Température de fusion à l'équilibre thermodynamique (°C)	-	280°C

- **Hydroscopie**

Le PET absorbe naturellement l'eau à hauteur de 0,16 %, Ce phénomène est d'importance lorsque l'on dépasse la température de transition vitreuse du polymère (T_g

=75°C) : il se produit des réactions d'hydrolyse de la fonction ester au sein du polymère ce qui entraîne une chute du poids moléculaire et de la viscosité, et donc la dégradation partielle du PET [9].

c) Propriétés chimiques du PET

Le PET possède une excellente résistance chimique aux acides concentrés et dilués, aux cétones, aux graisses et aux huiles, mais s'hydrolyse en présence des produits alcalins [12].

d) Propriétés thermiques du PET

Le polyéthylène téréphtalate (PET) peut se présenter sous forme amorphe ou semi-cristalline. Sa densité typique se situe généralement entre 1,30 et 1,40. La cristallisation du PET peut se produire lorsque sa température est inférieure à sa température de fusion. Toutefois, un taux de cristallinité de 30 % n'est atteint qu'après un traitement thermique spécifique. Pour obtenir ce taux de cristallinité, il est nécessaire de maintenir le PET à une température de 130°C pendant 6 minutes, à 110°C pendant 30 minutes et à 90°C pendant 3 heures. Le PET commercialisé présente une température de fusion (T_f) comprise entre 255°C et 265°C. Il est important de souligner que la température de fusion du PET peut varier en fonction du poids moléculaire et du taux de cristallinité du polymère.

Le PET possède une température de fusion élevée grâce à la présence d'un noyau benzénique. Le noyau confère aussi un aspect semi rigide au PET. Cependant, le noyau benzénique, contrairement au polystyrène, n'empêche pas le PET de se cristalliser dès 80°C. Cependant, sa semi rigidité empêche une cristallisation rapide. De plus, il est facile d'obtenir un PET amorphe en le refroidissant rapidement depuis sa température de fusion. Lors de la cristallisation, le PET devient blanchâtre opaque. Ce phénomène est commun à tous les matériaux polymères cristallins.

Entre sa température de transition vitreuse et sa température de fusion, le PET peut cristalliser thermiquement, ou sous l'effet de la déformation, cristallisation dite induit. La cristallisation thermique peut avoir lieu lors, du refroidissement du matériau depuis l'état fondu, ou lors de son chauffage depuis l'état vitreux. Ce type de cristallisation est dit cristallisation froide.

e) Propriétés thermomécaniques du PET

Le PET se présente sous forme vitreuse à température ambiante, ce qui lui confère sa rigidité et le rend adapté à une utilisation courante. À la température de transition vitreuse (T_g), les propriétés mécaniques du PET subissent des changements significatifs. Au-dessus de la T_g , la mobilité accrue des chaînes permet, par exemple, l'étirage et l'orientation du polymère par soufflage lorsqu'il est amorphe. À la fois au-dessus et en dessous de la T_g , la cristallinité et l'orientation du PET améliorent ses propriétés mécaniques.

Lorsque le PET est amorphe, son module mécanique augmente jusqu'à environ 145°C en raison de la cristallisation qui se produit pendant le chauffage. Au-dessus de la température de fusion, la mobilité des chaînes devient suffisamment importante pour que le polymère ait l'apparence d'un liquide visqueux, et c'est dans cet état que l'on peut transformer le PET.

Le PET donne ses propriétés thermomécaniques optimales dans son état cristallin, par contre sont moindres à l'état amorphe, qui est obtenu dans des conditions de refroidissement non maîtrisées, par trempe du matériau (refroidissement très rapide à partir de l'état fondu). Le poly (éthylène téréphtalate).

Les principales propriétés mécaniques du PET sont résumées dans le tableau 4

Tableau I.4 : Propriétés mécaniques du PET [20].

Propriétés	Valeurs
Traction :	
Contrainte au seuil d'écoulement	40 MPA
Contrainte à la rupture	150MPA
Allongement à la limite élastique	4 %
Allongement à la rupture	70 %
Module d'Young	2800 MPA
Flexion :	
Contrainte à la rupture	110 MPA
Module d'Young	3000 MPA

f) Propriétés rhéologiques

La mise en œuvre du PET est généralement réalisée à l'état fondu, à des températures comprises entre 270 et 290°C. À ces températures, la dégradation thermique du PET peut avoir un impact important et irréversible sur ses propriétés rhéologiques. Ce phénomène est étroitement lié aux conditions de mise en œuvre lors de la fusion. Des études, telles que celle de Zimmermann et al., ont démontré que la diminution de la viscosité était directement liée à la quantité de groupements carboxyliques, qui sont eux-mêmes associés à la dégradation du matériau. Par conséquent, il est crucial de sécher soigneusement le polymère avant sa mise en œuvre, en le chauffant à une température élevée (environ 150°C) pendant plusieurs heures.

Pendant la mise en œuvre, des mesures préventives peuvent être prises pour limiter cette dégradation, telles que la réduction du temps de séjour à l'état fondu et l'utilisation d'une atmosphère modifiée pour éviter toute oxydation. La viscosité du PET est également influencée par le nombre de cycles d'injection successifs. Des recherches menées par La Mantia et Silva Spinace, par exemple, ont montré que la proportion de groupements carboxyliques en extrémité de chaîne augmentait avec le nombre de cycles d'injection, tandis que l'indice de viscosité (exprimé en grammes pour 10 minutes) augmentait également, indiquant une baisse de la viscosité. Ce phénomène est d'autant plus prononcé lorsque le PET réextrudé n'est pas séché correctement (Figure 11). [20]

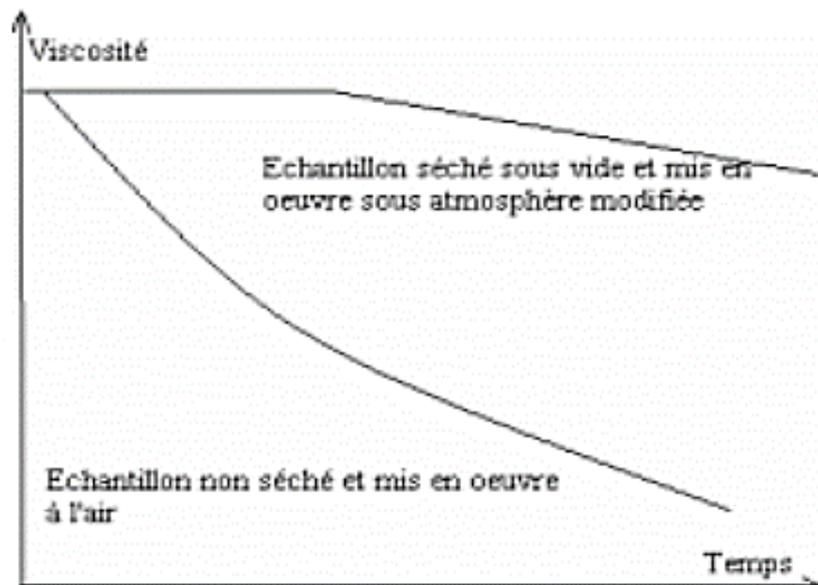


Figure I.11 : Evolution de la viscosité du PET à l'état fondu au cours du temps et en fonction des conditions de mise en œuvre. [20]

I.2.5. Dégradation du PET

Le PET est relativement sensible aux fortes chaleurs ($>250^{\circ}\text{C}$) qui provoquent des réactions de transestérification entre chaînes et des scissions de chaîne d'autant plus importantes que la quantité de catalyseur est importante. A ces réactions de dégradation viennent s'ajouter des décompositions par hydrolyse ou par oxydation dans l'air.

a) Dégradation thermique

Le PET possède, par rapport à nombre de polymères, une bonne tenue thermique ($< 150^{\circ}\text{C}$) permettant son utilisation à chaud (plats pour fours micro-ondes). Cependant à des températures proches ou supérieures à la température de fusion, les dégradations par scission de chaîne augmentent rapidement et suivent le schéma réactionnel suivant [20].

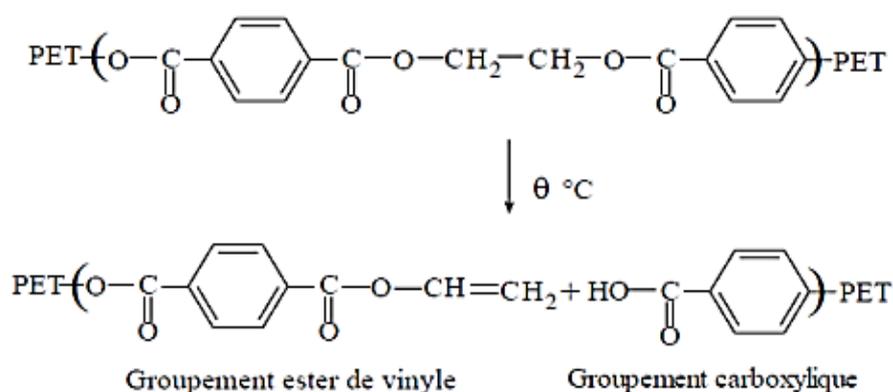


Figure I.12 : Schéma réactionnel de la dégradation du PET par scission de chaîne.[20]

Au cours de cette dégradation, il y a donc formation de fin de chaînes vinyliques qui peuvent réagir avec une fin de chaîne alcoolique pour former de l'acétaldéhyde et une fonction ester entre les deux chaînes de PET. Il y a également formation de fins de chaînes carboxyliques dont l'hydrogène, fortement labile, favorise les réactions d'hydrolyse

b) Dégradation hydrolytique

La sorption d'eau par le PET est relativement faible et dépend fortement du taux de cristallinité et de l'humidité relative. Elle est de l'ordre de 0,5% en général et peut atteindre un maximum de 1,05%. Cependant, le PET est très sensible aux dégradations par hydrolyse, notamment à haute température. En effet, les réactions d'hydrolyse aboutissent à la formation de groupements carboxyles et hydroxyles, qui à leur tour catalysent l'hydrolyse [20].

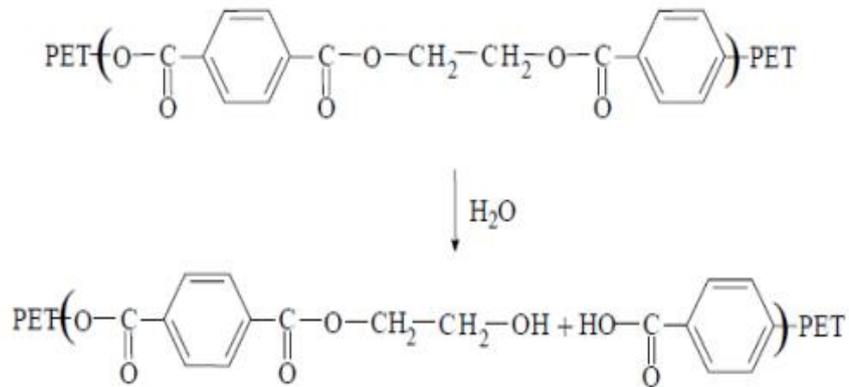


Figure I.13 : Dégradation du PET par hydrolyse. [20]

c) Dégradation thermo-oxydative

La dégradation thermo-oxydative est un processus chimique en boucle fermée qui génère ses propres amorceurs : les hydro peroxydes, formés au niveau des méthylènes et dont la décomposition se traduit par une scission de chaîne homolytique pouvant entraîner une accélération irréversible de la dégradation du matériau.

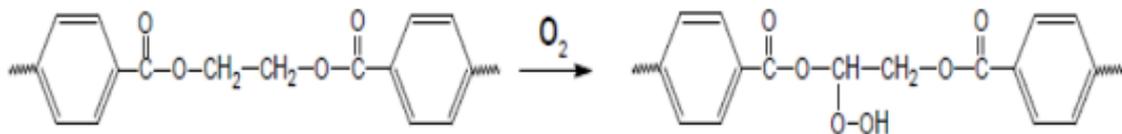


Figure I.14 : Dégradation thermo-oxydative du PET.[20]

Ce processus chimique relativement complexe induit une modification de structure irréversible du matériau, et réduit fortement ses possibilités de mise en œuvre. R. Assadi et al. Et F.P. La Mantia et al. Ont montré que la dégradation thermo-oxydative est la source principale de problèmes lors de la mise en œuvre du PET.

I.2.6. Application du PET

Les principales applications du PET sont comme suit :

- **Textiles** : fils textiles, fibres...etc.
- **Films** : emballage, supports de film photos, ...etc.
- **Corps creux** : bouteilles pour boisson gazeuses, ...etc.
- **Automobiles** : ventilateur, alternateur, poignées de pièces pour circuit d'allumage, etc.

- **Application médicale** : tricot tubulaire pour prothèse vasculaires, prothèse du larynx et de l'œsophage, ...etc.
- **Technologies de pointe** : supports magnétiques, des outils informatiques tels que disquettes bandes vidéo et audio, bandes pour ordinateurs, ...etc.

La principale application hors fibres du PET est la fabrication de bouteilles pour les boissons et l'emballage des produits alimentaires. Sa première application sous forme de bouteilles date de 1984 et depuis cette année, il est devenu le matériau de choix dans le domaine du flaconnage et de l'emballage [19]

I.2.7. Autres utilisations courantes

- Bouteilles recyclables (contrairement au polychlorure de vinyle PVC), le PET est étanche au CO₂, d'où son utilisation pour les bouteilles de limonade et autres boissons effervescentes).
- Rembourrage de peluches et de coussins.
- Fibres textiles dites polaires pour la confection de vêtements (notamment à base de PET recyclé), → Emballages résistant au four.
- Revêtement ajouté sur le papier aluminium pour éviter le contact avec les aliments,
- Lunettes d'observation des éclipses de soleil.
- Films transparents à base coût pour les applications d'optique (écrans LCD, instruments),
- Emballages de jetables de toutes sortes (boîtes pour les salades, plateaux de présentation...etc.).
- Plaques imprimées puis thermoformées pour la fabrication d'enseignes lumineuses [19].

I.3. Recyclage du PET

Au fil des années, le recyclage est devenu à la fois une nécessité écologique et un enjeu économique majeur. L'augmentation constante de l'utilisation d'emballages alimentaires, entre autres, génère une grande diversité de déchets. Ainsi, l'emballage de demain devra être écologique, composé de matériaux recyclés ou provenant de ressources renouvelables et/ou biodégradables/compostables.

Le développement de procédés de transformation pour les matériaux largement utilisés tels que les bouteilles alimentaires revêtent un intérêt majeur. En effet, cela permettra

de résoudre les problèmes environnementaux liés au stockage des déchets tout en contribuant à prolonger de manière significative la durée de vie du matériau [21].

I.3.1. Recyclage et valorisation du PET

Les bouteilles en PET sont produites à partir de dérivés du pétrole. Au niveau mondial, la fabrication de bouteilles en PET requiert chaque année 2,7 millions de tonnes de ce polymère. La nécessité de recycler cette matière est devenue une priorité à cause du coût élevé de la matière première.

Par définition la valorisation est une opération conduisant à la réintroduction d'un déchet dans un circuit de production d'énergie, d'une nouvelle matière, d'un nouvel objet, mais également, de toute opération visant la réutilisation d'un produit fini considéré comme un déchet, dans une application pouvant être différente de celle d'origine [9]

a) Recyclage chimique

Le PET est un polyester qui, du fait de sa structure chimique et de la réactivité particulière des liaisons ester qui le constituent, peut être valorisé chimiquement. Cette valorisation consiste à faire subir au matériau des réactions chimiques amenant la formation d'intermédiaires réactionnels ou de monomères précurseurs du PET (acide téréphtalique, téréphtalate de diméthyle et éthylène glycol) réutilisables. A l'heure actuelle, trois procédés chimiques existent dans le milieu industriel [13]

- La glycolyse :

Le procédé consiste à faire réagir un polyol de faible masse molaire (éthylène ou propylène glycol) avec le PET par alcoolyse. Cette réaction s'effectue à des températures comprises entre 180 et 280 °C, en présence d'un excès de polyol et d'un catalyseur de transestérification

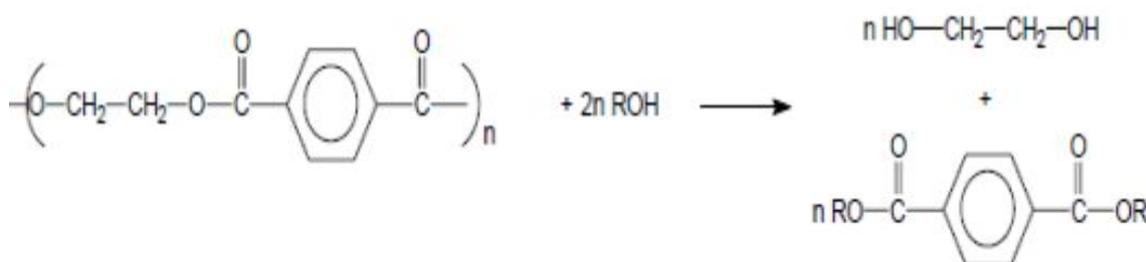


Figure I.15 : Glycolyse du PET. [13]

Les produits obtenus sont des oligomères de téréphtalate d'éthylène glycol tels que le bit hydroxyléthyl téréphtalate (BHET). Ils peuvent ensuite, après traitement, servir pour reformer de nouveaux composés à forte valeur ajoutée [13]

- L'hydrolyse :

Elle consiste en une hydrolyse réalisée en température et sous pression amenant la production de glycol et d'acide téréphtalique de grande pureté. Ces derniers produits peuvent être alors utilisés pour former une nouvelle génération de PET. Ce procédé est actuellement peu utilisé [9].

- La méthanolyse :

Ce procédé provoque la dépolymérisation du PET par réaction de méthanol gazeux sur les chaînes macromoléculaires en présence d'un catalyseur à 185 °C. Cette réaction amène la formation de téréphtalate de diméthyle

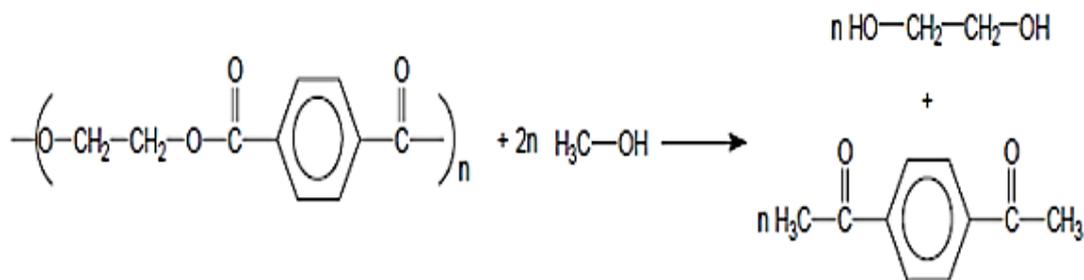


Figure I.16 : Méthanolyse du PET.

Cette dernière méthode reste cependant limitée par les importantes conditions de pureté imposées aux déchets [13]

b) Valorisation énergétique

Comme nous l'avons indiqué précédemment, la valorisation énergétique par incinération consiste à sécher les déchets et à les soumettre à une combustion totale à des températures comprises entre 800 et 1000°C. Elle produit principalement du dioxyde de carbone CO₂ et de l'eau H₂O. Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du PET varie entre 13Mg/Kg (déchets d'emballage) et 45 Mg/Kg (matériau pur), et 29 MJ/Kg pour le charbon, L'énergie dégagée peut donc être récupérée sous forme de chaleur ou d'électricité [13]

c) Recyclage mécanique avec décontamination du PET

Le recyclage matière ou mécanique a pour objectif d'utiliser les matières plastiques usagées pour produire de nouveaux objets. Le processus implique l'identification des différentes sources de déchets plastiques à recycler, leur collecte, leur tri, leur broyage, puis leur régénération. La séparation est nécessaire pour obtenir des lots de matière purifiée qui peuvent ensuite être transformés en produits finis.

Cependant, le recyclage mécanique présente un inconvénient majeur : la présence d'eau et de contaminants dans le matériau pendant la mise en œuvre. Cela peut entraîner ou catalyser des réactions de dégradation responsables de la diminution de la masse molaire de la résine recyclée. Les ruptures de chaînes sont responsables de la diminution de la viscosité du matériau, ce qui entraîne une perte de ses propriétés mécaniques, un jaunissement de la résine et parfois même le blocage de l'extrudeuse en raison de l'oxydation des chaînes dans certaines conditions de mise en œuvre [9].

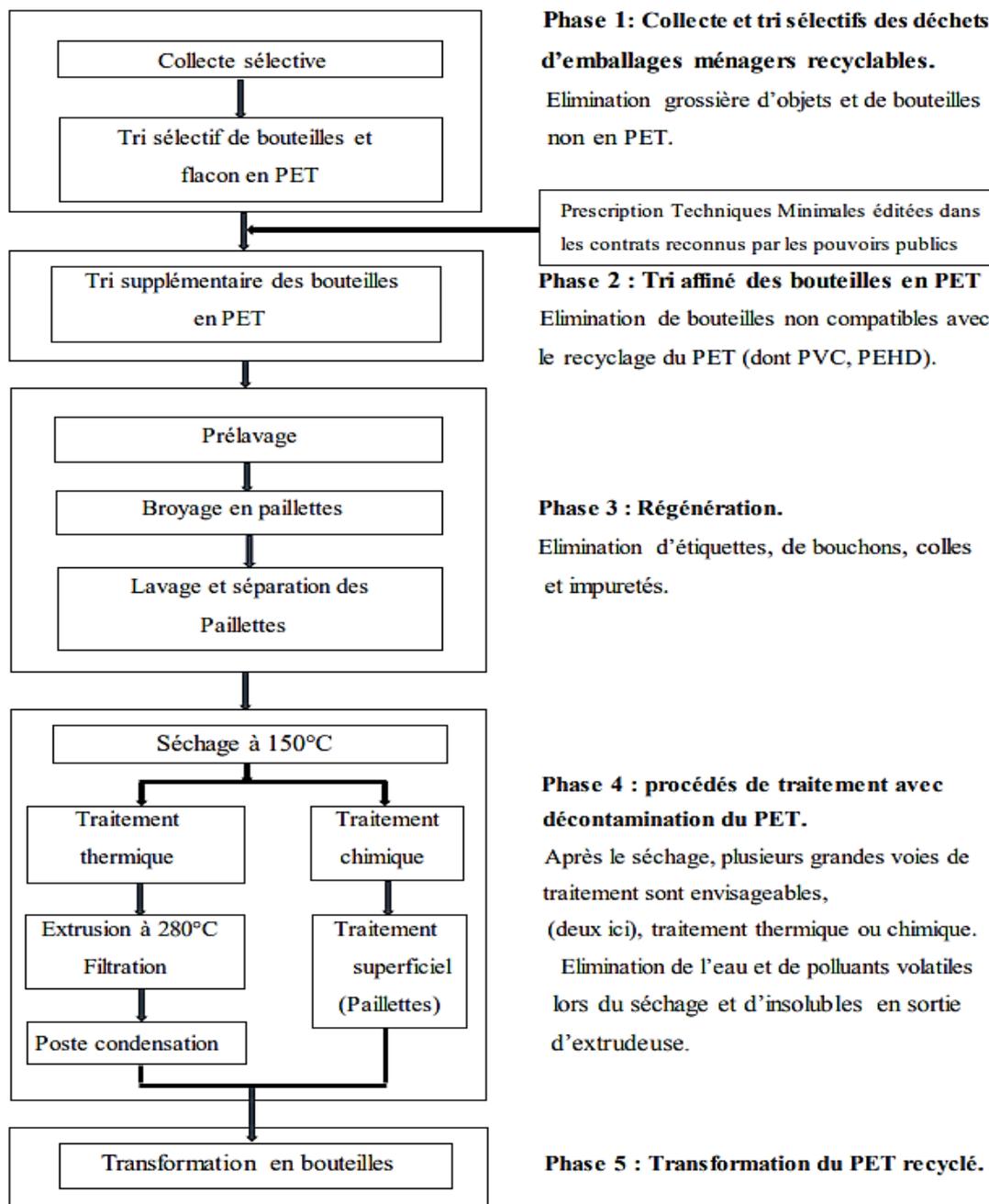


Figure I.17 : différentes étapes du recyclage mécanique des bouteilles en PET [22].

I.3.2. Contaminants du PET recyclé

Malheureusement cette valorisation a ses limites car le matériau concerné (PET) ne peut être indéfiniment recyclé à cause de sa dégradation accélérée par la présence de contaminants. Il perd progressivement ses propriétés physique et chimique, donc réduire au minimum la quantité de ces contaminants mène à améliorer la qualité du PET recyclé. En effet le PET recyclé est contaminé avec divers substances comme des acides, l’eau, ... etc.

- Effet des acides :

Les acides agissent en tant que catalyseurs pour les réactions de scissions de chaînes pendant le procédé de traitement des déchets de PET (dégradation hydrolytique de la fonction ester du PET lors de sa mise en œuvre) [9].

Ces acides sont à l'origine de la dégradation de certains composés.

Cas de chlorure de polyvinyle (PVC)

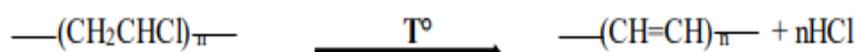


Figure I.18 : La source de l'acide chlorhydrique HCL.

Paci et Lamantia ont étudié l'influence d'une petite quantité de PVC sur le procédé de dépolymérisation de déchets du PET. Ils ont signalé que la présence de 100 ppm de PVC augmente la scission de chaînes du PET. Ceci est dû à l'effet catalytique du chlorure d'hydrogène (HCl) formé pendant la dégradation du PVC. D'après pawlak et al, le taux de PVC présent dans le PET ne doit pas dépasser 50 ppm pour avoir une dégradation hydrolytique négligeable. Torres [26] a étudié les propriétés mécaniques d'un PET recyclé contenant 6000 ppm de PVC et un autre contenant 20 ppm. Les résultats, présentés dans le tableau 4 montrent une diminution de la résistance au choc et de l'élongation à la rupture pour le PET contenant 6000 ppm de PVC. La présence de PVC augmente aussi le taux d'oligomères cycliques lors de la mise en œuvre du PET.

Tableau I.5 : Propriétés mécaniques d'un PET recyclé en fonction du taux de PVC dans la matrice [24].

	Masse molaire initiale	Masse molaire injection	Module d'Young (MPa)	Elongation à la rupture (%)
PET vierge	44000	42200	2140 (±206)	270 (±57)
PET contenant 20 ppm de PVC	44900	37900	2170 (±184)	5,4 (±0,6)
PET contenant 6000 ppm de PVC	47600	31300	1996 (±210)	3,0 (±0,4)

- L'eau

La présence de l'eau dans la matrice PET lors de sa mise en œuvre peut causer des dégradations hydrolytiques très importantes. Le taux d'humidité présent dans la résine PET avant sa transformation à chaud doit être donc minimal.

Il est donc indispensable de sécher efficacement le PET avant son utilisation afin d'obtenir un taux résiduel d'eau limité dans la résine.

I.3.3. Points critiques dans l'évaluation de la chaîne du recyclage

A partir des informations relatives aux modes de collecte et de tri des matières plastiques, les points critiques de la chaîne du recyclage, sur le plan sanitaire, ont été identifiés pour la collecte, le tri, la régénération et la décontamination des matières collectées. La connaissance de tous ces points critique est nécessaire à l'évaluation du risque sanitaire [23].

a) Collecte

Actuellement, parmi les emballages ménagers, seuls les corps creux en PVC, PET, PP et PEHD font l'objet d'une collecte et d'un tri sélectif en vue d'un recyclage. Cependant, il est possible de retrouver dans les containers de collecte sélective d'autres matériaux qui polluent la matière à recycler. Les points critiques sanitaires correspondants sont notamment [23].

- Les bouteilles polluées par des substances non alimentaires.
- Les matériaux non destinés au contact alimentaires, pouvant contenir des additifs non autorisés.
- Des polymères susceptibles de conduire à des produits de dégradation lors de l'extrusion.

b) Tri

Les tris manuels par matière par objet suivis éventuellement d'un tri complémentaire par spectroscopie peuvent laisser des matériaux ne devant en principe pas être intégrés dans le processus de recyclage :

- Une étiquette ou un manchon en PVC sur une bouteille en PET, (ou l'inverse) peut masquer la nature du matériau,
- Les bouteilles multicouches qui comportent une couche externe de PET, ce qui les ferait identifier comme étant intégralement en PET [23].

c) Régénération

Le nettoyage et la purification servent à éliminer des matières autres que le PET, par flottation et par dissolution. Cependant, dans certain cas, l'élimination peut ne pas être efficace et la contamination peut provenir par exemple :

- Des systèmes de fermeture : les matériaux utilisés pour les bague d'inviolabilité, les joints d'étanchéité ou même les bouchons sont séparés par flottation, après broyage des bouteilles. Les polyoléfines sont éliminées de cette façon mais pas le PVC, dont la densité est voisine de celle du PET.
- Des étiquettes : elles sont éliminées par flottation comme pour les systèmes de fermeture,
- Des adhésifs : les colles solubles dans l'eau sont éliminées sans problème. Par contre, les colles thermo fusibles non dispersables en présence de soude aqueuse à 60 ou 80°C peuvent se retrouver dans les paillettes régénérées.
- De la décoration-sérigraphie : les systèmes d'impression directe du PET laissent des encres difficiles à éliminer, qui sont aussi des polluants [22].

I.3.4. Procédés de décontamination du PET

La dérive ou la modification du procédé de décontamination peut introduire une modification du matériau recyclé. L'évaluation sanitaire s'effectuant pour des conditions parfaitement définies du procédé, il importe qu'à tout moment, l'industriel puisse démontrer que son procédé est efficace et n'a pas dérivé [23].

I.3.5. Risques associés à l'utilisation du PET recyclé

Comme pour les matériaux destinés au contact de l'eau et des aliments, le risque associé à l'emploi de PET recyclé est lié à la migration de molécules chimique. Parmi ces substances susceptibles de migrer. On peut distinguer :

- Les constituants usuels du PET : Ils doivent être autorisés par les textes réglementaires sur les matériaux au contact des aliments et satisfaire aux restrictions éventuelles (limites de migration spécifique...etc.).
- Les contaminants occasionnels spécifique au recyclage : d'une part des additifs ou des monomères issus de bouteilles ou de récipients non destinés au contact alimentaires et intégrés aux processus de recyclage et, d'autres part, des polluants issus de l'utilisation impropre d'emballages alimentaires par des consommateurs [22].

I.3.6. Propriétés nécessaires au PET recyclé

Le recyclage mécanique est quant à lui plus limité, parce que la dégradation du polymère pendant la mise en forme n'est pas encore maîtrisée. Le tableau 5 précise les propriétés nécessaires au PET recyclé pour être transformé [25].

Tableau I.6 : Minimum requis pour la transformation à l'état fondu des paillettes de PET recyclé[25].

Propriétés	Valeurs
Viscosité intrinsèque	> 0,7 dl/g
Température de fusion	> 240°C
Taux d'humidité	< 0,02 % en poids
Taille des paillettes	0,4 < D < 8mm
Quantité de colorants	< 10 ppm
Quantité de métaux	< 3ppm
Quantité de PVC	< 50 ppm
Quantité de polyoléfines	< 10 ppm

I.3.7. Domaines d'applications du PET recyclé

Les principales applications du PET issu de ce recyclage et concernant les bouteilles postconsommation sont essentiellement la fabrication de fibres courtes destinées au rembourrage de vêtements ou à l'isolation thermique.

D'autres applications sont en voie de développement :

- Les bouteilles multicouches pour des applications alimentaires,
- Les fibres longues destinées au textile,
- Des feuilles et des plaques destinées au thermoformage,
- Des pièces destinées au secteur de l'électronique et de l'électroménager. Cependant, toutes ces applications ne permettent pas de valoriser l'ensemble des déchets de PET. Aussi, de nombreuses études sont développées pour trouver de nouveaux procédés de recyclage matière.

Les propriétés et caractéristiques moléculaires du PET dépendent énormément de son application. Ainsi la sélection du grade approprié pour telle application est déterminée par la

mesure de sa viscosité intrinsèque, dont la valeur est directement liée à la masse moléculaire du matériau (tableau 7).

Tableau I.7 : Viscosité intrinsèque du PET en fonction de son application [26].

PET		$[\eta](DL/g)$
Fibres	Textiles	0.40-0.70
	Techniques	0.72-0.98
Films	Bi-orientes	0.60-0.70
	Pour thermoformage	0.70-1.00
Bouteilles	Pour eau	0.70-0.78
	Pour boissons gazeuses	0.78-0.85

I.4. Conclusion

En conclusion, les plastiques, y compris le PET (polyéthylène téréphtalate), sont des matériaux polyvalents largement utilisés dans de nombreuses applications en raison de leurs propriétés mécaniques, de leur durabilité, de leur légèreté et de leur facilité de fabrication. Le PET en particulier présente des propriétés mécaniques intéressantes, notamment une résistance à la traction, une rigidité, une ténacité et un faible coefficient de friction.

Le PET présente également des défis en matière de durabilité environnementale, en raison de sa persistance dans l'environnement et de sa faible biodégradabilité. Il est donc essentiel de promouvoir une gestion responsable des déchets plastiques, y compris le recyclage du PET, pour réduire son impact environnemental.

Chapitre II
Technologie d'impression 3D

II.1. Filament 3D

II.1.1. Introduction

L'impression 3D est une technologie accessible et polyvalente qui permet de créer des objets en trois dimensions de manière rapide et flexible. Elle est utilisée dans de nombreux domaines tels que l'industrie, la médecine, l'architecture et l'éducation. Grâce à sa liberté de conception, sa diversité de matériaux et sa capacité à produire des formes complexes, elle ouvre de nouvelles possibilités d'innovation. L'impression 3D contribue à une économie de matière et continue d'évoluer grâce à la recherche et au développement constants.

Le filament 3D est une forme de matière première utilisée dans l'impression 3D. Il s'agit d'un fil en plastique qui est fondu et déposé couche par couche pour construire un objet. Différents types de filaments existent, tels que le PLA, l'ABS, le PETG, le TPU et le nylon, chacun offrant des caractéristiques et des propriétés spécifiques. Le choix du filament dépend des besoins et des exigences de l'objet à imprimer.

II.1.2. Définition de filaments

Le filament d'impression 3D est un matériau en plastique sous forme de fil, utilisé dans les imprimantes 3D pour créer des objets en trois dimensions. Il est chauffé et fondu par l'extrudeuse de l'imprimante 3D, puis déposé couche par couche pour créer l'objet souhaité. Les filaments d'impression 3D sont disponibles dans une grande variété de matériaux, notamment le PLA (acide poly lactique), l'ABS (acrylonitrile butadiène styrène), le PETG (glycol-modifié avec du polyéthylène téréphtalate), le nylon, le TPU (polyuréthane thermoplastique), le PVA (alcool polyvinylique) et bien d'autres encore. Chaque matériau a ses propres propriétés et avantages, tels que la résistance, la flexibilité, la transparence ou la capacité à se dissoudre dans l'eau, ce qui permet une grande variété d'applications pour l'impression 3D.



Figure II.1 : Filament 3D

II.1.3. Types de filament

a) Le PLA (Polylactic Acide)

Filament le plus utilisé dans l'impression 3D par les particuliers, ce type de filament est le plus simple à utiliser. Ce biomatériau composé la plupart du temps d'amidon de maïs possède un impact environnemental réduit comparé à d'autres plastiques comme l'ABS et ne dégage peu voire pas d'odeurs [27].

Tableau II.1 : Caractéristiques, Paramètres d'impression et application de PLA

Caractéristiques Mécanique et thermique	Paramètres d'impression	Applications
Module d'élasticité (T / F) 2500 / 3000 MPA	Température d'impression : 180 – 220°C	Pièces sans contraintes mécaniques
Résistance à la traction 48 MPA	Température du plateau : 0 – 50°C	Ustensiles
Résistance à la flexion 100MPA	Vitesse d'impression : 30 – 100 mm /s	Pièces de décoration
Élongation maximum 3.5%	Ventilation de l'impression : facultative	Pièces de modélisme
		Prototypage Marketing et communication

Résistance aux chocs 4kJ/m ²		
Résistance température 55°C		

Les avantages

Le filament PLA (acide poly lactique) offre plusieurs avantages spécifiques :

- Il s'imprime très facilement, à une température entre 180 et 220° C.
- Possède une forte adhérence inter-couche.
- Se refroidit vite.

Il est idéal pour de nombreuses applications dans l'impression 3D comme l'impression de décorations, d'objets finis, de prototypes, d'ustensiles, de pièces de modélisme.

Les inconvénients

Bien que le filament PLA présente de nombreux avantages, il y a également quelques inconvénients à prendre en compte :

- Il n'est pas adapté à toute l'utilisation.
- Sensible à l'humidité.
- Il n'est ni flexible ni résistant à la chaleur et aura tendance à casser et à ramollir.



Figure II.2 : Filament type PLA. [27]

b) L'ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrène)

Thermoplastique à base de produits pétroliers, ce type de filament sera plus capricieux lorsqu'on voudra l'imprimer. Contrairement au PLA, l'ABS dégage une forte odeur lors de sa fusion, ainsi que des fumées et des particules potentiellement nocives. Il est de ce fait recommandé d'équiper un système de filtration de l'air (ou au moins d'évacuation de l'air vers l'extérieur). [27]

Sans tenir compte de l'impression 3 D, l'ABS est très présent dans notre vie de tous les jours. De par ses qualités, nous le trouvons par exemple dans des jouets, des plastiques de voitures, des casques de sécurité, des appareils électroménagers...

Tableau II.2 : Caractéristiques, Paramètres d'impression et application de L'ABS

Caractéristiques Mécanique et thermique	Paramètres d'impression	Applications
Module d'élasticité (T / F) 1700 / 2200 MPA	Température d'impression : 230 – 250° C	Pièces subissant des contraintes mécaniques
Résistance à la traction 35Mpa	Température du plateau : 80 – 100° C	Pièces fonctionnelles / d'usage courant
Résistance à la flexion 60Mpa	Vitesse d'impression : 30 – 100 mm/s	Pièces de modélisme / RC
Résistance aux chocs 11 kJ/m ²	Ventilation de l'impression : néfaste pour l'impression	Prototypes fonctionnels
Résistance température 85°C		

Les avantages

L'ABS (acrylonitrile butadiène styrène) est un matériau d'impression 3D largement utilisé qui offre plusieurs avantages :

- possède une très grande résistance aux chocs
- Il ne se cassera pas facilement et aura tendance à se plier plutôt qu'à se rompre.

- résiste à des températures plus hautes que le PLA, se ramollissant aux alentours de 100°C.
- Il s'agit d'un matériau durable, qui ne se dégradera pas facilement avec le temps et les conditions climatiques pour un usage extérieur
- très résistant à l'abrasion ainsi qu'aux contraintes mécaniques.

Les inconvénients

L'ABS présente également quelques inconvénients :

- Très capricieux.
- Nécessite un plateau chauffant aux environs de 80 à 100°C.
- L'ABS doit se refroidir le plus lentement possible pour éviter qu'il ne se rétracte et que la pièce imprimée se déforme ou se décroche du lit chauffant.



Figure II.3 : Filament type ABS. [27]

c) Le HIPS (high-impact polystyrene)

Le HIPS est un copolymère issu de polybutadiène et de styrène. Ce type de filament, s'imprimant à assez haute température, pourra être capricieux lors de son impression. Contrairement au PLA, le HIPS peut dégager une odeur lors de sa fusion, ainsi que des fumées et des particules potentiellement nocives. Il est de ce fait recommandé d'équiper un système de filtration de l'air (ou au moins d'évacuation de l'air vers l'extérieur) [27].

Tableau II.3 : Caractéristiques, Paramètres d'impression et application de HIPS

Caractéristiques Mécanique et thermique	Paramètres d'impression	Applications
Module d'élasticité (T / F) 1550 / 1500 MPA	Température d'impression : 220 – 250°C	Support soluble avec ABS
Résistance à la traction 22Mpa	Température du plateau : 80 – 110°C	Pièces subissant des contraintes mécaniques
Résistance à la flexion 35Mpa	Vitesse d'impression : 40 – 90 mm /s	Pièces fonctionnelles / d'usage courant
Élongation maximum 20%	Ventilation de l'impression : désactiver au moins pour le début de l'impression	Pièces de modélisme / RC Prototypes fonctionnels
Résistance aux chocs 15kJ/m ²		
Résistance température 85°C		

Les avantages

Le HIPS (High Impact Polystyrène) est un matériau d'impression 3D qui présente plusieurs avantages :

- possède une très grande résistance aux chocs, plus que l'ABS.
- Il Nécessitant une assez haute température d'impression, le HIPS résiste à des températures plus hautes que le PLA, se ramollissant aux alentours de 90-100°C.
- ce matériau est soluble dans certains produits, comme le D-Limonène ou encore l'essence de térébenthine! Cette solubilité permet de réaliser des supports complexes sur des pièces en ABS, à condition d'avoir une imprimante double extrusion bien sûr. Il suffira de laisser tremper la pièce dans le produit un certain temps pour qu'il se ramollisse. Attention tout de même, ces produits ne sont pas sans risque.
- se ponce, coupe et perce parfaitement bien, ce qui facilitera grandement les post-traitements

Les inconvénients

Le HIPS présente également quelques inconvénients :

- la température nécessaire à son impression : entre 220 et 250°C.



Figure II.4 : Filament type HIPS. [27]

d) Le PETG (polyéthylène téréphtalate)

Le PETG, dérivé du PET (Poly méthacrylate d'éthylène) est un plastique pétro-sourcé possédant de grande qualité. Grand concurrent de l'ABS, il est tout aussi résistant que lui tout en s'imprimant presque aussi facilement que le PLA et en ne relâchant presque aucune odeur [27].

Tableau II.4 : Caractéristiques, Paramètres d'impression et application de PETG

Caractéristiques Mécanique et thermique	Paramètres d'impression	Applications
Module d'élasticité (T / F) 1600 / 2000 Mpa	Température d'impression : 190 – 240° C	Coques
Résistance à la traction 45Mpa	Température du plateau : 0 – 100° C	Pièces en contact avec l'eau
Résistance à la flexion 65Mpa	Vitesse d'impression : 20 – 50 mm/s	Eléments antichoc / anti-bruit
Résistance aux chocs 8kJ/m ²	Ventilation de l'impression : faible	Pièces effet caoutchouc
Résistance température 80°C		Prototypes fonctionnels Bijoux

Les avantages

- Facilité d'utilisation
- Résistance mécanique
- Résistance aux chocs
- Résistance à la chaleur
- Résistance à l'humidité
- Résistance aux produits chimiques

Les inconvénients

La température d'impression assez élevée comprise entre 220 et 260°C et la nécessité d'avoir un lit chauffant pour optimiser l'accroche, le PETG ne possède pas spécialement d'inconvénients. C'est le nouveau PLA, en plus résistant !



Figure II.5 : filament type PETG. [27]

e) Le Nylon (poly hexaméthylène adipamide)

Le Nylon est un thermoplastique polyamide très utilisé dans l'industrie automobile, médicale et alimentaire [27].

Tableau II.5 : Caractéristiques, Paramètres d'impression et application de Nylon

Caractéristiques Mécanique et thermique	Paramètres d'impression	Applications
Module d'élasticité (T / F) 850 / 1900 MPA	Température d'impression : 230 – 260°C	Prototypes fonctionnels
Résistance à la traction 37Mpa	Température du plateau : 60°C	Pièces fonctionnelles
Résistance à la flexion 35Mpa	Vitesse d'impression : 30 – 70 mm /s	Pièces mécaniques
Élongation maximum >20%	Ventilation de l'impression : moyenne	Pièces à frottement Outillage
Résistance aux chocs 8kJ/m ²		
Résistance température 70°C		

Les avantages

Le nylon est un matériau durable et résistant aux impacts, à la friction, à l'abrasion, à la corrosion et aux produits chimiques, il est parfait pour réaliser des pièces subissant des frottements ou de fortes contraintes mécaniques.

Les inconvénients

Ils possèdent aussi quelques inconvénients :

- Le filament Nylon, comme le TPU, est un filament technique.
- Pour l'imprimer il faudra veiller à une bonne stabilité de la température de la zone d'impression. Un caisson sera donc indispensable.
- Comme tous les filaments thermoplastiques, le Nylon dégage des particules et des fumées qu'il faudra filtrer / évacuer.

- Enfin, le Nylon est très sensible à l'humidité ! Il ne faudra donc pas laisser vos impressions dans un milieu humide et stocker vos bobines entamées dans un endroit sec.



Figure II.6: Filament type NYLON. [27]

f) Le Polycarbonate (PC)

Le polycarbonate est le thermoplastique le plus résistant disponible couramment. Phares de voitures, Carter d'appareils électroménagers, verres de lunettes, vitres de serres, CD et DVD sont quelques utilisations de ce thermoplastique dans l'industrie actuelle, appréciées pour sa grande résistance et sa transparence [27].

Tableau II.6 : Caractéristiques, Paramètres d'impression et application de Polycarbonate

Caractéristiques Mécanique et thermique	Paramètres d'impression	Applications
Module d'élasticité (T / F) 2000 / 2300 MPA	Température d'impression : 260 – 300° C	Prototypes fonctionnels Pièces d'usages Pièces mécaniques
Résistance à la traction 60/ 63 MPA	Température du plateau : +110° C	
Résistance à la flexion 95 / 100 Mpa	Vitesse d'impression : 30 – 70 mm/s	
Résistance aux chocs 4 kJ/m ² / 15 kJ/m ²	Ventilation de l'impression : aucune	
Résistance température		

10°C / 110°C		
--------------	--	--

Les avantages

Le polycarbonate (PC) est un matériau d'impression 3D couramment utilisé qui présente plusieurs avantages :

- très grande solidité et résistance aux chocs qui permet de l'utiliser pour des applications fonctionnelles.
- Résistant à la chaleur, les objets imprimés pourront résister à des températures pouvant aller jusqu'à environ 140°C.
- possède une très grande transparence.

Les inconvénients

Le polycarbonate (PC) présente également quelques inconvénients :

- extrêmement complexe à imprimer de par la température d'extrusion nécessaire.
- très sensible au changement de température qui provoque un décollement des différentes couches.
- réservé aux personnes expérimentées possédant le matériel approprié.



Figure II.7: Filament type PC. [27]

II.2. Imprimante 3D

II.2.1. Définition de l'imprimante 3D

L'impression 3D est une technique de fabrication dite additive qui procède par ajout de matière, contrairement aux techniques procédant par retrait de matière comme l'usinage. L'impression 3D permet de réaliser des objets usuels, des pièces détachées ou encore des

prototypes destinés aux essais. Le point de départ est un fichier informatique représentant l'objet en trois dimensions, décomposé en tranches. Ces informations sont envoyées à une imprimante 3D qui va réaliser la fabrication par ajout de couches successives. [29]



Figure II.8: exemple d'une imprimante 3d. [29]

II.2.2. Historique

Voici une brève histoire de l'impression 3D, se focalisant principalement sur les évolutions technologiques :

C'est le 16 juillet 1984 que le 1er brevet sur l'impression 3D (dite « fabrication additive ») est déposé. Les dépositaires sont français : Jean-claude André, Olivier de Witte, et Alain le Méhauté pour le compte de l'entreprise CILAS ALCATEL. La même année, aux Etats-Unis, le 1er août 1984, c'est l'américain Chuck Hull qui dépose le brevet sur la technique d'impression 3D de stéréolithographie (SLA pour StéréoLithographie Apparatus). Ce brevet donnera non seulement le nom de l'extension du fichier d'impression. stl, mais donnera aussi naissance à une entreprise leader : 3D Systems, géant de la fabrication d'imprimantes 3D. 3D Systems lancera fin 1988 la première imprimante 3D, la SLA-250.

En 1987, le procédé de frittage laser sélectif (ou SLS pour Sintering Laser System) est inventé par l'entreprise DTM corp. Ce nouveau procédé de fabrication additive consiste en la fabrication couche par couche de poudres polymères par frittage laser.

En 1988, une autre entreprise américaine, la société Stratasys fondée par Scott Crump, lance sur le marché une nouvelle technologie reposant elle aussi sur le dépôt couche par couche en fabrication additive : le procédé FDM pour Fused Deposition Modeling ou

dépôt de fil fondu en français. Cette technique donnera naissance par la suite aux imprimantes domestiques personnelles telles que nous les connaissons aujourd'hui.

En 1995, c'est la technologie d'impression 3D métallique ou DMLS (Direct Metal Laser Sintering) qui fait son apparition. La technologie est similaire à celle du frittage laser sélectif mais adaptée aux métaux, avec un laser encore plus puissant.

En 2003, la société MCor technologies présente un nouveau procédé, le 3DPP (3D Paper Printing). L'impression 3D utilise du papier de format A4 agrégé en couches successives avec une colle spéciale, et couplé avec une lame en pointe de tungstène pour couper la forme.

En 2005 la société ZCorporation lance la première imprimante couleur, fonctionnant sur le même principe de quadrichromie que les imprimantes 2D couleurs que nous connaissons. L'impression sur la hauteur en couches successives est rendue possible grâce à une matière de type minérale agrégée par un liant de colle.

En 2006 apparaît pour la première fois un projet d'imprimante 3D open source qui ouvrira la voie aux futures imprimantes domestiques : le projet RepRap a été initié dès 2004 par le Dr Adrian Browyer alors professeur en génie mécanique de l'Université de Bath au Royaume-Uni. L'idée à la base de ce projet est de pouvoir construire par soi-même une imprimante 3d en technologie de dépôt de fil fondu. C'est le début de ce qu'on a pu appeler par la suite le mouvement Makers.

À partir de 2011, on voit apparaître des initiatives dans l'impression 3D alimentaire. C'est le cas avec l'impression 3D en sucre rendue possible par des machines fabriquées par exemple par la société américaine The Sugar Lab, rachetée en 2013 par le géant 3D System. En 2012 la firme anglaise Choc Edge lance la première imprimante 3D chocolat.

En 2014, l'évolution technologique s'attaque à la contrainte de la taille. La société chinoise Win Su annonce fabriquer des maisons en impression 3D, à bas prix. Le secteur de la construction et de l'immobilier s'intéresse de près à ces nouvelles technologies permettant notamment la conception 3D et production de formes difficiles à produire dans des process de construction traditionnels.

En 2015 la société Carbon3D annonce une nouvelle technologie révolutionnaire permettant de multiplier par 7 la rapidité en impression 3D. Baptisée CLIP, la technologie sur

l'utilisation de résine, lumière et d'oxygène pour polymériser l'objet. Ce principe constitue une avancée importante dans le monde de la fabrication additive. Les premières imprimantes 3D sont attendues sur le marché en 2016. Début 2015 c'est aussi Hewlett Packard (HP) qui annonce se positionner sur le marché des imprimantes 3D professionnelles avec une technologie brevetée appelée Multi jet Fusion. Le géant de l'impression souhaite entrer sur le marché avec un procédé mixant les technologies d'impression multicolore et de frittage, ce qui constituerait une révolution dans le secteur. La commercialisation aura aussi lieu courant de l'année 2016, année qui s'annonce charnière dans l'histoire encore courte mais en mouvement perpétuel de l'impression en 3D [30].

II.2.3. Types d'imprimantes 3D

a) Types d'imprimantes 3D selon les technologies d'impression

Les types d'imprimantes 3D sont très nombreux, et peuvent être classés selon différents critères [31].

1/ Famille principale

Les imprimantes 3D pourraient être classées principalement en Groupes 3 :

Encre : il ne s'agit pas d'une encre courante, mais d'un composé en poudre tel que la cellulose ou le plâtre. L'imprimeur construira le modèle à partir de ce conglomerat de poussière.

Laser/LED (optique) : est la technologie utilisée dans les imprimantes 3D à résine. Ils contiennent essentiellement un liquide dans un réservoir et sont soumis à une exposition au laser pour solidifier la résine et à un durcissement UV pour durcir. Cela rend le résine (photopolymère à base d'acrylique) se transforme en une pièce solide avec la forme nécessaire.

Injection : sont ceux qui utilisent principalement filaments (généralement thermoplastiques) tels que PLA, ABS, Tuvalu, nylon, etc. L'idée derrière cette famille est de créer des formes par dépôt de couches fondues de ces matériaux (ils peuvent être très variés). Le résultat est une pièce robuste, bien que plus lente et avec moins de précision que le laser.

2/ Imprimantes 3D résine et/ou optique

Ils sont parmi les plus sophistiqués et avec les meilleurs résultats dans leurs finitions, ils sont aussi généralement beaucoup plus chers

SLA (Stéréolithographie)

SLS (Frittage Laser Sélectif)

DLP (traitement numérique de la lumière)

MSLA (SLA masqué)

DMLS (frittage laser direct de métal)

3/ Extrusion ou dépôt (injection)

Lorsque nous parlons de la famille d'imprimantes qui utilisent techniques de dépôt en utilisant des extrudeuses de matériaux, on peut différencier les technologies suivantes :

FDM (modélisation de dépôt fondu)

FFF (fabrication de filaments fondus)

b) Types d'imprimantes 3D selon les matériaux

Une autre façon de cataloguer les imprimantes 3D consiste au type de matériel sur lequel ils peuvent imprimer

1/ imprimantes 3D métal

Au cours des dernières années, l'industrie de la fabrication additive a pu constater une nette progression de l'impression 3D métal, que ce soit au niveau de l'offre ou de la demande.

Parmi Les poudres métalliques les plus courantes utilisées en fabrication additive sont :

- Acier inoxydable (différents types)
- Acier à outils (avec une composition de carbone différente)
- Alliages de titane.
- Alliages d'aluminium.



Figure II.9 : imprimante 3D métal X de markforged. [31]

2/ Imprimantes alimentaires 3D

Il est de plus en plus fréquent de trouver Des imprimantes 3D pour faire de la nourriture en utilisant des méthodes de fabrication additive. Dans ce cas, certains des plus courants sont :

- Composants fonctionnels (prébiotiques, probiotiques, minéraux, vitamines, acides gras, phytochimiques et autres antioxydants).
- Fibre.
- Graisses
- Différents types de glucides, comme la farine et le sucre.



Figure II.10 : imprimante 3D alimentaires. [31]

3/ Imprimantes 3D plastique : L'un des matériaux les plus utilisés pour l'impression 3D, en particulier pour les imprimantes 3D domestiques, est les polymères : Les plastiques comme le PLA, l'ABS, le PET, le PC, etc.

c) Selon les usages

1/ Imprimantes 3D industrielles

Les imprimantes 3D industrielles Il s'agit d'un type d'imprimante très particulier. Ils disposent généralement de technologies avancées, en plus d'être de taille considérable et d'un prix de plusieurs milliers d'euros. Ils sont destinés à un usage industriel, pour être fabriqués rapidement, précisément et en grande quantité. Et ils peuvent être utilisés dans des secteurs tels que l'aéronautique, l'électronique et les semi-conducteurs, la pharmacie, l'automobile, la construction, l'aérospatial, le sport automobile, etc.

2/ Grandes imprimantes 3D

Il existe des modèles conçus pour une utilisation en dehors de l'industrie, comme certaines imprimantes capables d'imprimer de grandes pièces pour les fabricants qui en ont besoin, pour les petites entreprises.

3/ Imprimantes 3D pas chères

Ces imprimantes sont destinées à un usage privé, comme les bricoleurs ou les makers, ou pour certains indépendants qui ont besoin de créer certains modèles de façon ponctuelle. Mais ils ne sont pas conçus pour créer de grands modèles, ni massivement ni rapidement. Et, pour la plupart, ils sont fabriqués avec du filament de résine ou de plastique [31].

II.2.4. Fonctionnement d'une imprimante 3D

L'impression 3D fonctionne selon plusieurs procédés, qui diffèrent selon la technologie et le type d'imprimante 3D utilisée. On peut classer ces procédés dans trois grands groupes :

- Le dépôt de matière
- La solidification par la lumière
- L'agglomération par collage

Ces trois procédés fonctionnent selon le même principe de base, c'est à dire superposer des couches de matières selon les coordonnées XYZ d'un fichier 3D. La différence se situe sur la manière dont sont déposées et traitées ses couches, ainsi que le type de matériau utilisé [32].

Pour la plupart des procédés employés l'utilisateur a besoin :

- D'une imprimante 3D
- De consommable (filament, poudre...)
- D'un fichier 3D (le plus souvent au format STL ou OBJ)
- D'un logiciel de slicing pour trancher le fichier et transmettre les indications à l'imprimante
- D'un ordinateur

La manière d'exporter les fichiers vers l'imprimante diffère selon les marques et les modèles : câble USB, Wi-Fi ou carte SD [33].

II.2.5. Les avantages des imprimantes 3D

Les imprimantes 3D présentent plusieurs avantages intéressants rien qu'en se servant de quelques matériaux pour la fabrication d'objets 3D couche par couche. Aussi, voici les avantages qu'offre une imprimante 3D à son utilisateur :

Une précision accrue : Les imprimantes 3D ont la capacité de produire des pièces avec une grande précision. Cela est dû à la structure couche par couche de l'impression 3D, qui permet un contrôle très précis de l'emplacement du matériau.

Une vitesse accrue : L'impression 3D est beaucoup plus rapide que les méthodes de fabrication traditionnelles, comme l'usinage ou le moulage par injection

Une efficacité accrue : L'impression 3D est un procédé de fabrication très efficace, car elle minimise les déchets et la consommation d'énergie.

Une production accrue : La technologie d'impression additive est capable d'imprimer plusieurs pièces et/ou objets 3D à la fois. L'impression 3D élimine le besoin d'outillage et le temps de préparation associés aux processus de fabrication traditionnels

L'impression 3D peut être utilisée pour créer des pièces personnalisées à la demande. Ainsi, les coûts d'inventaire et les délais associés aux méthodes de fabrication traditionnelles sont réduits [34].

II.2.6. Les limites d'une imprimante 3D

En plus des avantages, les imprimantes 3D présentent toutefois des limites et des inconvénients :

Coûts initiaux élevés : Les coûts initiaux d'acquisition d'une imprimante 3D peuvent être prohibitifs, surtout pour les petites entreprises et les particuliers.

Limitations de taille : Les imprimantes 3D ont des limites de taille pour la production d'objets, ce qui peut limiter la production de certains types d'objets.

Finition de surface : Les pièces imprimées en 3D peuvent avoir des finitions de surface irrégulières qui nécessitent souvent une post-production pour être lisses et uniformes.

Qualité : La qualité des pièces imprimées en 3D peut être inférieure à celle des pièces produites par les méthodes traditionnelles, en particulier pour les objets de grande taille.

Matériaux limités : Bien que l'impression 3D offre une grande variété de matériaux, certains matériaux plus avancés peuvent être coûteux et difficiles à trouver [34].

II.3. L'impression et le PETG

II.3.1. Définition

Le PETG est le copolymère le plus connu et le plus utilisé dans le monde de l'impression 3D. Son apparition est due à la combinaison du PET et du glycol, ce qui améliore les propriétés intéressantes du PET avec un processus de glycol [35].

II.3.2. Réussir son impression en PETG

L'impression du filament PETG est relativement simple et accessible à tous. Ce matériau technique doté de propriétés mécanique, chimique et thermique supérieur au PLA ne nécessite pas d'imprimante 3D plus performante ou puissante [35].

a) Sélection des paramètres d'impression

1. Température de la buse

La température de la buse pour l'impression 3D avec du PETG varie généralement entre 220 et 250 degrés. Gradé en tête que la température de la buse dépend de plusieurs facteurs, tels que la qualité du filament utilisé, les conditions d'impression et les paramètres d'impression. N'oubliez pas de vérifier les indications du fabricant et comme toujours réalisé des tests de températures.

2. Vitesse d'impression

La vitesse d'impression pour l'impression 3D varie entre 30 et 60 millimètres par seconde. Il est important de noter que la vitesse d'impression optimale dépend aussi de la complexité de la forme de l'objet, de la qualité de surface souhaitée et de la stabilité de la machine d'impression. Vous pouvez sans risque accéder l'impression de vos couches internes sans risque de réduire la beauté de la pièce.

3. Plateau d'impression

Il n'est pas obligatoire d'utiliser un plateau chauffant pour le PETG mais cela est néanmoins fortement recommandé. Il faut régler le plateau à une température proche du point de transition vitreuse soit environ 70 à 75 degrés. Même s'il est rare d'avoir du warping sur votre création en PETG vous pouvez appliquer des solutions adhésives.

4. Rétraction du PETG

Le PETG est très soumis au stringing. Il faut donc paramétrer une bonne rétraction sur votre Slicer. Nous recommandons 7 mm en bowden et 4mm en direct drive. Attention la température de traitement et les paramètres de refroidissement vont jouer sur ce paramètre.

5. Ventilation du PETG

La ventilation est un paramètre important lors de l'impression du PETG, car elle va aider à améliorer la qualité de la pièce. Cela peut aider à réduire la formation de cordes et de bavures sur la surface de votre pièce. Activer le ventilateur à partir d'une hauteur de couche de 3 mm ou 4 mm, afin de laisser le temps au matériau de se stabiliser avant d'appliquer de la ventilation.

Ensuite réglé la vitesse du ventilateur à environ 50% à 75% de la vitesse maximale. Des vitesses plus élevées pourraient risquer de provoquer du warping. Si votre pièce a des détails fins, il est recommandé de diminuer la vitesse de ventilation [36].

b) Post-traitement et finition

Les post-traitements et les finitions les plus couramment sont :

Peinture : Évidemment le PETG peut être peint pour améliorer l'apparence et les propriétés de couleur de l'objet imprimé en 3D. Il est important de choisir une peinture compatible avec le PETG pour obtenir les meilleurs résultats. La peinture acrylique à base d'eau est un choix courant, car elle adhère bien au matériau et sèche rapidement. Vous pouvez aussi la peinture en aérosol, à condition de choisir une peinture compatible avec le PETG

Polissage : Vous pouvez poncer vos objets en PETG pour lisser la surface. Utilisez du papier de verre à grain fin, comme du 800 ou 1000, pour poncer légèrement la surface de

la pièce et du 1500 ou 2000, pour poncer la surface de la pièce plus en profondeur. Attention le ponçage du PETG peut laisser des marques.

Traitement thermique : Le PETG peut être soumis à un traitement thermique pour améliorer les propriétés mécaniques de l'objet imprimé en 3D. Il est important de consulter les instructions du fabricant pour savoir si un traitement thermique est recommandé pour le PETG au risque d'endommager votre création.

Kit de lissage : Comme pour d'autres matières imprimables en 3D vous pouvez appliquer un kit de lissage à base de résine.

Les imprimantes 3D présentent de nombreux avantages, notamment une précision, une vitesse, une efficacité et une productivité accrue. Cependant, elles présentent également certains inconvénients, comme le nombre limité de matériaux, de couleurs, de tailles et de formes. Également, cette technologie peut être difficile à maîtriser. Cependant, cette technologie d'impression additive est une technique incontournable qui apporte une énorme révolution dans le secteur de fabrication [36].

Le PETG est un matériau d'impression 3D très populaire en raison de ses nombreux avantages. Il offre une transparence, une résistance à l'eau, une résistance aux impacts, une flexibilité, une facilité d'impression et un coût attractif. Cependant, il présente également quelques inconvénients. Le PLA peut être considéré comme un matériau intermédiaire entre le PLA et l'ABS. Il est donc important de prendre en compte les avantages et les inconvénients avant de décider d'utiliser le PETG pour une application spécifique. Si vous souhaitez vous former à l'impression 3D avec du PETG, notre formation pourrait vous intéresser [36].

II.4. Conclusion

En conclusion, le filament 3D est une composante essentielle de l'impression 3D. Il s'agit d'un fil en plastique utilisé comme matière première pour construire des objets couche par couche. Les différents types de filaments disponibles offrent une variété de propriétés et de caractéristiques, ce qui permet de répondre aux besoins spécifiques de chaque projet d'impression 3D. Que ce soit pour des prototypes, des pièces fonctionnelles ou des créations artistiques, le choix du filament approprié joue un rôle crucial dans la qualité et les performances de l'objet final.

Chapitre III

Dimensionnement de la machine

III.1. Introduction

L'impression 3D est une technologie révolutionnaire qui permet de créer des objets tridimensionnels à partir de modèles numériques. L'un des éléments clés de cette technologie est le filament, qui est le matériau de base utilisé pour construire les objets imprimés en 3D.

La fabrication de filament 3D consiste à transformer des matières premières en filament de qualité, prêt à être utilisé dans une imprimante 3D. Il existe différents types de filaments utilisés dans l'impression 3D, tels que le PLA (acide poly lactique), l'ABS (acrylonitrile butadiène styrène), le PETG (polyéthylène téréphtalate glycol), le nylon, etc. Chaque matériau a ses propres caractéristiques et propriétés d'impression.

La qualité du filament 3D est d'une importance capitale pour obtenir des impressions 3D précises et de haute qualité. Les fabricants de filament effectuent généralement des contrôles de qualité rigoureux pour s'assurer que le diamètre du filament est uniforme, que la composition est conforme aux spécifications et qu'il n'y a pas de défauts tels que des bulles ou des impuretés.

III.2. Objectif de projet

L'objectif de ce projet est de concevoir et de construire une machine d'extrusion qui fabrique des filaments d'impression 3D à partir de bouteilles d'eau. L'application vise à rendre l'impression 3D durable et économique pour toutes les entreprises utilisant cette technologie dans un pays en développement. Cette confection est une machine simple et robuste qui prend des déchets de bouteilles en plastique en polyéthylène téréphtalate (PET), les fait fondre, les mélange, puis les extrude sous forme de filament homogène. Bien que le PET soit difficile à recycler, il a été choisi pour notre projet car il est le plastique de déchets le plus couramment disponible en Algérie. Nos exigences de conception et les détails sont discutés plus dans le chapitre.

III.3. Les composants de la machine

III.3.1. Moteur et vis sans fin

a) Moteur

Le moteur est conçu pour générer la puissance et le couple nécessaires à l'entraînement de la vis sans fin. Cette fonction est cruciale car le couple fournit la force nécessaire pour pousser le plastique le long de la chambre, et la vitesse du moteur règle la vitesse d'extrusion du filament à travers la buse. Pour contrôler la vitesse du moteur, un système de réduction est utilisé, ce qui sera expliqué plus en détail dans la suite.

Puisque le moteur et la vis sans fin sont connectés, ils sont Co-dépendants et contribuent tous deux à la vitesse et à la force disponibles pour pousser le plastique à travers la chambre.

Les résultats sont affichés dans un tableau ci-dessous.

Le couple nécessaire a été calculé à l'aide de l'équation :

$$c = F \times L \quad 1$$

Le paramètre (C) est le couple (Nm), F est la force en action (N), L est la longueur de la chambre.

$$F = \frac{A \times \mu \times \Delta v_x}{\Delta_y} \quad 2$$

Où A est la section de la vis sans fin (m²), μ est la viscosité du PET (Pa.s), Δv_x est la vitesse tendancielle (m/s), Δ_y profondeur du canal (m)

Pour choisir le bon moteur il fallait calculer la puissance électrique :

$$P_a = P_u \times \eta \quad 3$$

P_a c'est la puissance absorbée par le moteur, P_u c'est la puissance mécanique transmise sur l'arbre du moteur, η le rendement (%)

$$P_u = C \times \omega \quad 4$$

$$\omega : \text{vitesse angulaire } \omega = \frac{2\pi N}{60}$$

Les résultats sont affichés dans le tableau ci-dessous :

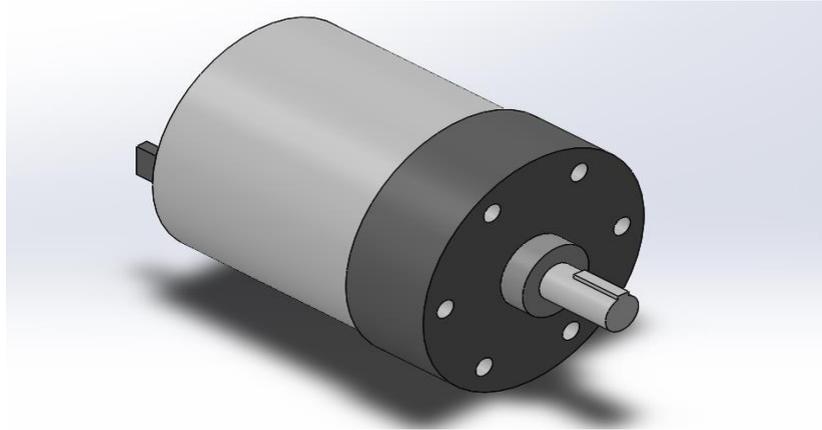


Figure III.1 : Moteur d'entraînement

Tableau III.1 : Paramètre de moteur

Symboles	Paramètres	Unités	Valeurs
C	Le couple	Nm	5
P_a	Puissance absorbé	W	11,07
P_u	Puissance utile	W	7.75
ρ	Le rendement	%	0,7
N	Vitesse de rotation	Tr/min	1200
μ	La viscosité	Pa.s	0.4
A	La surface de la vis	M ²	18,94
Δv_x	La vitesse tendancielle	M/s	0.015
Δ_y	Profondeur du canal	M	0,003
ω	Vitesse angulaire	Ras/sec	1,2566

Le system de réduction est compose d'un system polie courroie et un system a 2 engrenages.

Ce system était choisi pour minimiser le volume de la machine le plus possible

Tableau III.2 : polie-courroie/engrenages

Polie-courroie	Engrenages	
$N_e=1200\text{Tr/min}$ $N_s=240\text{Tr/min}$ $D_e=10\text{mm}$ $D_s=50\text{mm}$	$N_e=240\text{Tr/min}$ $N_s=48\text{Tr/min}$	$Z_e=10\text{dents}$ $Z_s=50\text{dents}$
	$N_e=48\text{Tr/min}$ $N_s=12\text{Tr/min}$	$Z_e=10\text{dents}$ $Z_s=40\text{dents}$

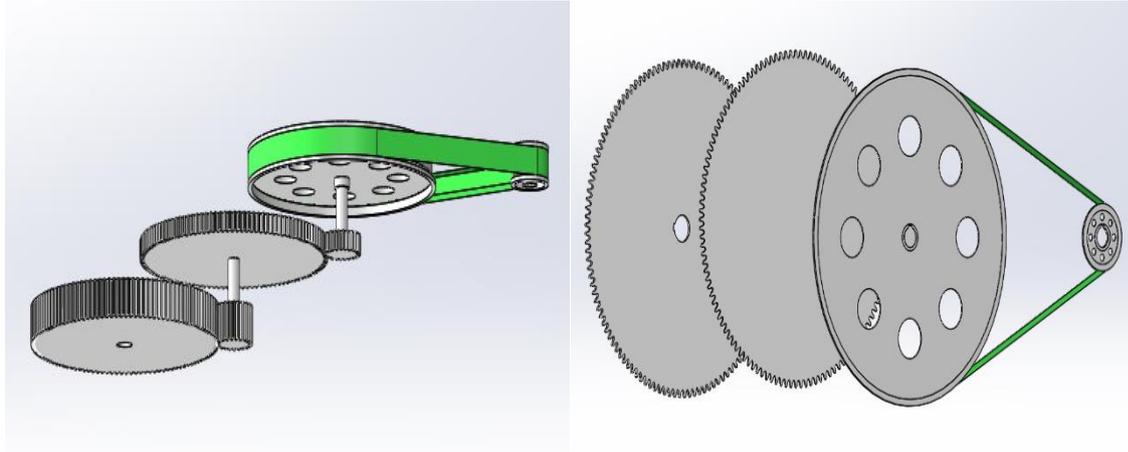


Figure III.2 : System poulie-courroie et engrenage

b) Vis sans fin

La vis sans fin, qui agit comme une pompe à vis, est insérée dans la chambre. Sa principale fonction est de déplacer les embouts de plastique depuis la trémie le long de la chambre. Au fur et à mesure que le plastique avance horizontalement dans la chambre, l'élément chauffant le fait fondre, et la vis sans fin joue également un rôle dans le mélange du plastique pendant le processus de fusion. La vis sans fin est essentielle pour assurer l'homogénéité du filament, ce qui est une exigence fondamentale de notre système. Elle garantit que le plastique fondu est uniformément mélangé et prépare ainsi le filament pour l'extrusion.

Lors du choix de la vis, voici quelques considérations spécifiques à prendre en compte :

1. Géométrie de la vis : utiliser une vis avec un profil de filetage en profondeur modérée et un rapport de compression élevé, Cela permet une bonne compression du matériau et une fusion efficace pendant le processus d'extrusion.
2. Matériau de la vis : Des matériaux résistants à la corrosion et à l'abrasion, tels que les aciers inoxydables.
3. Rapport longueur/diamètre (L/D) : Un rapport L/D plus élevé peut être bénéfique pour l'extrusion de PET.

La Longueur de la chambre $L=0.2\text{m}$, Diamètre de la vis $d=0.024\text{m}$, Profondeur du canal $H=0.003\text{m}$

La figure présente un schéma représentant une vis sans fin typique, avec les différentes caractéristiques étiquetées, telles que la profondeur du canal, l'angle de l'hélice et la longueur de la vis.

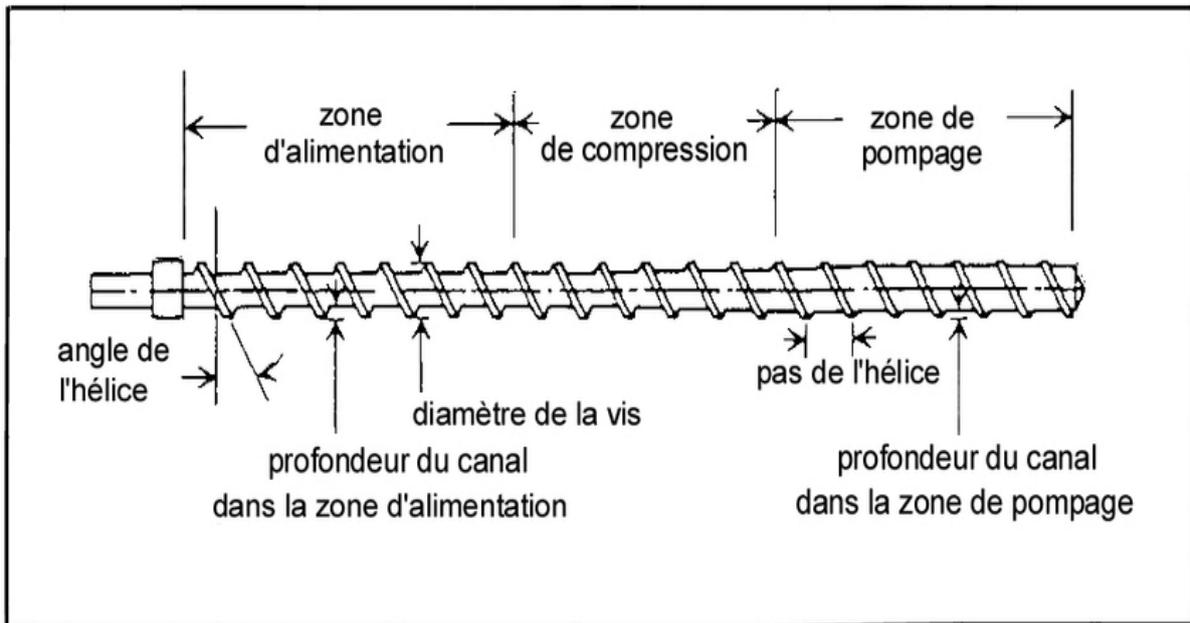


Figure III.3: Schéma d'une vis sans fin avec caractéristiques géométriques.

III.3.2 la chambre et la trémie

a) La trémie

La fonction de la trémie est de transporter les morceaux de plastique vers la vis sans fin et la chambre d'extrusion. Elle doit assurer un flux régulier du plastique vers la chambre, sans rencontrer d'obstructions. De plus, la trémie doit posséder une intégrité structurelle solide, capable de résister à des températures allant jusqu'à 80°C. Il est également important qu'elle puisse être facilement démontée pour faciliter l'entretien et le nettoyage. En tenant compte de ces facteurs, nous avons pris les décisions suivantes lors de la construction de la trémie :

- Taille d'ouverture
- Façonner
- Matériel
- Connexions

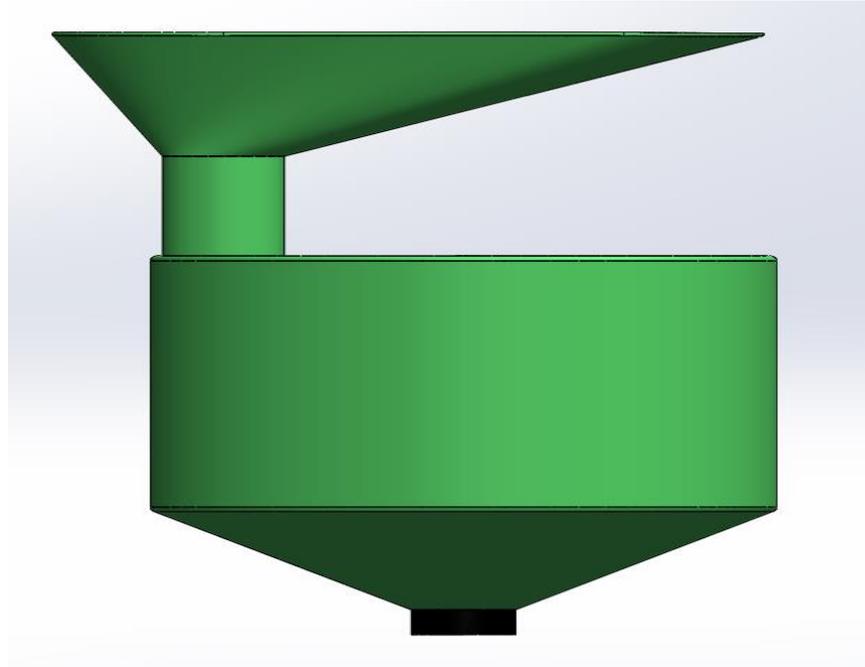


Figure III.4 : Conception de la trémie

b) La chambre

La chambre fournit le logement pour la vis sans fin. Les lambeaux de plastique sont introduits dans la chambre par la trémie.

La fusion et le mélange du plastique ont lieu dans la chambre avant l'extrusion du filament à travers la buse. Comme la chambre subit des températures élevées pendant le processus d'extrusion, les paramètres suivants ont été utilisés pour choisir le matériau. Le tableau donne un aperçu des cinq paramètres utilisés pour déterminer le matériau de la chambre

Tableau III.3 : Paramètres des matériaux de la chambre

Intervalle de température	Température de fonctionnement du matériau
Tolérance	Espace entre la vis sans fin et le diamètre intérieur de la chambre
Disponibilité	Produit "prêt à l'emploi"
Conductivité	Transfert de chaleur à travers le matériau
Prix	Coût du mètre linéaire de matériau

Quatre types de tuyaux différents ont été comparés en utilisant les paramètres du matériau de la chambre :

- Tube en acier noir
- Aluminium
- Acier inoxydable - Schedule 40
- Acier inoxydable - Schedule 80

Après avoir évalué les quatre options de tuyaux disponibles, il a été conclu que les tuyaux en acier inoxydable de type Schedule 80 étaient les mieux adaptés aux paramètres de la chambre en raison des raisons suivantes :

- La température de fusion du PET est de 245°C. Les métaux tels que les tuyaux en acier noir sont fragilisés à ces températures.
- La tolérance a été quantifiée en comparant le jeu avec les procédés d'extrusion industriels à l'aide de l'équation $Cr=0.001 * D_b$

Où Cr est le dégagement et D_b est le diamètre du canon ou de la vis sans fin, Par conséquent, l'objectif était d'obtenir le dégagement le plus faible possible entre la chambre et la vis sans fin.

- La disponibilité était essentielle lors de la sélection du matériau de la chambre afin de répondre aux besoins du client. Il était important que toutes les pièces achetées soient facilement disponibles afin de faciliter leur remplacement. Les quatre options de tuyaux sont disponibles sur le site McMaster.com
- La conductivité du tuyau est essentielle pour aider à contrôler la zone de chauffage. La conductivité thermique faible limite le transfert de chaleur dans le reste de la chambre. L'acier inoxydable a une conductivité thermique de 15,8 W/m-K. L'aluminium peut présenter une conductivité thermique aussi élevée que 231 W/mK.
- Bien que le prix ait été un paramètre dans la détermination du matériau de la chambre, il n'a finalement eu qu'un poids minime dans la décision finale. Le tuyau en acier inoxydable, Schedule 80 était le plus cher à 40,53 \$ le pied avec les extrémités filetés, comparé à l'aluminium Schedule 40, qui s'élevait à 15,35 \$ par pied avec les extrémités filetés.

III.3.3. L'élément chauffant

Le sous-système de l'élément chauffant se compose des éléments chauffants qui entourent la chambre et en chauffent l'intérieur afin de faire fondre le plastique. Deux types d'éléments chauffants ont été initialement envisagés : les bandes chauffantes et les serpentins chauffants. Les aspects de chacun d'entre eux qui ont été pris en compte dans le processus de prise de décision sont indiqués ci-dessous dans le tableau.

Tableau III.4 : Analyse des compromis entre les bandes chauffantes et les serpentins chauffants

Objet	Qualités
Bandes chauffantes	<ul style="list-style-type: none"> • Températures de chauffage individuelles réglables <ul style="list-style-type: none"> • Chaleur concentrée • Moins de puissance nécessaire
Serpentins de chauffe	<ul style="list-style-type: none"> • Puissance réglable de la bobine <ul style="list-style-type: none"> • Chaleur répartie • Puissance plus élevée nécessaire

Nous voulions avoir la plus grande flexibilité avec le profil de température le long de la chambre, ce qui favorise les bandes de chauffage puisque nous pouvions les placer le long de la chambre avec des températures différentes. Tandis que la bobine de chauffage prendrait plus de surface et serait réglée avec un seul réglage de puissance. Pour ces raisons, nous avons décidé d'utiliser les bandes chauffantes comme élément chauffant.

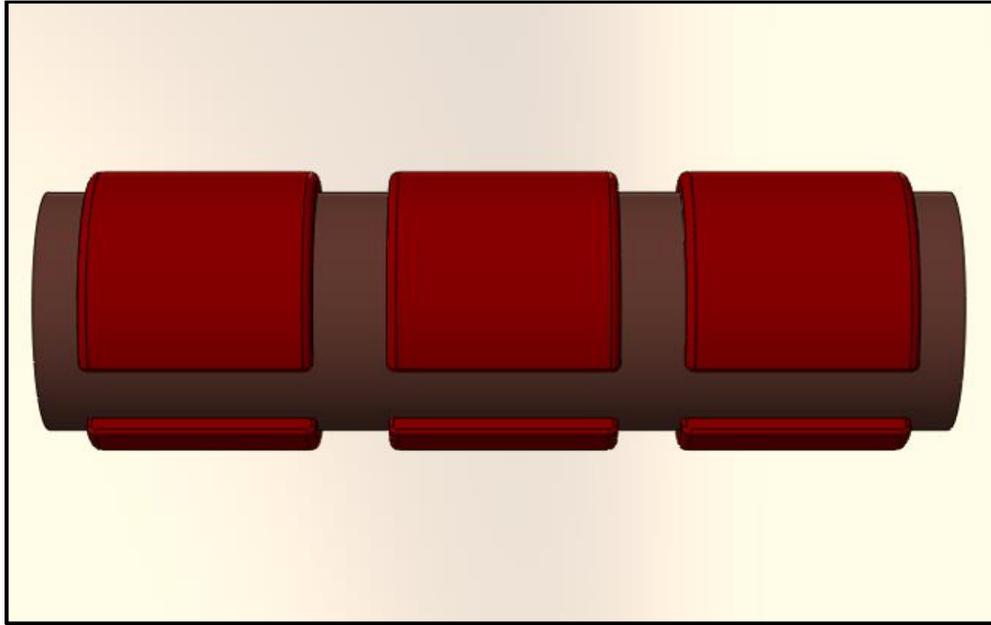


Figure III.5 : conception de la chambre et les bandes chauffantes

a) Calculs théoriques

Les bandes chauffantes d'un diamètre donné peuvent toujours avoir des largeurs et des puissances totales différentes. C'est pourquoi nous avons dû effectuer des calculs de transfert de chaleur pour savoir ce qu'il fallait commander.

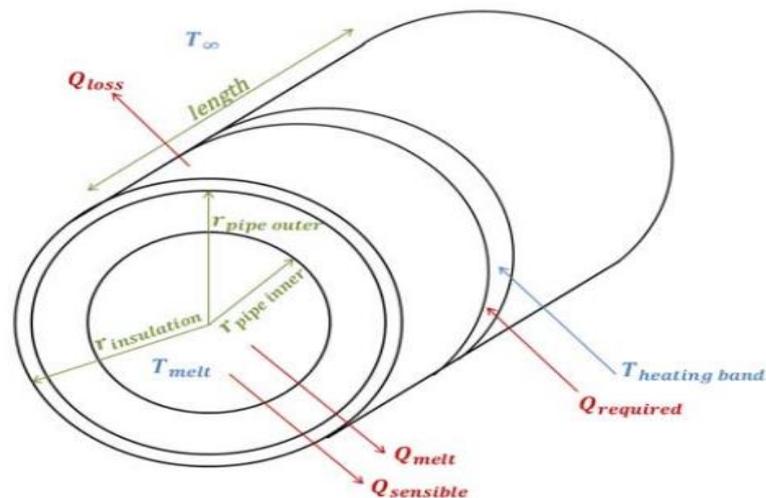


Figure III.6 : Un modèle simplifié de la chambre, de l'élément chauffant (une seule bande chauffante) et du plastique intérieur a été utilisé pour les calculs de transfert de chaleur.

La théorie de l'ingénierie a été utilisée pour prédire la quantité de chaleur nécessaire et la longueur de tuyau requise pour le chauffage à une vitesse d'extrusion fixée à 12tr/minute. En utilisant cette vitesse d'extrusion et la section transversale de la buse et du tuyau, la vitesse à l'intérieur de la chambre a été calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$A_1V_1 = A_2V_2 \quad 5$$

Où A_1 et A_2 sont les sections transversales [m²] de la buse et du tuyau respectivement. De même, V_1 et V_2 sont les vitesses [m/s] à l'intérieur de la buse et du tuyau respectivement. En utilisant la vitesse à l'intérieur du tuyau et la section transversale du tuyau, le débit massique à l'intérieur du tuyau, \dot{m} a été calculé à $5,1 \times 10^{-5}$ kg/s à l'aide de l'équation suivante :

$$\dot{m} = \rho \cdot A_{\text{pipe}} \cdot V_{\text{pipe}} \quad 6$$

Où ρ est la densité du PET. Afin de déterminer la chaleur totale nécessaire pour faire fondre le plastique dans l'ensemble de la chambre, l'équation suivante a été utilisée :

$$Q_{\text{total}} = q_{\text{heat}} + q_{\text{melt}} + q_{\text{loss}} \quad 7$$

Où q_{heat} , q_{melt} et q_{loss} représentent chacun une partie différente du processus de chauffage et ont des unités de Watts. Le premier, q_{heat} , est donné par l'équation suivante et représente la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température du PET de la température ambiante (15°C) à la température de fusion (260°C).

$$Q_{\text{heat}} = \dot{m} \cdot C_p (T_m - T_i) \quad 8$$

La température ambiante est T_i , la température de fusion est T_m , et C_p est la chaleur spécifique du PET. La deuxième partie de l'équation 7 est q_{melt} , et représente la quantité de chaleur nécessaire pour la transition de phase du PET de l'état solide à l'état liquide.

Cette quantité de chaleur est donnée par la formule suivante :

$$Q_{\text{melt}} = L_m \cdot \dot{m} \quad 9$$

Où L_m est la chaleur latente de fusion du PET.

La troisième partie de l'équation 7 est q_{loss} et représente la perte de chaleur dans l'environnement, Cette perte de chaleur a été calculée en trouvant la résistance à travers la chambre qui se compose de 3 couches :

$$R_{\text{total}} = R_{\text{acier}} + R_{\text{ldr}} + R_{\text{plastique}} \quad 10$$

$$R = \frac{\ln(R_{\text{ext}}/R_{\text{int}})}{2\pi KL} \quad 11$$

$$\phi 1 = \frac{(t_{\text{band}} - t_i)}{R_{\text{total}}} \quad 12$$

Où T_i est la température initiale (15°C) et T_{band} est la température de la bande chauffante a été fixée à 300°C.

$$\phi 2 = \frac{(t_{\text{band}} - t_i)}{R_{\text{total}}} \quad 13$$

Où T_i est la température initiale (15°C) et T_{band} est la température au milieu de la chambre (180°C).

$$\phi 3 = \frac{(t_{\text{band}} - t_i)}{R_{\text{total}}} \quad 14$$

Où T_i est la température initiale (15°C) et T_{band} est la température au milieu de la chambre (90°C).

$$Q_{\text{loss}} = \phi 1 + \phi 2 + \phi 3 \quad 15$$

$$P_e = q_{\text{loss}} \times \eta \quad 16$$

Où η est le rendement de la résistance.

Les résultats sont affichés dans le tableau suivant :

Tableau III.5 : les calculs de quantité de chaleur

Symbole	Paramètre	Unité	Valeur
A	Section transversale de la buse	M ²	3.14×10 ⁻⁶
V	Vitesse hors de la buse	M/s	0.1
ρ	Densité de PET	Kg/m ³	1420
T_m	Température de fusion du PET	°c	260
T_i	Température ambiante	°c	15
C_p	Chaleur spécifique du PET	J/kg. K	1140

L_m	Chaleur latente de la fonte du PET	J/g	50
\dot{m}	Le débit massique à l'intérieur du tuyau	Kg/s	0.00043
R_o, R_i (acier)	Rayon extérieur, intérieur de la chambre	M	0.015/0.013
R_o, R_i (laine de verre)	Rayon extérieur, intérieur de la laine de verre	M	0.026/0.015
R_o, R_i (plastique AVC)	Rayon extérieur, intérieur de plastique	M	0.036/0.026
L	Longueur de la chambre	M	0.1
K_{acier}	La conductivité thermique de la chambre	W/m.k	15.8
K_{ldr}	La conductivité thermique de la laine de verre	W/m.k	0.03
K_{avc}	La conductivité thermique de plastique AVC	W/m.k	0.185
T_{band}	La température de la bande chauffante	°c	300
q_{heat}	La chaleur nécessaire pour élever la température du PET de la température ambiante à la fonte Température	W	120.1
q_{melt}	La quantité de chaleur nécessaire à la transition de phase du PET du solide au liquide.	W	21.5
q_{loss}	La perte de chaleur pour l'environnement	W	16.39
q_{total}	La quantité de chaleur totale	W	163.1

III.3.4. La buse

La fonction de la buse est d'ajuster la taille du plastique lorsqu'il est refroidi et sort de la chambre. Lors de la conception de la buse, trois paramètres principaux étaient importants :

- Simplicité d'usinage
- Taux de refroidissement
- Écoulement régulier du plastique

Un bouchon en laiton massif a été choisi pour sa simplicité et sa conductivité. Le filetage extérieur du bouchon a permis de le fixer facilement à la chambre fileté à l'aide d'un raccord, éliminant ainsi la nécessité d'usiner une connexion. Cela lui permet également d'être facilement démontable afin de nettoyer la chambre.

La conductivité du laiton était souhaitable pour faciliter le transfert de chaleur hors du plastique, afin de le refroidir et de commencer à le faire descendre en dessous de la température de fusion. Le laiton a été choisi parce qu'il est plus conducteur que l'acier inoxydable, mais pas autant qu'un matériau comme le cuivre. Cela nous a permis d'ajuster le matériau de la buse en fonction de la vitesse de refroidissement souhaitée.

Étant donné que la buse a été achetée telle quelle en tant que bouchon en laiton massif, elle a dû être usinée pour permettre au plastique de s'écouler à travers elle et s'extruder sous forme d'un cylindre continu. La forme intérieure de la buse a été conçue pour faciliter l'écoulement régulier du plastique et obtenir le diamètre final souhaité du filament. Les options pour le profil intérieur de la buse étaient carré, parabolique et conique.

Un profil carré aurait entraîné la formation de poches dans les coins et aurait provoqué des turbulences, ce qui aurait entraîné des incohérences dans le filament en raison des perturbations de l'écoulement.

La forme parabolique est la deuxième meilleure option, mais elle n'a pas de profil de pression très constant car elle est une courbe exponentielle.

La buse conique est la meilleure option car elle a un profil linéaire et ne provoquera aucune turbulence dans l'écoulement. La buse conique crée une augmentation régulière de la vitesse tout en éliminant les points de stagnation des fluides, ce qui garantit des conditions d'extrusion optimales. L'angle exact de l'entrée conique a été dicté par la disponibilité des outils de machine, en tenant compte de l'objectif d'une profondeur d'environ un demi-pouce. Un outil de contre-alésage de 90 degrés et de 1 pouce de diamètre a été utilisé pour créer la forme de l'entrée conique. Un schéma de la géométrie intérieure de la buse en laiton est présenté dans la figure, et un rendu 3D de la géométrie intérieure est présenté dans la figure.)

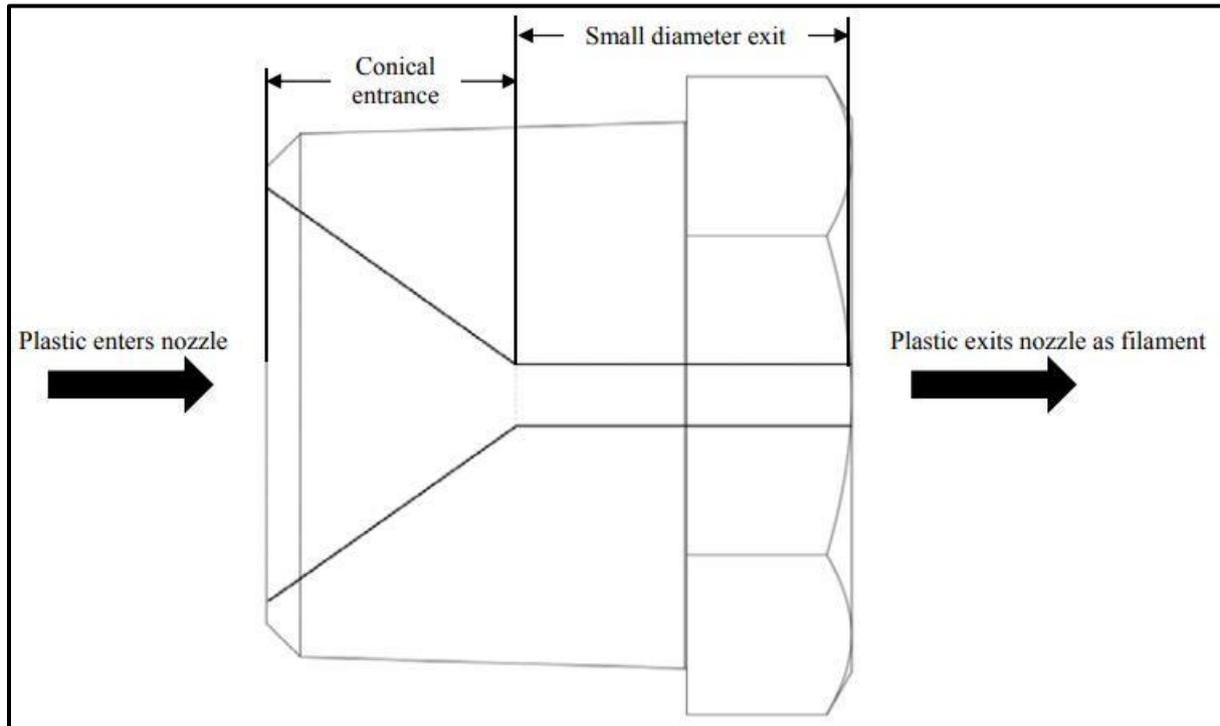


Figure III.7 : diagramme de la géométrie interne de la buse

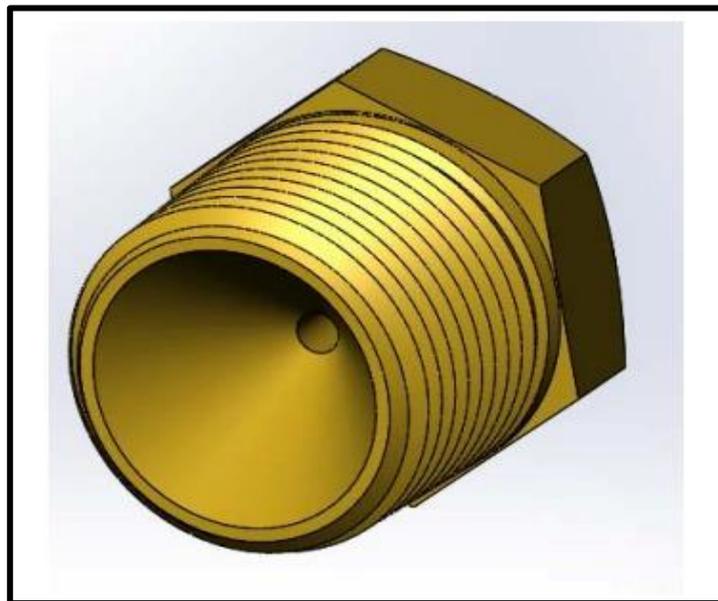


Figure III.8 : Rendu 3D de la géométrie interne de la buse

III.3.5. System de refroidissement

Le système de refroidissement dans notre machine joue un rôle crucial pour éviter les problèmes liés à la surchauffe du filament et garantir des impressions de haute qualité.

Lorsque le filament est extrudé par la buse chauffée, il est initialement à une température élevée et malléable. Si cette chaleur n'est pas rapidement dissipée, le filament peut se ramollir à des endroits indésirables, entraînant des déformations, des bavures ou même des obstructions de la buse. C'est là qu'intervient le système de refroidissement.

Le système de refroidissement comprend un ventilateur positionné près de la buse. Ce ventilateur souffle de l'air frais directement sur le filament sortant de la buse, ce qui permet de refroidir le matériau fondu, le solidifie, et lui permet de conserver sa forme plus rapidement.

En plus de refroidir le filament, le système de refroidissement contribue également à maintenir une température stable dans l'ensemble de l'extruder. Lorsque le moteur d'extrusion et le bloc chauffant génèrent de la chaleur, le ventilateur aide à dissiper cette chaleur pour éviter toute surchauffe de l'extruder.



Figure III.9 : Ventilateur de refroidissement

III.3.6. Bobinage :

Une bobine de filament 3D est une forme de stockage pour le matériau, elle est généralement un support cylindrique, similaire à une bobine de fil traditionnelle, sur lequel le filament est enroulé. Elle est conçue pour maintenir le filament en place de manière organisée

et empêcher qu'il ne s'emmêle ou ne se casse pendant l'impression. La bobine est souvent munie d'un trou central permettant de l'installer directement sur le support de l'imprimante 3D.

Pour remplir une bobine de filament 3D, vous pouvez suivre les étapes suivantes :

1. Préparez votre filament : Assurez-vous d'avoir une bobine de filament à proximité et vérifiez que le filament est correctement déroulé.
2. Identifiez le sens d'enroulement : Observez la bobine et repérez le sens d'enroulement du filament.
3. Localisez le trou central : Trouvez le trou central de la bobine. Il est généralement situé au centre de la bobine et permet de la fixer sur le support de l'imprimante 3D.
4. Insérez l'extrémité du filament : Prenez l'extrémité du filament et insérez-le dans le trou central de la bobine. Poussez-le doucement jusqu'à ce qu'il ressorte de l'autre côté de la bobine.
5. Commencez à enrouler : Maintenez fermement l'extrémité du filament à l'extérieur de la bobine et à l'aide d'un moteur ça va commencer à tourner la bobine dans le sens approprié d'enroulement.
6. Maintenez la tension : Veillez à maintenir une tension appropriée sur le filament pendant l'enroulement. Une tension légèrement tendue aidera à garder le filament bien enroulé et empêchera les nœuds ou les emmêlements.
7. Terminez l'enroulement : Continuez à enrouler le filament jusqu'à ce que vous atteigniez la fin de la bobine ou la longueur désirée. Assurez-vous que l'enroulement est régulier et serré pour éviter tout problème lors de l'impression.

Une fois que le roulement du filament est terminé, assurez-vous de bien fixer l'extrémité à la bobine pour éviter qu'il ne se défasse pendant le transport ou l'utilisation ultérieure. Vous pouvez utiliser un clip de filament ou un autre dispositif de fixation pour maintenir l'extrémité en place.

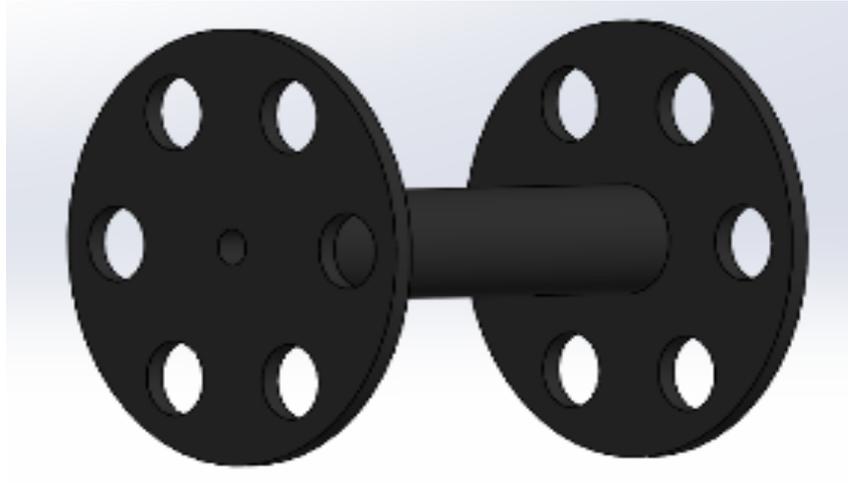


Figure III.10 : Bobine

Chapitre IV

**Conception de la machine sur
SolidWorks**

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre modèle de machine et révélé ses pièces qui fonctionnaient harmonieusement. De plus, nous avons fourni une explication détaillée du logiciel moderne que nous avons utilisé pour créer et concevoir cette machine.

IV.2. SolidWorks

IV. 2.1. La conception

Le logiciel SOLIDWORKS a été utilisé pour concevoir la machine d'extrusion et ses composants. SOLIDWORKS est un modéleur volumique permettant de créer des pièces complexes en 3 dimensions. Ces pièces peuvent être ensuite utilisées pour créer des mises en plan en 2D et des assemblages de plusieurs pièces entre elles.



Figure IV.1 : Logo SOLIDWORKS

IV. 2.2. Historique

Créé en 1993 par l'éditeur américain éponyme, SolidWorks est racheté le 24 juin 1997 par la société Dassault Systèmes³

Parmi les plus grandes organisations utilisant SolidWorks, on peut citer Franckie, Équipement d'emballage MMC, AREVA, Patek Philippe, Mega Bloks, Axiome, ME2C, SACMO, Le Boulch, Robert Renaud, Lorenz Baumer⁴, l'Opéra de Paris⁴, Jtekt⁴, GTT⁴ et le Ministère de l'Éducation nationale français.

IV. 2.3. Fonctionnement

SolidWorks est un modéleur 3D utilisant la conception paramétrique. Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers sont en relation. Toute modification à quelque niveau que ce soit est répercutée vers tous les fichiers concernés.

Un dossier complet contenant l'ensemble des relatifs à un même système constitue une maquette numérique. De nombreux logiciels viennent compléter l'éditeur SolidWorks. Des utilitaires orientés métiers (tôlerie, bois, BTP...), mais aussi des applications de simulation mécanique ou d'image de synthèse travaillent à partir des éléments de la maquette virtuelle.

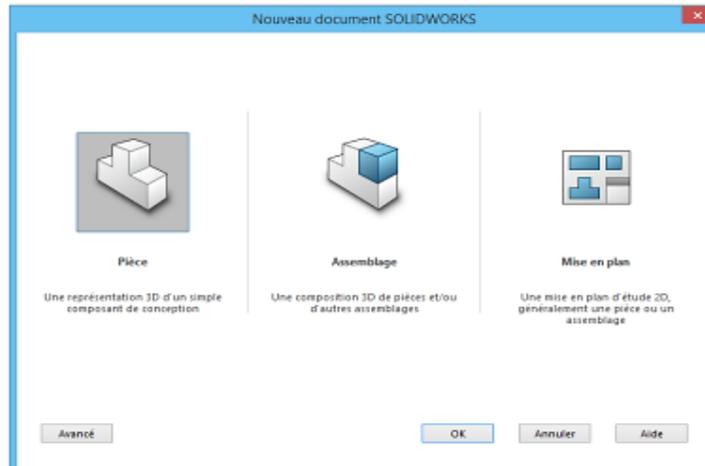


Figure IV.2 : Choix du module

a) Les barres d'outils

Esquisse :

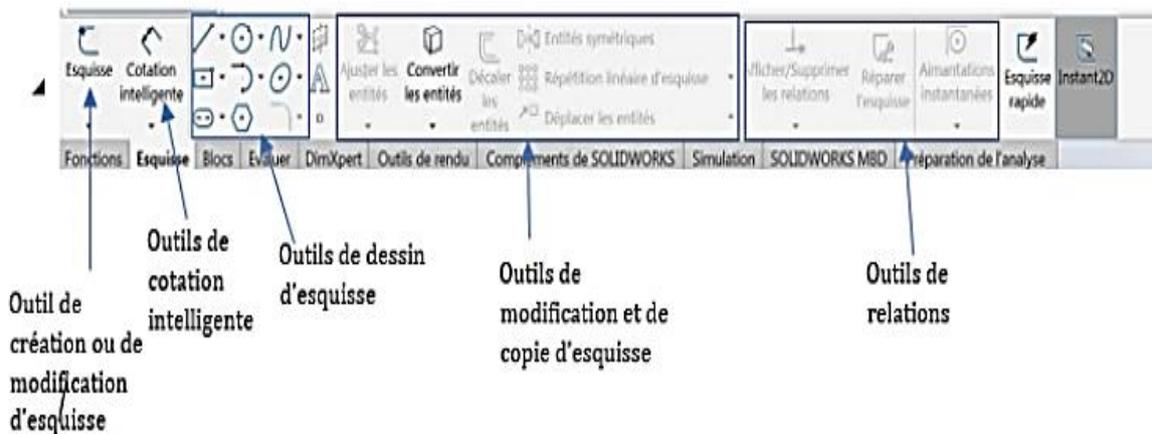


Figure IV.3 : la barre d'outils Esquisse

Fonction :

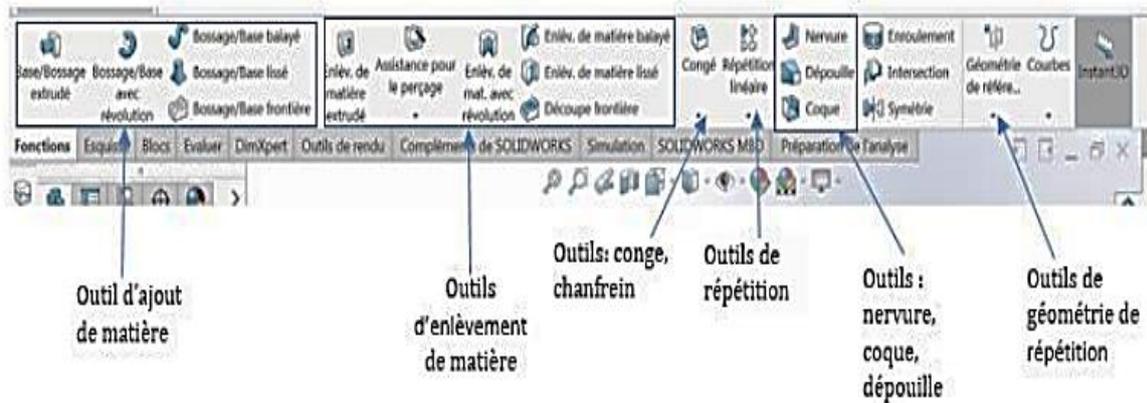


Figure IV.4 : la barre d'outils Fonction

Affichage :

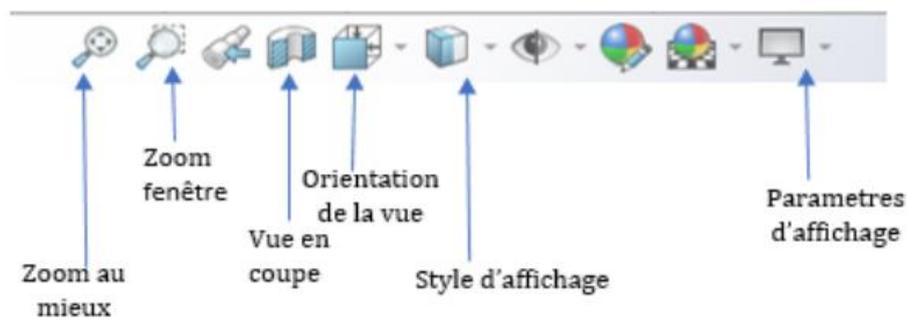


Figure IV.5 : la barre d'outils affichage

b) LE MODULE ASSEMBLAGE :

Le module assemblage est le deuxième module élémentaire de SOLIDWORKS, permettant d'effectuer l'assemblage des pièces que l'on a élaboré préalablement dans le module pièce.

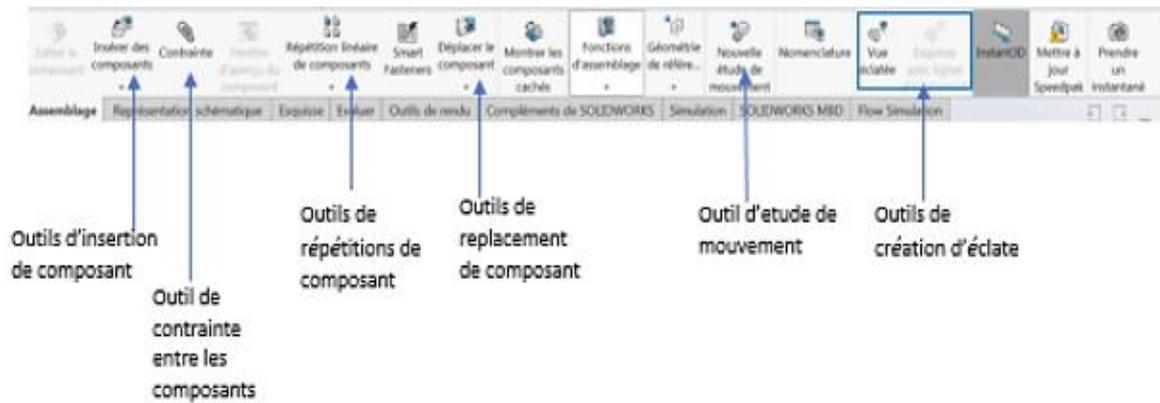


Figure IV.6 : la barre d’outils Assemblage

Tableau IV.1 : Information sur le logiciel utiliser pour la conception

Développé par	Dassault Systèmes SE
Première version	21 mars 1995
Version utiliser pour ma conception	SOLIDWORKS 2019
Écrit en	Visual Basic
Système d'exploitation	Microsoft Windows
Langues	Multilingue
Type	Logiciel de conception assistée par ordinateur
Licence	Licence de logiciel propriétaire
Site web	www.solidworks.com

IV.3. Présentation de la machine

La machine commence par recevoir les déchets de PET à travers une trémie, qui les transporte vers une chambre contenant une vis sans fin. Cette vis sans fin est alimentée par un moteur et pousse les déchets vers l'extrémité. Pendant ce processus, le PET est chauffé à des températures élevées à l'aide des dispositifs dédiés. Une fois que le matériau est fondu, il passe ensuite à travers une buse qui va lui donner la forme d'un filament tout en respectant un diamètre bien spécifique. Et finalement, le filament est refroidi à l'aide d'un système de refroidissement composée essentiellement de ventilateurs puis enroulé sur une bobine qui est animé a son toure par un moteur.

IV.4. Présentation du prototype graphique de la machine

Après avoir travaillé sur la machine avec SolidWorks, nous avons pu obtenir les modèles représentés ci-dessous.

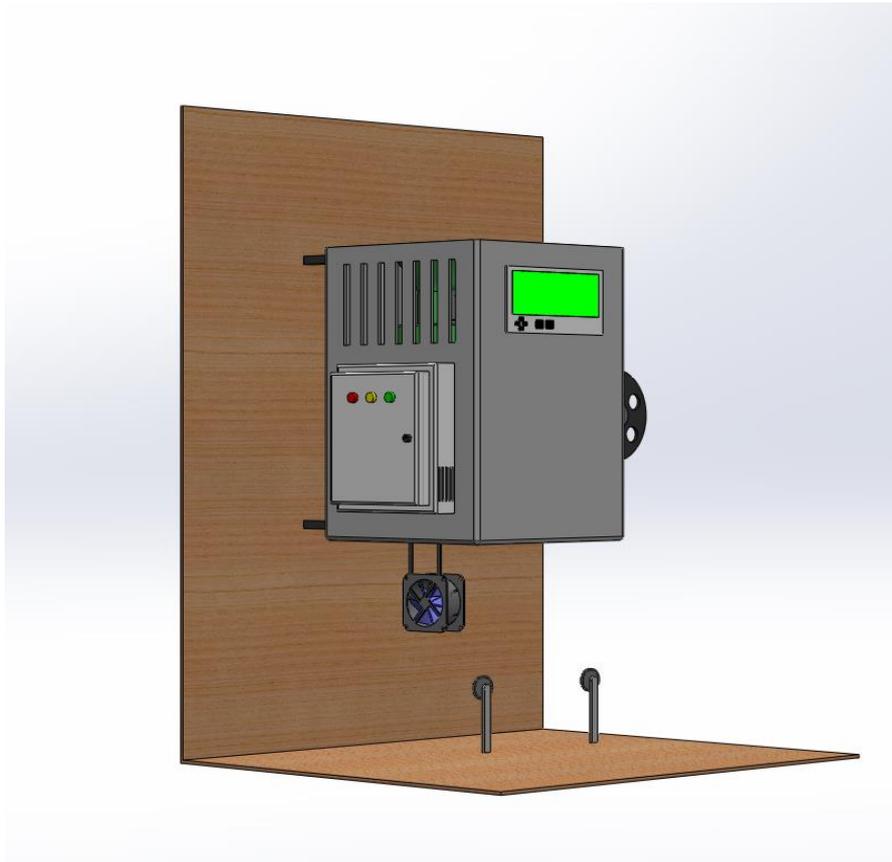


Figure IV.7 : Vue 3D de la machine

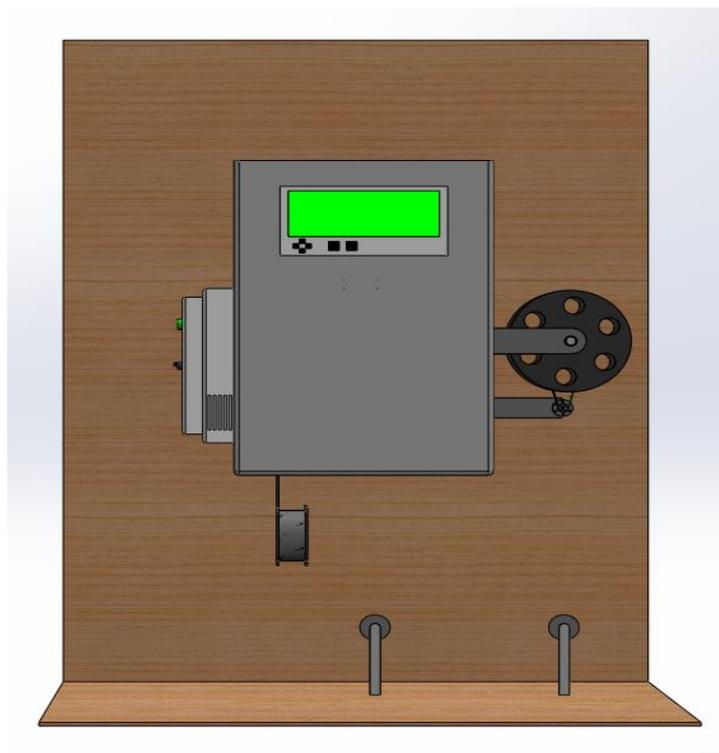


Figure IV.8 : Vue de face de la machine.

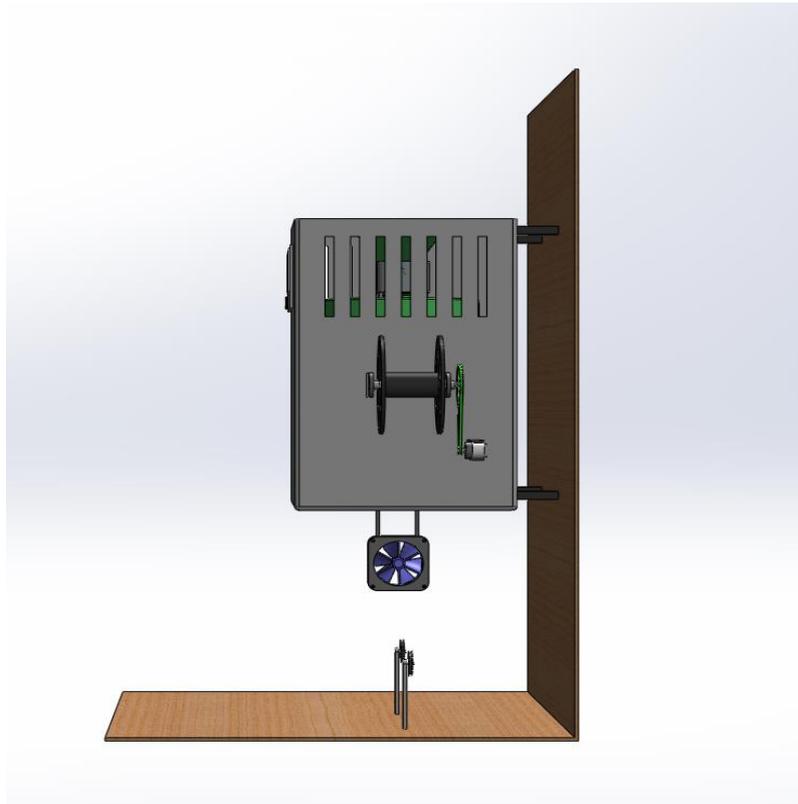


Figure IV.9 : Vue de droite de la machine.

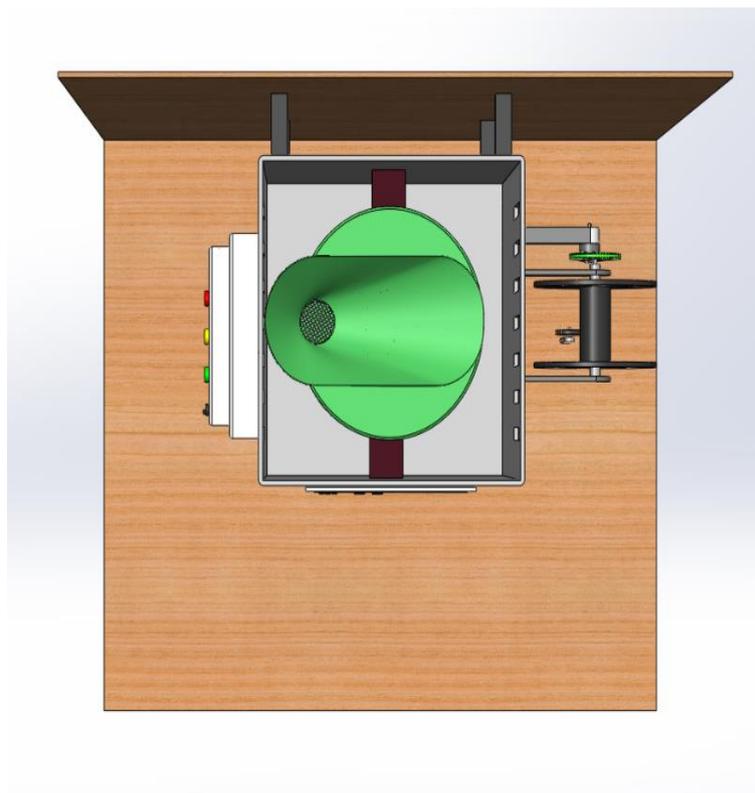


Figure IV.10 : Vue de dessus de la machine.

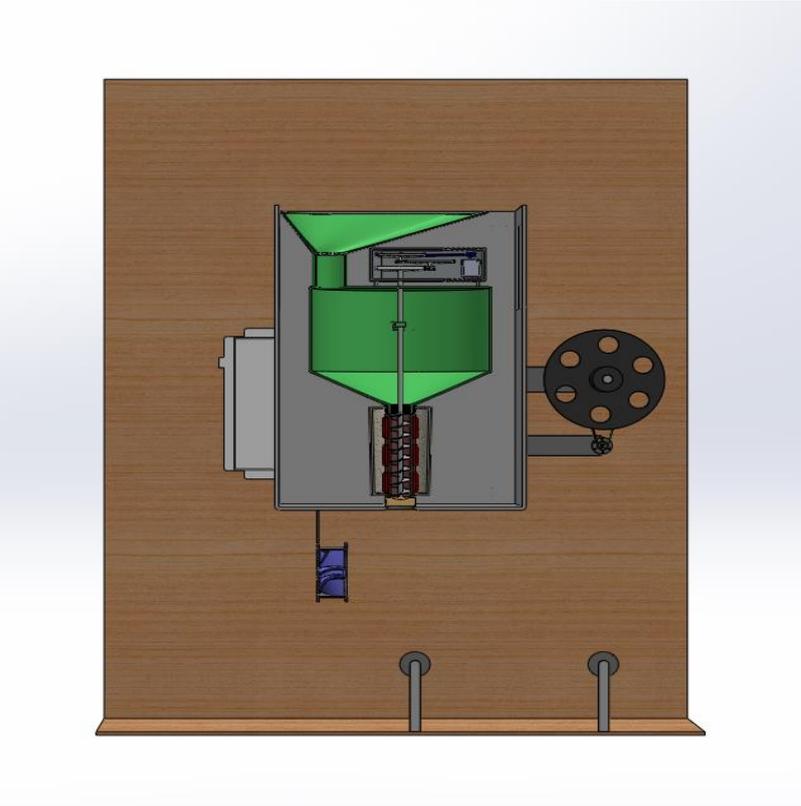
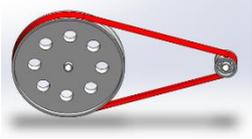
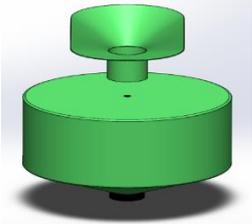
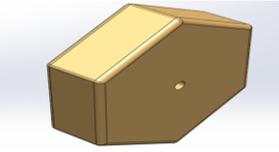
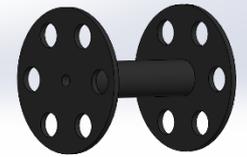


Figure IV.11 : vue de coupe de la machine

Tableau IV.2 : Les composants de la machine

Composant	Illustration	Fonction	Dimensionnement
Moteur Principale		Fournir la puissance et le couple nécessaires à l'entraînement de la vis sans fin.	$P_e=11.07w$ $P_m=7.75w$ $N=1200 \text{ tr/min}$ $C=5Nm$ $\eta =0.7\%$
System d'entrainement Par Poulie-courroie		Permet de transmettre un mouvement de rotation	$D_e=10mm$ $DS=50mm$ $N_e=1200Tr/min$ $N_s=240Tr/min$
System d'entrainement Par Engrenage		Transmettre une puissance d'un arbre d'entre vers un arbre de sortie avec modification de la vitesse	Engrenage 1 $Z_e=10dents$ $Z_s=50dents$ Engrenage 2 $Z_e=10dents$ $Z_s=40dents$
Hopper		Achemine les morceaux de plastique vers la vis sans fin et la chambre d'extrusion.	$L=230mm$ $D_e=50mm$ $d_s=30mm$
Chambre		Fournit le logement pour la vis sans fin la fusion et le mélange du plastique	$L=200mm$ $D=30mm$
Vis sans fin		Déplace les morceaux de plastique insérés dans la trémie sur toute la longueur de la chambre morceaux	$L=200mm$ $D=24mm$ $H=3mm$

Elément chauffant		Fournit l'énergie nécessaire pour faire fondre les lambeaux de plastique	$Q=163.1w$
Buse		Extruder le filament au diamètre souhaité	$D=2\text{ mm}$
System de refroidissement de fil		Refroidir le filament qui sort à travers la buse	
Rouleau de Bobinage		Le filament est généralement enroulé en boucle autour d'un moyeu central à l'intérieur de la bobine. Elle garder le filament bien enroulé	Bobine 1K

IV.5. Les étapes d'assemblage de la machine :

La machine est divisée en 3 parties importantes : les vireurs et ses moteurs, la machine elle-même et le cadre :

La partie motrice : comprend un moteur ainsi qu'un système de réduction, composé d'une poulie courroie et de deux engrenages. Nous avons opté pour ce système afin de réduire la vitesse du moteur. Pour assurer la sécurité des éléments, nous avons préparé une cage pour que le système soit encastré et éloigné des regards.

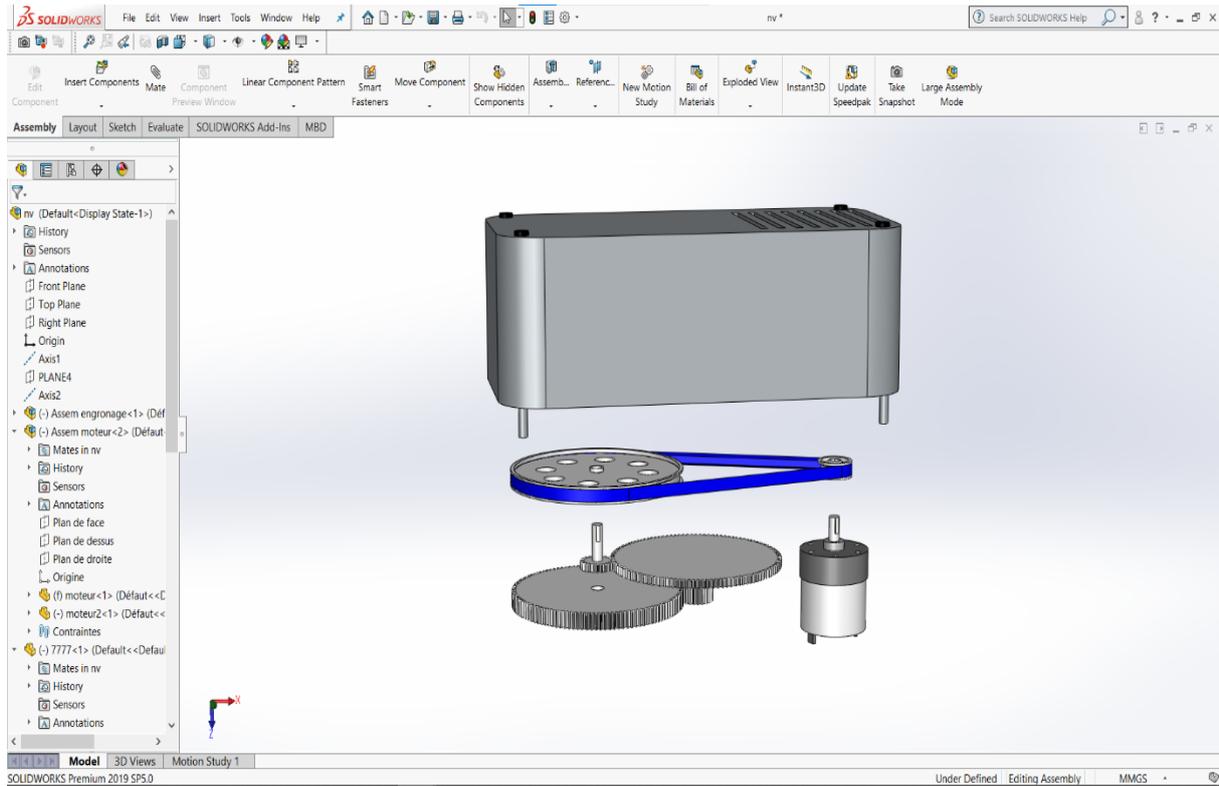


Figure IV.12 : Les composants du moteur

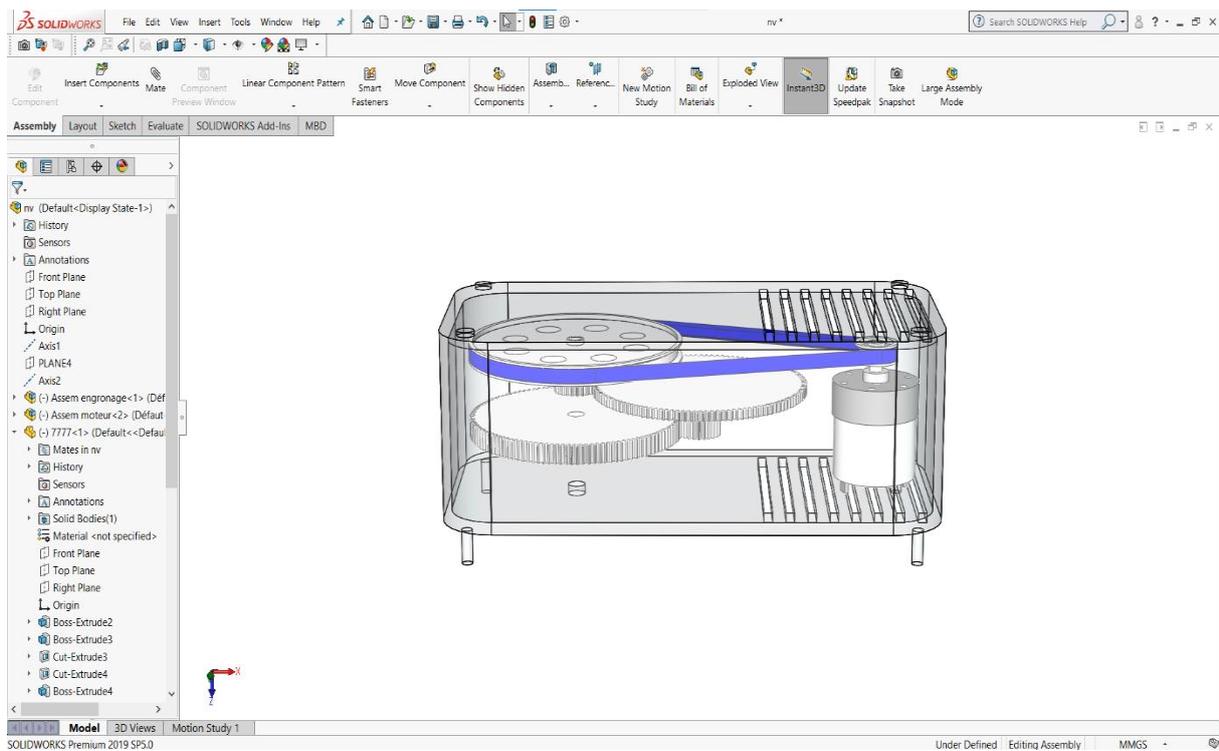


Figure IV.13 : Assemblage du moteur

1. préparation des composants : Rassemblez tous les composants nécessaires à l'assemblage tels que le moteur et le réducteur, la trémie, la chambre, la vis sans fin et la buse

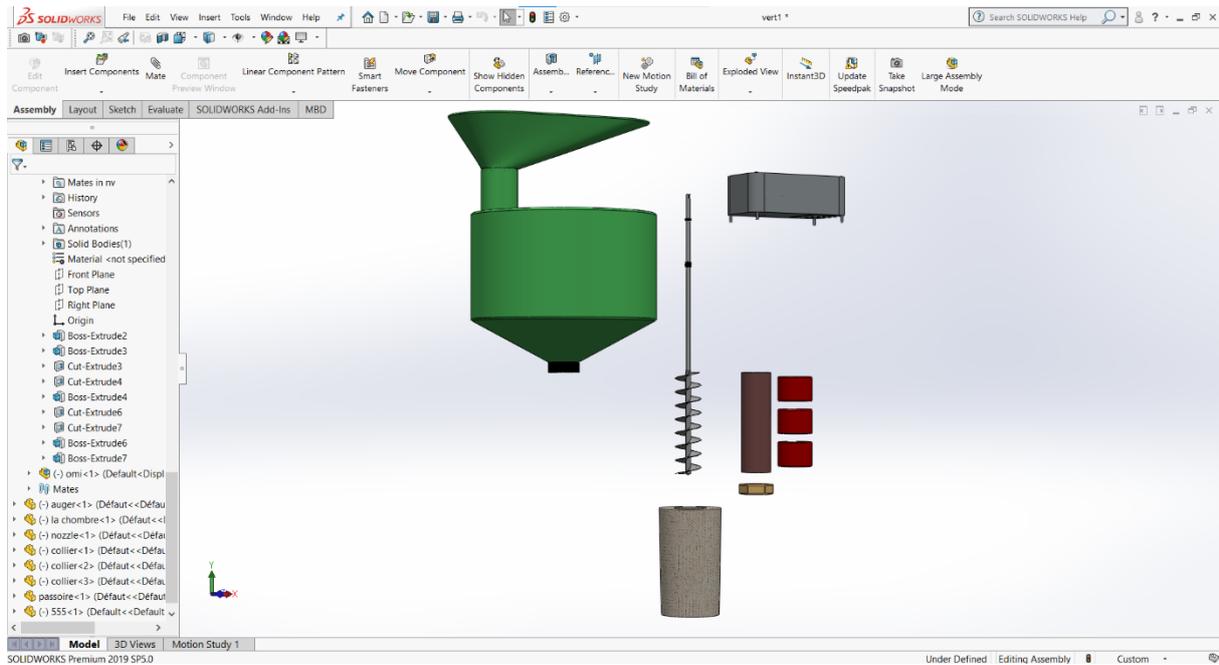


Figure IV.14 : Les composants de la machine.

2. connexion des composants mécaniques : fixez la trémie, la chambre et la buse à leur emplacement

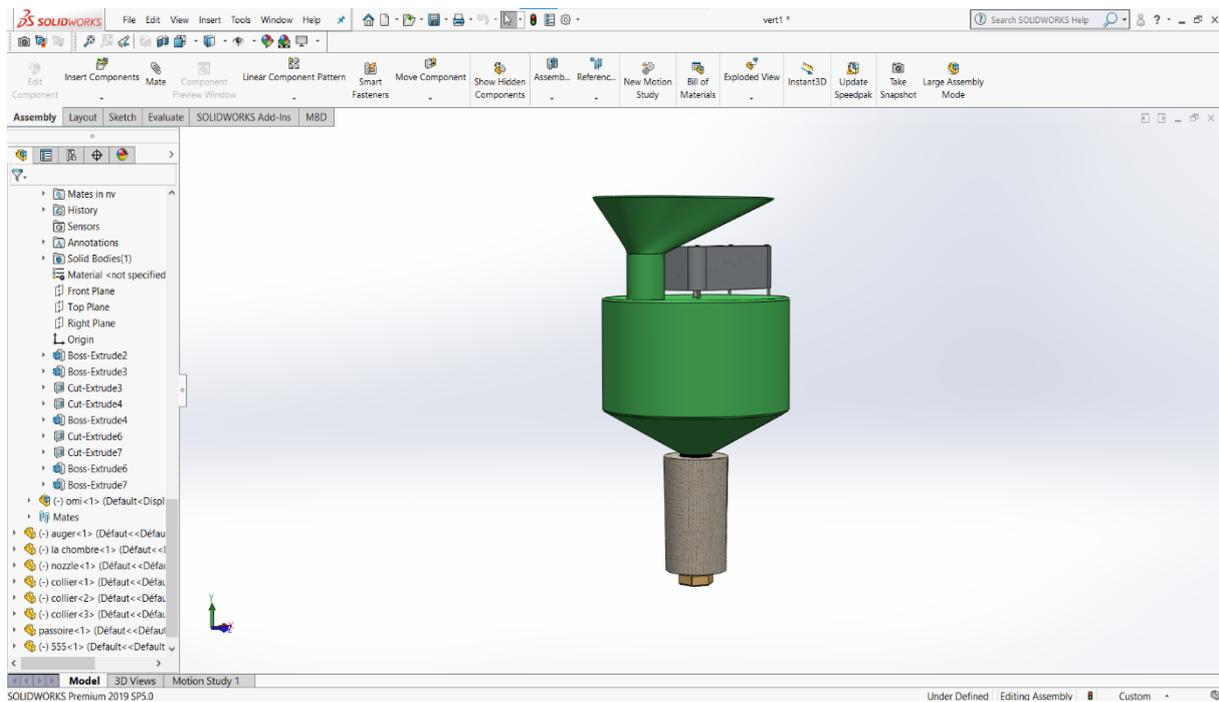


Figure IV.15 : Assemblage de la machine.

3. Connexion des câbles électriques : Raccordez les câbles électriques du moteur et des autres composants à l'alimentation électrique et aux commandes.

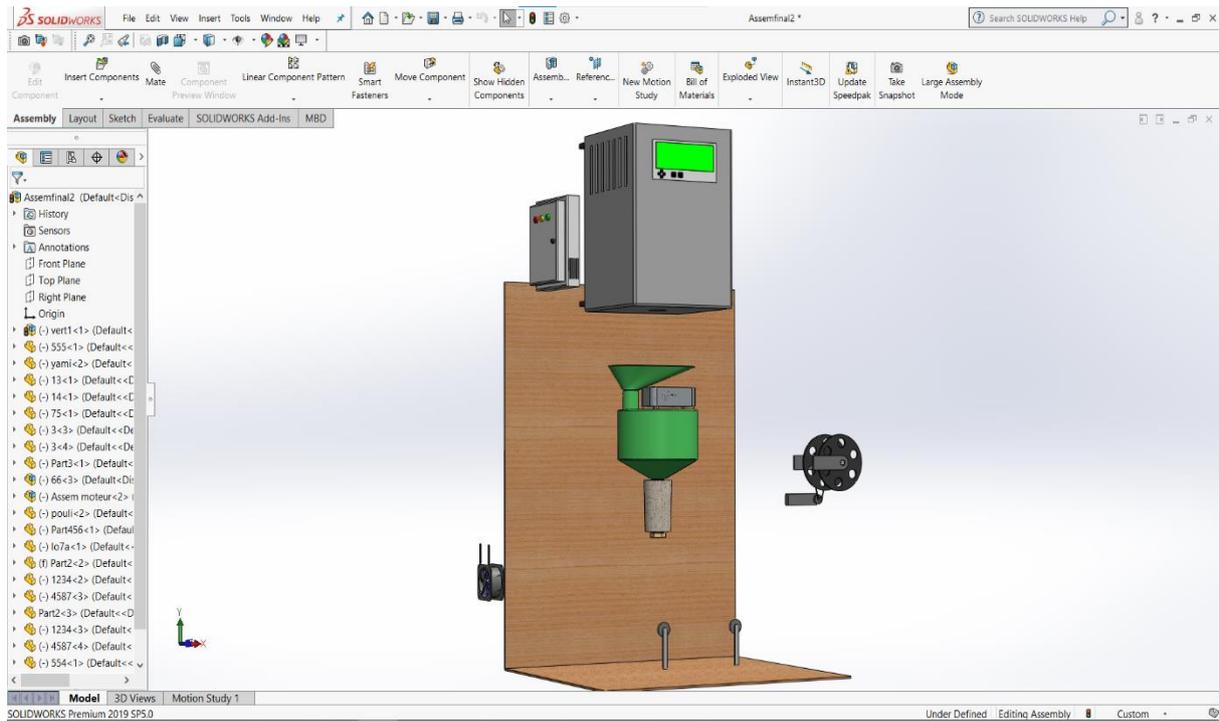


Figure IV.16 : Liaison de la machine au support

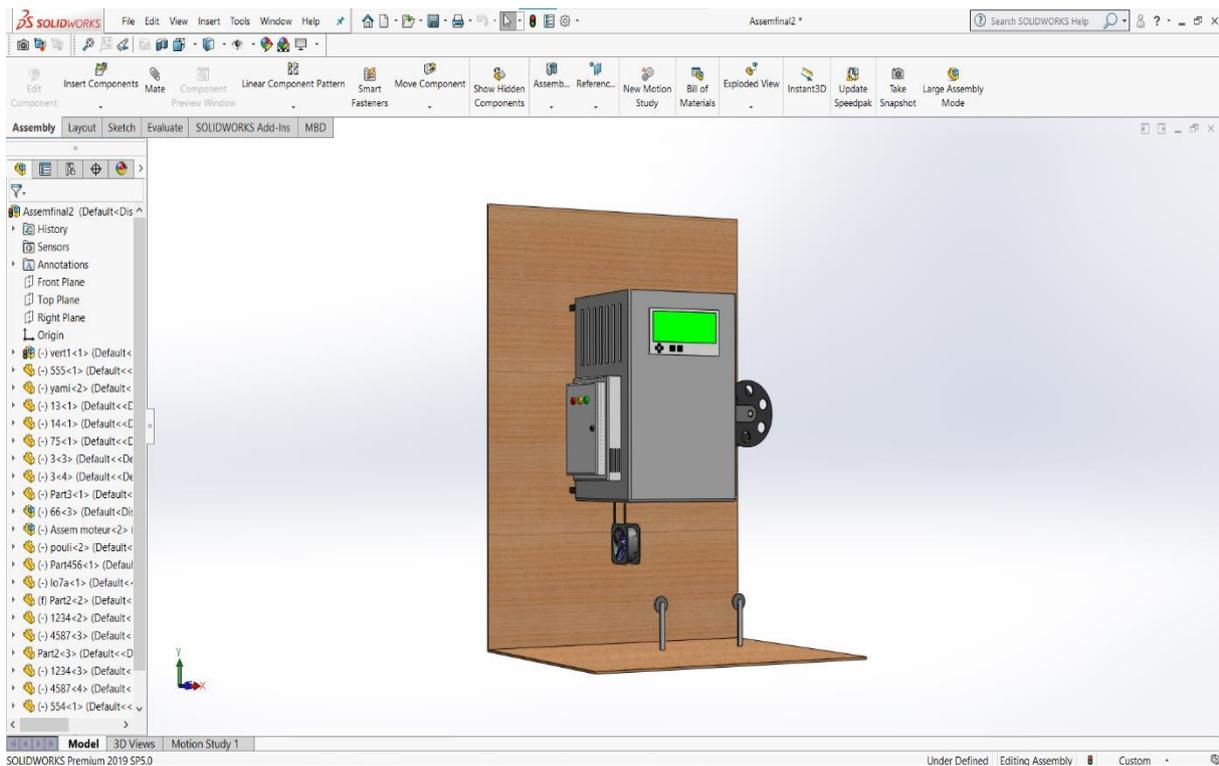


Figure IV. 17 : Machine finale

IV.6. Schéma électrique simplifié de la machine :

L'électronique est conçue pour nous donner la plus grande flexibilité et le meilleur contrôle sur les propriétés des câbles finaux. Dans notre système, le circuit est séparé en parties AC et DC.

Le circuit DC est illustré ci-dessous :

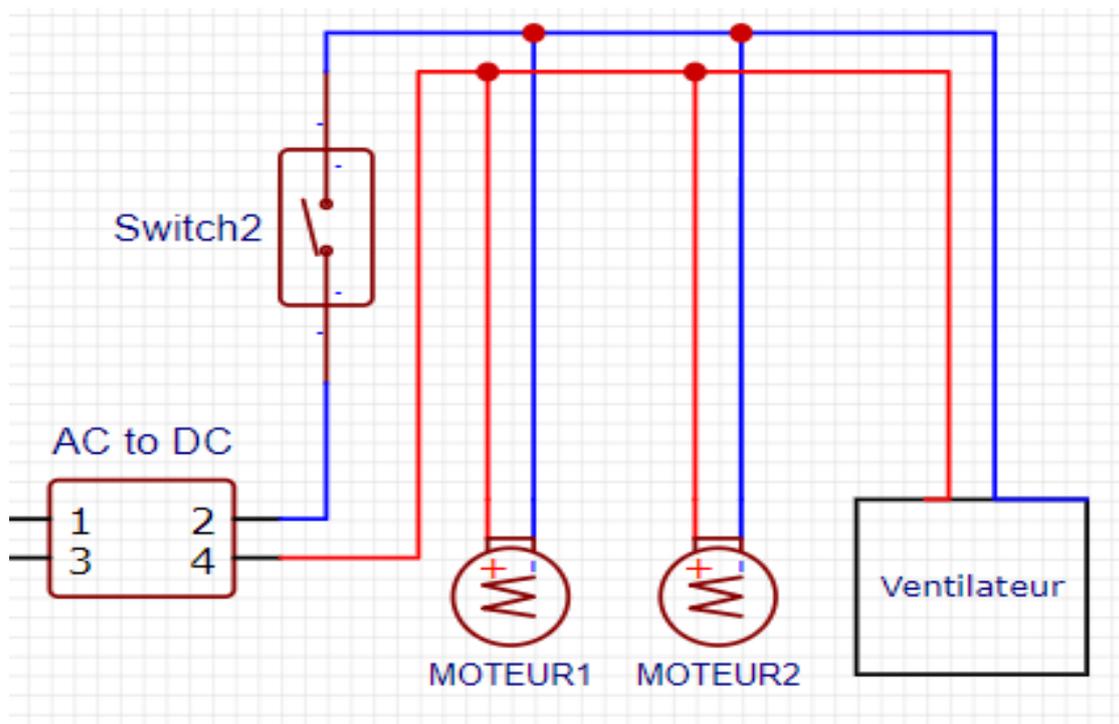


Figure IV.18 : DC Circuit

Le circuit AC est un système électrique qui alimente trois radiateurs et régulateurs de température différents. Avant d'arriver à l'alimentation principale, les fils du circuit sont connectés ensemble.

Le contrôleur PID (proportionnel, intégral, dérivé) est un composant important du système. Il affiche deux valeurs : la valeur du point et la valeur de consigne. La valeur du point correspond à la température réelle mesurée par le thermocouple, tandis que la valeur de consigne est la température souhaitée que l'utilisateur entre.

Le rôle du contrôleur PID est de réguler la température du réchauffeur en fonction de la valeur mesurée par le thermocouple. Il utilise un algorithme de contrôle PID pour décider quand allumer ou éteindre le réchauffeur en utilisant le relais statique à semi-conducteurs.

Le contrôleur PID peut être ajusté manuellement en modifiant les paramètres de gains PID, qui sont trois valeurs différentes. Cependant, il peut également être réglé automatiquement, ce qui permet d'obtenir une précision plus élevée dans la régulation de la température.

Le contrôleur a été réglé pour que la température soit légèrement supérieure au point de fusion du plastique PET afin de compenser la perte de chaleur à travers la chambre et vers l'environnement.

Le circuit AC est illustré ci-dessous

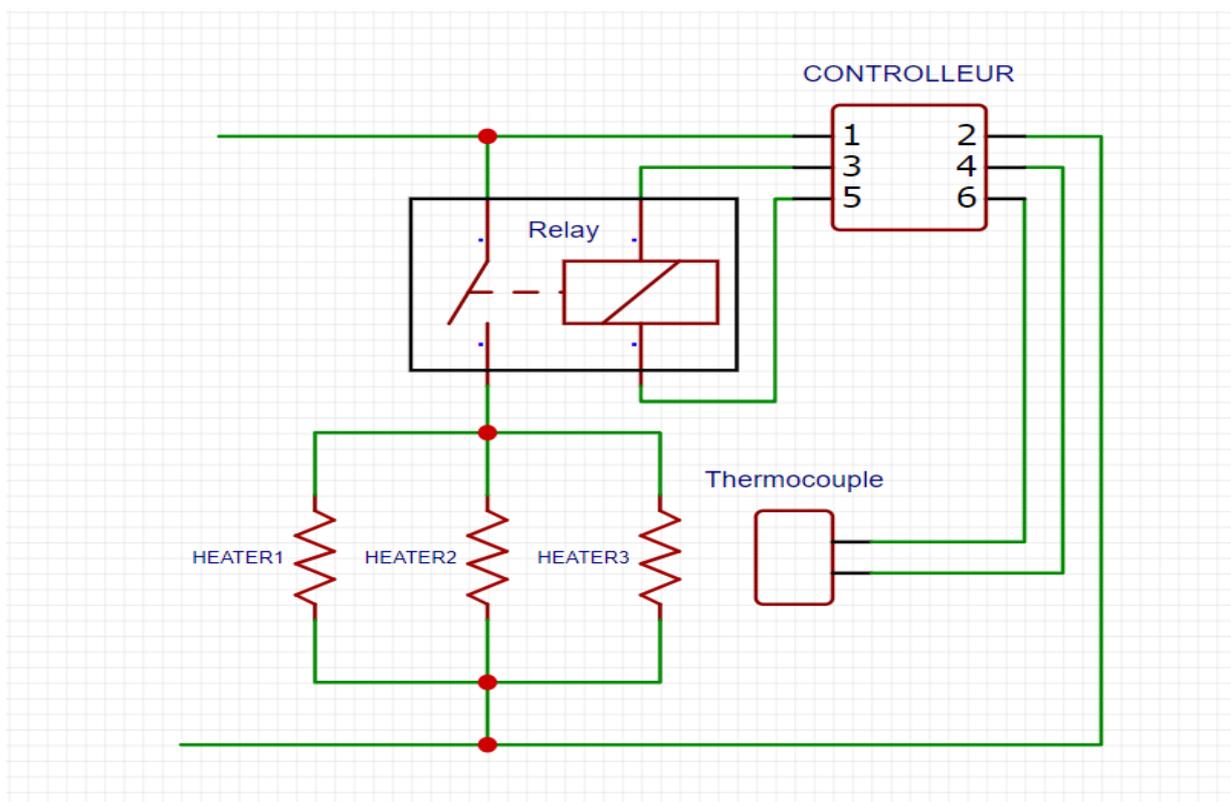


Figure IV.19 : AC Circuit

Peuvent être ajustées les températures des trois appareils de chauffage.

La chaleur reçue par le plastique peut être modifiée soit en ajustant les températures du réchauffeur, soit en plaçant le réchauffeur. Une fois l'emplacement de l'élément chauffant déterminé, les températures individuelles de l'élément chauffant peuvent être modifiées pour nous donner le profil de chauffage souhaité. La vitesse à laquelle le plastique se déplace dans la chambre et la quantité de chaleur qu'il reçoit de chacune des bandes chauffantes sont cruciales pour les propriétés finales du filament. C'est pourquoi le circuit a été conçu.

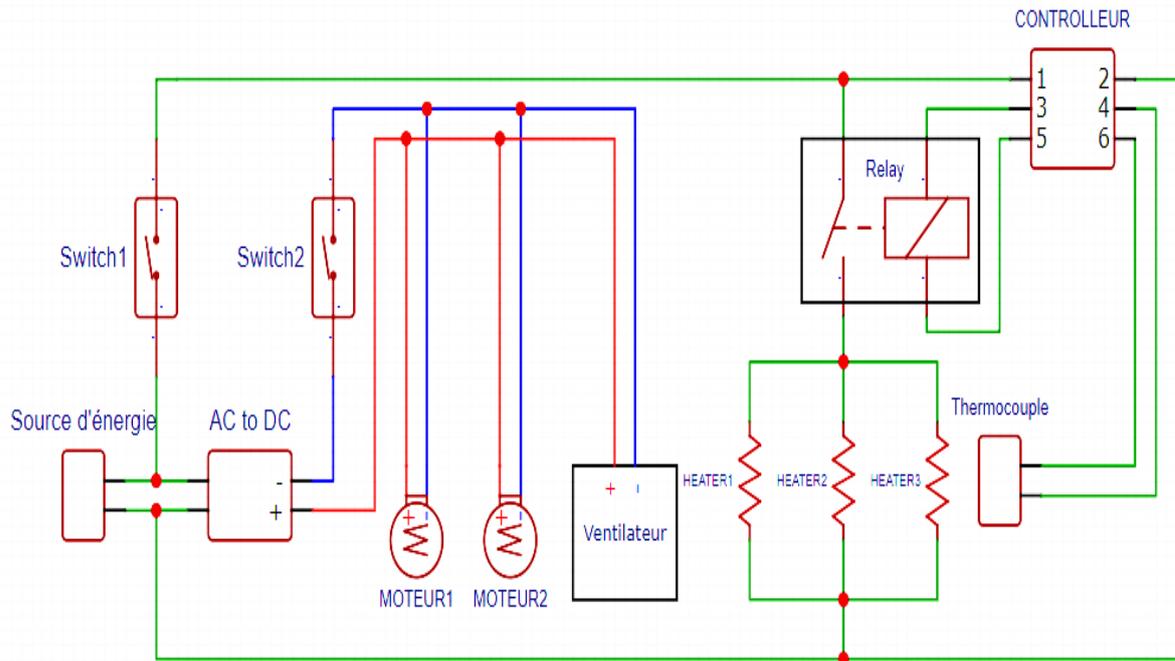


Figure IV.20 : Circuit final

IV.7. Schéma de circuit de commande de la machine

Pour rendre la machine automate et intelligente nous avons opté à l'élaboration d'un programme qui sera installé dans l'automate PLC afin de pouvoir accomplir a bien l'interface avec l'utilisateur.

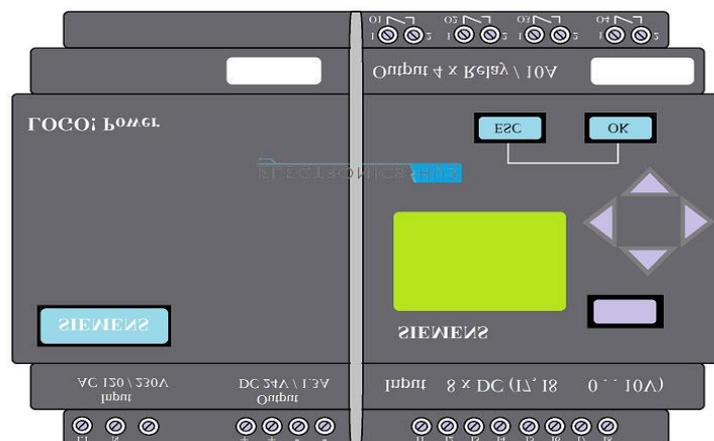


Figure IV.21 : PLC Controller

Le Programme

```
1  #include <iostream>
2  #include <cstdlib>
3  #include <ctime>
4
5  // Fonction pour obtenir la température actuelle
6  double obtenirTemperature() {
7      // Simuler la lecture de la température
8      // Cette fonction doit être remplacée par la lecture réelle de la température
9      return (std::rand() % 1000) / 10.0; // Température aléatoire entre 0°C et 100°C
10 }
11
12 // Fonction pour démarrer les moteurs et le ventilateur
13 void demarrerMoteursEtVentilateur() {
14     std::cout << "Démarrage des moteurs et du ventilateur." << std::endl;
15     // Code pour démarrer les moteurs et le ventilateur sur l'automate programmable
16 }
17
18 // Fonction pour arrêter les moteurs et le ventilateur
19 void arreterMoteursEtVentilateur() {
20     std::cout << "Arrêt des moteurs et du ventilateur." << std::endl;
21     // Code pour arrêter les moteurs et le ventilateur sur l'automate programmable
22 }
23
24 // Fonction pour démarrer les résistances
25 void demarrerResistances() {
26     std::cout << "Démarrage des résistances." << std::endl;
27     // Code pour démarrer les résistances sur l'automate programmable
28 }
29
30 // Fonction pour arrêter les résistances
31 void arreterResistances() {
32     std::cout << "Arrêt des résistances." << std::endl;
33     // Code pour arrêter les résistances sur l'automate programmable
34 }
35
36 int main() {
37     // Initialiser le générateur de nombres aléatoires
38     std::srand(std::time(0));
39
40     double temperature = 0.0;
41     bool moteursEtVentilateurDemarres = false;
42     bool resistancesDemarrees = false;
43     bool bobineRemplie = false;
44     bool niveauMatiereBas = false;
```

```
45
46 while (true) {
47     temperature = obtenirTemperature();
48
49     if (!moteursEtVentilateurDemarres) {
50         if (temperature >= 240.0) {
51             demarrerMoteursEtVentilateur();
52             moteursEtVentilateurDemarres = true;
53         }
54     } else {
55         if (temperature >= 300.0) {
56             arreterResistances();
57             resistancesDemarrees = false;
58         }
59
60         if (temperature <= 240.0 && !resistancesDemarrees) {
61             demarrerResistances();
62             resistancesDemarrees = true;
63         }
64     }
65
66     if (bobineRemplie && niveauMatiereBas) {
67         arreterMoteursEtVentilateur();
68         arreterResistances();
69         break;
70     }
71
72     // Simuler le remplissage de la bobine et le niveau de matière bas
73     // Ces conditions doivent être remplacées par les lectures réelles des capteurs
74     bobineRemplie = (std::rand() % 2) == 0; // Simuler le remplissage de la bobine
75     niveauMatiereBas = (std::rand() % 2) == 0; // Simuler le niveau de matière bas
76
77     // Attendre un certain temps avant de vérifier la température à nouveau
78     // Cette attente doit être remplacée par une fonctionnalité appropriée de l'automate programmable
79     std::cout << "Température actuelle : " << temperature << "°C" << std::endl;
80     std::cout << "-----" << std::endl;
81     std::cout << "Attente..." << std::endl;
82     std::cout << std::endl;
83     std::cout << std::endl;
84 }
85
86 return 0;
87 }
```

Figure IV.22 : Programme c++

Nous avons modifié le schéma de l'extrudeuse de plastique, Cette nouvelle représentation visuelle facilite la compréhension et la visualisation du circuit électrique spécialisé :

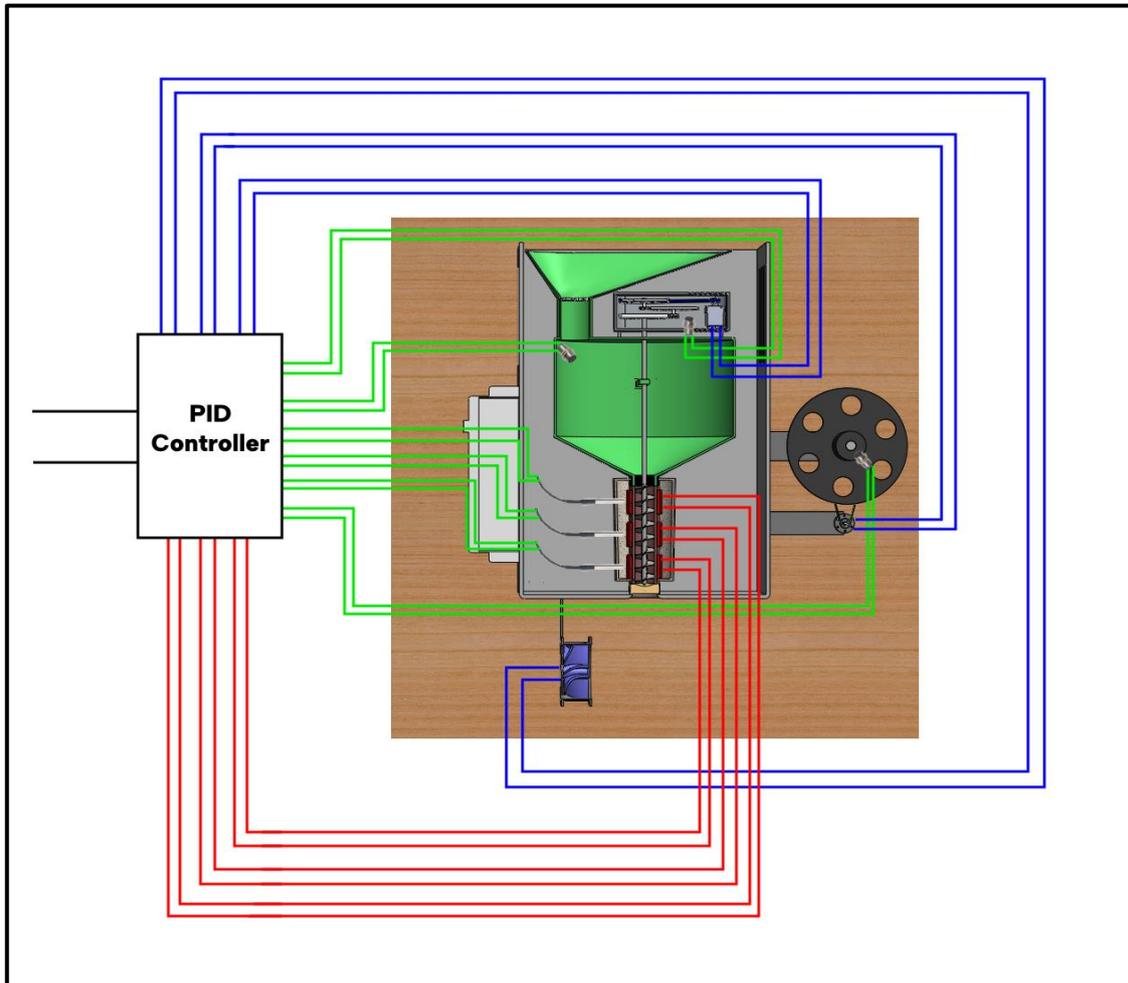


Figure IV.23 : Schéma de commande de la machine

IV.8. Conclusion

Ce design prend en compte toutes les difficultés rencontrées dans les machines de fabrication de films 3D précédemment conçues. De plus, il met l'accent sur la réduction du volume, afin de permettre à chaque personne de l'utiliser dans son propre projet.

Chapitre V

Risques et Sécurité de la machine

V.1. Introduction

Les machines industrielles sont des équipements spécialisés qui sont conçus pour accomplir des tâches complexes et exigeantes. Elles sont utilisées dans différents secteurs d'activité et leur manipulation requiert une expertise en raison de leurs fonctions spécifiques et des risques potentiels qu'elles peuvent présenter. Assurer la sécurité des machines industrielles est d'une importance capitale pour prévenir les accidents, les blessures et les dommages matériels. Dans cet article, nous examinerons les définitions essentielles liées à notre machine industrielle, les risques associés à son utilisation et les mesures de sécurité à mettre en place.

Nous aborderons également les risques électriques, mécaniques et thermiques couramment rencontrés dans notre machine, ainsi que l'application des consignes de sécurité pour réduire ces risques au minimum.

V.2. Définition d'une machine

Une machine industrielle est un outil destiné à un usage professionnel, qui permet de réaliser des travaux pointus et ardues à réaliser. Ces équipements sont conçus pour être manie par une équipe d'expert qui connaît les fonctions de l'outil, ainsi que la façon donc qu'il faut utiliser, il ne faut pas donc la mettre toutes les mains.

Pour utiliser une machine industrielle, il est conseillé de travailler dans le secteur d'activité adapté, ou d'avoir l'appui d'un expert, si on doit en utiliser un titre personnel.

Une machine industrielle est capable de produire, mais aussi de servir à conditionner, transformer et façonner des matières afin d'obtenir un produit fini utilisé par l'entreprise ou destiné à la location de l'article ou à sa vente directe.

V.3. Définition d'un risque

Un risque lié à une machine industrielle fait référence à la possibilité qu'une machine utilisée dans un environnement industriel puisse causer des dommages ou des préjudices aux opérateurs, aux travailleurs ou à l'environnement. Il s'agit d'une évaluation des dangers potentiels associés à l'utilisation, à la maintenance ou à l'interaction avec la machine.

V.4. Définition de la sécurité des machines

La sécurité des machines fait référence à l'ensemble des mesures et des précautions prises pour réduire les risques d'accidents, de blessures ou de dommages résultant de l'utilisation, de la maintenance ou de l'interaction avec des machines. Elle vise à assurer la protection des opérateurs, des travailleurs et du public qui interagissent avec les machines dans différents environnements, tels que les sites industriels, les usines, les chantiers de construction, etc.

V.5. Risques liés à notre machine

V.5.1. Risques électriques

Les principaux risques électriques dans notre machine sont les chocs électriques, les courts-circuits et les surtensions. Les chocs électriques peuvent survenir en raison d'une mauvaise isolation ou d'un câblage défectueux, ce qui peut mettre en danger la vie des personnes qui interagissent avec la machine. Les courts-circuits représentent un risque majeur car ils peuvent entraîner des incendies, mettant en danger non seulement la machine elle-même, mais aussi les personnes travaillant à proximité. Les surtensions peuvent endommager les appareils électriques sensibles, entraînant des pannes coûteuses et des pertes de production. Pour garantir une grande protection contre ces risques électriques, il est essentiel de respecter les normes de sécurité électrique en vigueur et de faire preuve de vigilance lors de l'utilisation de la machine. Cela implique de mettre en place des mesures de prévention telles que l'installation d'un système d'isolation adéquat, l'entretien régulier des câbles et des connexions, l'utilisation de dispositifs de protection tels que des disjoncteurs et des fusibles, ainsi que la formation et la sensibilisation des travailleurs aux dangers électriques.

Tableau V.1: classes des matériaux Électriques

Classes	Caractéristiques	Emploi	Symbole
0	Isolation principale Pas de possibilité de relier les masses entre elles ou à la terre	Utilisation interdite sur les lieux de travail	Pas de symbole

I	Isolation principale Masses reliées entre elles et à la terre	Utilisation possible sur les lieux de travail pour les machines fixes	
II	Isolation renforcée (ou double isolation) Masses non reliées à la terre	Utilisation possible sur les lieux de travail pour les machines non fixes	
III	Alimentation en très basse tension de sécurité (TBTS) ou de protection (TBTP) Masses non reliées à la terre Alimentation sécurisée (transformateur de sécurité)	Obligatoire sur les appareils portatifs, non fixes en milieu confiné humide ou mouillé	 Indication de la tension nominale (maximale)

V.5.2. Risques mécaniques

Le risque mécanique se produit lorsqu'un élément en mouvement peut entrer en contact avec une partie du corps humain, entraînant ainsi un risque de blessure. De même, une partie du corps humain en mouvement peut entrer en contact avec un objet matériel, créant ainsi un danger potentiel.

La présence d'un risque mécanique peut donc être identifiée par la conjonction de 3 éléments : un opérateur, un élément et l'énergie d'un mouvement.

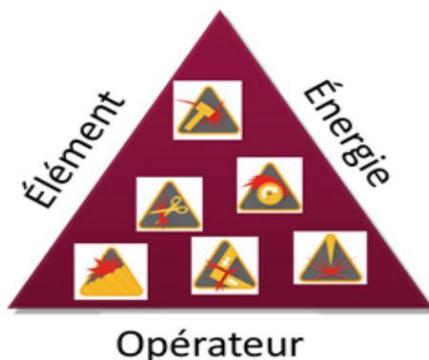


Figure V.1: Triangle des risques mécaniques

Si on parlera des phénomènes dangereux peuvent être cause par notre équipement on a :

- D'écrasement.
- De cisaillement, de coupure ou de sectionnement.
- De chocs avec des éléments solides.
- De perforation ou de piqûre.
- De choc ou de projection de fluides, notamment sous pression.

V.5.3. Risques thermiques

Les risques thermiques sont associés à l'exposition des travailleurs à des températures extrêmes, qu'elles soient élevées ou basses. Ces risques peuvent entraîner des blessures graves, voire mortelles, et doivent être pris au sérieux pour assurer la sécurité des employés. Voici quelques-uns des risques thermiques causes par notre machine :

- Brûlures : Les brûlures peuvent résulter du contact direct avec les bandes chauffantes.
- Insolation : L'insolation survient lorsque le corps est exposé à des températures élevées pendant une période prolongée.
- Échauffement : L'échauffement est une augmentation de la température corporelle causée par une exposition à des températures élevées.
- Incendies et explosions : Les incendies et les explosions peuvent également causer des blessures thermiques graves.

V.6. Application des consignes de sécurité sur notre machine

Nous avons mis en œuvre des consignes de sécurité rigoureuses dans le design de notre machine, afin d'assurer une protection ultime des utilisateurs. Cela comprend l'intégration de dispositifs de sécurité tels que des capteurs de mouvement, des systèmes d'arrêt d'urgence et des barrières de protection pour prévenir les accidents. De plus, nous avons effectué des études comme mentionner par la suite pour garantir la conformité aux normes de sécurité et la fiabilité de notre machine.

V.6.1. Prévention du risque électrique

Nous avons appliqué des consignes de sécurité rigoureuses dans le domaine électrique lors de la conception de notre machine, garantissant ainsi une protection ultime des utilisateurs et évitant les principaux risques tels que les chocs électriques, les arcs électriques,

les incendies et les explosions d'origine électrique, ainsi que les défaillances d'équipement électrique. Pour cela, nous avons intégré des mécanismes de protection tels que des dispositifs de mise à la terre, des disjoncteurs, des fusibles et des systèmes de surveillance en temps réel pour assurer la sécurité électrique et la fiabilité de notre machine.

En effet, nous avons opté pour une grande protection contre les risques électriques, parmi ces protections :

1/La Protection contre les contacts directs :

Nous avons mis en place des mesures de sécurité électrique dans la conception de notre machine afin de garantir la protection contre les contacts directs. Cela inclut l'éloignement et la distanciation, où la distance d'éloignement est déterminée en fonction de la valeur de tension, ainsi que l'utilisation de barrières ou d'enveloppes comme obstacle physique tel que des écrans, des boîtiers ou des armoires. De plus, nous avons assuré l'isolation des parties actives sous tension en les recouvrant d'un isolant qui ne peut être enlevé que par destruction. Nous avons également opté pour l'utilisation de très basse tension, qu'il s'agisse de très basse tension de sécurité (TBTS) ou de très basse tension de protection (TBTP), pour minimiser les risques électriques.

2/ La Protection contre les contacts indirects :

Nous avons appliqué des consignes de sécurité strictes dans le domaine électrique lors de la conception de notre machine, afin de garantir une protection efficace contre les contacts indirects, qui correspondent aux contacts entre une partie du corps humain et une masse conductrice accidentellement sous tension. Pour éliminer les contacts indirects dans notre machine, nous avons mis en place les mesures suivantes :

Double isolation ou isolation renforcée : Nous avons intégré des couches d'isolation supplémentaires pour fournir une protection supplémentaire contre les contacts indirects.

Utilisation de très basse tension : Tout comme pour la protection contre les contacts directs, nous avons opté pour l'utilisation de très basse tension, telle que la très basse tension de sécurité (TBTS), pour réduire les risques liés aux contacts indirects. En ce qui concerne les tensions et les classes de matériels électriques, nous avons soigneusement évalué les spécifications et les normes appropriées pour assurer la conformité de notre machine et garantir la sécurité des utilisateurs.

V.6.2. Prévention des risques mécaniques

Les risques mécaniques se réfèrent aux dangers liés à l'utilisation de machines. Ils incluent des risques tels que les blessures par écrasement, les coupures, les chutes d'objets lourds, les étranglements et les brûlures causées par des pièces en mouvement. Pour éviter cela, il est important de respecter les consignes de prévention suivante

- 1 - Adopter des mesures de protection collectives.
- 2 - Donner l'information nécessaire aux opérateurs.
- 3 - Mettre en place des dispositifs de protection.
- 4 - Signaler les dangers liés à la machine
- 5 - Imposer le port d'équipements de protection individuelle.

Nous avons utilisé les points susmentionnés comme base pour développer le design final de notre machine, en prenant en compte et en éliminant les risques potentiels qu'elle présentait, notamment le risque d'écrasement des extrémités lors de la manipulation, le risque de cisaillement et le risque d'enroulement des chocs avec des éléments solides. Nous avons également pris en considération des mesures de sécurité adéquates afin d'assurer la protection des utilisateurs de notre machine.

V.6.3. Prévention des risques thermiques

Les risques thermiques rencontrés dans une machine à utilisation domestique incluent les brûlures causées par des surfaces chaudes, les risques d'incendie dus à des surchauffes ou à des courts-circuits électriques, ainsi que les risques d'explosion liés à une mauvaise utilisation ou à des fuites de gaz. Il est essentiel de respecter les consignes de sécurité et de surveiller attentivement ces risques pour prévenir les accidents et assurer la sécurité des utilisateurs.

Afin de garantir une protection intégrale des utilisateurs de notre machine, nous avons développé un design global qui englobe les mesures suivantes :

- Amélioration de la ventilation pour réduire la température de la machine.
- Utilisation d'un système de chauffage innovant pour réduire la consommation d'énergie, minimiser les risques pour les utilisateurs et améliorer l'efficacité de la machine.
- Augmentation de la circulation de l'air par le biais de la ventilation pour disperser la chaleur émise par les surfaces chaudes et réduire les températures.

- Isolation des surfaces chaudes en utilisant des écrans ou des revêtements spéciaux pour assurer une protection thermique adéquate.

V.7.Conclusion

En appliquant des consignes de sécurité rigoureuses dans la conception de notre machine industrielle, nous avons cherché à minimiser les risques électriques, mécaniques et thermiques. Nous avons pris des mesures spécifiques pour prévenir les chocs électriques, les courts-circuits, les accidents mécaniques tels que les écrasements et les cisaillements, ainsi que les risques thermiques tels que les brûlures et les surchauffes. En intégrant des mécanismes de protection appropriés, en respectant les normes de sécurité et en sensibilisant les utilisateurs aux consignes de sécurité, nous avons travaillé à garantir la sécurité et la fiabilité de notre machine.

Conclusion générale

Notre projet vise à développer une machine d'extrusion capable de fabriquer des filaments d'impression 3D à partir de bouteilles en plastique PET recyclées. L'objectif principal est de rendre l'impression 3D durable et économique pour un large spectre d'utilisateurs (entre particuliers écoles, universités, ateliers...) le développement de notre machine est une première dans le monde, il permettra sans doute à notre pays qui est en développement l'utilisant d'une matière première gratuite et disponible en abondance qui est le PET.

La machine d'extrusion proposée est conçue de manière simple et robuste, permettant de prendre des déchets de bouteilles en plastique PET, de les chauffer jusqu'à la fusion, de les mélanger si nécessaire avec d'autre substance dans le but de modifier leurs propriétés physiques ou éventuellement leurs couleurs et de les extruder sous forme de filaments homogènes. En utilisant le PET comme matériau de base, sachant qu'il est disponible en grande quantité en Algérie, le projet vise à maximiser l'utilisation des ressources locales et à promouvoir le recyclage des déchets plastiques d'un côté et d'implanter une industrie nouvelle d'un autre côté.

La conception et les détails de la machine d'extrusion sont discutés de manière approfondie dans le chapitre correspondant, mettant l'accent sur les exigences spécifiques et les considérations techniques.

Nous avons établi des études rigoureuses pour assurer la transmission de la puissance mécanique apparié du moteur jusqu'à la vis sans fin en passant par un système de réduction composée par poulie courroies et engrenage.

Nous avons également réalisé des études thermiques approfondies avant de procéder au design de notre machine en incluant la partie de chauffage, de fusion ainsi que l'énergie thermique perdue, d'un autre côté nous nous sommes appliqués pour minimiser les pertes thermiques sur l'ensemble des composants, voire plus, nous nous sommes allés jusqu'à la récupération d'une partie de l'énergie perdue pour l'étudier dans le préchauffage de la matière première

Le design de notre machine a été établi de façon à permettre une expérience agréable utilisation sûre et sans risque, et ce après avoir suivi toutes les consignes de sécurité à savoir : la sécurité électrique, la sécurité mécanique et surtout la sécurité thermique

En encourageant l'utilisation de la machine d'extrusion pour la production de filaments 3D à partir de bouteilles en plastique PET, nous visons à soutenir le développement de l'impression 3D dans notre pays qui est en développement, en offrant une alternative économique et durable aux filaments traditionnels. Cela peut favoriser l'innovation locale, la création d'emplois et la réduction de la dépendance vis-à-vis des importations de filaments.

En fin, ce projet présente une solution innovante et concrète pour rendre l'impression 3D plus durable et économique en utilisant des matériaux recyclés localement. En combinant la technologie de l'impression 3D avec des pratiques respectant l'environnement, nous pouvons contribuer à un avenir plus durable et ouvrir de nouvelles opportunités pour les entreprises dans notre pays.

En perspectives, Nous travaillons actuellement sur l'amélioration de l'interface de notre machine, en mettant l'accent sur sa convivialité et son intuitivité. Nous développons une interface utilisateur graphique intuitive, avec des écrans tactiles haute résolution et des menus contextuels pour faciliter la navigation. De plus, nous améliorons la connectivité de la machine en intégrant des options sans fil, telles que le Wi-Fi et le Bluetooth, afin de simplifier la connexion à des appareils mobiles ou des ordinateurs. Nous sommes également en train de développer une application mobile compagnon qui permettra un contrôle à distance et offrira des fonctionnalités avancées. Notre objectif est de rendre l'utilisation de la machine plus simple et plus fluide pour nos utilisateurs.

Références bibliographiques

- [1] ABDOUNE, A., & HADDAD, O. K. (2020). Utilisation des déchets plastiques en matériaux composites de construction (Doctoral dissertation, universite Ahmed Draia-ADRAR).
- [2] <https://www.flexico.com/comment-les-plastiques-sont-ils-fabriques/>
- [3] <https://www.emploi-plasturgie.org/>
- [4] « Directives techniques pour l'identification et la gestion écologiquement rationnelle des déchets plastiques et leur élimination », Texte révisé - Version 6 Par le Groupe de travail technique de la Convention de Bâle.
- [5] SAFER K., « Environnement et développement durable », Polycopié de cours, 2015, P 59.
- [6] <http://www.ademe.fr/particuliers-eco-citoyens/dechets/bien-jeter/comprendresymbles>
- [7] OCDE, Organisation de coopération et de développement économiques, janvier 2007.
- [8] N. KERBOUA, « Etude de recyclage de déchets de polyéthylène téréphtalate (PET) utilisé pour la fabrication de bouteilles (eaux minérales) », Thèse doctorat en Génie des Procédés Université A-Mira Béjaia, Algérie, (2010).
- [9] F. SALHI et M. SALHI, « Etude et optimisation de quelque paramètre de valorisation des bouteilles en polyéthylène téréphtalate (PET) en fibres polyester », Mémoire de Master, Université A-Mira Béjaia, (2012).
- [10] L. GOUISSEM, « contribution à l'amélioration des propriétés du poly (éthylène téréphtalate) (PET) recyclé », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, Algérie, (2007).
- [11] I. GOODMAM, In : H.F. MARC, N.M. BIKALES, C.G. OVERBERGER et G. MENGESN, « Encyclopedia of Polymer Science and Engineering », Vol. 12, Edition John Wiley and Sons, New York, (1988).
- [12] N. MEDJDOUB, « Effets du triphenylphosphite et du SEBS-g-MA sur les propriétés du système (PET/ PEHD) à base de matériaux recyclé », Mémoire de Master, Université Ferhat Abbas, Algérie, (2011).

- [13] V. CHAFFRAIX, « Etude de l'extrusion du polyéthylène téréphtalate et de ses mélanges non-compatibilisés avec le polyéthylène haute densité - Application au recyclage », Thèse doctorat en Sciences et Génie des Matériaux, Ecole des Mines de Paris, (2002).
- [14] R. DAUBENY, C.W. BUNN, C.J. BROWN, Proc. Roy. Soc., A226, 531 (1954).
- [15] J.P. QUENTIN, « PET ou polyéthylène téréphtalate », Techniques de l'Ingénieur, J6488, (2004).
- [16] U. KONCKE, G. ZACHMANN et F.J. BALTA-CALLEJA, Macromolécules, 29, 6019-6022, (1996).
- [17] M. RULE, « Polymer Handbook », (1987).
- [18] N. ZERDOUMI, F. NOUAR, « Comportements du PET vierge et recyclé en présence d'un allongeur de chaînes de type phosphites - études par extrusion et par malaxage interne », Mémoire d'Ingénierat, Université Ferhat Abbas, Algérie, (2011).
- [19] <http://www.strid.ch/Pdf/pet.pdf>archive. (Consulté 15 Avril 2016).
- [20] P.Y. PENNARUN, « Migration à partir de bouteilles en PET recyclé - Elaboration et validation d'un modèle applicable aux barrières fonctionnelles », Thèse de Doctorat en chimie, Université de Reims Champagne, U.F.R. Sciences Exactes et Naturelles, Ardenne, (2001).
- [21] K.L. NAÏT-ALI, « le PET recyclé en emballages alimentaires : Approche expérimentale et modélisation, Thèse de doctorat en Chimie des Matériaux », Univ Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc, France, (2008).
- [22] <http://www.contactalimeentaire.com/fileadmin/ImageFichier-Archive/contactalimetaire/Fichiers-Documents/Avis-AFSSA-CSHPF/avis-du-26-11-2006rap.pdf>. (Consulté le 19 avril 2016).
- [23] J. SCHEIRS, « Polymer Recycling, science, Technology and application », Edition John Wiley and Sons, England, (1998).
- [24] N. TORRES, J.J. ROBIN, B. BOUTEVIN, « Eur Polym », 36, 2075, (2000).
- [25] F. AWAJA, D. PAVEL, « Recycling of PET », European Polymer Journal, 2005 volumes.41, pp.1453-1477, (2005).

- [26] E. MARECHAL, P.H. GEIL, V.B. GUPTA et Z. BASHIR, « Handbook of thermoplastic polyesters », Edité par Stoyko FAKIROV, WILEY-VCH, Allemagne, (2002).
- [27] Makers, G. 3. (2023, 20 janvier). Les différents types de filaments 3D dans l'industrie ; impression 3D - GT 3D Makers. *GT 3D Makers*.
<https://gt3dmakers.com/le3dblog/debuterdanslimpression3d/comment-choisir-le-type-de-filament-3d-a-utiliser/>
- [28] Le guide complet pour impression 3D | Hubs. (S. d.). Hubs.
- [29] De Futura, L. R. (s. d.). Impression 3D : qu'est-ce que c'est ? Futura. <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/imprimante-3d-impression-3d-15137/>
- [30] Impression 3 D - Son histoire. (2017b, juillet 3). FABULOUS.
<https://www.fabulous.com.co/guide-impression-3d/en-bref/histoire/#>
- [31] Isaac. (2022, 25 février). Types d'imprimantes 3D et leurs caractéristiques. Hardware libre. <https://www.hwlibre.com/fr/tipos-impresoras-3d/>
- [32] PRIMANTE3D. (2023, 28 janvier). Imprimante 3D fonctionnement - Comment ça marche ? | PRIMANTE3D. <https://www.primante3d.com/principe/>
- [33] De Futura, L. R. (s. d.). Impression 3D : qu'est-ce que c'est ? Futura. <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/imprimante-3d-impression-3d-15137/>
- [34] Vincent. (2023, 22 avril). Les avantages et inconvénients de l'impression 3D - AnalogicTech. AnalogicTech. <https://www.analogictech.com/les-avantages-et-inconvenients-de-limpression-3d/>
- [35] W, M. (2023). Le plastique PETG en impression 3D. 3Dnatives.
<https://www.3dnatives.com/plastique-petg-18122019/>
- [36] Slice, G. (2023). PETG : Tout savoir sur cette matière d'impression 3D — La Nouvelle École. La Nouvelle École. <https://www.nouvelleecole.fr/blog/petg-tout-savoir-sur-cette-matiere>