

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION
Département de Génie Mécanique



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master académique en Génie Mécanique

Option : Science des Matériaux et Fabrication Mécanique et Productique

THEME :

Etude comparative du comportement mécanique de l'ABS :
injection presse- impression 3D

Proposé et dirigé par :

Mme. MOHELLEBI FADHILA

Co-encadreur :

Mr. MOHELLEBI MOULOUD

Présenté par :

Mr. OURAD ABDERRAZEK

Mr. OUAZAR MADANI

Remerciements

Nous remercions en premier lieu le Bon Dieu de nous avoir donné le courage d'aller au bout de notre objectif.

Nous remercions les membres des laboratoires de l'UMMTO, ENIEM, SISCOPLAST, EI et AlcadWorks pour leur aide précieuse.

Nous remercions notre promotrice Mme MOHELLEBI. F pour la confiance qu'elle nous a accordée en proposant ce sujet que nous avons mené à bien, et d'avoir accepté de diriger notre travail, par son soutien et ses conseils pertinents qui nous ont permis de travailler tranquillement.

Nous adressons nos plus vifs remerciements et reconnaissances, à Mr MOHELLEBI. M pour sa disponibilité et son aide précieuse.

Il nous est agréable de remercier les membres de jury, pour nous avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire qu'ils trouvent ici l'expression de notre profond respect.

Nous ne remercierons jamais assez nos chères familles pour nous avoir toujours encouragés et nous avoir enseigné le goût du savoir et de l'ambition.

Nous remercierons aussi l'ensemble de la famille enseignante pour nous avoir formé durant toutes ces années et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.

Dédicaces

A la mémoire de mon cher et
regretté père

A ma mère ;

A mon frère et à ma sœur ;

A tous mes proches ;

A mes professeurs ;

A mes amis et à toutes les
personnes qui me sont chères

OUAZAR MADANI

Dédicaces

A LA MÉMOIRE DE MON CHER ET

REGRETTÉ PÈRE ;

A MA MÈRE ;

A MES SŒURS

A TOUTE MA FAMILLE

A MES AMIS ET À TOUTES LES
PERSONNES QUI ME SONT CHÈRES

OURAD ABDERRAZEK

SOMMAIRES

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale

Chapitre I : Aperçu sur les polymères et modes de transformation :	1
I.1. Introduction :.....	1
I.2. Définitions :.....	1
I.2.1. Polymère :.....	1
I.2.2. Monomère :.....	1
I.2.3. Polymérisation :.....	2
I.2.4. Homopolymère :.....	2
I.2.5. Copolymère :.....	2
I.2.6. Tacticité :.....	3
I.3. Classification des polymères :.....	3
I.3.1. Classification selon le comportement thermomécanique :.....	3
I.3.1.1. Les thermoplastiques :.....	3
I.3.1.2. Les thermodurcissables :.....	5
I.3.1.3. Les élastomères :.....	7
I.3.2. Classification selon la morphologie :.....	8
I.3.2.1. Les polymères amorphes :.....	8
I.3.2.2. Les polymères semi-cristallins :.....	8
I.3.3. Classification selon la structure :.....	8
I.3.3.1. Structure linéaire :.....	9
I.3.3.2. Structure ramifié :.....	9
I.3.3.3. Structure réticulé :.....	9

I.3.4. Caractéristiques des polymères :.....	9
I.3.4.1. Elasticité :.....	10
a) Comportement élastique :	10
b) Comportement plastique :	10
I.3.5. Propriétés des polymères :.....	10
I.3.5.1. Propriétés physique :	10
a) Masse volumique :.....	10
I.3.5.2. Propriétés thermiques :.....	11
a) Température de fusion :.....	11
b) Température de ramollissement Vicat :.....	11
I.3.5.2. Propriétés mécaniques :.....	11
a) Contrainte au seuil d'écoulement en traction :.....	11
b) Résistance à la rupture :.....	11
c) Allongement à la rupture :.....	11
d) Module de Young en traction :.....	12
e) Résistance au choc :.....	12
f) Dureté :	12
I.4. La mise en œuvre des polymères :.....	12
I.4.1. Mise en œuvre des thermoplastiques :.....	12
I.4.1.1. L'injection :.....	12
I.4.1.2. L'injection –soufflage :.....	13
I.4.1.3. L'extrusion :.....	14
I.4.1.4. L'extrusion-soufflage :.....	15
I.4.1.5. L'extrusion-gonflage :.....	16
I.4.1.6. Le calandrage :.....	17
I.4.1.7. Le moulage par expansion :.....	19
I.4.1.8. L'enduction :.....	19
I.4.1.9. Le thermoformage :.....	20
I.4.1.10. Le moulage par rotation (roto-moulage) :.....	21

I.4.2. Mise en œuvre des thermodurcissables :	21
I.4.2.1. La coulée :	21
I.4.2.2. Moulage par compression :	22
I.4.2.3. Moulage par compression transfert :	23
I.4.2.4. L'injection :	24
I.4.3. Mise en œuvre des mousses :	24
I.5. Conclusion :	24

Chapitre II : Techniques d'Injection Plastique.....	25
II.1. Introduction :	25
II.2. Injection presse :	25
II.2.1. Historique :	25
II.2.2. Architecture des presses à injecter :	26
II.2.3. Les différents types de presses d'injection :	26
II.2.3.1. Presse horizontale :	26
II.2.3.2. Presse verticale :	27
II.2.4. Les différentes parties ou unités d'une presse :	28
II.2.4.1. Unité d'injection :	28
a. Phase de plastification :	29
b. Phase d'injection :	29
II.2.4.2. Unité de fermeture :	29
II.2.4.3. Le moule :	29
II.2.5. Le choix d'une presse :	31
II.2.6. Le cycle de moulage par injection :	31
II.2.6.1. Le démoulage :	31
II.2.6.2. Fermeture de moule :	31
II.2.6.3. Verrouillage :	31
II.2.6.4. Injection et compactage :	31
II.2.6.5. Refroidissement :	31

II.2.6.6. Ouverture de moule :.....	31
II.3. L'impression 3D :.....	32
II.3.1. Introduction :.....	32
II.3.2. Historique :.....	32
II.3.3. Principe de fonctionnement :.....	34
II.3.4. Quelques techniques d'impression en 3D :.....	36
II.3.4.1. Dépôt de matière fondue FDM (Fused Deposition Modeling).....	36
II.3.4.2. Imagerie par transfert de film FTI (Film Transfer Imaging).....	36
II.3.4.3. Modelage à jets multiples MJM (Modelage à Jet Multiples).....	36
II.3.4.4. Stéréolithographie SLA (Stéréolithographie Apparatus).....	36
II.3.4.5. Frittage sélectif par laser SLS (Selective Laser Sintering).....	36
II.3.5. Les produits utilisés dans l'impression 3D :.....	37
II.3.5.1. L'ABS (acrylonitrile butadiène styrène) :.....	37
II.3.5.2. PLA (acide polylactique) :.....	38
II.3.5.3. Polyamides :.....	39
II.3.5.4. Nylon :.....	39
II.3.5.5. Alumide :.....	40
II.3.5.6. Résine :.....	40
II.3.5.7. Polypropylène :.....	41
II.3.5.8. Matériaux de support :.....	41
II.4. Conclusion :.....	42
Chapitre III: Matériaux et Technique de Caractérisation.....	43
III.1. Introduction :.....	43
III.2. MATERIAU : L'Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS).....	43
III.2.1. Historique :.....	43
III.2.2. Définition :.....	43
III.2.3. Caractéristiques de l'ABS :.....	45
III.2.3.1. Caractéristiques physiques et mécaniques :.....	45

III.2.3.2. Caractéristiques thermiques :.....	45
III.2.3.3. Caractéristiques chimiques :.....	45
III.2.3.4. Conditions de mise en œuvre de l'ABS :.....	45
III.2.4. Présentation commerciale de l'ABS :.....	45
III.2.5. Avantages particuliers :.....	46
III.2.6. Inconvénients :	46
III.2.7. Application :.....	46
III.2.8. Recyclage :.....	46
III.2.9. Fiche technique : ABS.....	47
III.3. Techniques de caractérisation (partie théorique) :.....	48
III.3.1. Introduction :.....	48
III.3.2. Essais de traction.....	48
III.3.2.1. Définition.....	48
III.3.2.2. Description générale d'une machine de traction.....	49
III.3.2.3. Éprouvettes et systèmes d'encastrement.....	49
III.3.2.4. Courbe conventionnelle :.....	51
III.3.3. Essai de résilience :.....	53
III.3.3.1. Introduction :.....	53
III.3.3.2. Méthode pendulaire :.....	53
III.3.3.3. Principe de l'essai:.....	54
III.3.3.4. Machine d'essai:.....	54
III.3.3.5. Les éprouvettes.....	55
III.3.4. Le microscope optique :.....	55
III.3.4.1. Définition :.....	55
III.3.4.2. Généralités :.....	56
III.3.4.3. Les différents types du microscope optique :.....	57
III.3.5. Microscope électronique à balayage (MEB).....	57
III.3.5.1. Les éléments principaux du MEB.....	58
III.3.5.2. Fonctionnement simplifié :.....	59

III.3.6. Essai de dureté	60
III.3.6.1. Introduction :.....	60
III.3.6.2. Principe de l'essai de dureté :.....	60
III.3.7. Indice de fluidité :.....	63
III.3.7.1. Définition :.....	63
III.3.7.2. Principe :.....	63
III.3.7.3. Appareillage :.....	64
III.3.7.4. Définitions des grandeurs utilisées.....	64
III.3.7.5. Calcul et expression de résultats :.....	65
III.4 : Techniques de caractérisation (partie pratique) :.....	65
III.4.1. Introduction :.....	65
III.4.2. Elaboration des éprouvettes :.....	66
III.4.2.1. Elaboration des éprouvettes par injection plastique.....	66
III.4.2.2. Elaboration des éprouvettes par impression 3D :.....	67
III.4.3. Déroulement des essais:.....	69
III.4.3.1. Indice de fluidité.....	69
III.4.3.2. Essai de traction :.....	70
III.4.3.3. Essai de Résilience :.....	71
III.4.3.4. La microdureté.....	73
III.4.3.5. Observation microscopique (microscope optique et MEB) :.....	74
 Chapitre IV : Résultats et Discussions.....	 76
Introduction :.....	76
IV.1. Résultats de l'indice de fluidité :.....	76
IV.2. Essai de traction :.....	76
IV.2.1. Module de Young E:.....	78
IV.2.2. Contrainte maximale σ_m :.....	79
IV.2.3. Allongement à la rupture A% :.....	80
IV.3. Résultats de L'Essai Charpy :.....	80

IV.4. Résultats de la Micro dureté :.....	81
IV.5. Résultats de l'observation au microscope optique :.....	82
IV.6. Résultats de l'observation au microscope électronique à balayage:.....	84
Conclusion :.....	85

Conclusion générale

Bibliographie

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I.1 : Procédé de mise en œuvre par injection	13
Figure I.2 : Procédé de mise en œuvre par injection-soufflage	14
Figure I.3 : Procédé de mise en œuvre par extrusion	15
Figure I.4 : Procédé de mise en œuvre par extrusion soufflage	16
Figure I.5 : Procédé de mise en œuvre par extrusion-gonflage	17
Figure I.6 : Procédé de mise en œuvre par calandrage	18
Figure I.7 : La pré-expansion, le stockage et le moulage	19
Figure I.8 : Procédé de mise en œuvre par enduction	20
Figure I.9 : Procédé de mise en œuvre par thermoformage	20
Figure I.10 : Procédé de mise en œuvre par roto-moulage	21
Figure I.11 : Technique de coulée	22
Figure I.12 : Technique du moulage par compression	23
Figure I.13 : Technique du moulage par compression transfert	23
Figure I.14 : Procédé de mise œuvre des mousses	24

CHAPITRE II

Figure II.1. Presse à injecter les thermoplastiques	26
Figure II.2. Presse horizontale	27
Figure II.3. Presse verticale	28
Figure II.4. Dispositif d'une presse d'injection	28
Figure II.5. Système vis-piston	29
Figure II.6. Moule d'injection plastique	30
Figure II.7. Schéma explicatif de fonctionnement d'une imprimante 3D	35
Figure II.8. Filament d'ABS générique	38
Figure II.9. Filament de PLA	38
Figure II.10. Filament de Polyamides	39
Figure II.11. Filament de nylon	39
Figure II.12. Alumide en poudre	40
Figure II.13. Pièce en alumide	40
Figure II.14. Objet imprimé en résine transparente	40
Figure II.15. Objet imprimé en Polypropylène	41
Figure II.16. Objets imprimés en Matériaux de support	42

CHAPITRE III

Figure III.1: Structure chimique de l'ABS	44
Figure III.2: Vue d'un ABS au microscope électronique à transmission	44
Figure III.3: Machine à traction	49
Figure III.4: Géométrie des éprouvettes de traction, norme NF EN ISO 527	50
Figure III.5. Courbes conventionnelles typiques de traction	51
Figure III.6: Détail pour le calcul de E (pente de la partie élastique) et $R_{p0.2}$	52
Figure III.7: Image correspondant aux pendules	53
Figure .III.8: Machine d'essai de résilience (mouton pendule)	54
Figure III.9: Éprouvettes Charpy standardises. ISO-V. Dimension en mm	55
Figure III.10: Image d'un Microscope optique	56
Figure III.11:Schéma explicatif d'un microscope optique	57
Figure III.12: Microscope électronique à balayage	58
Figure III.13:Le filament en tungstène	58
Figure III.14: Le canon à électrons	58
Figure III.15: La chambre dans laquelle on peut placer 4 objets.	59
Figure III.16: Image d'un viscosimètre	63
Figure III.17: Schéma explicatif d'un viscosimètre	64
Figure III.18: Bobine d'un filament d'ABS	65
Figure III.19: Epreuve élaborée par injection	66
Figure III.20: Epreuve élaborée par 3D	67
Figure III.21: Imprimante 3D ZORTRAX M2000	67
Figure III.22: Viscosimètre	69
Figure III.23: Machine de traction	70
Figure III.24: Dimension de l'éprouvette de traction 3D	70
Figure III.25: Dimension de l'éprouvette de traction injection presse	71
Figure III.26: Dimensions de l'éprouvette de résilience	71
Figure III.27: Position d'éprouvette et mouton-pendule	72
Figure III.28: Machine de résilience Zwick 5102	72
Figure III.29: Microduromètre	73
Figure III.30: empreinte délimité par les réglettes	74
Figure III.31: Microscope électronique	75
Figure III.31: Microscope optique à Balayage	75

CHAPITRE IV

Figure IV.1. La courbe contrainte déformation pour les échantillons réalisés par injection.	77
Figure IV.2. La courbe contrainte déformation pour les échantillons réalisés par impression 3D.	78
Figure IV.3. La superposition des courbes contraintes déformation des deux procédé.	78
Figure IV.4 Histogramme du module de Young des échantillons.	79
Figure IV.5.Histogramme des contraintes maximales.	80
Figure IV.6. Histogramme de l'Allongement à la rupture des échantillons.	80
Figure IV.7. Histogramme.de l'essai Charpy.	81
Figure IV.8.Histogramme de la micro dureté des échantillons d'ABS injecté par les deux procédés.	82
Figure IV.9 Observation au microscope optique des faciès de rupture des éprouvettes de traction	82
Figure IV.10 Observation au microscope optique des faciès de rupture des éprouvettes de résilience	83
Figure IV.11 : Micrographie des faciès de rupture des éprouvettes de résilience	84
Figure IV.12 Micrographie des faciès de rupture des éprouvettes de traction	85

Liste des tableaux

CHAPITRE I

Tableau I.1: Caractéristiques et usage des thermoplastiques	4
Tableau I.2: Caractéristiques et usage des thermodurcissables	6
Tableau I.3 : Caractéristiques et usage des élastomères	7

CHAPITRE II

Tableau II.1: Procédés d'impression 3D, caractéristiques et nom de l'entreprise créatrice	37
---	----

CHAPITRE III

Tableau III.1: Caractéristiques physiques et mécaniques de l'ABS	45
Tableau III.2:Caractéristiques thermiques de l'ABS	45
Tableau III.3: Conditions de mise en œuvre de l'ABS	45
Tableau III.4: Fiche technique des propriétés mécaniques	47
Tableau III.5: Fiche technique des propriétés thermiques	47
Tableau .III.6: Autres propriétés	48
Tableau III.7: Fiche technique des propriétés mécaniques	48
Tableau III.8: Propriétés mécaniques et rhéologiques des polymères à l'état solid	51
Tableau III.9: Paramètre d'injection	66
Tableau III.10: Caractéristiques techniques Zortrax M200	68
Tableau III.11: Données techniques du mouton pendule Zwick	73

CHAPITRE IV

Tableau IV.1. Module de Young des échantillons	79
Tableau IV.2. Contrainte maximale	79
Tableau IV.3.: Allongement à la rupture des échantillons	80
Tableau IV.4: Essai Charpy (résistance au choc des échantillons)	81
Tableau IV.5. Micro dureté Knoop des différents échantillons	81

Liste des abréviations

SLA : Stéréolithographie

SLS : Selective Laser Sintering.

LAM : Laser Additive Manufacturing.

stl : format du fichier 3D

CSC : Computer Sciences Corporation.

R-D : Recherche et Développement.

UV : Ultraviolet.

CNC : Computer Numerical Control.

CNRS : Centre national de la recherche scientifique

P : Poids [N]

L : Longueur [mm]

g : La gravité [N/Kg]

m : La masse [Kg]

d : Le diamètre [mm]

R_{pe} : Résistance pratique à l'extension [N/mm²]

R_e : Résistance à l'élasticité [N/mm²]

s : Coefficient de sécurité

R.I.M : Réaction Injection Molding

F : la charge (N)

S₀ : section initiale (mm²)

σ_C : la contrainte conventionnelle (MPa).

Δl : l'allongement (mm)

l₀ : la longueur initiale,

ε_C : déformation conventionnelle

R_{p0,2} : limite conventionnelle d'élasticité

σ_m : Contrainte maximale

Rm : résistance à la traction (MPa).

Z% : Coefficient de Striction

A % : allongement pour cent après rupture (%)

E : module de Young

Rm : résistance à la traction

λ : longueur d'onde

IF : Indice de Fluidité

MEB. Microscope électronique à balayage

MFI: Le Melt Flow Index

MFR: Melt Flow rate

MVR: Melt volume rate

θ est la température d'essai, en degrés Celsius.

m_{nom} : est la charge nominale, en kilogrammes.

t_{ref} : est le temps de référence (10 min), en secondes (600 s).

HK : dureté de Knoop

Introduction générale

Les polymères, appelés communément "matières plastiques", sont indissociables de notre environnement et de notre vie pratique. Ils se sont imposés dans tous les domaines de nos activités en vue de leur large gamme de caractéristiques.

Les techniques de transformation des plastiques dépendent de la nature des polymères et de la destination des produits finis. Afin d'améliorer la productivité des plastiques, et perfectionner leurs performances, le monde industriel a accordé une importance capitale à l'évolution de ces techniques.

Dans le cadre de la réalisation de notre projet de fin d'étude, nous avons effectué une étude comparative du comportement mécanique d'un polymère (ABS) lors de son injection par deux techniques différentes : l'injection presse et l'impression 3D).

Notre étude s'est déroulée dans deux sociétés qui sont : AlcadWorks, société d'intégration des nouvelles technologies liées à la conception mécanique (siège Bordj El Kiffan, Alger) société choisie pour l'impression 3D. La seconde est l'entreprise SISCOPLAST, entreprise de transformation des produits plastique (siège Draa El Mizan) choisie pour l'injection presse (injection classique).

Afin de mener à bien notre travail, nous l'avons organisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre intitulé « Aperçu sur les polymères et modes de transformation » où l'on trouve des définitions des polymères dans une première partie, et l'étude des différents types de mode de transformation dans la seconde partie.
- Le deuxième chapitre intitulé « Technique d'injection plastique » qui portera sur les procédés d'injection par presse et l'impression 3D.
- Dans le troisième chapitre « Matériau et techniques de caractérisation » on donnera les caractéristiques de notre matériau (ABS), ainsi que les différents essais mécanique effectué tel que : l'essai de traction, la microdureté, l'essai de résilience, observation microscopique et indice de fluidité.
- Le dernier chapitre est une présentation des résultats avec leurs interprétations.

On couronne notre étude par une conclusion générale qui donne une synthèse des principaux résultats obtenus puis les perspectives.

CHAPITRE I :
APERÇU SUR LES
POLYMERES ET MODES DE
TRANSFORMATION

Chapitre I : Aperçu sur les polymères et modes de transformation

I.1. Introduction : [2]

Les travaux de Staudinger dans les années 1920 constituent la base de la science des polymères (Nobel en 1953) ou macromolécules. Flory énoncera plus tard les principes fondamentaux sur les polymères (Nobel 1974).

Pour bien mesurer l'importance des matériaux de synthèse, il faut savoir que, en volume physique, leur production annuelle mondiale a aujourd'hui largement dépassé celle des métaux. En effet, la réalisation des produits ne doit pas se mesurer en pondéral car, dans l'industrie, on ne cherche pas à fabriquer des masses mais des pièces pour réaliser des fonctions.

Comme pour l'acier, on retrouve ces matériaux dans tous les secteurs d'activité : automobile, ferroviaire, constructions navale et aéronautique, électricité, électronique, électroménager, sports et loisirs, santé, bâtiments et travaux publics (BTP), textiles, agriculture, emballage, etc. Ceci, contrairement à d'autres matériaux qui restent très focalisés sur un type d'activité : papier-carton (50 % emballage, 50 % écriture), verre (2/3 bouteillerie, 1/3 bâtiment), caoutchouc (2/3 pneumatiques), béton et ciment (100 % BTP).

Il faut aussi savoir que l'électricité et l'électronique, telles que nous les connaissons, n'existeraient pas sans ces matériaux qui, grâce à leurs propriétés isolantes, ont permis leur développement et leur miniaturisation. Pour le futur, on peut attendre beaucoup de la fonction inverse car en dopant certains d'entre eux on pourra créer des fonctions semi-conductrices.

I.2. Définitions : [1] [2]

I.2.1. Polymère :

Le mot polymère vient du grec « plous » plusieurs, et « meros » partie. Un Polymère est une macromolécule, organique ou inorganique, constituée de l'enchaînement répété d'un même motif, le monomère, reliés les uns aux autres par des liaisons covalentes. Le résultat est une suite d'atomes de carbone reliés entre eux et combinés à d'autres éléments (hydrogène, azote, fluor, silicium, chlore, etc.).

I.2.2. Monomère :

Le mot monomère vient du grec (du grec monos: un seul ou une seule, et meros ; partie). Chaque monomère est constitué d'atomes unis par des liaisons chimiques covalentes fortes et confère au polymère certaines propriétés

Les monomères sont produits par les raffineries de pétrole, à commencer par leur tête de file l'éthylène $\text{CH}_2=\text{CH}_2$. Cela met la chimie des polymères en aval de la pétrochimie.

I.2.3. Polymérisation :

La polymérisation désigne la réaction chimique ou le procédé par lesquels des petites molécules (par exemple des hydrocarbures de 2 à 10 atomes de carbone) réagissent entre elles pour former des molécules de masses molaires plus élevées. Les molécules initiales peuvent être des monomères ou des pré-polymères ; la synthèse conduit à des polymères en présence de réactifs et de catalyseurs, et sous l'action de la chaleur et de la pression, il se forme des chaînes macromoléculaires constituées de motifs de répétition identiques (homopolymère synthétisé) ou différents (copolymère obtenu), liés de façon covalente.

Les réactions de polymérisation peuvent être classées selon deux mécanismes :

- Polymérisations par étapes : réactions ayant lieu entre des groupes fonctionnels. La majorité des polymérisations par étapes se fait par polycondensation.
- Polymérisations en chaîne : réactions ayant lieu grâce à la formation de centres actifs comme des radicaux ou des ions. La majorité des polymérisations en chaîne se fait par polyaddition.

I.2.4. Homopolymère :

$[-A-]_n$, n unités constitutives liées entre elles par des liaisons covalentes.A-A-A-AA-A

Exemple du PVC. $(CH_2-CHCl)_n$ Il peut donner lieu à des enchaînements réguliers (tête à queue) ou irréguliers (tête à tête ou queue à queue)

« Tête à queue » : ...CH₂-CHCl-CH₂-CHCl...

« Queue à queue » : ...CH₂-CHCl-CHCl-CH₂...

I.2.5. Copolymère :

Les polymères sont constitués de deux (ou plus) unités constitutives nommées A, B, C etc...

– Copolymères statistiques :

A et B se répartissent en suivant une statistique. Les copolymères désordonnés (Random) font partie de cette famille.

-A-A-B-A-B-A-B-B-B-A-A-B-

– Copolymères alternés :

Les deux motifs alternent régulièrement

-A-B-A-B-A-B-A

– Copolymères séquencés linéaires ou copolymères à bloc :

Chaque unité constitutive est répétée plusieurs fois de suite pour former de longues séquences

-A-A-A-A-A-B-B-B-B-B-B: dibloc [AB]

-A-A-A-A-A-B-B-B-B-B-B-A-A-A : tribloc [ABA]

– Copolymères séquencés et greffés :

Une chaîne d'un homopolymère principal, sur lequel des chaînes secondaires d'un autre polymère sont greffées.

I.2.6. Tacticité :

La tacticité ne concerne que les molécules asymétriques ; il s'agit de molécules de même formule chimique dont l'arrangement des radicaux monovalents R le long du squelette de la molécule est différent d'une chaîne à l'autre.

Le groupement R rend le monomère asymétrique ; Il y a plusieurs façons de le lire sur le squelette de la chaîne :

- Polymère isotactique : les radicaux R sont tous du même côté du plan
- Polymère syndiotactique : les radicaux R sont situés alternativement de part et d'autre du plan.
- polymère atactique : les radicaux R sont fixés au hasard, de façon aléatoire.

La perfection de la stéréorégularité des polymères synthétiques n'existe pas, on observe seulement une tendance plus ou moins grande à un type de régularité stérique.

I.3. Classification des polymères :

I.3.1. Classification selon le comportement thermomécanique : [4]

Selon le comportement thermomécanique, on distingue ainsi trois grandes classes de polymères : les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères.

I.3.1.1. Les thermoplastiques :

Les matériaux thermoplastiques ou thermoplastes sont des solides généralement Solubles, formés de chaînes distinctes bien compactes, liées entre elles par des seules liaisons secondaires (forces de van der Waals ou dipolaires, liaisons d'hydrogène, etc.) et mis en forme (même de façon répétitive) par chauffage et refroidissement.

Le polymère thermoplastique se ramollit lorsqu'il est chauffée au-dessus d'une certaine température, mais qui, au-dessous, redevient dure (T_g température de transition vitreuse) Une telle matière conservera donc toujours de manière réversible sa thermoplasticité initiale. Cette qualité rend le matériau thermoplastique potentiellement recyclable (après broyage). Cela implique que la matière ramollie ne soit pas thermiquement dégradée et que les contraintes mécaniques de cisaillement introduites par un procédé de mise en forme ne

modifient pas la structure moléculaire et que L'état de ramollissement permet leur déformation sous l'action de contraintes mécaniques, cette déformation étant figée par le refroidissement.

Tableau I.1 : Caractéristiques et usage des thermoplastiques

Nom, abréviation	Caractéristiques	usages
Polyéthylène (PE)	Translucide, inerte, facile à manier, résistant au froid. On distingue deux familles: - le PEBD (polyéthylène basse densité) bonne résistance chimique, olfactivement, gustativement et chimiquement neutre, facilement transformé et soudé. - le PEHD (polyéthylène haute densité)	Utilisé dans la moitié des emballages plastiques et dans les domaines les plus divers. PEBD : produits souples : sacs, films, sachets, bidons, récipients et bouteilles souples (sauces, shampooing, crèmes ...)* PEHD : objets rigides (bouteilles, flacons, bacs-poubelles, tuyaux, jouets, ustensiles ménagers, boîtes de conservation, sacs plastiques)*
Polypropylène (PP)	Très facile à colorer. N'absorbe pas l'eau. aspect brillant et résistant à la température (160°C). Difficile à recycler surtout s'il est imprimé	Pièces moulées d'équipements automobiles (pare-chocs, tableaux de bord, ...), mobilier de jardin, Film d'emballage, bouteilles rigides, boîtes alimentaires résistantes à la température du lave-vaisselle. Fibres de tapis, moquettes, cordes, ficelles
polystyrène (PS)	Dur et cassant. Trois types: - polystyrène "cristal" transparent - polystyrène "choc" (HIPS) ; acrylonitrile butadiène styrène ABS) - polystyrène expansé (PSE), inflammable et combustible	Usages variés : mobilier, emballages, jouets, verres plastiques, pots de yaourt,... -"cristal": nombreux types de boîtes, boîtiers CD... -ABS : produits rigides, légers et moulés (bacs à douche...) -PSE : emballage « anti chocs », isolant thermique
polycarbonate (PC)	Excellentes propriétés mécaniques, bonne résistance thermique jusqu'à 120°C, très transparent, physiologiquement neutre. Mauvaise résistance aux contacts prolongés avec l'eau, aux agents chimiques et aux rayons ultraviolets.	casques de moto, boucliers de police, CD et DVD, vitres pare-balle, phares, feux arrière et clignotants d'automobile, matériel médical et prothèses, biberons incassables, profilés de toiture, vitres de cabine téléphonique...
polyesters et polyéthylène téréphtalate (PET)	mou à moyenne température.	fabrication de fils textiles, de films et de bouteilles d'eau et de sodas. Usage limité par la température.
polyacétals ou	Solides et avec des qualités de métaux. Résistant à la plupart des	pièces à fortes exigences mécaniques : engrenages, poulies. La recherche

polyoxyméthylène (POM)	agents chimiques, faible coefficient de frottement. Densité élevée. Assez faible résistance thermique.	visé à augmenter leur résistance au choc pour permettre la réalisation de plus grosses pièces.
polychlorure de vinyle (PCV)	Rigide ou souple selon les ingrédients qu'on lui incorpore. PVC rigide : aspect lisse et dur	Dans l'industrie de l'ameublement, bâtiment, le génie civil et dans l'alimentaire : pots de margarine, blisters, bouteilles d'eau, emballage alimentaire ... PVC rigide : utilisé pour les tuyaux de canalisation. PVC souple: recouvre certains manches de pinces...
polyamides (PA)	Différents types de PA (selon la longueur des chaînes) distingués par des chiffres. Bon compromis entre qualités mécaniques, thermiques et chimiques. Hydrophiles.	Pièces moulées dans l'appareillage ménager et automobile, tapis et moquettes, pièces de robinetterie, de serrurerie, engrenages, ... Textiles (lingerie et voilages)...
polyméthacrylate de méthyle (PMMA)	Transparent, même avec une très grande épaisseur (jusqu'à 33 cm d'épaisseur); à la différence du verre. L'ajout de PMMA dissout permet aux huiles lubrifiantes et fluides hydrauliques de conserver leur liquidité au froid (jusqu'à -100°C)	Nom commercial <i>Plexiglas, Lucite, Altuglas, ...</i> Utilisé pour remplacer le verre pour des vitres incassables, les surfaces des baignoires et des éviers, pour les vitres de grands aquariums résistantes à la pression de l'eau... feux arrière et clignotants, hublots d'avion, fibres optiques, enseignes lumineuses...

I.3.1.2. Les thermodurcissables :

Les matériaux thermodurcissables ou thermodurcis sont des solides infusibles et Insolubles qui forment un réseau tridimensionnel à partir de segments moléculaires liées entre eux par une densité élevé de liaisons primaires ; les thermodurcis sont mis en forme de façon irréversible.

Les polymères thermodurcissables deviennent solides irréversiblement, le plus souvent après chauffage. La transformation s'effectue avec réaction chimique (polymérisation). Ils présentent des propriétés thermomécaniques très différentes des polymères thermoplastiques ; le réseau tridimensionnel est constitué de nœuds covalents (faisant intervenir des liaisons de haute énergie) dont la rupture est, par nature, irréversible.

Contrairement aux matières thermoplastiques, les matières thermodurcissables ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois ; les produits finis ne pourront plus être fondus (sans dégradation) par un chauffage éventuel. Les matières thermodurcissables sont donc non recyclables. Exemples de matières thermodurcissables : celles obtenues par copolymérisation

Chapitre I : Aperçu sur les polymères et modes de transformation

du styrène en présence d'un polyester insaturé réactif, les résines aminoplaste et époxyde, les élastomères vulcanisés, etc.

Une fois la transformation réalisée, les matériaux thermodurcissables sont typiquement rigides et leurs propriétés mécaniques dépendent peu de la température.

Tableau I.2 : Caractéristiques et usage des thermodurcissables

Nom, abréviation	Caractéristiques	Usages
Polyuréthanes (PUR)	Grande diversité de dureté et textures en fonction des associations chimiques de différents monomères	Mousses souples ou rigides grâce à des agents d'expansion, colles, fibres (<i>Licra</i>) Matelas, sièges de voiture, tableaux de bord, roues de patins à roulettes, chaussures de ski...
polyesters insaturés	Prix peu élevé, durcissement assez rapide sans élimination de produits secondaires. Imprégnation facile des fibres de verre.	Pièces plastiques renforcées par coulée : pales d'éoliennes, coques et cabines de bateaux, piscines, carrosseries d'automobiles,... Textiles (<i>Dacron, Tergal, Térylène...</i>)
phénoplastes (PF)	Bonne résistance aux produits chimiques et à la chaleur et électriquement isolantes. Transformable par moulage et par compression. Souvent colorés en brun foncé	domaines scientifiques et réalisation d'objets téléphones, postes de radio, pour fabriquer les poignées de casserole, de fer à repasser et des plaques de revêtement.
aminoplastes (MF)	deux types principaux : urée-formaldéhyde(UF) et mélamine-formaldéhyde (MF) dont le plus connu est le <i>formica</i> . Dureté et rigidité exceptionnelles, peu sensibles à l'hydrolyse et à la lumière, résistance à l'abrasion, bonne tenue aux solvants, difficilement inflammables. Peuvent être produits en teintes claires	Usages variés : mobilier de cuisine, plans de travail, liants (adhésifs) dans les contreplaqués, bois agglomérés, mélaminés, etc. Moulage en stratifiés décoratifs de revêtements, pièces moulées d'ustensiles de cuisine (plateaux...), matériel électrique (interrupteurs, prises de courant...), vernis de parquets (vitrification), apprêts pour rendre les tissus indéfroissables ou plastifiés, peintures, etc.

I.3.1.3. Les élastomères :

Les élastomères ou matériaux caoutchoutiques sont des solides souples et gonflables formés de chaînes peu compactés et très mobiles à température ambiante.

L'élasticité de ce polymère est d'origine entropique : au repos, les chaînes polymériques sont pelotonnées en désordre. Elles s'ordonnent lorsqu'on les étire, et tournent donc à l'état de pelote statistique lorsque cesse la tension.

Aujourd'hui, ces gommages ont complètement détrôné le caoutchouc naturel. Ces élastomères comprennent aussi des polyisoprènes, polychloroprène, polybutadiène, et des copolymères éthylène-propylène, styrène-butadiène, ABS et SAN (styrène-acrylonitrile).

Les pneus ne sont pas l'unique application. Les chaussées des routes, les bandes assujetties aux poids lourds en particulier, sont faites de mélanges d'asphalte et d'élastomères tels que le SBS (styrène-butadiène-styrène).

Tableau I.3 : Caractéristiques et usage des élastomères

Catégories	Matériaux	caractéristiques
caoutchoucs	- caoutchouc naturel, cis-1,4-polyisoprène (NR) ; - copolymère styrène-butadiène (SBR) ; - polybutadiène (BR) ; - polyisoprène synthétique (IR)	Chauffés au-dessus de 65 °C, ils commencent à vieillir et deviennent poisseux. Faible résistance à l'huile et à l'ozone. Propriétés d'amortissement et grande extensibilité (jusqu'à 750 % avant rupture). Excellente résistance au déchirement.
élastomères spéciaux	- co- ou terpolymères d'éthylène propylène et diène (EPM et EPDM) - copolymères d'isobutylène isoprène, chlorés ou bromés (IIR, BIIR, CIIR) - copolymères de butadiène acrylonitrile (NBR) - polychloroprènes (CR)	Température maximum d'utilisation : 150 °C. Selon les matériaux : résistance aux produits pétroliers, aux solvants ; à l'oxydation (O ₂ et O ₃), aux intempéries, aux produits chimiques corrosifs et au vieillissement. Certains sont ininflammables et ont une grande imperméabilité aux gaz. Parfois sensible à la lumière et à l'ozone et au stockage (tendance à la cristallisation)
élastomères très spéciaux	- caoutchoucs de silicone (VMQ, FVMQ) - élastomères fluorés (FKM) - polyéthylènes chlorés et chlorosulfonés (CM, CSM) - polyacrylates (ACM)	Très variables en fonction des matériaux

I.3.2. Classification selon la morphologie :

On peut classer les polymères selon leur morphologie microscopique en polymères amorphes et semi-cristallin.

I.3.2.1. Les polymères amorphes :

Dans la structure amorphe, les macromolécules sont flexibles et disposées sans une règle, de façon aléatoire. Elles donnent un corps assez homogène. En général, les polymères amorphes employés sans adjonction d'autres substances sont transparents. C'est le cas par exemple des films de polyéthylène à basse densité. Mais le caractère de transparence n'est pas systématique, et inversement, il n'est systématiquement relié au caractère amorphe dans la matière. La structure amorphe correspond aussi bien à la structure des polymères à l'état fondu, qu'à celle des polymères à l'état vitreux, qui peuvent être considérés comme des liquides figés. On ne décèle aucun ordre à l'aide des rayons X, on observe un halo amorphe.

I.3.2.2. Les polymères semi-cristallins :

Pour certains polymères dont la chaîne présente les régularités de structure. Cet ordre n'est pas, celui des monocristaux, loin de là, mais il est évident que des zones se sont organisées. Corrélativement, il existe un domaine de températures restreint à une dizaine de kelvins où on observera toutes les caractéristiques d'une fusion- augmentation très rapide du volume spécifique avec absorption de chaleur, passage de l'état de solide à celui de liquide visqueux.

L'observation optique montre des zones de cristallisation plus réfringentes. La forme et la taille des zones dépendent des conditions de refroidissement et de la présence de germes hétérogènes. De nombreuses expériences indiquent que les zones cristallisées sont formées

De portion de chaînes arrangées régulièrement dans l'espace. Les chaînes peuvent être des zigzags plans régulièrement organisés comme dans le PE, ou des hélices comme dans le PP. Les chaînes moléculaires sont beaucoup trop longues pour ne pas se replier hors de la zone du cristal, mais elles y entrent à nouveau de façon adjacente, ou pénètrent dans une zone voisine.

La difficulté d'organiser des chaînes très longues, leur enchevêtrement dans un échantillon liquide font que les polymères industriels présentent un degré restreint de cristallinité.

I.3.3. Classification selon la structure :

Les macromolécules sont obtenues par assemblage répétitif de motifs monomères associés, selon les conditions, en structures linéaires, ramifiées ou réticulées.

I.3.3.1. Structure linéaire :

Les molécules des polymères linéaires sont formées de longues chaînes de monomères reliés les uns aux autres par des liaisons chimiques. Dans certains cas, les monomères sont en outre organisés régulièrement dans l'espace, et le composé obtenu se cristallise partiellement ; on dit qu'il est semi-cristallin.

Dans le cas où la macromolécule est composée de la répétition d'un seul motif, ce qui résulte le plus souvent de la polymérisation d'un seul type de monomère, on parle d'homopolymère. Quand plusieurs motifs différents sont répétés, on parle de copolymère. On distingue ensuite plusieurs types de copolymères suivant l'organisation entre les différents monomères. Dans le cas le plus fréquent, on a un copolymère statistique où les différents monomères se mélangent en fonction de la réactivité et de la concentration de ceux-ci ; les propriétés mécaniques sont alors dans la moyenne. En revanche, dans un copolymère séquencé (anglicisme copolymère à blocs est parfois utilisé) ou copolymère alterné, il peut y avoir combinaison des propriétés mécaniques :

- copolymère statistique : ABBAAAABBBABABAABABAB
- copolymère séquencé : AAAAAAAAAABBBBBBBB
- copolymère alterné : ABABABABAB

I.3.3.2. Structure ramifié :

Les polymères ramifiés se caractérisent par la présence de chaînes latérales qui sont raccordées aux chaînes principales. Faisant partie intégrante de la chaîne principale, les ramifications résultent des réactions latérales qui surviennent lors de la synthèse du polymère. Les ramifications latérales amoindrissent le potentiel de compaction d'une chaîne et, par conséquent, la masse volumique du polymère. Les polymères qui adoptent une structure linéaire peuvent aussi être ramifiés.

I.3.3.3. Structure réticulé :

Les monomères trifonctionnels, à trois liaisons covalentes actives, forment des réseaux tridimensionnels appelés polymères réticulés. Par ailleurs, les polymères comportant de très nombreuses liaisons transversales sont aussi des polymères réticulés.

De tels matériaux possèdent des propriétés mécaniques et thermiques distinctives ; elles sont plus rigides et résistent mieux au fluage. Les époxydes et les phénols formaldéhydes appartiennent à ce groupe.

I.3.4. Caractéristiques des polymères :

Le développement de l'utilisation des matières plastiques dans tous les secteurs d'activités s'explique par le fait que les polymères sont, par leurs caractéristiques, en parfaite adéquation avec les applications envisagées ; chaque polymère ayant des propriétés qui lui sont propres.

Les polymères ont remplacé d'autres matériaux par leur :

- Elasticité.
- Légèreté.
- Mise en forme

I.3.4.1. Elasticité :

a) Comportement élastique :

Il correspond à de petits déplacements réversibles des atomes autour de leur position d'équilibre dans le réseau cristallin. Sous l'action d'une force, les atomes s'écartent. Une réaction due aux forces de liaison tendant à les rapprocher provoque la réaction.

Pour les polymères non étirés et non renforcés, les caractéristiques d'élasticité sont indépendantes de la direction et le comportement élastique est linéaire.

Ce n'est pas le cas pour certains polymères pour lesquels le module d'Young varie avec l'amplitude de la déformation du fait de l'orientation des chaînes macromoléculaires, ce comportement correspond à des lois d'élasticité non linéaire.

b) Comportement plastique :

Lorsque la limite d'élasticité est dépassée, les atomes du réseau cristallin ont changé de place sous l'action d'un effort de cisaillement.

La prise en compte des défauts du cristal, notamment des dislocations, est indispensable pour comprendre le comportement plastique.

Lorsqu'une déformation plastique est provoquée, on constate que la résistance à la déformation augmente car les dislocations interagissent entre elles et de nouvelles dislocations prennent naissance, venant augmenter les interactions, cette augmentation de la résistance à la déformation plastique est appelé l'écrouissage.

Si on relâche l'effort qui a provoqué la plasticité, on constate un retour élastique: le domaine élastique s'étend jusqu'à la contrainte qui était appliquée précédemment, ce qui se traduit par une augmentation de la limite élastique.

Ce phénomène est limité par l'apparition de microcavités qui provoquent une diminution de la section résistante et conduisent à la rupture ductile.

I.3.5. Propriétés des polymères :

I.3.5.1. Propriétés physique :

a) Masse volumique :

La masse volumique est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume.

Elle est généralement notée par les lettres grecques ρ (rhô)

Elle est déterminée par le rapport :

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Où m est la masse de la substance homogène occupant un volume V .

L'unité de mesure de la masse volumique $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ou $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

La masse volumique varie selon plusieurs paramètres. Elle dépend notamment de la température.

I.3.5.2. Propriétés thermiques

a) Température de fusion

Le point de fusion ou la température de fusion d'un corps représente la température à une pression donnée, à laquelle un élément pur ou un composé chimique fond c'est-à-dire passe de l'état solide à l'état liquide.

Il est possible de déterminer la nature d'une substance (identification) par la mesure de sa température de fusion. C'est pourquoi la température de fusion est une propriété caractéristique de la matière.

b) Température de ramollissement Vicat

Le point de ramollissement Vicat ou la dureté Vicat indique, par la mesure d'un enfoncement de 1 mm d'une aiguille donnée, la température à laquelle la résistance mécanique d'une matière thermoplastique devient insuffisante. Le point Vicat est lié à la résistance du matériau. Le dispositif est appelé appareil de Vicat.

I.3.5.2. Propriétés mécaniques :

a) Contrainte au seuil d'écoulement en traction :

La limite d'élasticité est la contrainte à partir de laquelle un matériau arrête de se déformer d'une manière élastique, réversible et commence donc à se déformer de manière irréversible.

Pour un matériau fragile, c'est la contrainte à laquelle le matériau se rompt, notamment du fait de ses microfissures internes.

Pour un matériau ductile, les déformations subies au-delà de la limite d'élasticité restent permanentes, ce sont des déformations plastiques. Elles se mesurent ou se vérifient habituellement à l'aide d'un essai de traction.

b) Résistance à la rupture

La résistance à la traction, ou charge maximale, est définie par la contrainte σ_m correspondant à la contrainte maximale sur de la courbe de traction. Cette valeur est en général différente de la charge à la rupture à cause du phénomène de striction. Pour des applications pratiques, c'est la résistance à la traction σ_m qui est couramment utilisée et qui caractérise la résistance d'un matériau.

c) Allongement à la rupture :

L'allongement à la rupture noté $A\%$ est une caractéristique sans dimension des matériaux. Elle définit la capacité d'un matériau à s'allonger avant de rompre lorsqu'il est sollicité en traction.

Un allongement à la rupture élevé caractérise un matériau ductile, par contre un allongement à la rupture faible caractérise un matériau fragile.

d) Module de Young en traction :

Le module d'Young ou module d'élasticité (longitudinale) ou encore module de traction est la constante qui relie la contrainte de traction (ou de compression) et le début de la déformation d'un matériau élastique isotrope.

e) Résistance au choc :

La résistance au choc mesure la résistance du matériau à la rupture brutale, deux essais sont fréquemment utilisés : Charpy et Izod, donne une valeur en quantité d'énergie dissipé (joule).

f) Dureté :

La dureté d'un matériau définit la résistance qu'oppose une surface de l'échantillon à la pénétration d'un poinçon.

Il existe une grande variété d'essais de dureté possibles, ils sont très utilisés en contrôle qualité pour comparer ou estimer la résistance ou la rigidité des matériaux.

I.3. La mise en œuvre des polymères :

Les techniques de transformation des plastiques dépendent de la nature des polymères et de la destination des produits finis. Quelques méthodes sont régulièrement utilisées pour la fabrication des pièces et des objets en polymère.

Les principaux procédés de fabrication industrielle sont : l'injection, l'injection soufflage, l'extrusion, le thermoformage, le calandrage, le rotomoulage.

I.3.1. Mise en œuvre des thermoplastiques :

I.3.1.1. L'injection : [7]

La matière plastique arrive sous forme de granulés. Elle est versée dans la trémie pour alimenter la vis de plastification, qui est dans un fourreau (tube) chauffé.

La matière plastique est ramollie, mélangée et poussée par la vis piston dans un moule refroidi complètement fermé.

Quand la matière plastique arrive au contact du moule froid, elle prend la forme du moule et se solidifie.

Le moule s'ouvre ensuite pour faire sortir la pièce.

Pour changer la forme de la pièce il suffit de changer le moule.

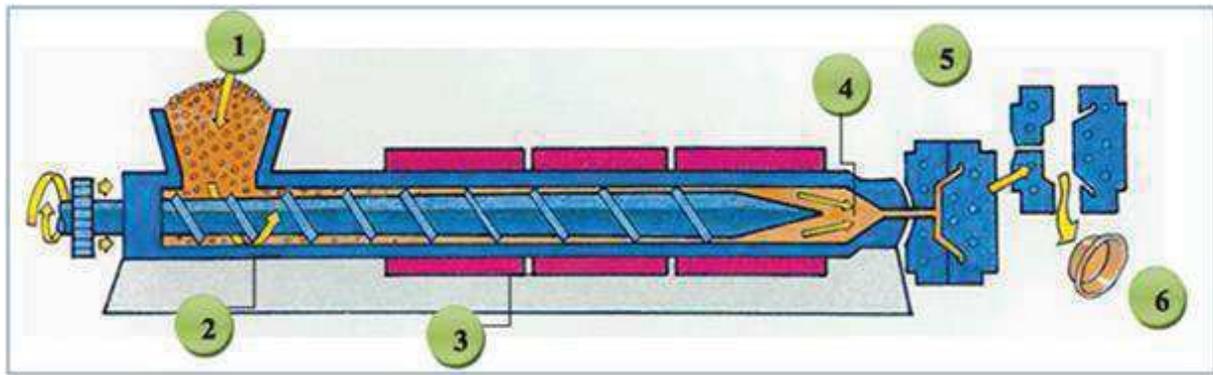


Figure I.1 : Procédé de mise en œuvre par injection

- 1- les granulés sont introduits dans la trémie de la machine
- 2- la rotation de la vis sans fin entraîne les granulés dans le fourreau
- 3- les colliers chauffants et le malaxage de la vis font fondre les granulés
- 4- une fois que la quantité de matière nécessaire est fondue, elle est accumulée en bout de vis et un mouvement de translation injecte la matière dans le moule.
- 5- le refroidissement dans le moule permet à la matière de garder la forme de moule.
- 6- une fois refroidie le moule s'ouvre et la pièce éjectée, un nouveau cycle recommence.

I.3.1.2. L'injection –soufflage : [6]

Est un procédé utilisé pour fabriquer la plupart des bouteilles et des flacons. On utilise des pièces semi-finies obtenues par injection.

Par exemple pour les bouteilles d'eaux minérales, le plastique est préformé mais le goulot est déjà entièrement formé. Le corps de la préforme est chauffé puis une tige étire la préforme jusqu'au fond du moule.

Enfin, un très puissant jet d'air plaque la matière contre les parois du moule. La préforme prend alors la forme et le moule est refroidi puis ouvert pour faire sortir la bouteille.

Comme pour l'injection, pour changer la forme de la bouteille, il faut changer le moule.

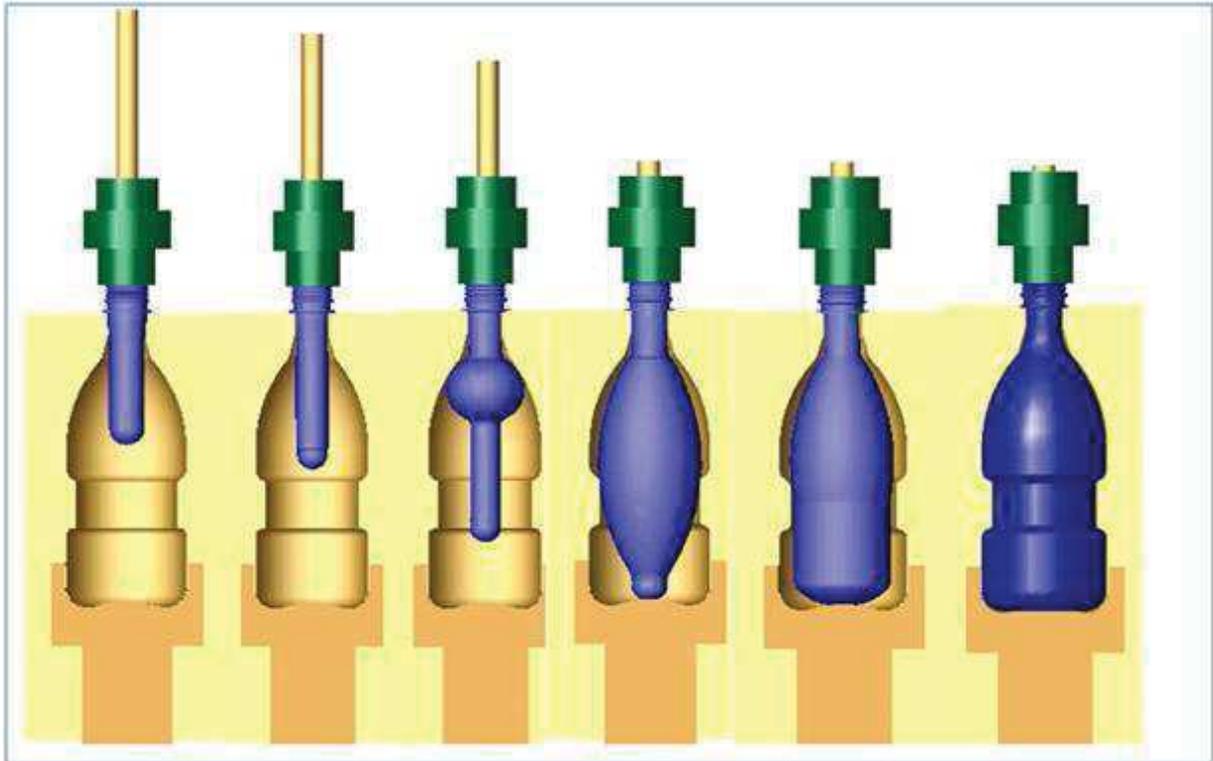


Figure I.2 : Procédé de mise en œuvre par injection-soufflage

Couramment employée, le moulage par injection permet donc de produire des pièces plus ou moins complexes en grande série.

Les principales matières plastiques utilisées pour l'injection sont :

- Le polyéthylène (PE)
- Le polypropylène (PP)
- Le polychlorure de vinyle

En cas de recyclage en interne du plastique industriel (purge machines, carotte, chutes de fabrication), des broyeurs placés au pied de presses d'injection récupèrent et concassent les déchets plastique produits par les machines et peuvent ainsi les réintroduire dans le processus de mise en œuvre. Notons que broyage fait également partie des nombreuses techniques utilisées par l'industrie de recyclage des plastiques pour recycler les déchets de ce type.

I.3.1.3. L'extrusion : [6]

L'extrusion plastique consiste à compresser la matière amollie et homogène (dans un cylindre chauffé et muni de vis rotatives semblable à celui d'une presse à injecter) et la pousser à travers une filière (outil rigide percé d'au moins un trou) qui lui donnera la forme souhaitée. Puis, la matière expulsée de cette filière en continu est ensuite refroidie et sectionnée à la bonne longueur.

Appelées « extrudeuses » ou « boudineuses », ces machines d'extrusion permettent de produire des pièces pleines, creuses ou particulièrement longues (tubes, tuyaux, profilés pour porte ou fenêtres, câbles, canalisations etc.) à des cadences élevées.

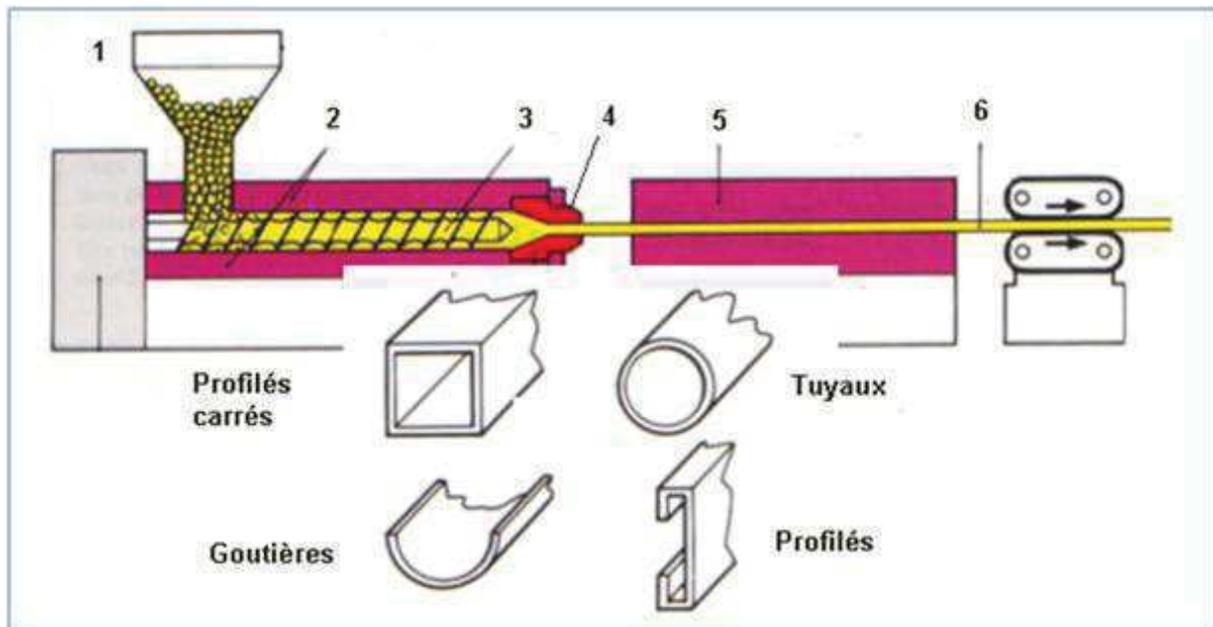


Figure I.3 : Procédé de mise en œuvre par extrusion

- 1- La matière est insérée dans l'extrudeuse (granulé ou poudre)
- 2- Le cylindre chauffant permet de ramollir la matière
- 3- La vis sans fin tourne et permet de fondre et homogénéiser la matière, celle-ci monte en pression en bout de vis.
- 4- La matière passe à travers la filière, qui va donner la forme finale du produit
- 5- La matière est refroidie et conformée généralement sous vide (pour conserver les dimensions)
- 6- Les profilés sont tirés en bout de ligne puis coupés à longueur et palettiser

I.3.1.4. L'extrusion-soufflage : [6]

L'extrusion-soufflage permet également de produire des corps creux, mais en sectionnant une paraison (un tube de plastique extrudé percé à une extrémité pour laisser passer de l'air ou de gaz comprimé) et en plaçant celle-ci dans un moule en deux parties, qui lui donnera la forme désirée. Une canne de soufflage permettra ensuite d'injecter assez d'air ou de gaz comprimé pour plaquer la matière contre les parois du tube.

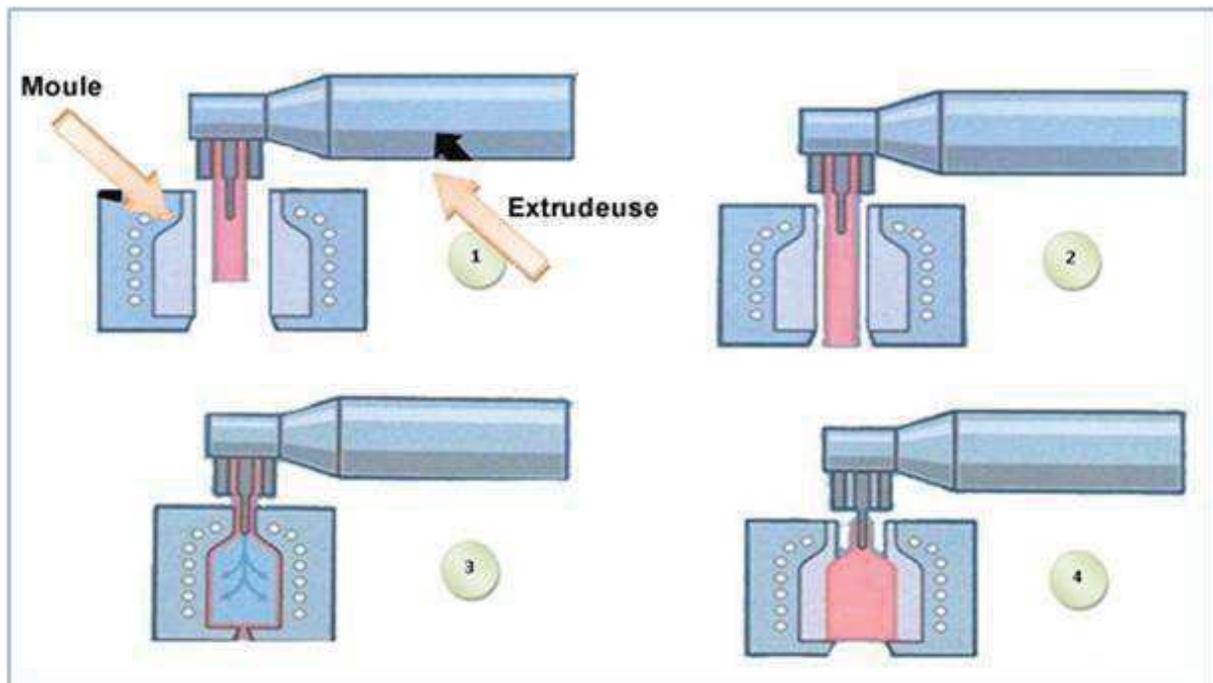


Figure I.4 : Procédé de mise en œuvre par extrusion soufflage

- 1- Moule ouvert : la paraison sort de l'extrudeuse puis descend dans le moule.
- 2- Fermeture de moule : la fermeture de moule vient assembler la partie inférieure de la paraison.
- 3- Soufflage de la paraison : la canne de soufflage introduit de l'air sous pression dans la paraison, celle-ci vient de plaquer sur les parois de moule refroidit.
- 4- Ouverture moule : la pièce est évacuée à l'ouverture du moule et un nouveau cycle recommence.

I.3.1.5. L'extrusion-gonflage :

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

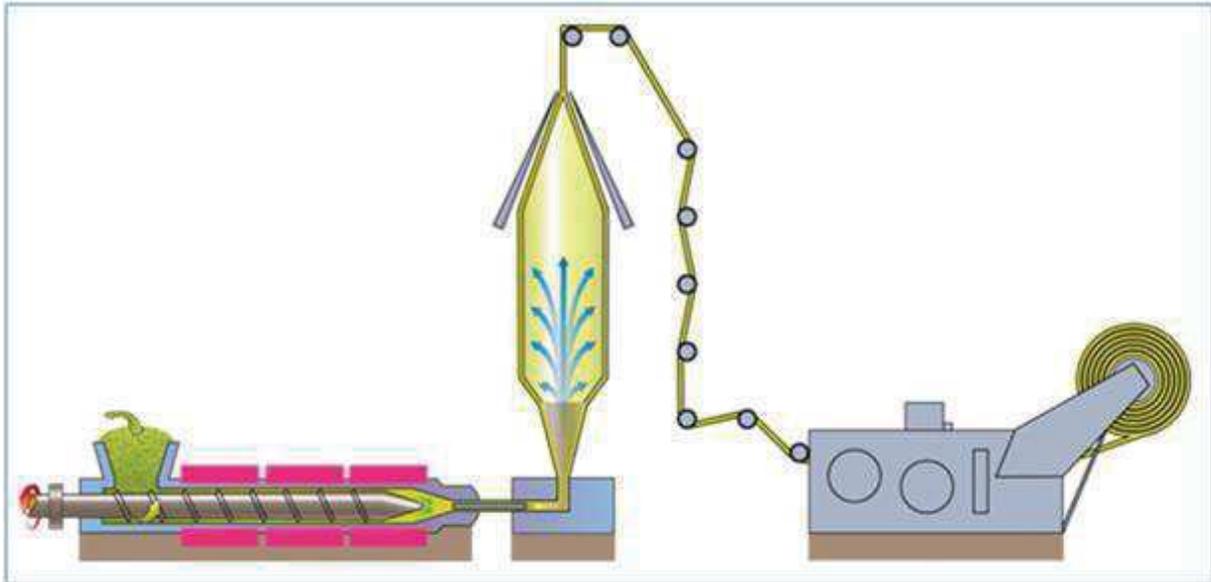


Figure I.5 : Procédé de mise en œuvre par extrusion-gonflage

- 1- La matière est extrudée et passe au travers une filière à tête d'équerre
- 2- L'air est soufflé à l'intérieur de la paraison (tube) pour gonfler \Rightarrow formation de la gaine
- 3- L'air soufflé donne la forme et refroidit la gaine
- 4- Le passage dans les rouleaux permet d'aplatir la gaine pour réaliser différents étapes (découpe, marquage, pliage...)
- 5- La gaine aplatie est ensuite enroulée sur des bobines pour le stockage ou d'autres étapes de fabrications.

Application :

Fabrication des sacs plastiques, sacs poubelles,...

I.3.1.6. Le calandrage : [7]

Les opérations de calandrage permettent de produire des plaques, des feuilles ou des films de diverses épaisseurs en comprimant la résine à l'aide de cylindres rotatifs en acier plus ou moins écartés (et à vitesse variable) appelés laminoirs (cette technique est proche de laminage de tôle). Une fois transformée un film, en feuille ou une pellicule par ces rouleaux chauffant, puis refroidie et étirée aux dimensions souhaitées, la matière thermoplastique est placée autour d'une bobine industrielle. On utilise notamment ce procédé pour fabriquer des produits plats et larges en PVC, mais aussi des revêtements d'ameublement ou de maroquinerie.

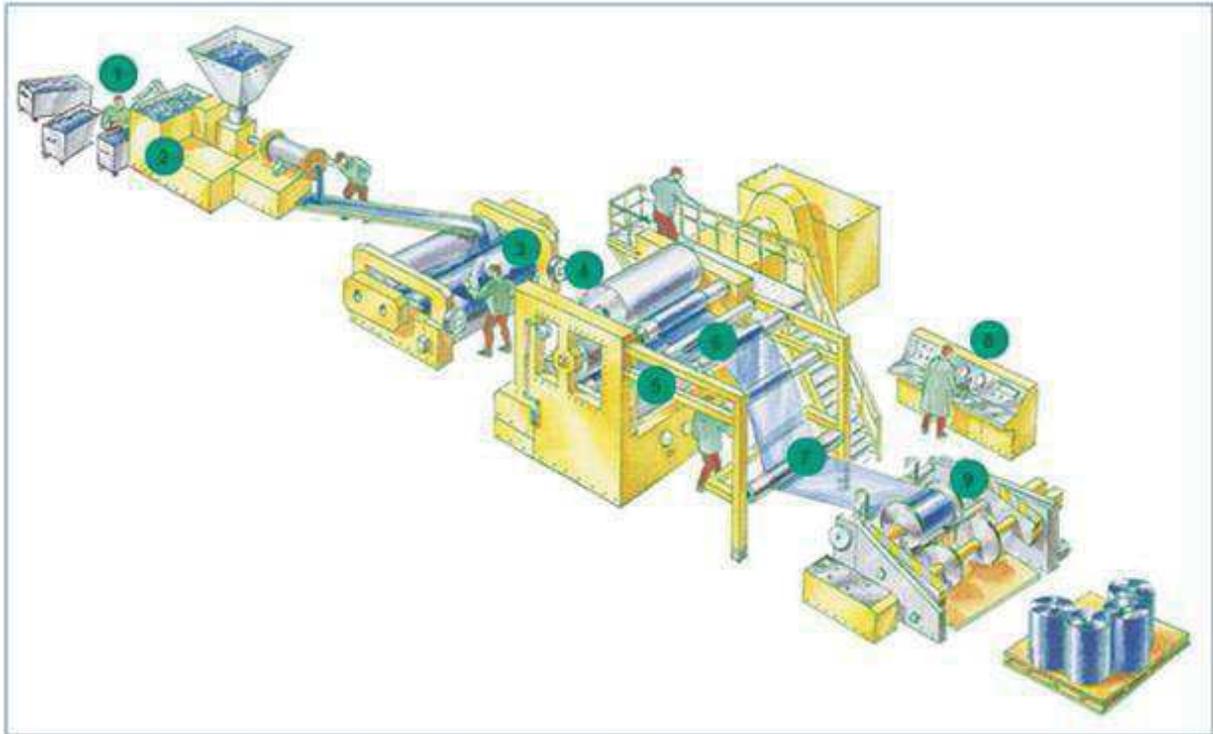


Figure I.6 : Procédé de mise en œuvre par calandrage

- 1- Formulation : Mélange des plastiques, additifs, stabilisants, charges diverses (suivant l'application final du produit)
- 2- Mélangeur pour homogénéiser la matière : la matière est chauffée puis malaxée dans une vis sans fin spéciale (différente de l'injection et l'extrusion)
- 3- Gélification de la matière entre deux calandres chauffées : la matière passe plusieurs fois entre les rouleaux pour être bien homogénéisée.
- 4- Réglage des paramètres gélification (température calandres, pression, vitesse de rotation...)
- 5- Calandrage : calibrage et grainage de feuille. L'écartement, la pression, le type de rouleaux vont donner les dimensions et les aspects des films
- 6- Refroidissement et stabilisation le passage dans le chemin de rouleaux permet le refroidissement du film ou de la feuille
- 7- Tirage
- 8- Réglages et paramètres de la ligne (vitesse avance, espacement rouleaux...)
- 9- Mise en bobine ou empilage des feuilles suivant dimensions et épaisseurs

I.3.1.7. Le moulage par expansion :

Au cours de cette opération de traitement de plastique, principalement utilisée pour produire des pièces en polystyrène expansé, des billes de résine thermoplastiques sont placées dans une chaudière, ou, sous l'effet de la vapeur d'eau, elles pourront atteindre jusqu'à trente fois leur taille initiale (on leur adjoint pour cela des agents d'expansion, comme le pentane).

Après avoir été séchées, ces billes pré-expansées seront placées dans un moule clos, où elles seront homogénéisées et définitivement expansées sous l'effet d'une nouvelle injection de vapeur d'eau.

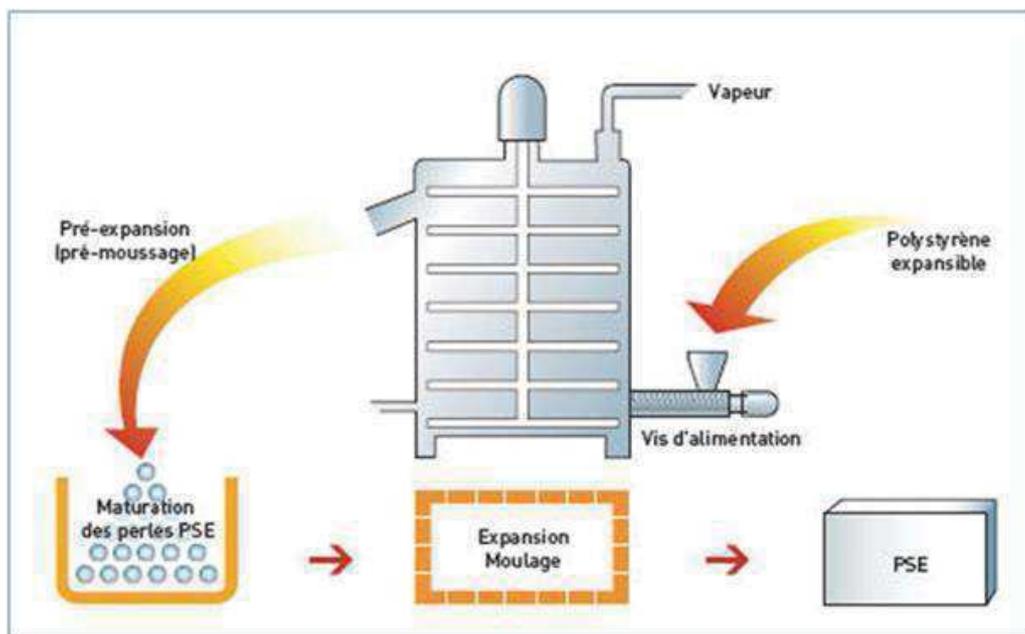


Figure I.7 : La pré-expansion, le stockage et le moulage

I.3.1.8. L'enduction :

Lors d'une opération d'enduction, la matière liquide ou la solution plastique est déposée sur un substrat (un support de papier, de tissu de l'aluminium) puis envoyée dans un four de séchage. Cette technique consiste à imprégner superficiellement un support avec une matière plastique sous forme de pâte. On dépose le polymère sur le support à l'aide d'un rouleau enducteur puis on égalise l'épaisseur en faisant défiler le support enduit sous une lame métallique. On peut procéder à plusieurs enductions successives pour obtenir des effets variés : couche protectrice puis couche d'aspect. Par exemple : les applications type de ce procédé sont les tissus enduits pour sièges auto, les vêtements les chaussures, l'ameublement, la toile cirée,...

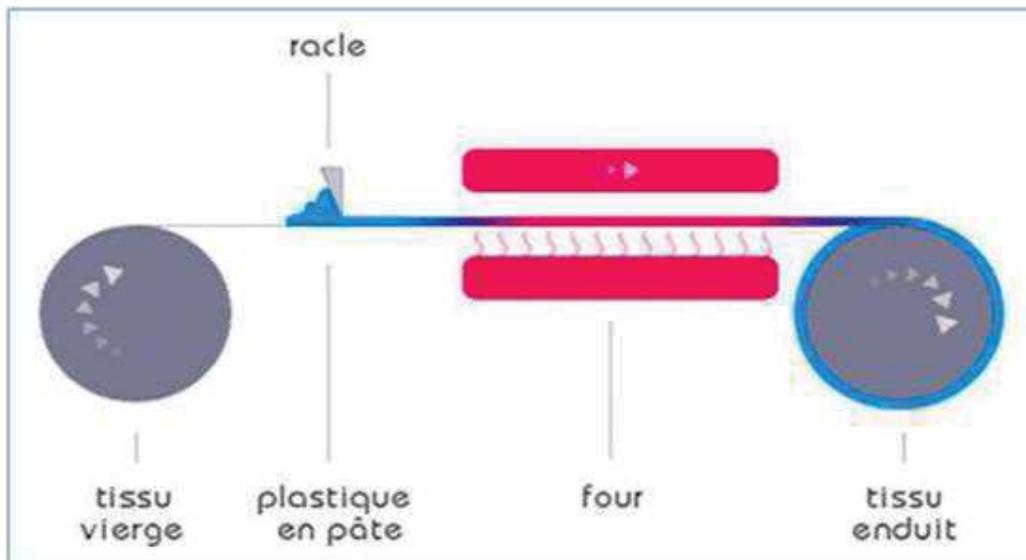


Figure I.8 : Procédé de mise en œuvre par enduction

I.3.1.9. Le thermoformage : [6]

C'est un procédé de seconde transformation dans lequel la matière arrive sous forme de plaques, de tubes ou de profilés. Le matériau est ramolli par chauffage avant d'être déformé et mis en forme par un moule métallique. La parfaite adhésion du polymère sur le moule se fait par aspiration sous vide ou par plaquage par injection d'air.

Il est possible de réaliser des pièces dont les parois sont fines et des pièces de grande taille. Les plaques de polystyrène ou d'ABS sont particulièrement adaptées à ce type de transformation. Cette technique est utilisée pour produire des objets aux formes géométriques simples comme des pots de yaourts, des baignoires et des éléments de carrosserie.

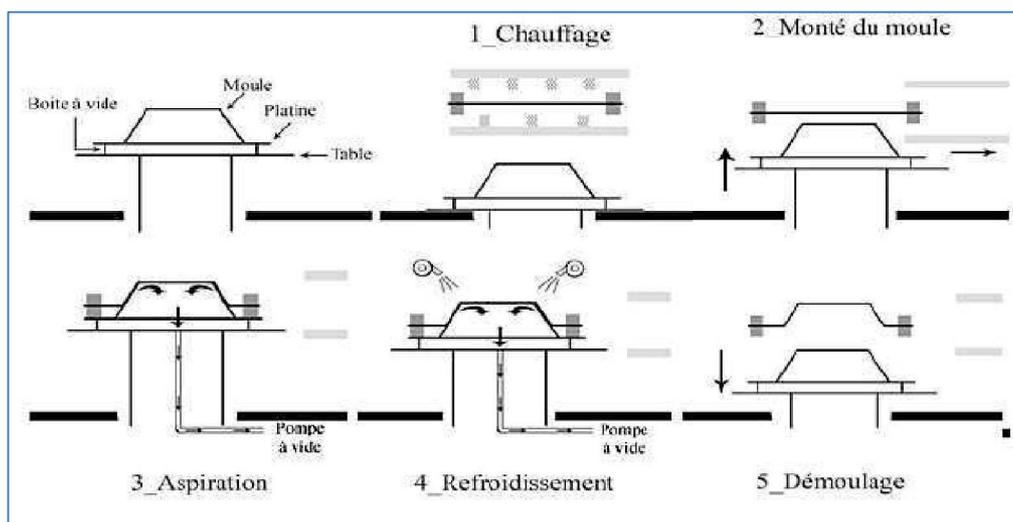


Figure I.9 : Procédé de mise en œuvre par thermoformage

I.3.1.10. Le moulage par rotation (roto-moulage) : [6]

Le traitement du plastique par roto-moulage comprend le chauffage d'une poudre thermoplastique dans un moule métallique fermé, rotatif et démontable, la transformation de matière plastique usinable par centrifugation au cœur de moule, le refroidissement de ce dernier au moyen de jet d'eau ou d'air froid, et enfin le démoulage de la pièce solidifiée.

C'est ainsi que sont fabriqués certains objets creux, comme les canoës, les planches à voile, les jouets, les cuves, les citernes ou diverse pièces de mobilier. Notons également que les pièces transformées par roto-moulage sont principalement des plastiques recyclables en polyéthylène moyenne et basse densité. En cas de recyclage des matériaux en interne, les déchets plastiques sont traités en trois temps : celui du broyage, du criblage et enfin de la réintroduction du plastique recyclé dans le processus de roto-moulage.

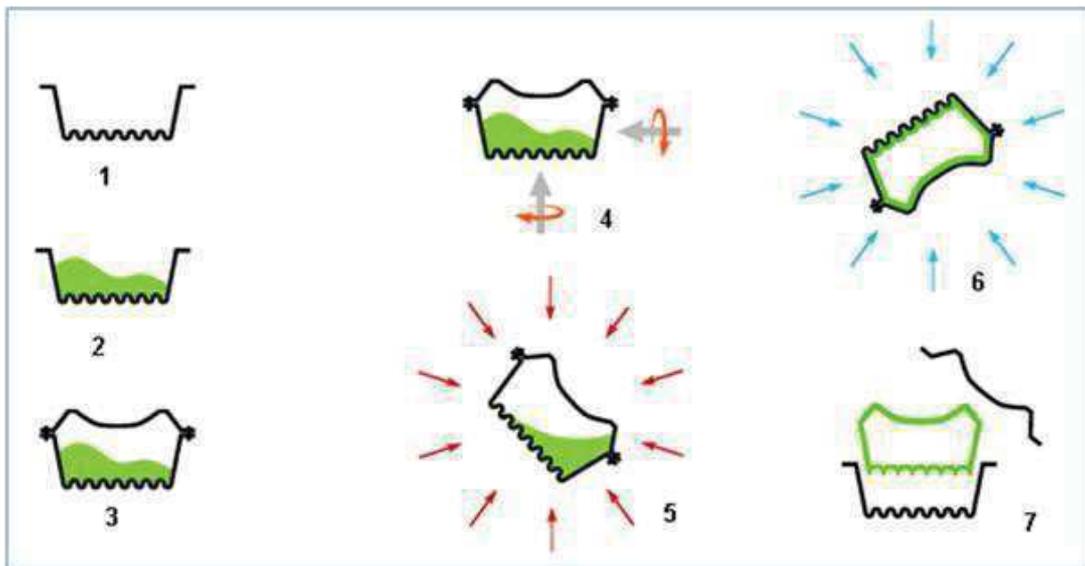


Figure I.10 : Procédé de mise en œuvre par roto-moulage

- 1- Ouverture de moule
- 2- Chargement de la matière plastique dans le moule (polymère et additifs éventuels).
- 3- Fermeture et verrouillage de moule
- 4- Mise en rotation de moule autour de deux axes perpendiculaire
- 5- L'ensemble toujours en rotation est chauffé, cela entraîne la forme du polymère qui adhère aux parois
- 6- Une fois toute la matière fondue, l'ensemble toujours en rotation peut être refroidi
- 7- Après le refroidissement, le moule est ouvert et la pièce peut être sortie (le démoulage)

I.3.2. Mise en œuvre des thermodurcissables :**I.3.2.1. La coulée :**

Plusieurs résines sont suffisamment fluides avant polymérisation pour être coulées, c'est-à-dire, versées dans un moule de forme sans appliquer de pression. La plupart des thermodurcissables peuvent être coulés.

La matière est coulée dans un moule, puis solidifiée par refroidissement.

Un retrait se produit, pouvant atteindre 21% et il faut en tenir compte lorsque l'on conçoit des moules pour la coulée.

L'utilisation de sirops de polymère avec du monomère fabriqués en interrompant la polymérisation permet de contrôler la température et le retrait.

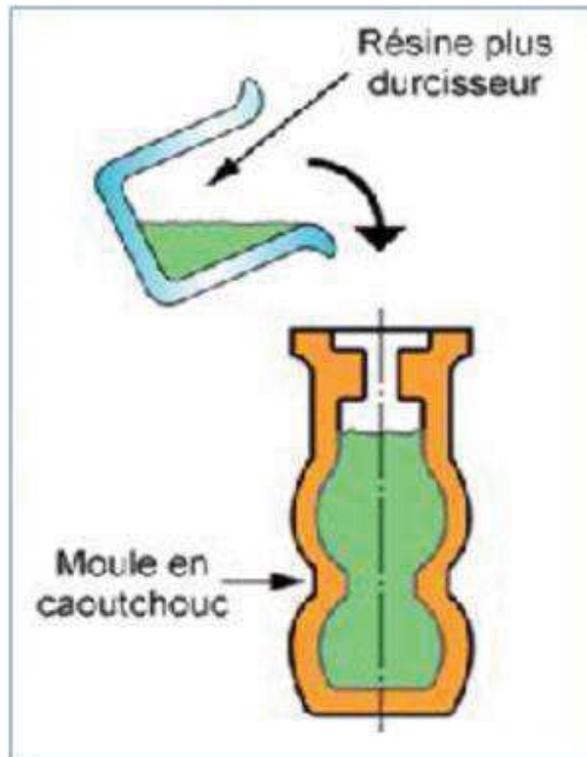


Figure I.11 : Technique de coulée

Application :

On utilise la coulée pour fabriquer des godets de chaînes élévatrices, grands engrenages, feuilles, tuyaux, encapsulation en électronique, barreaux balles de bowling, outillage en époxy,...

Pour les tuyaux, les citernes et les récipients, on peut utiliser la coulée centrifuge.

I.3.2.2. Moulage par compression : [6]

Ce procédé consiste à presser directement la matière à mouler dans l'empreinte du moule placée dans une presse verticale. On introduit dans un moule chauffé une matière thermodurcissable en poudre ou de pastilles, qui se fixeront en forme sous le double effet de la pression et de la température, le maintien sous pression comprime la poudre transformée jusqu'au refroidissement.

Après l'ouvert du moule, la pièce est éjectée.

Le durcissement définitif peut demander plusieurs minutes.

La cadence de production est assez lente.

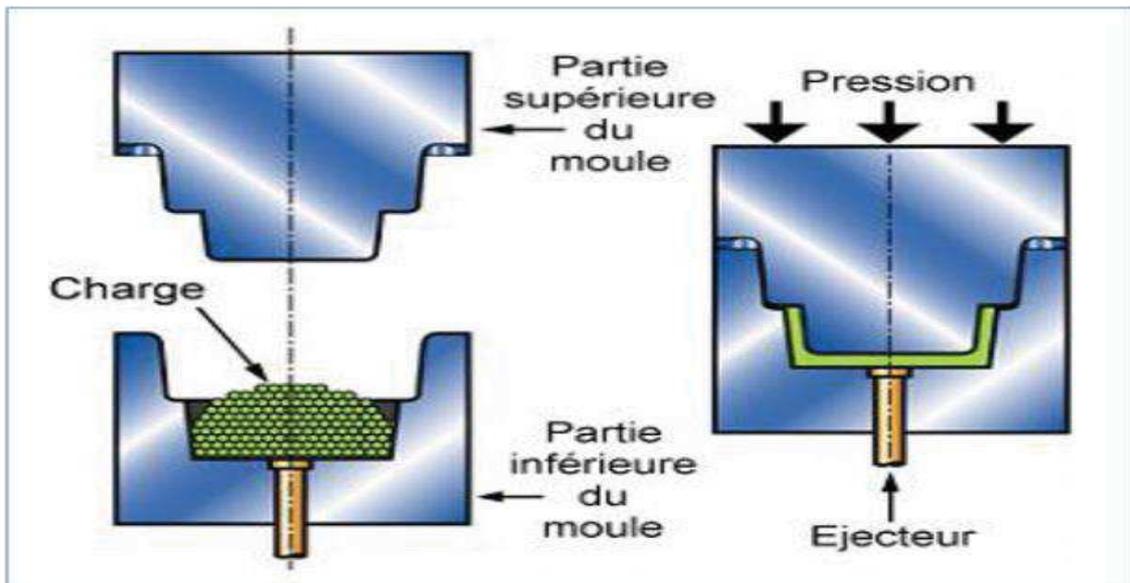


Figure I.12 : Technique du moulage par compression

I.3.2.3. Moulage par compression transfert :

Dans ce cas, on se sert d'un moule à empreintes multiples. C'est un procédé consistant à rendre plastique hors du moule, dans un pot de transfert, la quantité de matière à mouler nécessaire pour un seul moulage, puis à la transférer sous pression dans l'empreinte du moule ; la matière est injectée dans une empreinte fermée.

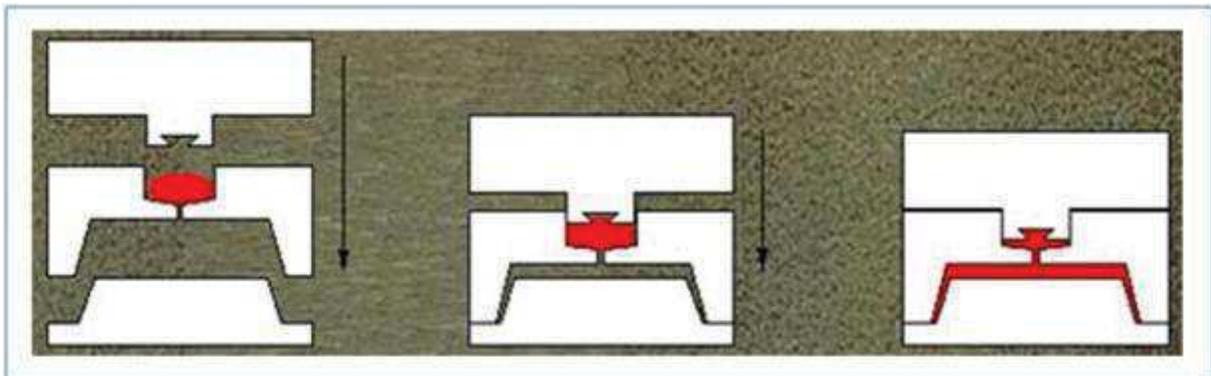


Figure I.13 : Technique du moulage par compression transfert

Le moulage par compression ou par compression /transfert se différencie du moulage par injection du fait que lors du moulage qui consiste à remplir sous haute pression l'empreinte du moule avec un polymère, les plastiques thermoplastiques se solidifient très rapidement en quelques dizaines de secondes dans le moule qui est refroidi alors que les plastiques thermodurcissables doivent être polymérisés ou cuits pendant 3 à 15 mn à une température élevée de 120 à 180°C.

Les thermoplastiques sont réutilisables par broyage alors que la polymérisation d'un thermodurcissable est irréversible et les matériaux non retransformables.

CHAPITRE II
TECHNIQUES D'INJECTION
PLASTIQUE

Chapitre II : Techniques d'injection plastique**II.1. Introduction :**

Avant la phase de commercialisation, la consommation et recyclage des plastiques, la mise en œuvre consiste à transformer les résines plastiques en produits finis ou semi-finis. Et si les opérations changent selon la nature de ces produits, il est néanmoins possible d'inventorier les quelques méthodes principalement employées par les industriels.

Dans ce chapitre, nous nous attacherons à présenter deux procédés de fabrication différents : l'injection plastique et l'impression 3D, et le but de notre étude est de décrire le principe de fonctionnement et les caractéristiques de chaque procédé.

II.2. Injection presse :**II.2.1. Historique :**

L'industrie du moulage par injection plastique a évolué au fil des ans : au départ réservée à la production de peignes et boutons, elle est passée à la production d'une vaste gamme de produits pour de nombreuses industries, y compris l'automobile, le médical, l'aérospatial, les produits de consommation, les jouets, la plomberie, l'emballage et la construction.

L'injection plastique, ou moulage par injection, utilise les propriétés thermoplastiques de certaines matières pour injecter un plastique ramolli dans un moule, afin de créer une empreinte de celui-ci. Cette technique apporte la meilleure qualité pour vos productions de grandes et très grandes séries.

L'inventeur américain John Wesley Hyatt a breveté la première machine de moulage par injection en 1872. Cette machine était relativement simple par rapport aux machines en usage aujourd'hui: elle fonctionnait comme une grande aiguille hypodermique, en utilisant un plongeur pour injecter du plastique à travers un cylindre chauffé dans un moule. A l'époque on produisait surtout des colliers, boutons et peignes.

En 1919, Arthur Eichengrün a développé la première presse de moulage par injection, qu'on peut considérer comme la première machine à injection moderne. Quelques années après, en 1926 Eckert et Ziegler font breveter la première presse à injecter ayant des caractéristiques commerciales. Dans les années 1930 voit l'apparition des premières presses à injecter en France. C'est le début des articles ménagers et jouets en plastiques sur le marché de consommation.

L'industrie s'est développée rapidement dans les années 1940, suite à une demande énorme pour des produits peu coûteux, produits en série. En 1946, l'inventeur américain James Watson Hendry construit la première machine avec vis à injection, permettant un contrôle beaucoup plus précis sur la vitesse d'injection et la qualité des articles produits. Cette machine permettait d'ajouter du plastique coloré ou recyclé à la matière vierge avant d'être injecté.

Aujourd'hui les machines avec vis d'injection représentent la grande majorité de toutes les machines d'injection.

II.2.2. Architecture des presses à injecter : [5]

Le bloc de plastification est équipé d'une buse ouverte ; la rotation de la vis est obtenue grâce à un moteur hydraulique MH transmettant son mouvement de rotation à la vis de plastification par l'intermédiaire d'un couple roue et vis sans fin (RV et VS).

Un vérin VI commande l'avance de la vis lors de l'injection et le vérin VV déplace l'ensemble du bloc de plastification. Le circuit hydraulique est équipé avec un accumulateur Ac, et les pompes basse pression PB et haute pression PH, entraînées par le moteur électrique ME, fournissent l'huile sous pression. Le volume d'huile nécessaire au bon fonctionnement du circuit est stocké dans le réservoir RH et le refroidissement à circulation d'eau Re maintient la température du fluide à une valeur acceptable.

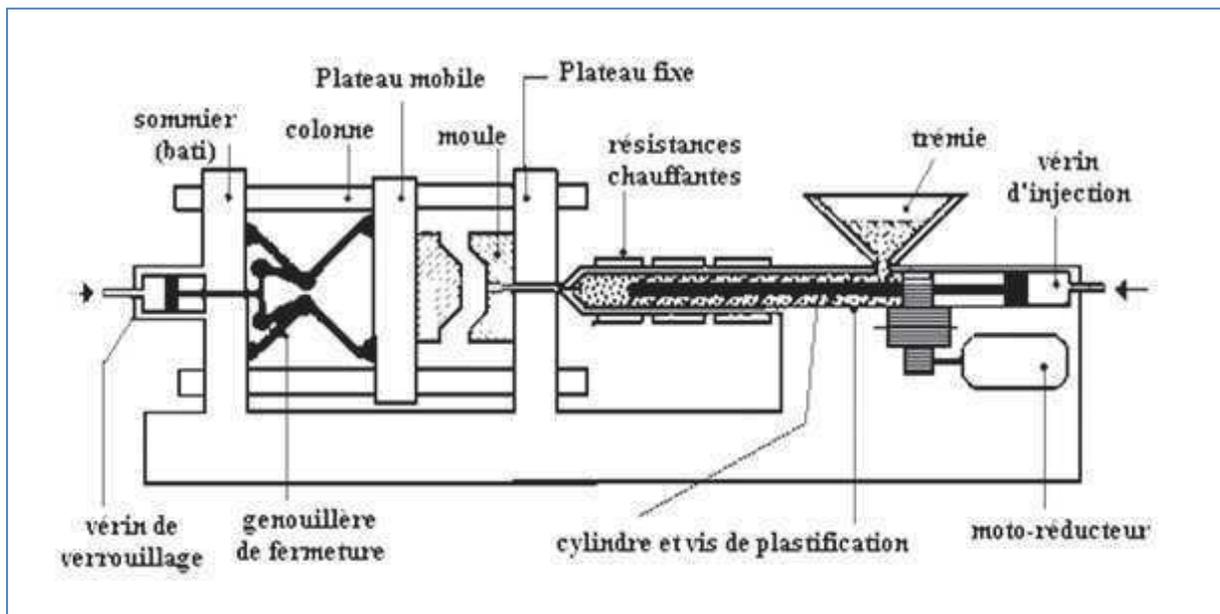


Figure II.1. Presse à injecter les thermoplastiques

II.2.3. Les différents types de presses d'injection : [7]

II.2.3.1. presse horizontale :

La machine de moulage par injection horizontale est le type le plus courant. Sa partie de serrage de moule et d'injection se trouve à la même position horizontale au centre de la ligne et son moule s'ouvre horizontalement. Ses caractéristiques sont : un petit corps, facile à utiliser et à réparer. Son barycentre est bas, son installation stable. Suite à la confection de produits, on peut utiliser la force gravitationnelle pour le faire descendre automatiquement, ainsi l'injection immédiate de la pièce. Opération entièrement automatisée facilement réalisable. Ses défauts sont : l'installation de moule est plutôt difficile, l'insertion de pièce peut être inclinée ou faire

tomber le moule, la surface d'occupation de sol est plutôt grande. A présent, de nombreuses machines de moulage par injection sur le marché utilisent cette forme.

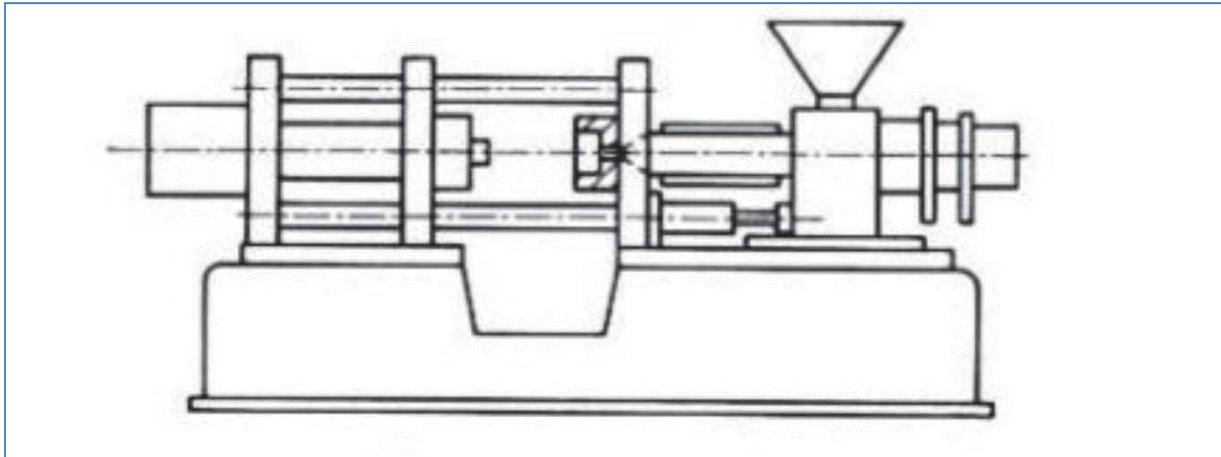


Figure II.2. Presse horizontale

Principales caractéristiques :

- Bien que ce soit une machine de grande envergure, comme son corps est bas, aucune limite de hauteur n'est impliquée pour son installation dans l'usine.
- Comme le produit descend automatiquement, il n'est pas nécessaire d'utiliser de robot industriel, pour réaliser un façonnage automatique.
- Comme le corps est bas, l'alimentation en matériaux est pratique, l'inspection et la réparation sont faciles.
- Le module doit être installé grâce à un chariot-grue.
- Si plusieurs machines sont en parallèle ou en série, les produits peuvent être facilement récoltés par un convoyeur à bande pour l'emballage.
- Les cadences de travail sont très élevées.

II.2.3.2. Presse verticale :

Elle a un encombrement au sol limité mais la hauteur peut devenir gênante et la stabilité laisse à désirer. La mise en place du moule est malaisée, le chargement de la trémie peu commode et les organes supérieurs sont peu accessibles. Les cadences élevées ne sont guère possibles, l'automatisation est plus difficile car les pièces ne tombent plus d'elle-même. Pratiquement ce type de machine garde son intérêt dans les fabrications des pièces avec insertions, car le moule est très accessible et les prisonniers tiennent souvent en place par gravité. Les surmoulages sont également faciles ainsi que la fabrication de certaines pièces de précision.

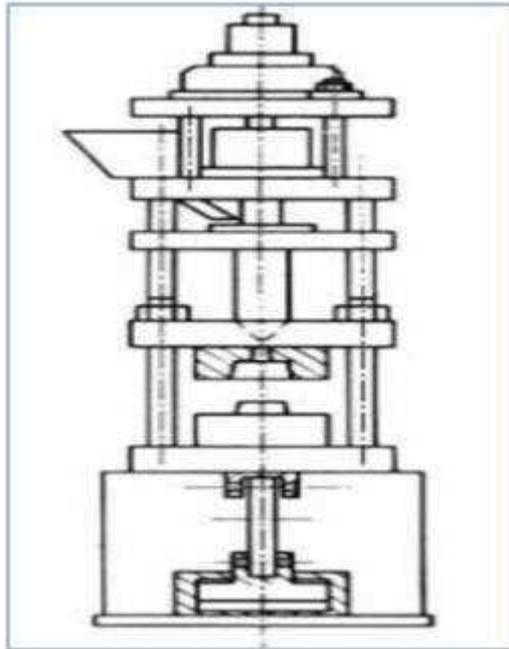


Figure II.3. Presse verticale

II.2.4. Les différentes parties ou unités d'une presse : [7]

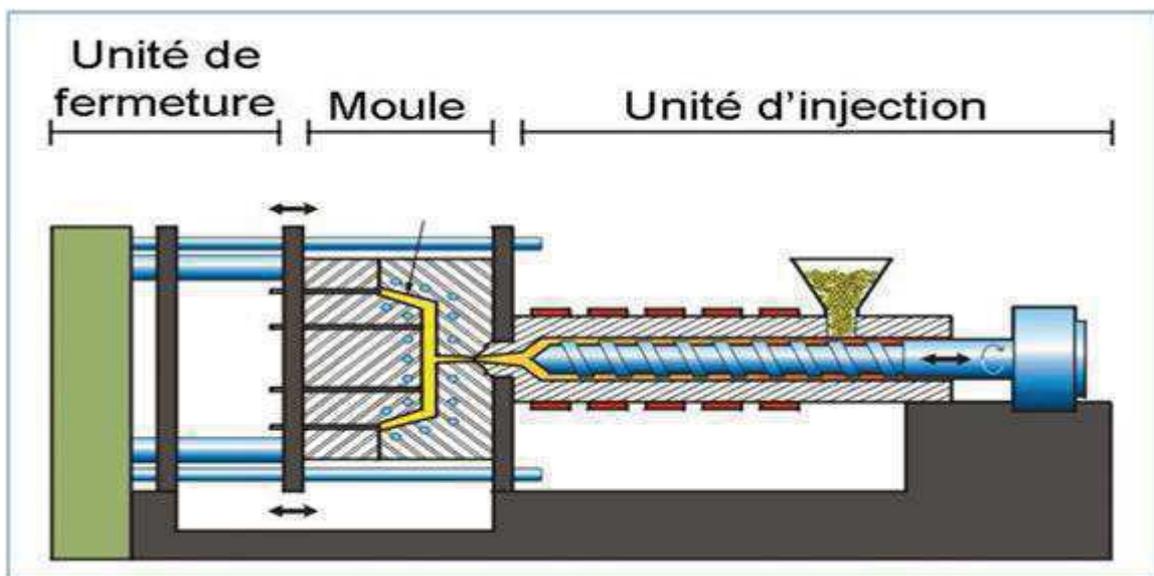


Figure II.4. Dispositif d'une presse d'injection

II.2.4.1. Unité d'injection :

Cette partie de presse, comporte le groupe injecteur, et c'est là, que se produit la plastification, qui se résume dans, le dosage, injection/purge.

Le dispositif vis-piston remplit les deux fonctions de plastification en un seul mécanisme.

*** Phase de plastification :**

La vis tourne pour faire fondre et homogénéiser les granulés qui viennent de trémie. Elle achemine la matière plastique faire l'avant de la vis par intermédiaire du clapet pour la stocker.

A fur et à mesure que l'on stocke la matière, la vis recule.

*** phase d'injection :**

La vis avance le clapet se plaque sur son siège. La matière ne peut plus refluer vers l'arrière. La matière est injectée dans le moule.

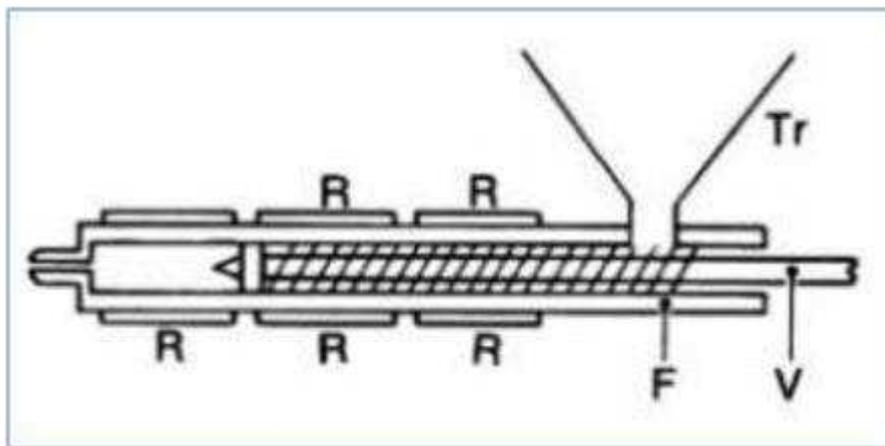


Figure II.5. Système vis-piston

II.2.4.2. Unité de fermeture :

Ce système assure les fonctions, fermeture, verrouillage, ouverture et démoulage.

Le dispositif de manœuvre des plateaux pote-moule doit assurer l'ouverture, la fermeture et le verrouillage de moule avec une force suffisante pour s'opposer à l'ouverture de moule pendant l'injection. Ce groupe comprend deux plateaux : l'un est mobile, l'autre est fixe. La force de fermeture est la force nécessaire pour maintenir les deux parties de moule fermées pendant son remplissage sous haute pression. Ces fonctions importantes peuvent être assurées de différentes manières soit mécanique, hydraulique ou mixte.

II.2.4.3. Le moule : [6]

La matière plastifiée par une vis dans un cylindre chauffé est injectée sous pression dans un moule, au contact du métal froid, elle se solidifie et conserve les formes de l'empreinte, le moule joue un rôle essentiel dans l'injection, c'est lui qui assure la mise en forme de la matière, la partie fixe de moule comporte, une plaque porte empreinte femelle, quatre colonnes de guidage, une plaque semelle, une buse d'injection, et une bague de centrage, quand à la partie mobile, elle comporte une plaque porte empreinte male, des bagues de guidage des colonnes, des tasseaux, une batterie d'injection composée de plaque et éjecteurs cylindriques, et enfin, une plaque semelle.

Fonction de moule :

- Centrage ;
- Alimentation ;
- Mise en forme ;
- Refroidissement ;
- Ejection

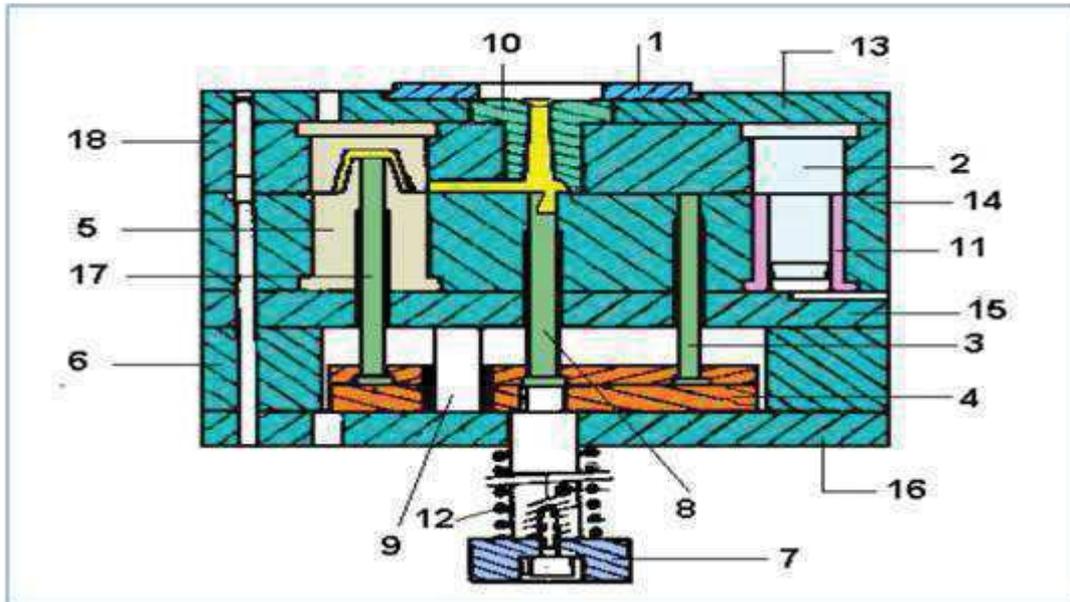


Figure II.6. Moule d'injection plastique

- | | |
|-----------------------|---------------------------------|
| 1- Bague de centrage | 11- Bague de guidage |
| 2- Colonne de guidage | 12- Ressort de rappel |
| 3- Rappel d'injection | 13- Plaque de fixation A.V |
| 4- Plaque d'injection | 14- Plaque porte empreinte Inf. |
| 5- Empreinte | 15- Plaque intermédiaire |
| 6- Tasseaux | 16- Plaque de fixation A.R |
| 7- Queue d'éjection | 17- Ejecteur |
| 8- Arrache carotte | 18- Plaque porte empreinte Sup. |
| 9- Plot de soutien | |
| 10- Contre buse | |

II.2.5. Le choix d'une presse : [5]

Les caractéristiques principales d'une presse, celles qui déterminent son prix d'achat et sa taille.

Le choix d'une presse dépend essentiellement des critères suivants :

- La force de fermeture.
- La dimension des plateaux (épaisseur minimale du moule, fermeture maximale des plateaux).
- Le volume injectable.
- La plastification horaire.
- L'encombrement entre colonnes.

II.2.6. Le cycle de moulage par injection : [7]**II.2.6.1. Le démoulage :**

Le moule occupe la position de fin d'ouverture qui assure à la pièce l'espace libre pour être éjectée.

II.2.6.2. Fermeture de moule :

Ce mouvement commence avec une vitesse lente puis rapide, et se termine de nouveau lentement pour éviter le choc entre les plans de joint et pour donner le temps d'agir au système de sécurité.

II.2.6.3. Verrouillage :

Si le système de sécurité n'a décelé aucune anomalie, la commande peut appliquer la force de fermeture. Selon le système de fermeture, la force est créée par le produit de la surface projetée et de la pression, ou par la mise en contrainte des colonnes.

II.2.6.4. Injection et compactage :

C'est la phase de remplissage de l'empreinte avec la matière plastifiée est le maintien sous pression pour compenser les retraits.

II.2.6.5. Refroidissement :

C'est le temps nécessaire pour que plastique se solidifie dans le moule. Dans la pratique, on plastifie souvent, pendant ce temps la matière pour le prochain cycle. De plus, si c'est nécessaire au cours de ce temps, on peut séparer la buse du cylindre d'injection de moule.

II.2.6.6. Ouverture de moule :

Le plastique étant suffisamment refroidi pour pouvoir être démoulé, la partie mobile de moule s'écarte de partie fixe.

Pendant le cycle, le plastique fondu se refroidit en passant de température d'injection (le plus souvent voisine de 200°C ou supérieure) à une température proche de celle de moule, à laquelle l'objet devient solide.

II.3. L'impression 3D :

II.3.1.Introduction : [8]

Depuis le début des années 1980, le déploiement de la révolution numérique impacte directement notre quotidien : mondialisation accrue des marchés, concurrence exacerbée imposant aux entreprises une réactivité optimale, et une capacité d'adaptation constante au renouvellement des produits et des services.

Ainsi, afin de conserver et d'acquérir de nouvelles parts de marché compte tenu du taux de renouvellement accéléré des produits, les entreprises doivent :

- maîtriser leurs coûts ;
- améliorer constamment la qualité de leurs produits/services ;
- réduire drastiquement leurs délais de développement et de mise sur le marché.

Pour répondre à ces critères essentiels de réussite, les entreprises s'adaptent en permanence à de nouveaux environnements externes et doivent intégrer au sein de leur processus de conception (et de leur organisation) les technologies issues de l'évolution numérique.

II.3.2.Historique : [9]

La popularité actuelle des imprimantes 3D personnelles et le relais récent des médias laissent supposer que l'impression 3D en est à ses balbutiements. Il n'en est rien. L'impression 3D existe en réalité depuis environ 25 ans. Elle est longtemps restée cantonnée à un usage industriel très spécialisé, d'abord employée à des fins de prototypage et d'outillage rapide. Cette entrée par la petite porte lui a permis de faire ses preuves, tranquillement mais sûrement.

La toute première imprimante 3D, la SLA-250, a été lancée fin 1988 par ce qui était alors une très jeune entreprise, 3D Systems, fondée en 1986 par l'ingénieur Chuck Hull, auteur d'une soixantaine de brevets dans le domaine du prototypage rapide. Le procédé utilisé était la stéréolithographie, technique qu'il a mise au point et brevetée en 1984. À cette époque, l'expression « impression 3D » n'existe pas encore. Chuck Hull parle de stereolithography apparatus, qui désigne un système de fabrication par couches successives utilisant un matériau sensible aux rayons ultraviolets. L'imprimante remporte d'emblée un franc succès dans le monde industriel. 3D Systems est d'ailleurs à l'origine du STL (Standard Tessellation Language), un format de fichier devenu depuis le standard pour l'impression 3D.

À la même époque, comme souvent dans l'histoire des techniques, d'autres inventeurs mettent au point des procédés de fabrication additive. En 1988, Scott et Lisa Crump créent l'entreprise Stratasys. Ils sont alors en plein développement du procédé FDM (Fused

Deposition Modeling) qui sera breveté l'année suivante. La société lance sur le marché ses premières imprimantes basées sur cette technique, qui permet de déposer le matériau liquéfié couche par couche grâce à une tête d'extrusion qui se déplace. La FDM donnera plus tard naissance aux imprimantes personnelles.

Il faut ensuite attendre 1993 pour voir apparaître le procédé 3DP (Three Dimensional Printing), mis au point au MIT (Massachusetts Institute of Technology). Il est assez proche de la technique employée pour les imprimantes 2D à jet d'encre : une glue est projetée sur une surface de poudre pour former peu à peu l'objet. En 1995, l'entreprise Z Corporation obtient du MIT le droit d'utilisation exclusif du procédé 3DP et débute le développement de ses imprimantes, destinées uniquement au monde industriel.

1996 est une année charnière pour le monde naissant de l'impression 3D. Trois imprimantes majeures sont alors lancées sur le marché : la Genisys de Stratasys, l'Actua 2100 de 3D Systems et la Z402 de Z Corporation. Pour la première fois, elles sont qualifiées d'« imprimantes 3D », et l'expression commence à entrer dans le langage courant pour parler de ce type de machine de prototypage rapide. Puis en 2005, la Spectrum Z510 de Z Corporation voit le jour. C'est la première imprimante 3D capable de fabriquer des objets directement en couleurs.

Pendant dix ans, de 1996 à 2006 environ, les constructeurs vont mettre au point d'autres modèles, améliorer et développer de nouveaux procédés. Les imprimantes 3D sont de plus en plus utilisées pour le prototypage rapide et la production de petites séries, mais tout en restant cantonnées au domaine industriel.

L'idée de rendre accessible cette technologie aux particuliers fait peu à peu son chemin chez certains acteurs. Plusieurs entreprises émergent de cette vision, principalement en Europe. En 2007, les Néerlandais Peter Weijmarshausen, Robert Schouwenburg et Marleen Vogelaar créent Shapeways, un service en ligne d'impression 3D ouvert aux particuliers. En France, Éric Carreel, Clément Moreau et Jacques Lewiner fondent Sculpteo en 2009 et développent des outils web qui simplifient l'ensemble du processus d'impression 3D pour l'utilisateur amateur.

En parallèle, d'autres acteurs s'investissent dans le domaine des imprimantes 3D personnelles. Né dans le monde de la recherche et de l'open source, le projet RepRap mené par Adrian Bowyer voit le jour en 2005 à l'université de Bath au Royaume-Uni. Il s'agit de la première imprimante 3D autorépliquante, elle peut imprimer ses propres pièces, qui s'appuie sur une technologie très similaire au procédé FDM. Le premier modèle opérationnel, la Darwin, est disponible en 2007. Il est entièrement open source, ce qui permet à beaucoup d'utilisateurs passionnés de le reproduire et de l'améliorer.

Aujourd'hui, le marché de l'impression 3D est en pleine expansion et semble même atteindre une phase de transition historique. En avril 2012, les entreprises Stratasys et Objet ont fusionné et sont devenues le pure Player de l'impression 3D le plus coté au monde, à 1,4 milliard de dollars. Autre chiffre saisissant, le marché des imprimantes 3D personnelles est passé de 355

unités vendues en 2008 à 23 265 en 2011. Les médias se sont aussi emparés du phénomène et continuent d'attirer l'attention sur cette technologie, de plus en plus connue du grand public. Les procédés d'impression se sont améliorés, les matériaux disponibles se sont multipliés, et le prix des machines a drastiquement chuté. Pour moins de 500 €, il est désormais possible de s'équiper d'une imprimante 3D personnelle offrant de bonnes performances.

II.3.3.Principe de fonctionnement : [10]

L'impression 3D, également appelée fabrication additive ou fabrication numérique directe, permet de fabriquer un objet en créant un modèle numérique et en l'imprimant en trois dimensions. Elle ouvre un large champ de possibilités techniques, avec des enjeux économiques importants. Utilisée essentiellement pour du prototypage, ses applications potentielles intéressent désormais de multiples secteurs d'activités : aéronautique, automobile, médical,...

Il n'y a pas une mais plusieurs techniques d'impression 3D : stéréolithographie, frittage sélectif au laser, dépôt de matière fondue,... comportant chacune des variantes. Elles ne requièrent ni les mêmes équipements, ni les mêmes matériaux et sont employées en fonction des applications visées.

Notre étude porte plus particulièrement sur l'impression 3D par dépôt de fil de matière fondu.

- **Procédés d'impression 3D :**

La première étape est la conception de l'objet à partir d'un logiciel de CAO (SolidWorks par exemple). Le fichier 3D obtenu, le plus souvent au format STL, est découpé en plusieurs couches via un logiciel comme MakerWare, avant d'être envoyé à l'imprimante. La plupart du temps, des structures de support sont également générées. La machine peut contenir plusieurs matériaux pour réaliser des objectifs différents : par exemple, utiliser un matériau pour construire le modèle et un autre en tant que structure de support.

L'impression 3D démarre par la mise à température de l'imprimante, autour de 200°C, nécessaire pour la fusion de la matière. Une fois la machine chauffée, un fil de matière, d'environ 0.1 millimètre de diamètre, est extrudé c'est-à-dire déposé sur une plateforme à travers une buse ou tête d'impression. Le filament de matière est le plus souvent du plastique ou du métal est déroulé d'une bobine par un mécanisme à vis qui pousse le filament dans la buse à une vitesse contrôlée. Le flux de matière peut être arrêté et redémarré sur commande.

La buse est chauffée afin que le matériau fonde. Dans le cas des thermoplastiques, elle est chauffée à une température supérieure à la température de transition vitreuse du matériau. La matière est ensuite extrudée à travers la buse, qui peut être déplacée dans les directions horizontale ou verticale par un mécanisme numériquement contrôlé. Elle suit un chemin vérifié par un progiciel (CAM). Le modèle utilisé est souvent un design rectiligne suivant les axes X-Y-Z.

Chaque couche déposée se solidifie immédiatement et la plateforme descend d'un niveau pour que chaque nouvelle couche soit extrudée sur la précédente, jusqu'à l'impression totale de l'objet. Une fois l'impression terminée, l'objet durcit à l'air. Il est possible de distinguer à l'œil nu les différentes couches de matière déposée. La qualité ainsi que la précision de l'objet imprimé dépendent essentiellement du diamètre de la buse et de l'épaisseur du fil de matière déposé. Elle peut atteindre le dixième de millimètre pour les modèles les plus performants.

La technologie de dépôt de matière fondue est composée de deux parties : un matériau de modélisation qui constitue la pièce achevée, et un matériau support tenant lieu d'armature. Ce dernier est détaché ou dessous dans du détergent et de l'eau. La pièce est alors prête à l'utilisation.

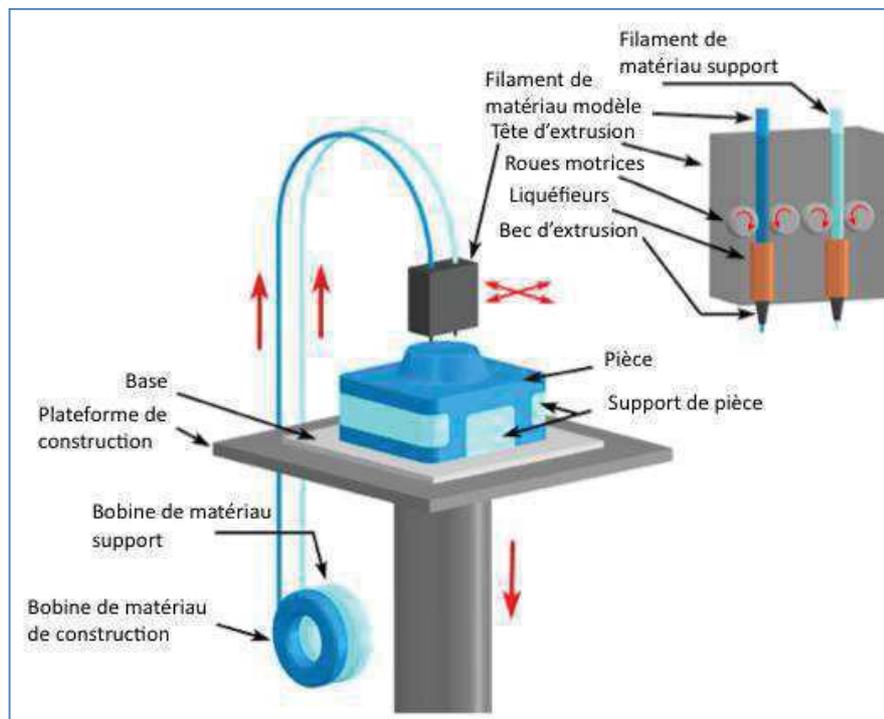


Figure II.7. Schéma explicatif de fonctionnement d'une imprimante 3D

Cette technologie est compatible avec un large choix de polymères thermoplastiques: acrylonitrile butadiène styrène, polycarbonate, polyphenylsulfone, polyetherimide (ULTEM). Cela se traduit par une large gamme de couleurs, 98% des couleurs de Photoshop sont disponibles, d'excellentes propriétés mécaniques et de biocompatibilité. Certaines imprimantes acceptent aussi les polycarbonates 5PC, les polycaprolactones, des plastiques résistant au feu, particulièrement adapté à l'aérospatiale. De plus, il est possible d'imprimer en 3D avec des filaments de bois, de pierre, de céramique et de matières alimentaires en faisant des adaptations au niveau de la tête d'extrusion. En effet, elle peut être remplacée dans certains cas par une seringue pour l'impression de fromage ou encore pour l'impression de cellules.

Les avantages du dépôt de matière fondue sont les suivants : cette technologie est la meilleure pour les imprimantes 3D de bureau et donne une très bonne qualité d'impression.

De nombreux matériaux sont envisageables (ABS, PLA) et un large choix de coloris peut être concevable. Ce procédé est simple à utiliser et plus rapide que d'autres techniques d'impression 3D. Cependant, la précision de ce procédé est moyenne, surtout pour les imprimantes personnelles, car le filament est parfois difficile à maîtriser.

II.3.4. Quelques techniques d'impression en 3D : [8]

II.3.4.1. Dépôt de matière fondue FDM (Fused Deposition Modeling)

Cette technique consiste à faire fondre un filament de thermoplastique (généralement un plastique type ABS ou PLA) à travers une buse chauffée à une température variant entre 160 et 400 °C suivant la température de plasticité du polymère. Le fil en fusion, d'un diamètre de l'ordre du dixième de millimètre, est déposé sur le modèle et vient se coller par re-fusion sur la couche précédente.

II.3.4.2. Imagerie par transfert de film FTI (Film Transfer Imaging)

Un film transparent recouvert d'une couche de résine photopolymère est placé devant le vidéo projecteur intégré à la machine, l'image de la coupe 2D projetée va faire durcir la résine. Le plateau de production est remonté d'une épaisseur tandis que le film transparent fait un aller-retour dans la cartouche afin de recevoir une nouvelle couche de résine liquide, l'image de la coupe 2D suivante est projetée dessus et ainsi de suite. La pièce est ainsi reconstituée couche par couche.

II.3.4.3. Modelage à jets multiples MJM (Modelage à Jet Multiples)

Cette technique consiste à déposer une couche de résine (du plastique type acrylate ou polypropylène) liquide de la même manière qu'une imprimante à jet d'encre avec une épaisseur de 2/100 à 4/100 de mm.

II.3.4.4. Stéréolithographie SLA (Stéréolithographie Apparatus)

Cette technique utilise en général une résine spéciale sensible au traitement par rayon laser. À la fin de chaque couche solidifiée, le laser continue à chauffer la résine qui durcit jusqu'à former l'objet complet. Cette technique permet ainsi d'imprimer des verres de silice fondus transparents.

II.3.4.5. Frittage sélectif par laser SLS (Selective Laser Sintering)

Cette technique est similaire à la stéréolithographie, mais une poudre est utilisée (au lieu d'un photopolymère liquide). Un laser puissant solidifie localement la surface de poudre et l'agglomère aux couches précédentes par frittage. Une nouvelle couche de poudre est ensuite étalée et le processus recommence.

Tableau II.1. Procédés d'impression 3D, caractéristiques et nom de l'entreprise créatrice

Procédé	Inventeur	Caractéristiques
Fused Deposit Modeling (FDM)	Stratasys	Fonte d'une résine de plastique à travers une buse chauffée à haute température (extrusion). Modélisation de l'objet par un dépôt de fils en fusion (10-1 mm).
Modelage à Jets Multiples (MJM)	3D Systems	Dépôt d'une couche de résine très fine (16 microns d'épaisseur). Technologie la plus précise. Objet reconstitué par couche de résine liquide suivant des projections successives d'images de coupe 2D qui fait durcir la résine.
Film Transfert Imaging (FTI)		Objet reconstitué par couches de résine liquide suivant des projections successives d'images de coupe 2D qui fait durcir la résine.
Stéréolithographie Apparatus (SLA)	Matérialise	Une plateforme mobile supportant le modèle est plongée dans une cuve de résine liquide sensible au traitement UV. Un laser fixe UV balaie la surface de la résine pour donner forme à l'objet.
Selective Laser Sentering (SLS) ou frittage de poudre		Un laser solidifie localement la surface de poudre et l'agglomère aux couches précédentes par frittage (chauffage sans fusion). Similaire à la SLA.

II.3.5. Les produits utilisés dans l'impression 3D : [11]

Certains pourraient croire que le plastique est le seul matériau utilisé dans l'impression 3D, hors cette technologie offre aujourd'hui un très large panel de consommables ! En effet, chaque procédé d'impression 3D fonctionne avec son propre type de matériau. Ainsi la plupart des imprimantes 3D de type FDM (dépôt de matière fondue) par exemple, sont compatibles avec des filaments plastiques, alors que les machines fonctionnant selon la technologie SLA (stéréolithographie) impriment à partir de résines.

On distingue 2 grandes familles de matériaux à savoir les plastiques et les métaux. A cela s'ajoute les céramiques (silice, alumine, plâtre...) et les matières organiques (cires, tissus et cellules). Voici les matériaux plastiques utilisés dans l'impression 3D :

II.3.5.1. L'ABS (acrylonitrile butadiène styrène) :

C'est un matériau très utilisé dans la carrosserie des voitures, les appareils électroménagers et dans de nombreuses applications de capotage. Il appartient à la famille des thermoplastiques mais contient une base d'élastomère à base de polybutadiène qui le rend souple et résistant aux chocs.

L'ABS fond entre 200 et 250 °C et peut supporter des températures très basses (- 20 °C) comme élevées (80 °C). En plus de sa bonne résistance, ce matériau permet d'obtenir une surface polie, est réutilisable et peut être soudé par procédés chimiques (en utilisant l'acétone). Cependant, il n'est pas biodégradable et rétrécit au contact de l'air, raison pour laquelle la plateforme d'impression est chauffée afin d'éviter le décollement des pièces.

L'ABS est employé principalement dans la technique de dépôt de matière fondue (FDM) et, en conséquence, il est disponible avec la plupart des imprimantes maisons comme les Replicator 2 de Makerbot et les Ultimaker. En outre, un dérivé de l'ABS, sous forme liquide, est utilisé dans les procédés SLA et PolyJet.



Figure II.8. Filament d'ABS générique

II.3.5.2. PLA (acide polylactique) :

Contrairement à l'ABS, ce polymère est biodégradable car il est fabriqué à partir de matières renouvelables (amidon de maïs). L'une de ses caractéristiques principales est son faible rétrécissement à l'impression 3D, raison pour laquelle des plateaux chauffants ne sont pas nécessaires lors de l'impression par la technique FDM (à 185 °C) et l'on obtient des pièces d'une meilleure précision. Enfin, grâce à sa non-toxicité, ce matériau est couramment utilisé pour des objets destinés au contact alimentaire, mais la tête d'impression doit alors être fabriquée en acier inoxydable.

En comparaison avec l'ABS, le PLA est plus difficile à manipuler du fait de sa vitesse élevée de refroidissement et de durcissement. Il peut également s'abîmer et se déteindre au contact de l'eau. Mais pour autant, ce matériau, souvent translucide, est utilisé pour la MakerBot Replicator 2 et la CubeX et accepte tout type de finition en plusieurs couleurs.



Figure II.9. Filament de PLA

II.3.5.3. Polyamides :

Les objets en polyamides sont souvent fabriqués à partir d'une poudre fine, granuleuse et blanche en utilisant la technologie du frittage sélectif par laser (SLS), mais certaines familles de ce matériau, comme le nylon, se présentent sous la forme d'un filament et s'utilisent avec la technique de dépôt de matière fondue (FDM).

Grâce à leur biocompatibilité, comme le PLA, les polyamides peuvent être utilisés pour des pièces en contact avec les aliments (sauf ceux contenant de l'alcool), et contrairement au PLA et à l'ABS, des surfaces plus lisses sans effet ondulé sont obtenues.

Etant constitué des structures semi-cristallines, ce matériau présente un bon compromis entre caractéristiques mécaniques et chimiques, d'où sa stabilité, rigidité, flexibilité et sa résistance aux chocs. Ces avantages donnent lieu à une large gamme d'applications et un grand niveau de détail. Une qualité supérieure utilisée, par exemple pour la fabrication d'engrenages, des pièces pour l'aérospatiale, l'automobile, la robotique, des prothèses médicales ou des moules pour l'injection.



Figure II.10. Filament de Polyamides

II.3.5.4. Nylon :

Moins cher que l'ABS et le PLA, le nylon est de plus en plus utilisé dans les imprimantes personnelles.

Le nylon 3D est un copolymère flexible et résistant spécifiquement conçu pour les imprimantes 3D. Le rendu de l'impression 3D est translucide. La flexibilité et l'élasticité du nylon rendent vos impressions souples tout en restant résistantes à la cassure ou déchirure.



Figure II.11. Filament de nylon

II.3.5.5. Alumide :

Les objets en alumide sont fabriqués à partir d'une combinaison entre polyamide et aluminium en poudre en utilisant la technologie de frittage sélectif par laser (SLS). Avec une surface légèrement poreuse et d'un aspect sableux et granuleux, ce matériau offre une grande solidité, une haute résistance à la température (172 °C max.) et aux chocs et une relative flexibilité. Cependant, des post-traitements sont généralement nécessaires: meulage, polissage, revêtement et fraisage par exemple.

L'alumide est utilisé pour des modèles complexes, pièces de conception ou pour des petites séries de modèles fonctionnels, ayant besoin d'une rigidité importante et d'un aspect proche de l'aluminium. La technique employée implique des limites géométriques faibles.



Figure II.12. Alumide en poudre



Figure II.13. Pièce en alumide

II.3.5.6. Résine :

Les résines peuvent être thermoplastiques ou thermodurcissables (polymérisation) et elles constituent le matériau de base de plusieurs techniques comme la stéréolithographie (SLA) et le PolyJet, et permettent d'obtenir des objets en finition mat ou brillant, blancs, noirs et même transparents. Ces dernières, ont une géométrie et une fonctionnalité limitées, mais la qualité et la douceur de la surface, en plus de sa transparence, sont systématiques. Dans tous les cas, il est possible de réaliser un processus de coloration et n'importe quel autre traitement post-impression.



Figure II.14. Objet imprimé en résine transparente

II.3.5.7. Polypropylène :

Un autre thermoplastique très utilisé en automobile, pour les emballages, les vêtements professionnels jetables, et dans la fabrication d'une centaine d'objets du quotidien. Le polypropylène (PP) est connu pour sa résistance à l'abrasion et sa capacité à absorber les chocs, en plus d'une relative rigidité et flexibilité.

Un des inconvénients est sa faible résistance aux températures et sa sensibilité au rayonnement UV, raison pour laquelle plusieurs fabricants d'imprimantes ont développé des dérivés de ce matériau, les simili-polypropylènes, afin de renforcer ses propriétés physiques et mécaniques. Entre autres, on trouve la gamme VisiJet de chez 3D Systems dont les matériaux offrent une grande flexibilité comme le VisiJet Flex ou ceux qui ont une grande rigidité et une résistance plus élevée à la chaleur (130 °C) et à l'humidité comme le VisiJet HiTemp ou la gamme DurusWhite de chez Objet. Enfin, EnvisionTEC propose un simili-polypropylène (le LS600) pour la fabrication de pièces d'un grand niveau de détail.



Figure II.15. Objet imprimé en Polypropylène

II.3.5.8. Matériaux de support :

Des plastiques solubles peuvent également être utilisés pour imprimer les supports d'impression (en fonction de la complexité et de la technologie utilisée pour la pièce désirée), qui par la suite seront dissous. Les plastiques solubles les plus employés actuellement sont le HIPS (Polystyrène Haut Impact) et le PVA (Alcool Polyvinylique) que l'on peut dissoudre avec du d-limonène et de l'eau respectivement.

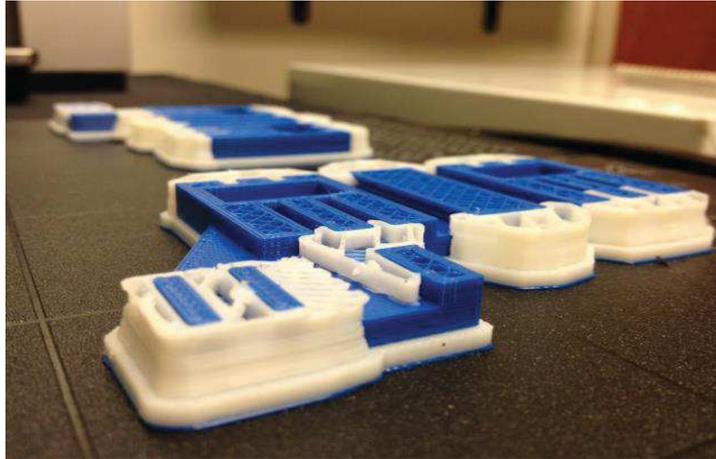


Figure II.16. Objets imprimés en Matériaux de support

II.4.Conclusion :

Durant ce chapitre, on a vu deux procédés de mise en œuvre des matières plastiques, les deux sont très utilisés de nos jours. L'injection permet des productions de très hauts volumes, elle offre aussi la possibilité de réaliser des pièces de taille minuscule, pour changer la forme de produit, il suffit de changer le moule. Tandis que l'impression 3D peut réaliser des produits finis, de structures très complexes avec une excellente précision, et pour cela il faut seulement d'avoir la structure sous format numérique et l'imprimante prendra le relais.

CHAPITRE III: MATERIAUX ET TECHNIQUE DE CARACTERISATION

Chapitre III: Matériaux et technique de caractérisation

III.1. Introduction :

Pour être en mesure de répondre à la demande croissante de ces matériaux plastiques, tout en continuant à améliorer leurs précieuses propriétés, la science et l'industrie ont développé une série de nouveaux polymères qui sont les copolymères.

La combinaison de deux ou plusieurs polymères de natures chimiques et de propriétés physiques différentes, permet d'avoir dans certains cas des matériaux d'intérêt pratique avec des performances supérieures aux produits de départ. Cette technique a été employée durant les dernières décennies pour améliorer les propriétés physiques comme la résistance aux chocs, la flexibilité et la stabilité thermique.

III.2. Matériau : L'Acrylonitrile Butadiène Styène (ABS)

III.2.1. Historique : [7]

L'ABS est une matière plastique aux propriétés d'avoir des surfaces exceptionnelles. Inventé en 1946 aux Etats-Unis par Monsieur DALY, il est principalement utilisé dans l'électroménager, l'automobile, les articles de sports et les produits High Tech et tous les secteurs d'activité où l'on souhaite allier la tenue au choc avec un bel aspect final. Il est reconnu par sa bonne tenue au choc, sa résistance à la rayure, son aptitude au vieillissement, son excellent aspect et sa capacité à être décoré. L'ABS est essentiellement mise en œuvre par injection.

III.2.2. Définition : [7]

L'ABS est copolymère thermoplastique amorphe, obtenu par la copolymérisation du styrène et l'acrylonitrile en présence de polybutadiène.

Les proportions des -différents monomères varient d'un ABS à l'autre :

- **Acrylonitrile** de 15 à 35%.
- **Butadiène** de 5 à 30.
- **Styrène** de 40 à 60%.

Le résultat est une longue chaîne de polybutadiène sillonnée de courtes chaînes de poly(styrène-co-acrylonitrile).

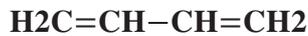
- **L'Acrylonitrile :**

L'acrylonitrile (cyanure vinylique ou cyanure de vinyle) est constitué d'un groupe vinyle lié à un nitrile. Sa formule semi-développée est CH_2CHCN (ou $\text{C}_3\text{H}_3\text{N}$). C'est un liquide incolore (à jaunâtre en raison d'impureté), son odeur est âcre et légèrement piquante. Il est généralement obtenu par oxydation de propylène C_3H_6 qui remplace l'Acétylène, par la présence d'Ammoniac NH_3 .



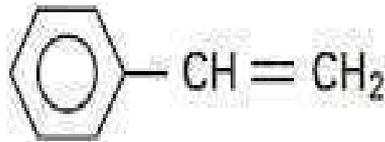
- **Le Butadiène :**

Le Buta-1,3-diène est un hydrocarbure de formule C_4H_6 , gazeux, incolore et inflammable. C'est l'isomère le plus courant de butadiène, raison pour laquelle, il est souvent simplement appelé butadiène.



- **Le Styrène :**

Le styrène est un composé organique, aromatique, de formule chimique C_8H_8 . C'est un liquide à température et pression ambiante. Il est utilisé pour fabriquer des plastiques, en particulier, le polystyrène.



La composition de ces trois polymères donne naissance à un copolymère polyphasé constitué d'une matrice Acrylonitrile-Styrène avec des nodules de Butadiène noyés dans cette dernière.

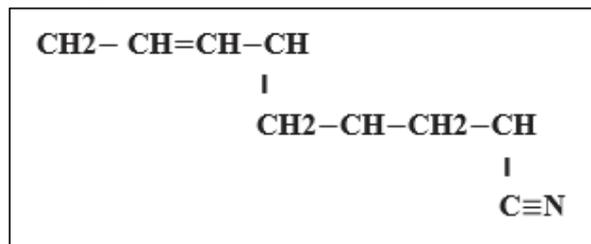


Figure III.1. Structure chimique de l'ABS

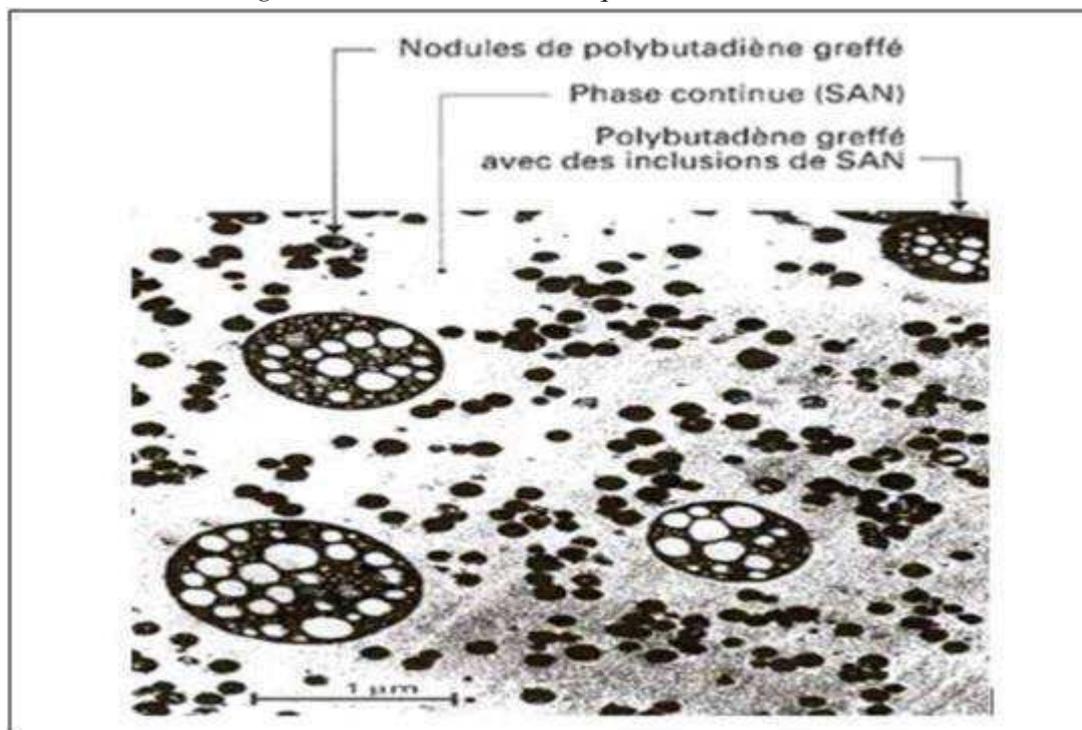


Figure III.2. Vue d'un ABS au microscope électronique à transmission [3]

III.2.3. Caractéristiques de l'ABS : [3]**III.2.3.1. Caractéristiques physiques et mécaniques :***Tableau III.1. Caractéristiques physiques et mécaniques de l'ABS*

Masse volumique (g /cm ³)	Résistance aux chocs(K) à 20°C	Résistance à rupture (Mpa)	Résistance à la flexion (Mpa)	Résistance à la compression (Mpa)	Module d'élasticité (Mpa)
1,03 à 1,08	1 à 2,5	47 à 55	65 à 75	63 à 68	2200 à 2600

III.2.3.2. Caractéristiques thermiques :*Tableau III.2. Caractéristiques thermiques de l'ABS*

Retrait %	Coefficient de dilatation linéaire k-1	Capacité thermique massique (j/kg.k)	Conduction thermique (W/m/K)	Diffusivité thermique (m ² /s)
0,4 à 0,6	(0,8 à 0,95) 10 ⁻⁴	1,6.10 ⁻⁵	0,2	8,3.10 ⁻⁸

III.2.3.3. Caractéristiques chimiques :

Les ABS résistent

- A l'eau ;
- Aux acides de bases ;
- A l'essence ;
- Aux huiles minérales ;
- Aux graissages.

Les ABS ne tiennent pas aux acides minéraux concentrés, aux carbures aromatiques, solvants chlorés et esters.

III.2.3.4. Conditions de mise en œuvre de l'ABS :*Tableau III.3. Conditions de mise en œuvre de l'ABS*

Température de la matière à injecter (°C)	Température du moule (°C)	Pression d'injection (bar)	Vitesse d'injection (m/s)	Préchauffage (°C)
220 à 280	60 à 80	800 à 1400	Elevée	70 à 80

III.2.4. Présentation commerciale de l'ABS : [3]

L'ABS est en général commercialisé sous forme de granulés cubiques ou billes (après compoundage dans les mélangeurs internes), naturel ou coloré, contenant des additifs.

III.2.5. Avantages particuliers : [7]

- Rigidité.
- Aspect agréable (surface dure et brillante).
- Stabilité dimensionnelle.
- Bonne résistance aux chocs aux rayures.
- Assez bonne tenue à la chaleur et à l'humidité.
- Moulage et formage aisés, décoration et impression facile.

Toutes ces qualités ont été exploitées par l'industrie dans de nombreux domaines tels que l'industrie automobile (tableaux de bord, calendrier,...), l'électroménager (réfrigérateurs, capotages, cartes,...), la radio, la télévision, l'ameublement (poignée, moulures, ...), l'outillage (carrosseries de perceuses, manche d'outils divers, ...) ou encore la coutellerie (manches de couteaux à usage professionnel) ou l'informatique (disquettes, souris, boîtiers d'ordinateurs,...).

III.2.6. Inconvénients :

- Opacité.
- Très électrostatique (nécessité d'agents antistatiques).
- Jaunissement à l'extérieur (nécessité d'un stabilisant).
- Transparence laiteuse.

III.2.7. Application :

- Industrie automobile et transport
- Appareils domestique et de jardinage
- Electrotechnique et électronique
- Bureautique et in informatique
- Phono, photo, optique
- Machines-outils
- Sanitaire et médecine
- Jouets
- Sport et loisirs.

III.2.8. Recyclage :

L'ABS est de plus en plus recyclé, comme tout polymère, il est difficile de recycler l'ABS souillé par d'autres matériaux. L'ABS à recycler doit être propre. Le séchage s'impose. Il est important de savoir si l'ABS contient un produit ignifuge, pour adapter les conditions de transformation. Pour tout objet d'une qualité élevée, il est conseillé d'utiliser un faible pourcentage de matière recyclée afin de ne pas nuire aux propriétés mécaniques et à la solidité de la couleur.

III.2.9. Fiche technique : ABS

Tableau III.4. Fiche technique des propriétés mécaniques

Propriétés mécaniques	Moulage par injection		Impression 3D	
	Valeur type	Méthode d'essai	Valeur type	Méthode d'essai
Module en traction	2030 MPa	ISO 527 (1 mm/min)	1681,5 MPa	ISO 527 (1 mm/min)
Limite d'élasticité à la traction	43,6 MPa	ISO 527 (50 mm/min)	39,0 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Limite de rupture à la traction	-	-	33,9 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Allongement à la limite d'élasticité	4,8 %	ISO 527 (50 mm/min)	3,5 %	ISO 527 (50 mm/min)
Allongement à la rupture	34 %	ISO 527 (50 mm/min)	4,8 %	ISO 527 (50 mm/min)
Résistance à la flexion	-	-	70,5 MPa	ISO 178
Module de flexion	-	-	2070,0 MPa	ISO 178
Résistance au choc Izod, éprouvette entaillée (à 23 °C)	-	-	10,5 kJ/m ²	ISO 180
Résistance au choc Charpy (à 23 °C)	58 kJ/m ²	ISO 179	-	-
Dureté	-	-	76 (Shore D)	Duromètre

Tableau III.5. Fiche technique des propriétés thermiques

Propriétés thermiques	Valeur type	Méthode d'essai
Méthode d'essai	41 g / 10 min	ISO 1133 (260 °C, 5 kg)
Température de fléchissement sous charge (HDT) à 0,455 MPa	-	-
Température de fléchissement sous charge (HDT) à 1,82 MPa	-	-
Température de ramollissement Vicat à 10 N	97 °C	ISO 306
Transition vitreuse	-	-
Coefficient de dilatation thermique	-	-
Température de fusion	225-245 °C	ISO 294
Retrait thermique	-	-

Tableau .III.6. Autres propriétés

Autres propriétés	Valeur type	Valeur type
Poids spécifique	Poids spécifique	ISO 1183
Classification d'inflammabilité	-	-

Tableau III.7. Fiche technique des propriétés mécaniques

Spécifications du filament	Valeur	Méthode
Diamètre	2,85±0,10 mm	
Écart de circularité max.	0,10 mm	
Poids net du filament	750 g	
Longueur du filament	~107 m	

III.3. Techniques de caractérisation (partie théorique) :

III.3.1. Introduction : [13]

Les essais, en laboratoire ou sur le terrain, apportent des renseignements précis et fiables sur la qualité et les performances d'un matériau. Il en existe un grand nombre ; des normes internationales règlent la plupart.

Principaux essais : essais mécaniques (traction, dureté, résilience, fatigue, fluage ...), essais pour la productique (emboutissage, pliage, usinabilité ...), essais sur les surfaces (abrasion, rayures, rugosité, adhérence ...), essais sur les fluides (viscosité, écoulements...)

III.3.2. Essais de traction

III.3.2.1. Définition [14]

L'essai de traction constitue un des essais les plus utilisés pour la caractérisation mécanique des matériaux. Etant purement uniaxial du moins tant qu'il n'y a pas de striction (diminution catastrophique de la section de l'éprouvette au centre de celle-ci), il permet de s'affranchir des méthodes de calcul inverse pour aboutir directement à une loi de comportement uniaxiale. Il permet de déterminer de nombreuses grandeurs normalisées, comme la contrainte à rupture, la contrainte maximale, la limite d'élasticité, est nécessaires dans les calculs de structure.

III.3.2.2. Description générale d'une machine de traction

Une machine de traction est constituée d'un bâti portant une traverse mobile. L'éprouvette de traction, vissée ou enserrée entre des mors, selon sa géométrie, est amarrée à sa partie inférieure à la base de la machine et à sa partie supérieure, à la traverse mobile (dans le cas d'une machine mécanique) ou au vérin de traction (dans le cas d'une machine hydraulique). Le déplacement de la traverse vers le haut réalise la traction. Une machine de traction comporte une cellule de charge, qui permet de mesurer l'effort appliqué à l'éprouvette et le déplacement de l'éprouvette peut être suivi de diverses façons.

Les dispositifs expérimentaux sont généralement asservis et peuvent être pilotés à vitesse de montée en charge, à charge constante, à vitesse de déformation constante, etc. Selon, ce qui peut être proposé, par le système de pilotage.



Figure III.3. Machine à traction

III.3.2.3. Éprouvettes et systèmes d'encastrement [15]

Une éprouvette de géométrie parfaitement définie est encastrée à ses deux extrémités dans des mors ou des mâchoires. L'un de ces mors, fixe, est relié pour la mesure des efforts, à un système dynamométrique par une rotule, de telle sorte que l'axe des efforts appliqués soient confondu avec celui de l'éprouvette ; l'autre mors, mobile, est relié à un système d'entraînement à vitesse de déplacement, ou plus rarement de charge, constante.

- Les mors (ou mâchoires) sont à serrage direct par vis (pneumatiques ou auto-serrant) ou à serrage sur empreinte. Leur choix dépend essentiellement de la forme de l'éprouvette et de la consistance de la matière. Les mâchoires pneumatiques ou auto-serrantes sont

recommandées dans la mesure où elles permettent d'obtenir un serrage reproductible, indépendant de l'opérateur.

Le glissement et les ruptures dans les mors seront limités au maximum en veillant à choisir des surfaces de serrage adaptées à l'épaisseur et à la déformabilité de la matière (surfaces striées ou dépolies pour les épaisseurs supérieures à 2 mm et les matériaux rigides, revêtements élastomères pour les films, etc.). Des goupilles de centrage dans les talons des éprouvettes facilitent l'alignement et limitent quelquefois le glissement.

- Sauf cas particuliers, la forme cylindrique des éprouvettes filetée aux deux extrémités n'a pas été retenue, car elle n'est guère compatible avec l'épaisseur moyenne des objets ou plaques en matière plastique. On utilise en général des éprouvettes planes rectangulaires en forme d'haltère. Leurs géométrie et dimensions dépendent des normes et du matériau testé. Si l'on se réfère aux normes NF EN ISO 527.

— pour les plastiques moulés ou extrudés, des éprouvettes haltères de type 1A ou 1B, respectivement recommandées dans le cas d'éprouvettes moulées (à usages multiples) et usinées, selon la norme NF EN ISO 527-2. Des variantes sont également proposées avec des éprouvettes homothétiques de taille réduite, proportionnelles au type 1B dans des facteurs 2 (type 1BA) ou 5 (type 1BB) ou au type 5 (en fait identiques aux types 2 et 3 de l'ISO 37 relative aux élastomères thermoplastiques).

— pour les films et feuilles, des éprouvettes de type 2 selon la norme NF EN ISO 527-3. Des variantes sont aussi autorisées avec des éprouvettes haltères de type 1B (feuilles rigides), type 5 (feuilles thermoplastiques souples et feuilles et films à très haute contrainte à la rupture) ou type 4

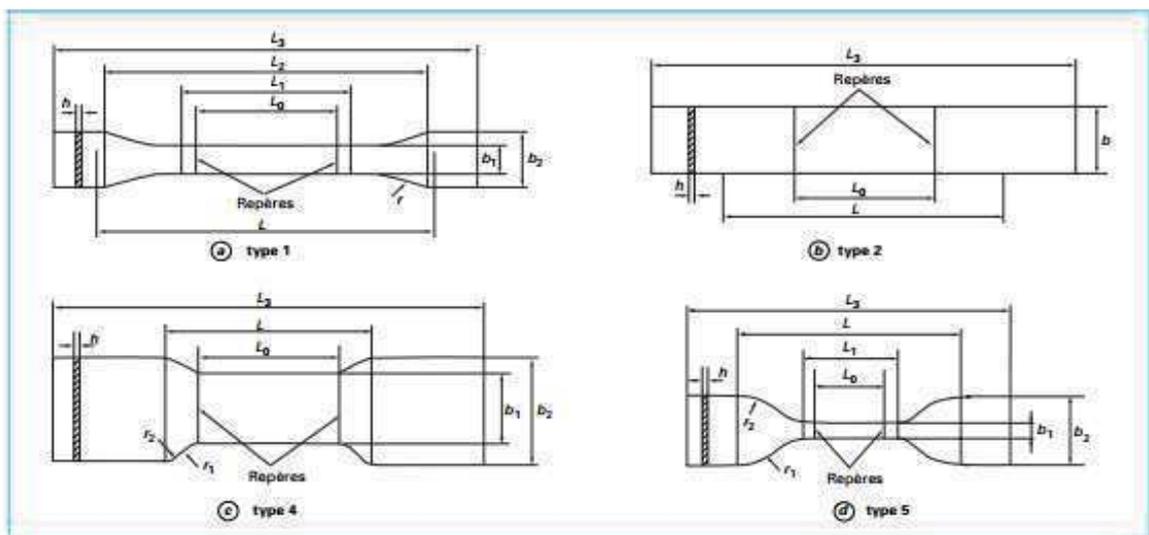


Figure III.4. Géométrie des éprouvettes de traction selon la norme NF EN ISO 527[15]

Tableau III.8. Propriétés mécaniques et rhéologiques des polymères à l'état solide [15]

Type d'éprouvette		1 A	1 B	1 BA	1 BB	5 A	5 B	2	4	5
Longueur totale	L_3	≥ 150	≥ 150	≥ 75	≥ 30	≥ 75	≥ 30	≥ 150	152	≥ 115
Longueur partie calibrée	L_1	80 ± 2	$60 \pm 0,5$	$30 \pm 0,5$	$12 \pm 0,5$	25 ± 1	$12 \pm 0,5$			33 ± 2
Rayon	r	20 à 25	≥ 60	≥ 30	≥ 12					
Petit rayon	r_1					$8 \pm 0,5$	$3 \pm 0,1$		22	14 ± 1
Grand rayon	r_2					$12,5 \pm 1$	$3 \pm 0,1$		25,4	25 ± 2
Distance initiale entre mâchoires	L	115 ± 1	$L_2 \cdot 0,5$	$L_2 \cdot 0,2$	$L_2 \cdot 0,1$	50 ± 2	20 ± 2	100 ± 5	73,4	80 ± 5
Distance entre parties larges à faces parallèles	L_2	104 à 113	106 à 120	58 ± 2	23 ± 2					
Largeur aux extrémités	b_2	$20 \pm 0,2$	$20 \pm 0,2$	$10 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$	$12,5 \pm 0,1$	$6 \pm 0,5$	10 à 25	38	25 ± 1
Largeur partie étroite	b_1	$10 \pm 0,2$	$10 \pm 0,2$	$5 \pm 0,2$	$2 \pm 0,2$	$4 \pm 0,1$	$2 \pm 0,1$		$25,4 \pm 0,1$	$6 \pm 0,4$
Épaisseur recommandée	h	$4 \pm 0,2$	$4 \pm 0,2$ ou ≤ 1	≥ 2	≥ 2	≥ 2	≥ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Longueur de référence	L_0	$50 \pm 0,5$	$50 \pm 0,5$	$25 \pm 0,5$	$10 \pm 0,2$	$20 \pm 0,5$	$10 \pm 0,2$	$50 \pm 0,5$	$50 \pm 0,5$	$25 \pm 0,25$
Norme ISO		527-2	527-2 (537-3)	527-2	527-2	527-2	527-2	527-3	527-3	527-3
Recommandations particulières		Moulées usages multiples	Usinées (feuilles rigides)	Proportionnel type 1B 1:2	Proportionnel type 1B 1:5	Proportionnel type 5				Feuilles souples et/ou résistance élevée
		Recommandées		Petites éprouvettes			Recommandées			

Vitesse = 1 % (L_0)/min
Les cotes sont en millimètres.

III.3.2.4. Courbe conventionnelle : [16]

Afin de pouvoir utiliser les courbes brutes de traction, on doit les modifier pour que les résultats obtenus soient fonction que de matériau étudié et non de la géométrie de l'éprouvette. Pour ce faire, on rapporte la charge $F(N)$ à la section initiale $S_0 (mm^2)$ de l'éprouvette en vue d'obtenir la contrainte conventionnelle $\sigma_c (MPa)$. Et on rapporte l'allongement $\Delta l (mm)$ à la longueur initiale, l_0 , pour obtenir la déformation conventionnelle (ϵ_c), soient :

$$\sigma_c = \frac{F}{S_0} \qquad \epsilon_c = \frac{\Delta l}{\Delta l_0}$$

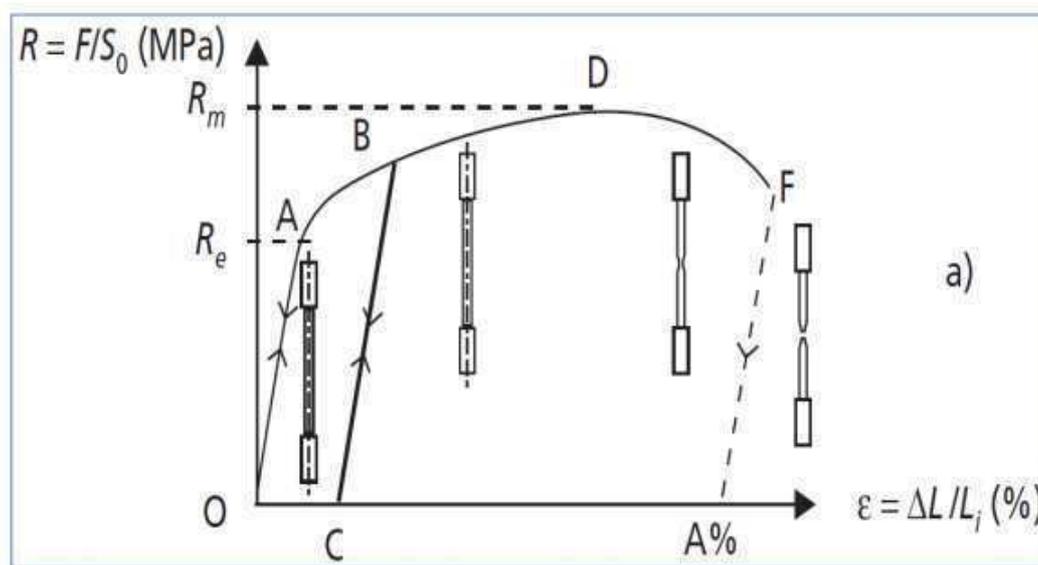


Figure III.5. Courbes conventionnelles typiques de traction

OA : allongement élastique linéaire, réversible.

Au-delà de A : déformation plastique permanente + déformation élastique.

La suppression de la force appliquée (BC) laisse apparaître un allongement plastique rémanent (OC). Une remise en charge conduit à une nouvelle limite d'élasticité (CB).

Re = Fe / S₀ : limite apparente d'élasticité (MPa) :

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}$$

Rp_{0,2} : limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % d'allongement plastique; sa détermination nécessite souvent l'usage d'un extensomètre.

AD : allongement élastique + allongement plastique réparti.

Rm = Fm/S₀: résistance à la traction (MPa).

DF : apparition et progression d'une striction (réduction de section localisée) dans les matériaux ductiles. En F : la rupture de l'éprouvette.

Z% : Coefficient de Striction, Avec S_u : la section à la rupture :

$$Z\% = 100 \cdot \frac{S_0 - S_u}{S_0}$$

A % = ΔLu/Li: allongement pour cent après rupture (%) :

$$A\% = 100 \cdot \frac{L_u - L_0}{L_0}$$

E = Re/ε_e : module de Young. En pratique, seule l'utilisation d'un dispositif extensométrique très précis permet d'exploiter la pente de la montée élastique pour la mesure de E.

Cas d'un à comportement fragile :

Dans le cas d'un matériau fragile, la rupture survient en fin de domaine élastique. L'allongement à la rupture est nul ou très faible. On ne peut déduire de la courbe que le module de Young E, et la résistance à la traction **Rm**.

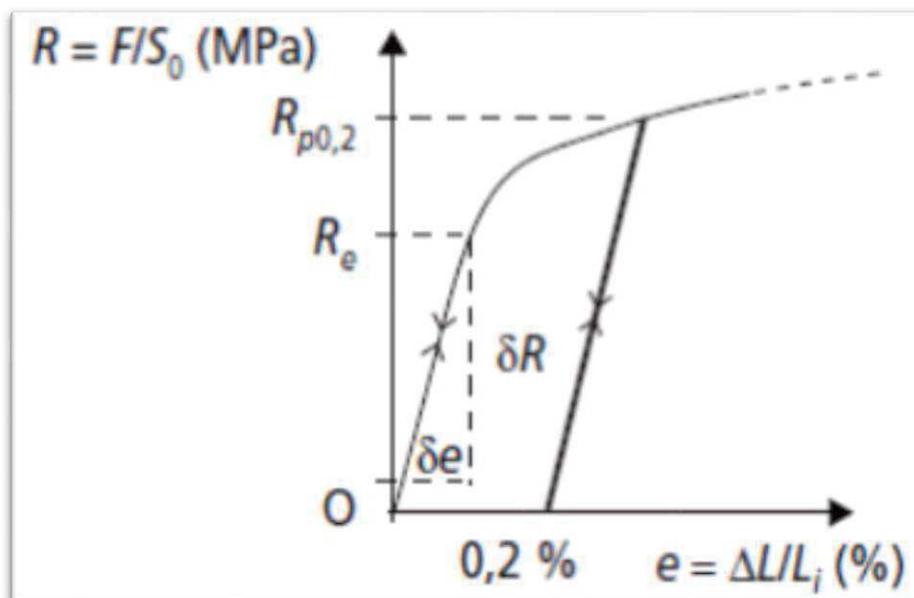


Figure III.6. Détail pour le calcul de E (pente de la partie élastique) et Rp_{0,2}

III.3.3. Essai de résilience :**III.3.3.1. Introduction : [15]**

Le choc résulte de l'application d'une sollicitation mécanique à grande vitesse (plusieurs mètres par seconde) et à énergie élevée, engendrant la rupture d'une éprouvette en une fraction de seconde.

Il permet de juger, dans des conditions expérimentales données, de la fragilité d'un ensemble matériau-éprouvette, la fragilité étant davantage synonyme de faible allongement que de faible énergie de rupture. Il permet au-delà de définir et de qualifier la zone de transition ductilité-fragilité (brusque ou progressive), lorsque varient les conditions d'utilisation par exemple.

Ce type de comportement peut être analysé dans la continuité des essais de traction ou de flexion, sous réserve de disposer de machines spéciales qui, compte-tenu de leurs coûts d'achat et de fonctionnement sont encore peu répandues. Ce mode d'analyse est certainement le plus précis, car il permet d'étudier l'évolution des lois de comportement contraintes-déformations en fonction de la vitesse.

III.3.3.2. Méthode pendulaire : [15]

La résistance au choc caractérise l'énergie absorbée au cours de la rupture d'un barreau lisse ou entaillé, sous l'action d'un percuteur doté d'une énergie cinétique suffisante. L'impact est généré par une masse à mouvement pendulaire. L'angle de remontée du pendule après le choc permet de calculer l'énergie de rupture. L'appareil utilisé porte le nom de mouton-pendule, il est constitué d'un bâti rigide et massif, d'un support d'éprouvette, d'une masse oscillante comportant un percuteur et d'un dispositif de repérage de l'énergie absorbée.

Chaque appareil est généralement équipé de plusieurs pendules interchangeables, correspondant à divers niveaux d'énergie. Une gamme de 0,5 à 50 J s'applique à l'ensemble des plastiques.



Figure III.7. Image correspondant aux pendules

Afin de limiter l'influence de la vitesse du percuteur au moment de l'impact, il est recommandé de travailler à hauteur de chute constante. La vitesse au point d'impact est de 3 à 4 m/s. La géométrie du percuteur dépend du mode de sollicitation, sachant que l'on distingue trois grandes méthodes : Charpy, Izod ou Dynstat et choc-traction. Les caractéristiques des appareils de choc pendulaires doivent être vérifiées conformément aux normes NF A 03-508 ou ISO 13802.

D'une manière générale les différentes normes d'essai signalent également la nécessité d'effectuer certaines corrections, de frottement par exemple, notamment lorsque les énergies mesurées sont faibles.

III.3.3.3. Principe de l'essai:

Il consiste à rompre, d'un seul coup de mouton pendule, une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis. On détermine l'énergie W absorbée dont on déduit la résilience.

La résilience est l'énergie nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette, exprimée en joule par centimètre carré.

III.3.3.4. Machine d'essai:

Un couteau fixé sur un marteau oscille dans un plan vertical autour d'un axe O . Une partie de l'énergie emmagasinée dans la chute du pendule est utilisée pour rompre l'éprouvette. Le centre de gravité du pendule est toujours voisin à l'arête de couteau du pendule



Figure .III.8. Machine d'essai de résilience (mouton pendule)

III.3.3.5. Les éprouvettes [17]

L'effet de la forme de l'éprouvette sur l'énergie de rupture est très prononcé. La Fig.III.7 montre les formes et dimensions géométriques de 3 types d'éprouvettes standardisées. Elles ont toutes une longueur de 55mm et une section nominale de $10 \times 10 \text{ mm}^2$, mais se distinguent dans leur forme et leur profondeur d'entaille qui se trouve sur le côté opposé à l'endroit où le marteau frappe.

Elle a pour objet de garantir un état de contrainte triaxiale, déjà lors de l'amorçage de la fissure, plutôt que de provoquer l'effet d'entaille. C'est pour cette raison que le fond de l'entaille n'est pas pointue mais cylindrique (rayon de 0.25 ou de 1mm selon type d'éprouvette).

Un constructeur qui aimerait donner une garantie pour la sécurité de son produit doit donc tenir compte d'une importante marge d'incertitude.

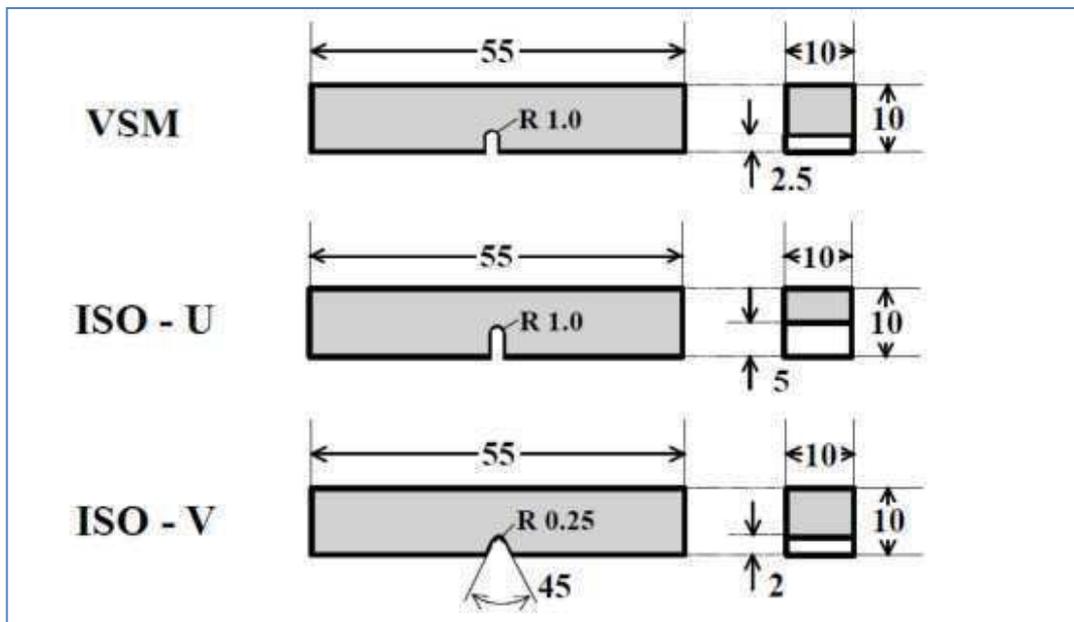


Figure III.9. Éprouvettes Charpy standardisées. Le type le plus utilisé est l'éprouvette ISO-V. Dimension en mm [17]

III.3.4. Le microscope optique :

III.3.4.1. Définition : [12]

Instrument d'optique à très fort grossissement qui permet d'observer des éléments, objets, organismes invisibles à l'œil nu, composé d'un tube renfermant plusieurs lentilles donnant l'image virtuelle d'un objet éclairé par transparence.

Le microscope optique permet de visualiser des objets vivants (bactéries, levures, organismes unicellulaires) ou fixés (coupes de tissus) à l'échelle cellulaire. Il s'applique aussi à la physique des matériaux ou à la géologie.

Les objets illuminés deviennent très clairs et il est souvent nécessaire de procéder à des colorations des tissus afin de les observer. Ces techniques de coloration permettent aussi de distinguer des objets précis, ou de différencier deux organismes proches (coloration de Gram pour les bactéries), car tous les tissus ne fixent pas la coloration de la même façon.

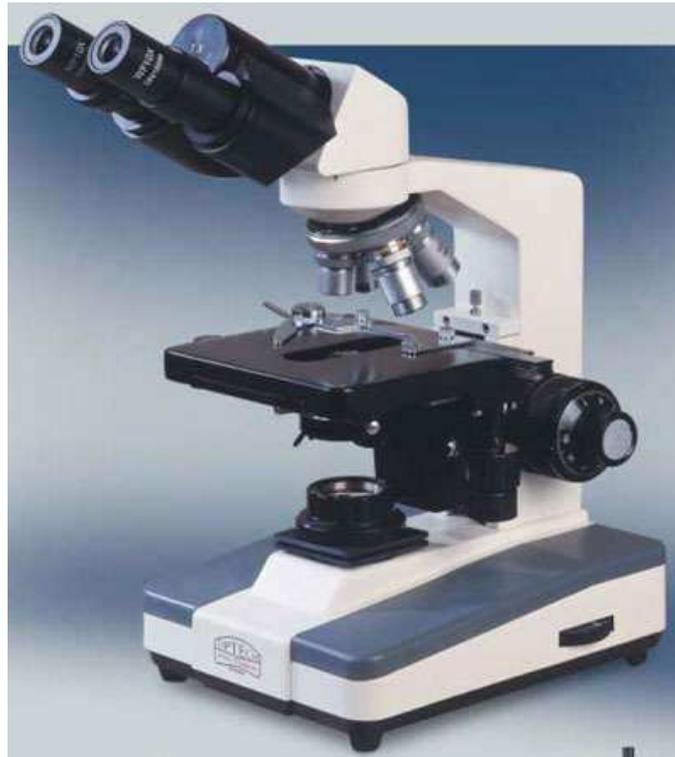


Figure III.10. Image d'un Microscope optique

III.3.4.2. Généralités : [12]

Le microscope optique est essentiellement constitué de deux composants optiques : l'objectif et l'oculaire. Cet ensemble solidaire d'un tube est pointé sur l'objet ou préparation posé sur une table ou platine dotée d'organes permettant le positionnement de l'objet dans son plan, généralement par deux mouvements de translation et/ou un mouvement de rotation.

La mise au point est assurée par deux dispositifs de translation parallèle à l'axe optique : les mouvements rapide et lent (il peut exister dans les instruments très sophistiqués en usage dans les laboratoires de recherche un mouvement ultra-lent et inversement certains microscopes d'enseignement peuvent n'être dotés que d'un seul mouvement d'amplitude et de vitesse intermédiaires aux valeurs habituelles). La liaison de ces divers éléments, ainsi que leur stabilité, sont assurées par une monture mécanique, le statif, pour lequel on peut souvent distinguer un pied et une potence. L'éclairage de l'objet est assuré par un ensemble condenseur et source, celle-ci étant le plus souvent aujourd'hui également solidaire du statif (et logée dans son pied). Cet éclairage peut prendre différentes formes suivant le type d'observation que nécessite l'objet.

Mais un instrument ne serait pas complet sans un récepteur destiné à recueillir l'information, c'est-à-dire à saisir l'image qu'il fournit. Le microscope optique étant susceptible de fournir des images à l'aide de lumière visible ou proche infrarouge et ultraviolet (pour des longueurs d'onde comprises entre 0,22 et 1,7 μm), l'œil de l'observateur ne pourra pas toujours constituer le récepteur direct et il lui faudra faire appel à des intermédiaires tels l'émulsion photographique, l'écran fluorescent, le convertisseur d'image électronique, moyens justifiant la présence éventuelle de plusieurs « sorties image », permettant par ailleurs la conservation, la diffusion, l'observation collective de l'image.

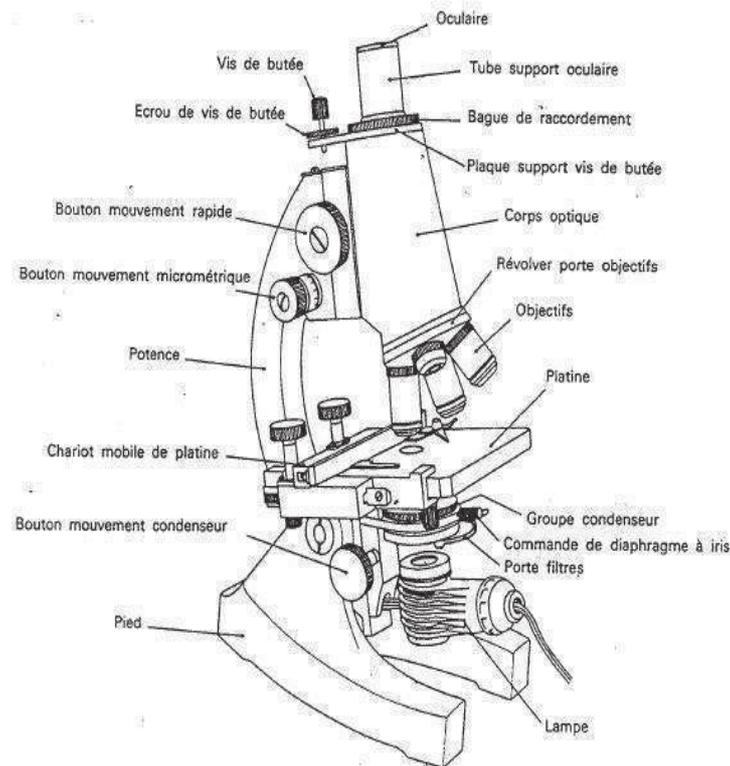


Figure III.11. Schéma explicatif d'un microscope optique

III.3.4.3. Les différents types du microscope optique :

- Le microscope à fond clair
- Le microscope à fond noir
- Le microscope à contraste de phase
- Le microscope à fluorescence

III.3.5. Microscope électronique à balayage (MEB) [18]

Le microscope électronique à balayage permet d'obtenir des images de surfaces de pratiquement tous les matériaux solides, à des échelles allant de celle de la loupe (x10) à celle du microscope électronique en transmission (x500.000 ou plus). Ces images frappent en premier par le rendu très parlant du relief et la grande profondeur de champ.

-Le MEB conventionnel fonctionne dans un vide ordinaire (10^{-5} à 10^{-6} mbar); les échantillons peuvent être massifs, de dimension allant de quelques $1\mu\text{m}$ (particules) à une dizaine de cm de diamètre, voire plus (prélèvements industriels). Ils doivent supporter le vide sans le polluer et être conducteurs. La préparation est en général simple.

-Le MEB à pression contrôlée (dit environnemental ou low vacuum) permet l'observation dans un vide allant jusqu'à 30 mbar, rendant ainsi possible l'examen d'échantillons humides ou gras (ech. biologiques), d'isolants sans métallisation préalable (céramiques, métaux corrodés), voire en présence de liquide.

-Equipé de détecteurs appropriés, le MEB permet de faire entre autres de la microanalyse X, analyse élémentaire locale.



Figure III.12. Microscope électronique à balayage

III.3.5.1. Les éléments principaux du MEB [19]

- **Le canon à électrons** : Un filament de tungstène est parcouru par un courant électrique d'intensité 2,5 A. Chauffé, il produit une énergie suffisante pour libérer des électrons qui seront attirés par une anode trouée portée à une tension d'environ 15 kV. Les électrons sortent ainsi du canon avec une énergie cinétique qui correspond à une vitesse des électrons de l'ordre de 50000 km.s^{-1} .



Figure III.13. Le filament en tungstène

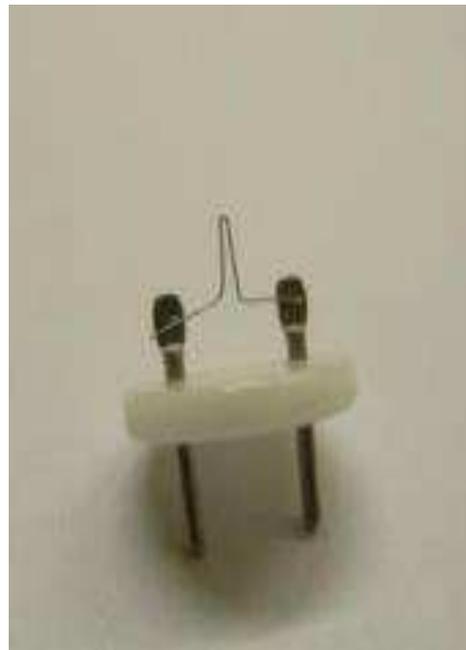


Figure III.14. Le canon à électrons

- **La colonne :** Elle comporte des lentilles électromagnétiques qui permettent de former un fin faisceau d'électrons qui balaie la surface de l'objet. Son diamètre est de 50 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). C'est ce diamètre qui donne la précision d'observation. Ce qu'on appelle le pouvoir séparateur. Afin que les électrons puissent se déplacer la colonne est sous vide. La pompe à vide assure une pression $p = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}$ ($1,5 \cdot 10^{-7} \text{ bar}$) ce qui permet aux électrons de se déplacer sans rencontrer de particules sur plus de 50 cm.
- **L'analyseur :** Les électrons heurtent la pièce à observer. On obtient des électrons réfléchis en général très énergétiques, des électrons arrachés à la pièce peu énergétiques, de la lumière de faible longueur d'onde ($\lambda \approx 10^{-10} \text{ m}$) qui se situe dans le domaine des rayons X. L'analyse de ces électrons et photons va permettre d'avoir une image de la pièce et d'obtenir une image en relief contrairement au microscope optique. En effet, la latitude de mise au point est de $1 \mu\text{m}$ ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$) maximum pour le microscope optique, il est indispensable d'avoir un objet parfaitement plat. Par contre, on peut avoir des creux et des bosses jusqu'à 1 mm avec le MEB. De plus, des analyseurs adaptés vont permettre de déterminer la nature des éléments et leur proportion dans la pièce analysée.



Figure III.15. La chambre dans laquelle on peut placer 4 objets.

III.3.5.2. Fonctionnement simplifié : [18]

L'image MEB est une image reconstituée : une sonde, le faisceau d'électrons, balaye la surface de l'échantillon, un détecteur récupère de manière synchrone un signal induit par cette sonde pour en former une image, cartographie de l'intensité de ce signal.

Le MEB est constitué d'une source d'électrons qu'un jeu de lentilles "condenseur" focalise sur un diaphragme. Une deuxième lentille "objectif" refocalise ce faisceau sur l'échantillon en un spot très fin ($<15 \text{ à } 200 \text{ \AA}$). Un jeu de bobines de déflexion permet de déplacer le faisceau et donc de balayer l'échantillon. Ceci forme la sonde.

Sous l'impact du faisceau d'électrons, il y a essentiellement :

- rétrodiffusion d'électrons du faisceau incident avec plus ou moins de perte d'énergie;
- émission d'électrons secondaires de faible énergie, provenant des couches externes des atomes de l'échantillon ;
- émission de rayons X, concurrentiellement avec les électrons Auger;
- émission de photons UV-visible,
- écoulement d'un courant vers la masse.

Tous ces signaux peuvent servir à former une image. Le détecteur de base du MEB (E.T. : Everhart-Thornley) récupère un mélange en proportion variable d'électrons secondaires et d'électrons rétrodiffusés, proportion dépendant de l'énergie primaire, de la distance échantillon-objectif, de l'angle d'incidence du faisceau primaire, du matériau observé. D'autres détecteurs permettent de discriminer les électrons secondaires des électrons rétrodiffusés.

III.3.6. Essai de dureté

III.3.6.1. Introduction : [20]

L'essai de dureté sert à caractériser la résistance à la déformation plastique d'un matériau non fragile à l'aide d'un essai simple et rapide. La dureté est définie comme la résistance opposée par l'éprouvette à la pénétration d'un corps plus dur.

Comme la géométrie de l'écoulement plastique lors d'un essai de dureté est complexe, l'essai de dureté n'est pas considéré comme une analyse du comportement mécanique d'un matériau au même titre que l'essai de traction. L'essai de dureté ne fournit qu'une seule valeur. En revanche, l'essai est très simple à réaliser, n'utilise pas de machine coûteuse et n'exige pas l'usinage d'une éprouvette, puisqu'une surface plane de quelques mm² suffit. En résumé, c'est un essai bon marché et souvent employé pour des essais comparatifs de séries d'éprouvettes et pour examiner les effets des divers traitements thermiques, thermomécaniques ou thermochimiques.

La dureté est un paramètre permettant de caractériser les matériaux. Il existe plusieurs manières de déterminer la dureté d'un matériau dont certaines font l'objet de norme précise.

- La dureté de Mohs
- La dureté Brinell
- La dureté Vickers
- La dureté Knoop
- La dureté Rockwell B et C

III.3.6.2. Principe de l'essai de dureté : [21]

L'essai de dureté a pour but de déterminer la dureté superficielle des métaux. Il consiste à enfoncer un pénétrateur, dont les formes et les dimensions varient en fonction du type d'essai, dans le métal à tester. La charge est constante et on mesure la surface ou la profondeur de l'empreinte laissée dans le matériau.

L'empreinte sera d'autant plus importante que le matériau sera mou.

- **La dureté de Mohs [20]**

La première notion de dureté (1822) provient du minéralogiste allemand Friedrich Mohs qui recherchait un paramètre pour définir les minéraux.

Il propose une échelle de 10 classes de dureté relative basée sur la résistance à la rayure par rapport à des matériaux donnés, le talc et le diamant étant les extrêmes.

Mesure de la surface :

La dureté est donnée en mégapascal (MPa) puisqu'elle est le rapport d'une force en Newton (N) sur une surface calculée en millimètres carrés (mm²).

- **Dureté Brinell**

L'essai Brinell utilise comme poinçon une bille en acier trempé ou en carbure de tungstène de 10 mm de diamètre (D). La pression est maintenue pendant 15 à 30 s selon le métal.

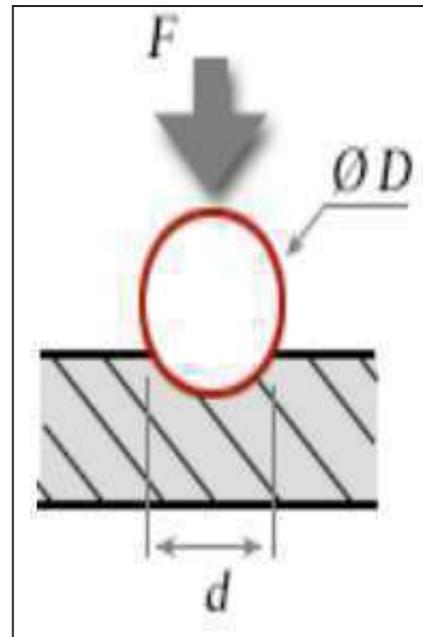
On applique une charge (F) de 500 ou 3000 kgf.

On mesure le diamètre (d) de l'empreinte en millimètres.

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

On doit l'essai Brinell à l'ingénieur métallurgiste suédois Johan Brinell (1849 - 1925). Il s'applique aux métaux "peu durs".

La norme Brinell de dureté a été éditée dès 1924.



- **Dureté Vickers**

La dureté Vickers a été conçue dans les années 1920 par les ingénieurs de la société Vickers en Angleterre.

Elle est caractérisée par l'empreinte faite par un indenteur sous une charge donnée durant 15 secondes. L'indenteur est formé d'une pyramide en diamant à base carrée dont les faces opposées font un angle de 136°. La charge appliquée est comprise entre 1 et 120 kgf. Le côté de l'empreinte est de l'ordre de 0,5 mm, la mesure s'effectuant à l'aide d'un microscope.

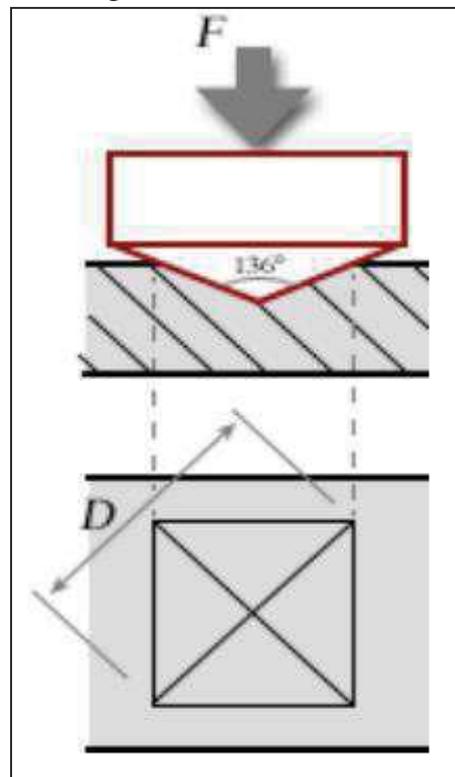
La dureté Vickers (HV) est calculée e à l'aide de la formule suivante :

$$HV = \frac{1,854 F}{D^2}$$

Où F est la charge appliquée en kgf et D, la diagonale de l'empreinte en millimètres. La profondeur de pénétration H est $H = D / 7$.

Cet essai est appliqué principalement aux métaux, mais peut l'être également appliqué aux céramiques avec de très faibles charges.

La norme de dureté Vickers a été adoptée en 1952 et celle de microdureté, en 1969.



- **Dureté Knoop**

L'essai de Knoop permet la mesure de dureté des matériaux fragiles comme le verre et la céramique.

Le pénétrateur en diamant est de forme pyramidale à base rectangulaire avec un angle de $172^{\circ}30'$ entre deux faces opposées et 130° pour les deux autres faces. Les charges appliquées sont inférieures à 1 kgf.

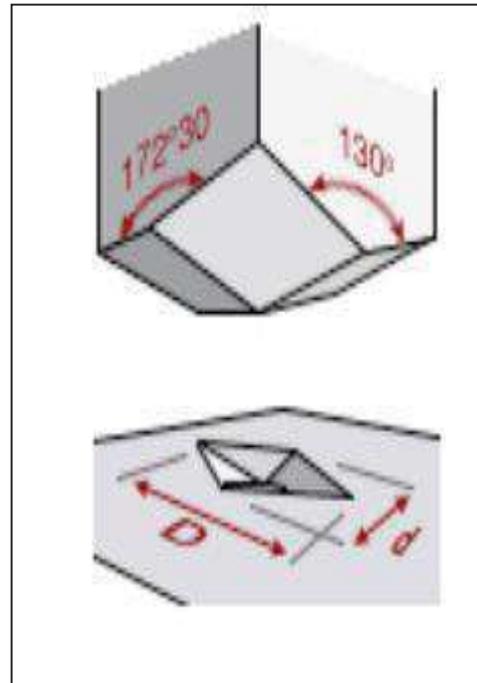
Le pénétrateur laisse une empreinte dont la taille est comprise entre 0,01 et 0,1 mm ($D = 7d$ et $H = D/30$).

Si on mesure la longueur et la largeur de l'empreinte à l'aide d'un microscope, la dureté de Knoop (HK) est donnée par la formule suivante :

$$HK = \frac{14,229}{D^2}$$

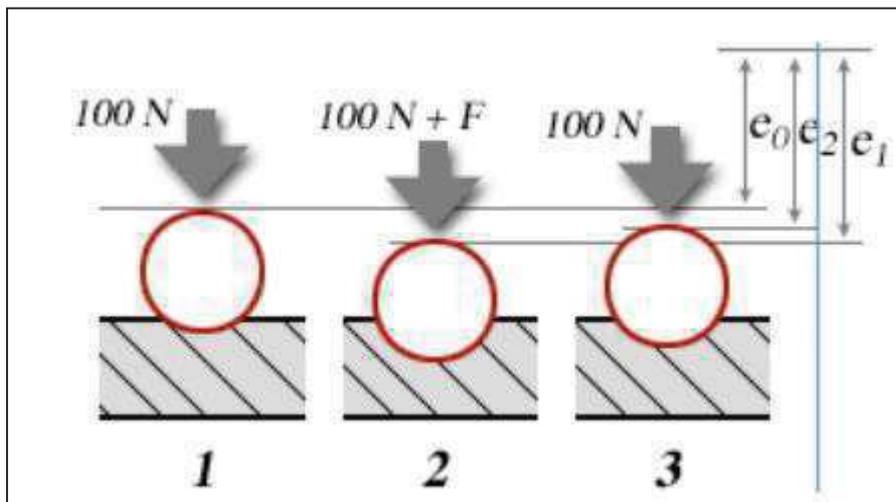
où F est la charge en kgf et D^2 , l'aire de l'empreinte en millimètres carrés.

La norme de micro-dureté Knoop a été adoptée en 1969.



- **Dureté Rockwell**

Essai Rockwell : mesure de la dureté d'un métal selon l'enfoncement d'une bille d'acier, appelé dureté Rockwell B (HRB) ou d'un cône de diamant de 120° , dureté Rockwell C (HRC).



La norme de dureté Rockwell date de 1932.

L'essai consiste à appliquer une précharge de 100 N sur le pénétrateur qui s'enfonce d'une profondeur e_0 .

On applique une force supplémentaire F , pendant 3 à 8 s, le cône s'enfonce d'une profondeur e_1 . On supprime la force F , le cône reste enfoncé d'une profondeur e_2 . La profondeur rémanente ($e_2 - e_0$) permet le calcul de la dureté selon la formule :

Les indices Rockwell peuvent se lire directement sur un cadran gradué.

ROCKWELL C

$$\text{HRC} = 500(100 - (e_2 - e_0))$$

Le pénétrateur est un cône de diamant de 120° et d'extrémité sphérique ($\varnothing 0,2 \text{ mm}$).

La charge F est de 1400 N (150 kgf).

ROCKWELL B

$$\text{HRB} = 500(130 - (e_2 - e_0))$$

Le pénétrateur est une bille d'acier de 1,59 mm de diamètre.

La charge F est de 900 N (100 kgf).

III.3.7. Indice de fluidité :

III.3.7.1. Définition :

Indice de Fluidité (IF) ou Le Melt Flow Index (MFI), est une méthode communément utilisée dans l'industrie des plastiques pour la caractérisation des matériaux thermoplastiques, surtout les polyoléfines. Elle permet d'estimer leur extrudabilité, par ailleurs elle renseigne sur la masse moléculaire moyenne de l'échantillon.



Figure III.16. Image d'un viscosimètre

III.3.7.2. Principe :

On mesure la masse de matière fondue qui s'écoule à travers une filière donnée sous l'action d'une masse donnée pendant un temps fixé et à une température donnée.

III.3.7.3.Appareillage :

L'appareillage se compose principalement d'un viscosimètre à filière thermo régulé La matière thermoplastique, contenue dans un réservoir cylindrique régulé thermiquement est extrudée à travers une filière sous la pression exercée par un piston chargé.

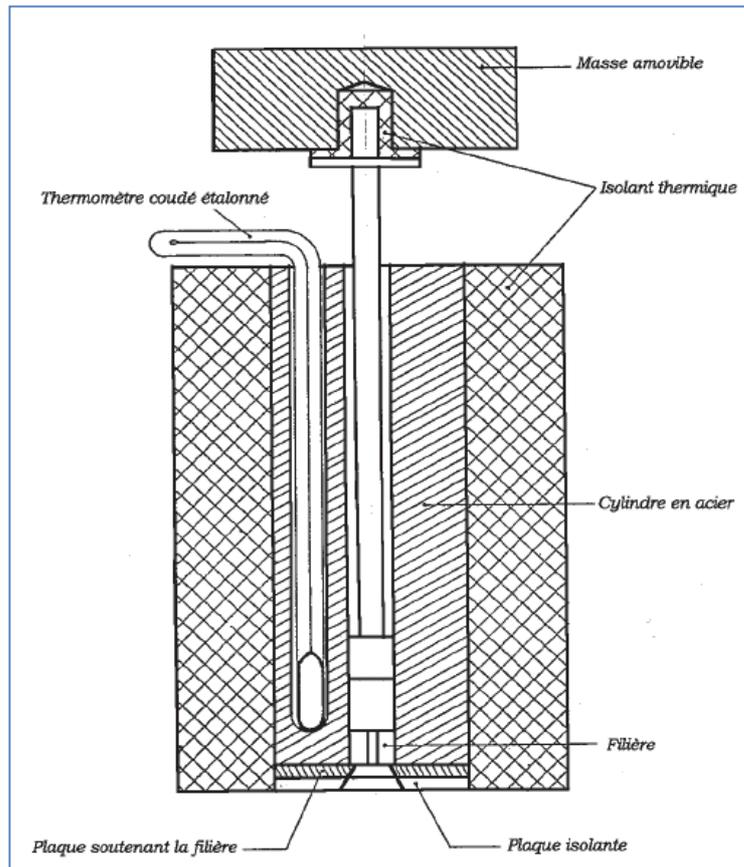


Figure III.17. Schéma explicatif d'un viscosimètre

III.3.7.4. Définitions des grandeurs utilisées

MFR (Melt Flow rate) : c'est exprimé l'indice de fluidité à chaud en masse exprimé en g/10min.

MVR (Melt volume rate) : c'est l'indice de fluidité à chaud en volume exprimé en cm³/10min,

Remarque : le rapport entre le MFR et le MVR est la masse volumique à chaud c'est à dire la masse volumique du matériau à la température de l'essai.

III.3.7.5. Calcul et expression de résultats :

L'indice de fluidité à chaud est donné par la formule :

$$MFR(\theta, m_{nom}) = \frac{t_{ref} \times m}{t}$$

Exprimer les résultats avec deux chiffres significatifs et indiquer les conditions d'essai mises en œuvre (par exemple 190/2,16).

- θ est la température d'essai, en degrés Celsius.
- m_{nom} : est la charge nominale, en kilogrammes.
- m : est la masse moyenne, en grammes, des extrudât.
- t_{ref} : est le temps de référence (10 min), en secondes (600 s).
- t : est l'intervalle de temps, en secondes, entre deux coupes d'un extrudât.

III.4 : Techniques de caractérisation (partie pratique) :**III.4.1. Introduction :**

Dans le cadre de préparation de ce projet de fin d'études, nos enseignants nous ont proposé d'étudier le comportement mécanique de l'ABS lors de deux manières différentes de mise en œuvre (injection presse et impression 3D).

Pour cela nous avons utilisé un ABS sous forme de filament.



Figure III.18. Bobine d'un filament d'ABS

III.4.2. Elaboration des éprouvettes :

On a utilisé deux procédés de fabrication pour élaborer nos éprouvettes, injection plastique et impression 3D :

III.4.2.1. Elaboration des éprouvettes par injection plastique

Le travail d'élaboration des éprouvettes par procédé d'injection a été mené à l'entreprise SISCOPLAST de Draa El Mizan, ce qui nous a permis d'avoir des éprouvettes normalisées (éprouvettes de traction selon la norme NF EN ISO 725).

On a découpé et broyé le fil d'ABS avant de le mettre dans la machine d'injection.



Figure III.19. Eprouvette élaborée par injection

➤ Paramètres d'injection

On a utilisé une machine à injection dont les spécificités suivantes :

- Modèle : 305-201-700
- Poids : 1500 Kg
- Clamp force : 700 KN

Les paramètres de la machine d'injection sont résumés dans le tableau ci-dessous

Tableau III.9. Paramètre d'injection

Paramètre	valeur	Paramètre	valeur
Dosage	164 mm	Vitesse d'ouverture	2 tours
Temps d'injection	2,5 s	Vitesse de fermeture	3 tours
Temps de maintien	1,6 s	Vitesse d'injection	4 tours
Temps de refroidissement	16 s	Vitesse d'éjection arrière	4 tours
Temps de pause	0,2 s	Vitesse d'éjection avant	4 tours
Retard départ injection	0,2 s	Vitesse de rechargement	2,5 tours

Les températures de zones est 170 – 190 – 200 °C.

III.4.2.2. Elaboration des éprouvettes par impression 3D :

Le travail d'élaboration des éprouvettes par impression 3D a été mené par La société AlcadWorks de Bordj El Kiffan, la norme de ces éprouvettes c'est ISO 3167 pour celles de la traction et EN ISO 179 pour celles de résilience.



Figure III.20. Eprouvette élaborée par 3D

➤ Paramètres de l'imprimante 3D :

On a utilisé une imprimante de modèle Zortrax M200



Figure III.21. Imprimante 3D ZORTRAX M2000

Les paramètres de l'imprimante sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.10. Caractéristiques techniques Zortrax M200

Dimensions physiques		Impression	
Sans bobine	345×360×430mm	Technologie d'impression	Dépôt de fil fondu
Avec bobine	345×430×430mm	Volume d'impression	200×200×185 mm
Carton d'emballage	460×470×570mm	Résolution en hauteur de couche	Avancée : 25 –50 microns*
Poids	13 kg		Standard : 90 –400 microns
Poids d'expédition	20 kg	Epaisseur des parois	Minimale : 400 microns
Températures			Optimale : 800+ microns
Température ambiante d'utilisation	15°-35°C	Résolution d'un seul point imprimable	400+ microns
Température de stockage	0°-35°C	Diamètre de filament compatible	1,75 mm
Caractéristiques électriques		Type de filament	Z-Filaments
Alimentation	110/240 V AC -2 A - 50/60 Hz	Diamètre de la buse	0,4 mm
Puissance requise	24 V DC -11 A	Positionnement unique minimum	1,5 microns
Puissance de consommation	≈ 190 W	Précision de positionnement en X/Y	1,5 microns
Connectivité	Carte SD (inclue)	Pas (≠microstepping)	1,25 microns
Logiciel		Température maximale de l'extrudeur	380°C
Suite logicielle	Z-Suite	Température maximale du plateau chauffant	110°C
Type de fichiers	.stl, .obj, .dxf		
Support	Mac OS X / Windows XP, Windows Vista, Windows 7, Windows 8		

Les techniques expérimentales utilisées sont :

- Essai de traction
- Essai de résilience
- Essai de microdureté
- Observation microscopique.
- Indice de fluidité

III.4.3. Déroulement des essais:

III.4.3.1. Indice de fluidité

Cette technique s'est déroulée dans le laboratoire de l'entreprise ENIEM.

- **Le matériel utilisé :**



Figure III.22. Viscosimètre

➤ **Mode opératoire :**

La matière d'ABS doit être d'abord découpée et broyée, Nous avons travaillé avec une charge de 10 kg et une température de 220°. Avant toute manipulation l'appareil doit être soigneusement nettoyé. Après cela on a procédé comme suite :

- Mettre l'appareil en chauffe et attendre qu'il soit à la température d'essai
- Placer une prise d'essai de 7 g dans le cylindre chauffant.
- Placer la charge choisie de 10 kg sur le piston et laisser la matière s'écouler.
- couper la matière après 20s pour éliminer les impuretés et les bulles d'air.
- L'appareil va couper automatiquement un extrudât chaque 10 s.
- Conserver 10 extrudât. Calculer leur masse moyenne.

III.4.3.2. Essai de traction :

Nous avons utilisé pour cet essai la machine de traction du laboratoire de l'entreprise SISCOPLAST de Draa El Mizan qui est une machine de traction spéciale polymères du model MTS Criterion Model 42.

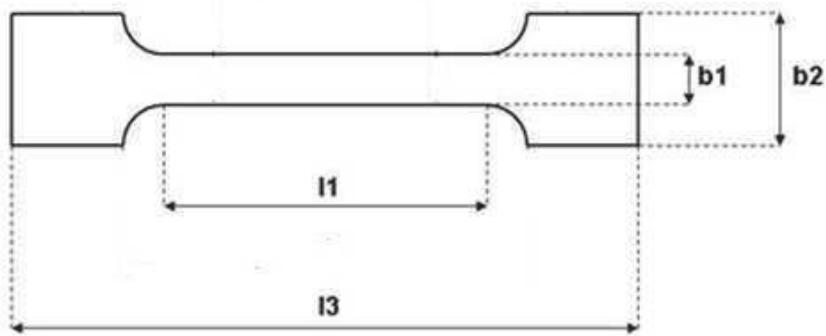
Nous avons utilisé une vitesse de 2mm/min.

Les étapes de l'expérience sont les suivantes :

- Fixer l'éprouvette sur les mors de la machine
- Actionner la machine à partir de son programme sur ordinateur.
- Attendre jusqu'à la rupture de l'éprouvette pour arrêter la machine
- Refaire les étapes pour tous les échantillons.
- Les résultats sont enregistrés et copier pour traitement.



Figure III.23. Machine de traction



L1	L3	B1	B2	h
80mm	150mm	10mm	20mm	4mm

Figure III.24. Dimension de l'éprouvette de traction 3D

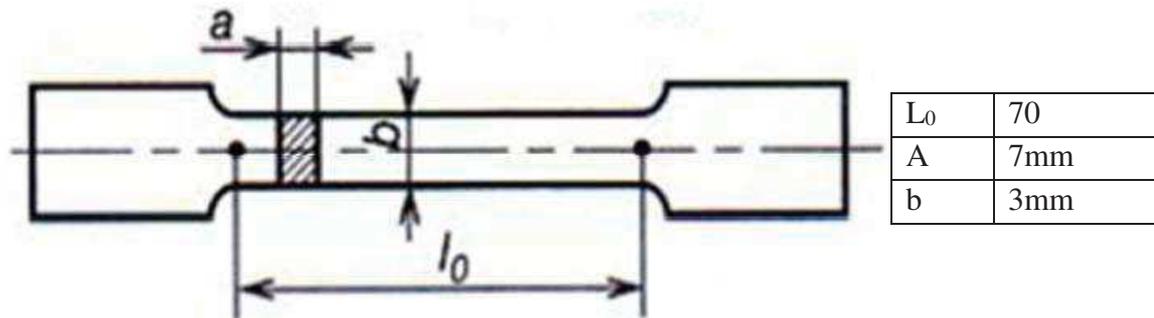


Figure III.25. Dimension de l'éprouvette de traction injection presse

III.4.3.3. Essai de Résilience :

Pour étudier la tenue au choc de nos matériaux, nous avons réalisé l'essai Charpy sur des éprouvettes normalisés.

➤ Préparation des éprouvettes :

Nous avons préparé les éprouvettes réalisées par injection avec entaille V de norme EN ISO 179 dans le hall de technologie de l'université UMMTO. Tandis que celles réalisées par impression 3D avaient déjà l'entaille, les deux figures suivantes montrent la forme de l'éprouvette ainsi que ses dimensions.

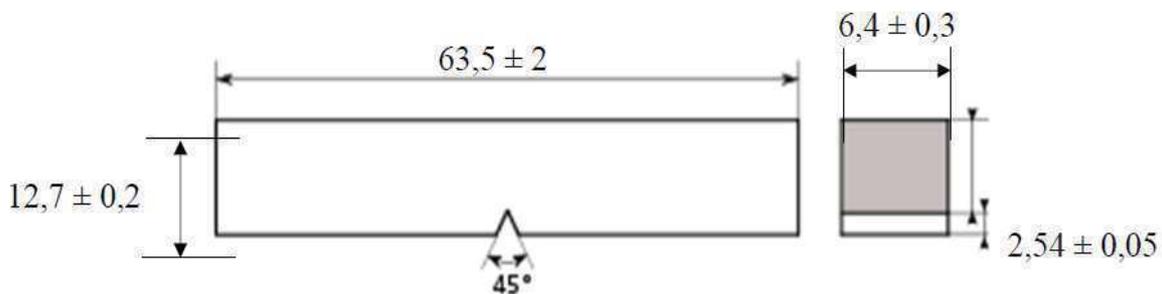


Figure III.26. Dimensions de l'éprouvette de résilience

Nous avons effectué des entailles avec une fraiseuse, nous utilisons une fraise de 2 mm à 45°. Nous avons préparé en tout 5 éprouvettes.

➤ Déroulement de l'essai:

A l'entreprise EI de Freha nous effectuons l'essai Charpy sur la machine comme suit :

- On utilise un mouton-pendule de 2j.
- On place l'éprouvette de façon à ce que l'entaille soit parallèle au couteau.
- On actionne le mouton-pendule et on lit sur le cadran la mesure en joule.
- On refait les étapes pour toutes les éprouvettes.

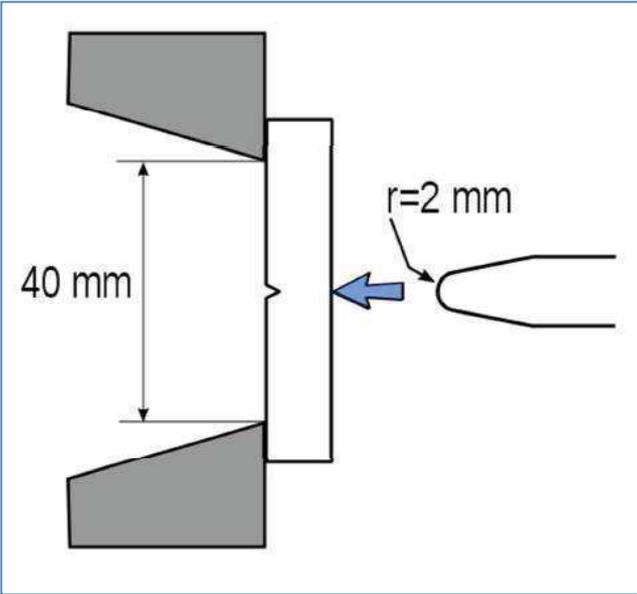


Figure III.27. Position d'éprouvette et mouton-pendule



Figure III.28. Machine de résilience Zwick 5102

Tableau III.11. Données techniques du mouton pendule Zwick

numéro du model	Zwick 5102
capacité de travail	0...4/2/1/0,5 joule
valeur unitaires	0,02/0,01/0,005 joule
lecture	cadran segmenté 160° avec aiguille et aiguille entraînée, diamètre de cadran 300 mm
longueur de pendule	225 mm
vitesse d'impact	2,93 m/s
portée libre	72 mm
dimension de l'éprouvette Charpy	15x10,1 /2"x1/2" 40/70/100 mm 6x4 distance entre butées 40/70 mm
dimensions (LxIxh)	270x250x560 mm
poids	brut env. 50 kg

III.4.3.4. La micro dureté

➤ Matériel utilisé:

Nous avons utilisé pour l'essai de la microdureté le Microduromètre du laboratoire de génie civil de marque : Zwick Roell ZHV

On utilise l'échelle de dureté Knoop qui est approprié pour les polymères.

Les paramètres de la machine sont 25gF pendant 20s



Figure III.29. Microduromètre

➤ **Déroulement de l'essai:**

Nous avons effectué une dizaine d'essais pour chaque échantillon. Nous procédons comme suit :

- placer l'éprouvette sur le palier
- actionner le pénétrateur
- visualiser l'empreinte et délimiter le diamètre avec les réglettes.
- lancer le calcul de HK.

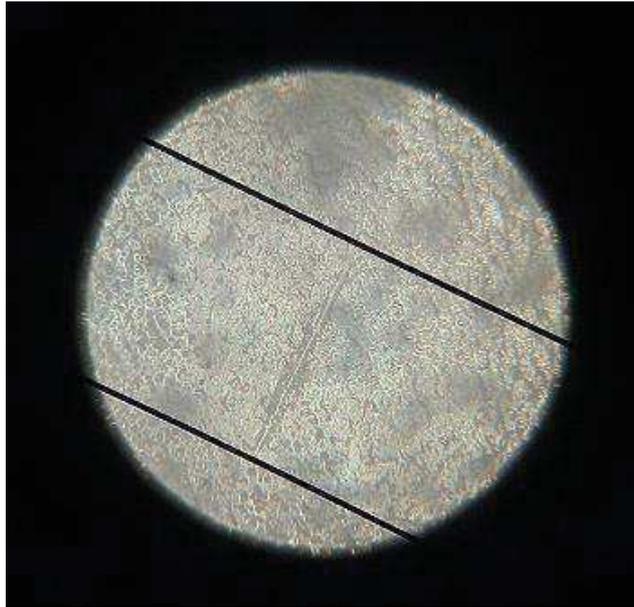


Figure III.30. Empreinte délimité par les réglettes

III.4.3.5. Observation microscopique (microscope optique et MEB) :

Nous préparons des échantillons en découpant la partie (1cm) des faciès de ruptures des éprouvettes de traction et de résilience utilisées.

Les échantillons seront examinés avec le microscope optique et le Microscope électronique à Balayage au niveau du laboratoire de chimie de Hasnaoua.



Figure III.31. Microscope optique



Figure III.32. Microscope électronique à Balayage

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

Introduction :

Dans ce dernier chapitre nous exposons l'essentiel de nos résultats obtenus des différents essais effectués avec les interprétations qui leurs correspondent.

IV.1. Résultats de l'indice de fluidité :

L'indice de fluidité d'un polymère (le *FMI* ; melt flow index) permet de choisir le mode de transformation adéquat à

notre polymère. $MFI(\theta, m_{nom}) = \frac{t_{ref} \cdot m}{t}$

- θ est la température d'essai (220 C°).
- m_{nom} : est la charge nominale (10 kg).
- m : est la masse moyenne des extrudât (0,372 g).
- t_{ref} : est le temps de référence (10 min), en secondes (600 s).
- t : est l'intervalle de temps, entre deux coupes d'un extrudât (10 s).

Pour notre polymère qui est l'ABS, l'indice de fluidité est de :

$$MFI = \frac{600 \times 0,372}{10} = 22,32 \text{ g / 10mn}$$

La valeur de l'indice de fluidité est assez importante ($\geq 18 \text{ g/10mn}$), dans ce cas ; le mode de transformation choisi qui est l'injection est en concordance avec notre matière.

IV.2. Résultats des essais de traction :

Nos éprouvettes polymérique, en ABS, sont élaborés par les deux procédés d'injection, qui sont l'injection presse et l'impression 3D,

Pour l'éprouvette injection on a utilisé la norme NF EN ISO 527 – 2.

Pour l'éprouvette impression 3 D on a utilisé la norme ISO 3167.

- **Les surfaces des sections efficaces de nos éprouvettes sont :**

Surface de l'éprouvette d'injection :

$$S = 7 \times 3 = 21 \text{ mm}^2$$

$$L_0 = 70 \text{ mm}$$

Surface de l'éprouvette 3D :

$$S = 8 \times 4 = 32 \text{ mm}^2$$

$$L_0 = 80 \text{ mm}$$

Les résultats des essais de traction sont donnés sous formes de courbes de traction (contraintes-déformations), à partir de chaque courbe nous allons tirer les enseignements nécessaires

Dans la figure IV.2 on représente les courbes contrainte déformation pour les échantillons réalisés par injection. On a effectué trois essais de traction.

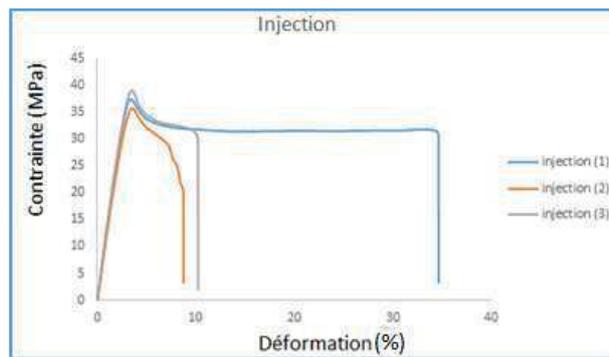


Figure IV.1. La courbe contrainte déformation pour les échantillons réalisés par injection.

Avant la rupture, l'ABS a montré un comportement élasto-plastique représenté par le plateau pseudo plastique.

-En analysant les courbes contraintes déformation des échantillons d'ABS réalisée par injection (figure IV.1), nous observons une importante déformation (34. %) pour la première éprouvette. une déformation moyenne (8%-10%) pour les deux autres éprouvettes. La première éprouvette injectée en ABS est formée d'un mélange d'ABS et de PE, utilisé pour purger la machine à injection, c'est pour cela que la déformation de l'éprouvette a atteint une valeur importante.

-les résistances maximales pour trois éprouvettes de traction sont équivalentes (35MPa -39MPa)

Dans la figures IV.2 on représente la courbe contrainte déformation pour les échantillons réalisés par l'impression 3D, avec une vitesse de déformation de 2mm/mn (même vitesse de déformation que pour les éprouvettes injections):

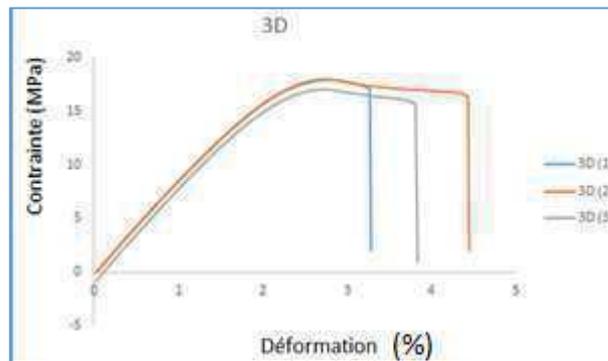


Figure IV.2. La courbe contrainte déformation pour les échantillons réalisés par impression 3D.

En analysant les courbes contraintes déformation des échantillons d'ABS réalisée par impression 3D, nous observons une faible résistance mécanique et aussi une faible déformation.

On superposant les courbes contraintes déformations des deux procédé on aura :

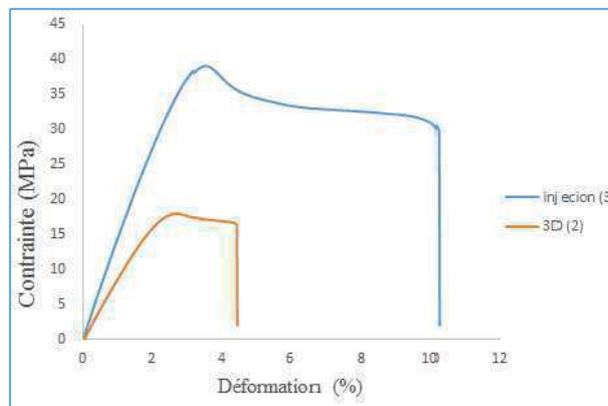


Figure IV.3. La superposition des courbes contraintes déformation des deux procédé

Le comportement mécaniques, des éprouvettes réalisées par les deux procédés, est différent. Les caractéristique de contrainte et de déformation est nettement supérieure dans le procédé d'injection classique que dans le cas de l'impression 3D.

A partir des courbes contraintes déformation on détermine les caractéristiques suivantes :

IV.2.1. Module de Young E:

À partir de la tangent de la courbe contrainte déformation; dans la zone du comportement élastique, nous déterminons les valeurs du module d'élasticité (module de Young), et nous regroupons les résultats dans le tableau suivant:

Tableau IV.1. : Module de Young des échantillons

Procédés	N°	E (MPa)	Moyenne
Injection	1	1415,80	1404,06
	2	1346,40	
	3	1450,00	
3D	1	831,68	864,67
	2	868,66	
	3	893,66	

On trace un histogramme à partir du tableau IV.1 ;

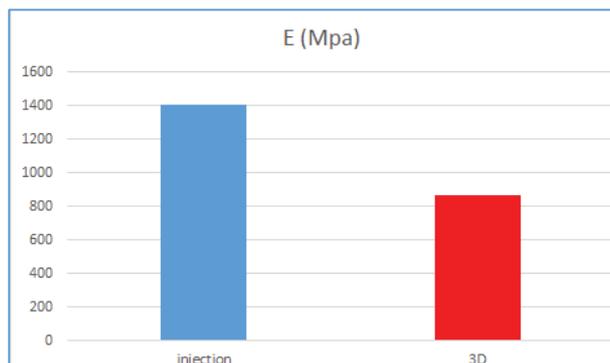


Figure IV.4 Histogramme du module de Young des échantillons

Le caractère de résistance, illustré par l'histogramme montre que les éprouvettes injectées par le procédé classique sont beaucoup plus résistantes que les éprouvettes injectées par impression 3D.

IV.3.2. Contrainte maximale σ_m :

On regroupe les valeurs de la contrainte maximale obtenues à partir des différentes courbes contraintes –déformations dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.2. Contrainte maximale

Procédés	N° Echantillon	σ_m (MPa)	Moyenne (MPa)
Injection	1	37,4186	37,4132
	2	35,7465	
	3	39,0765	
3D	1	17,9166	17,6425
	2	17,9800	
	3	17,0310	

L'éprouvette réalisée par impression 3D a une contrainte maximale inférieure à celle réalisée par injection.

On trace un histogramme à partir du tableau IV.2;

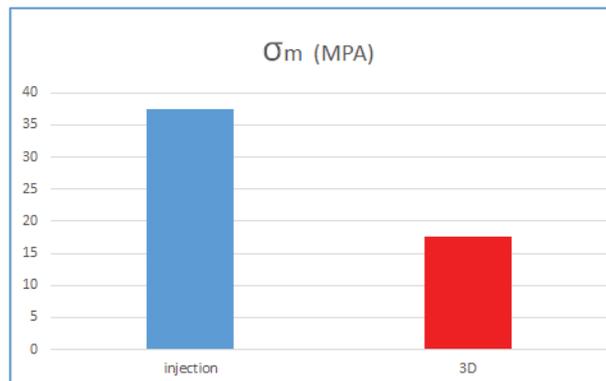


Figure IV.5. Histogramme des contraintes maximales

IV.2.3. Allongement à la rupture A % :

On regroupe les valeurs obtenues de l'allongement à la rupture à partir des différentes courbes contraintes-déformations dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.3. : Allongement à la rupture des échantillons

Procédés	N°	A%	Moyenne
Injection	1	/	9,485
	2	8,75	
	3	10,22	
3D	1	3,28	3,85
	2	4,44	
	3	3,83	

La déformation après rupture est beaucoup plus importante pour le procédé d'injection presse que pour le procédé d'impression 3D.

On trace un histogramme à partir du tableau IV.3;

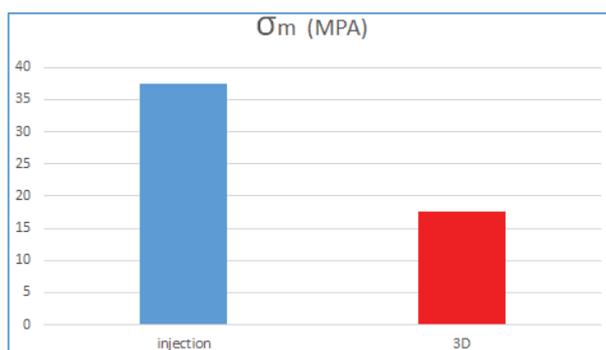


Figure IV.6. Histogramme de l'Allongement à la rupture des échantillons

IV.3. Résultats de L'Essai Charpy :

La machine utilisée nous donne les résultats de l'énergie Charpy directement que nous traduisons en résistance au choc avec cette formule :

Surface de rupture : $10,16 \times 6,5 = 66,04 \text{ mm}^2$ (même surface pour les éprouvettes réalisées par les deux procédés)

Résistance au choc = énergie / surface de rupture

Tableau IV.4: Essai Charpy (résistance au choc des échantillons)

Procédés	N°	Energie Charpy (j)	Résistance au choc (Kj/m ²)	Moyenne (Kj/m ²)
Injection	1	0,96	14,53	14,19
	2	0,90	13,62	
	3	0,99	14,99	
	4	0,90	13,62	
3D	1	0,60	9,08	9,03
	2	0,61	9,23	
	3	0,62	9,38	
	4	0,56	8,43	

On trace un histogramme à partir du tableau IV.4;

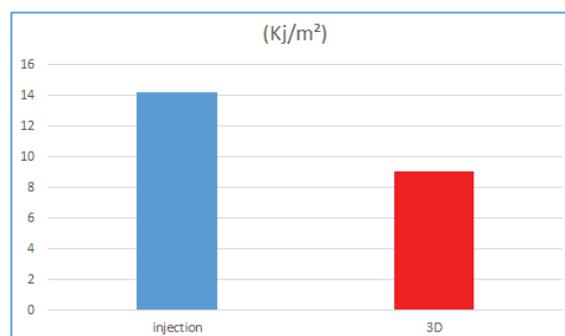


Figure IV.7. Histogramme.de l'essai Charpy

Les éprouvettes réalisées par injection sont plus résilientes que celles réalisés par impression 3D. Les éprouvettes élaborées par impression 3D sont plus fragile que celle élaborées par injection presse.

IV.4. Résultats de laMicro dureté :

La micro dureté nous informe sur la dureté des différentes phases pouvant exister dans un élément.

Dans le tableau ci-dessous on regroupe les résultats de la micro dureté

Tableau IV.5. Micro dureté Knoop des différents échantillons

Procédés	N°	Duretés HK	Moyennes
d'injection	1	6	8,2
	2	7	
	3	9	
	4	8	
	5	11	
Echantillon 3D	1	7	9,8
	2	10	
	3	13	
	4	9	
	5	10	

La valeur moyenne de la micro dureté des éprouvettes réalisées par impression 3D est supérieure à celle des éprouvettes élaborées par injection presse. En balayant les surfaces des éprouvettes, on remarque que la micro dureté varie entre 7 à 13 pour l'impression 3D et varie entre 6 à 11 pour l'injection presse. La matière des éprouvettes étant la même pour les deux procédés, cette légère variation est sûrement due à la vitesse de refroidissement des éprouvettes dans les deux procédés. La vitesse de refroidissement dans l'impression 3D est plus grande.

L'Histogramme suivant donne un aperçu sur la micro dureté de nos échantillons :

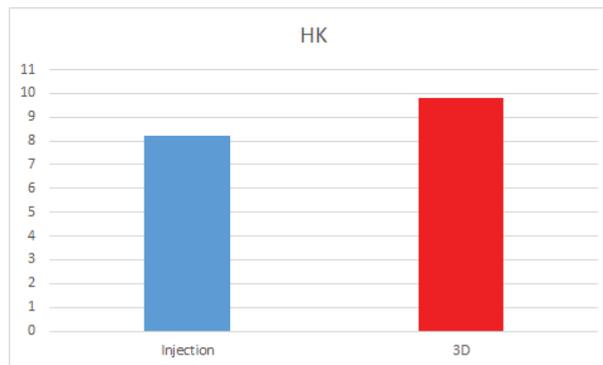


Figure IV.8. Histogramme de la micro dureté des échantillons d'ABS injecté par les deux procédés

IV.5. Résultats de l'observation au microscope optique :

Les micrographies obtenues par observation au microscope optique des différents faciès de rupture des échantillons D'ABS sont données dans ce qui suit :

Observation au microscope optique des faciès de rupture des éprouvettes de traction

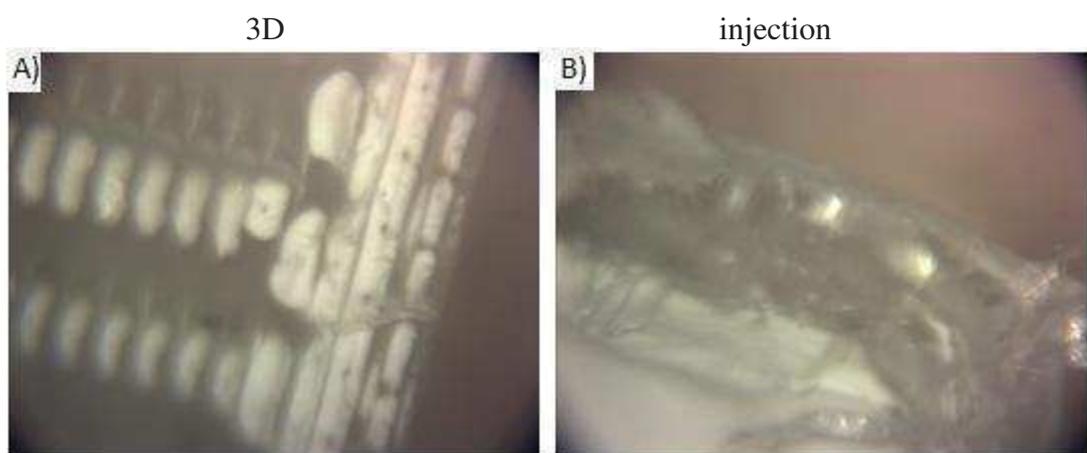


Figure IV.9 Observation au microscope optique des faciès de rupture des éprouvettes de traction

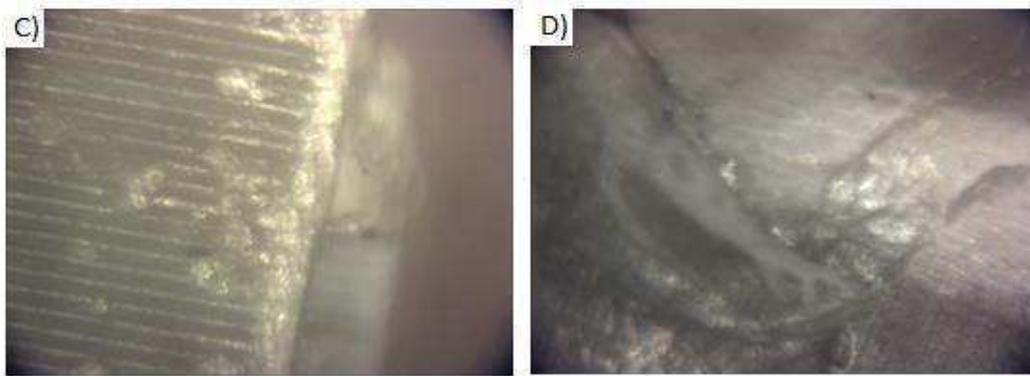


Figure IV.10 Observation au microscope optique des faciès de rupture des éprouvettes de résilience

-Sur la micrographie A) de la figure IV.10 ; on observe des zone claire et des zone foncée, cette éprouvette est élaborée par impression 3D, couche par couche la matière se dépose pour constituer la forme de l'éprouvette, la matière ainsi injectée par ce procédé, se refroidie d'une manière non continue, chaque couche se refroidit seule, le file de matière au contact de l'aire se refroidit aussi avant de se déposé pour former la couche de matière. Le refroidissement des couches formants l'éprouvette s'effectue à des vitesses variables crée une non cohésion de la matière qui provoque à son tour des ruptures fragiles. La structure a réagi comme si elle était constituée de plusieurs structures indépendantes entre elles mais liées par une faible liaison.

- le faciès de rupture de l'éprouvette de traction injectée par le procédé d'injection presse (classique) représentée par la micrographie B) de la figure IV.10 représente une rupture ductile, car la matière s'est étirée avant de rompre (les bords plus longs que le centre de l'éprouvette), le cœur de l'éprouvette constitué de matière continue, de même aspect prouve d'une vitesse de refroidissement continue, allant de la surface de l'éprouvette jusqu'au cœur de l'éprouvette. Refroidissement assuré par la circulation de l'eau autour du moule d'injection. La matière lors de sa rupture a réagi comme un seul bloc uniforme et continu.

Nous avons aussi observé les faciès de rupture des éprouvettes de résilience, élaborées par les deux procédés d'injection, qui sont l'impression 3 D et l'injection presse, nous avons tiré les observations suivantes :

-la micrographie C) concerne l'éprouvette de résilience de l'impression 3D, la rupture est fragile, la surface de rupture est constituée de plusieurs lignes parallèles représentant les différentes couches qui ont rompues au même temps.

-la micrographie D) concerne l'éprouvette de résilience de l'injection presse, le faciès de rupture est formé d'une matière continue, d'aspect non lisse, l'éprouvette est résiliente, s'est déformée avant la rupture.

IV.6. Résultats de l'observation au microscope électronique à balayage:

-Les micrographies obtenues par observation au microscope électronique à balayage des différents échantillons D'ABS (3D /injection) sont donnés dans les figures qui suivent :

Sur la micrographie MEB du faciès de rupture des éprouvettes de résilience injectée par le procédé de l'impression 3D, nous observons une structure en couche dont la surface de rupture est franche (pas de déformations plastiques avant la rupture) symbole d'une rupture fragile, non résiliente.

-L'éprouvette résilience injectée par le procédé d'injection presse possède un faciès de rupture semblable au faciès de rupture d'un polymère ductile (PP, PE...) faisant des filaments avant de céder et de rompre.

Sur la micrographie du MEB de l'essai de traction, les faciès de rupture des deux éprouvettes relève une grande différence entre les deux structures, la première structure celle de l'impression presse montre une structure en couches, la structure entre les couches est discontinue, causant une rupture avec faible déformation 3,83 %, contrairement à la structure de l'éprouvette injectée par le procédé classique cette dernière est plus résiliente, plus ductile et de déformation plus importante 9,48%.

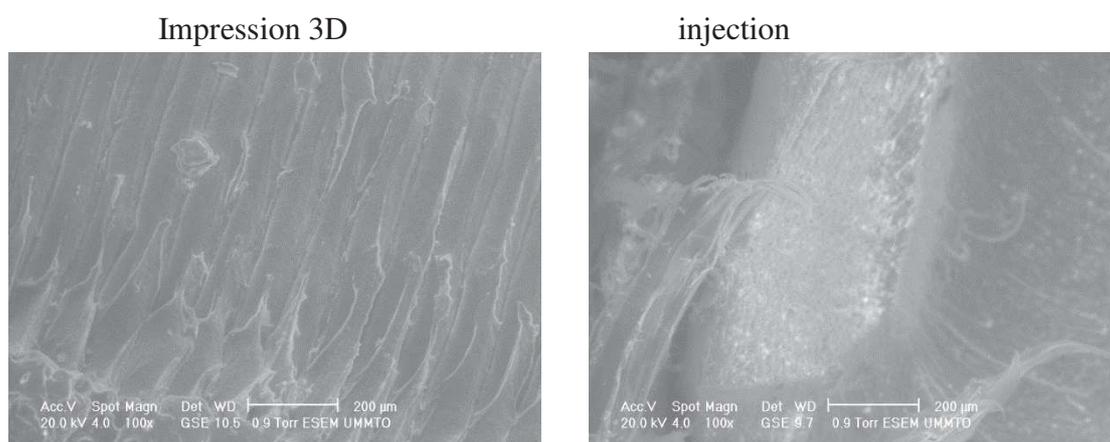


Figure IV.11 : Micrographie des faciès de rupture des éprouvettes de résilience

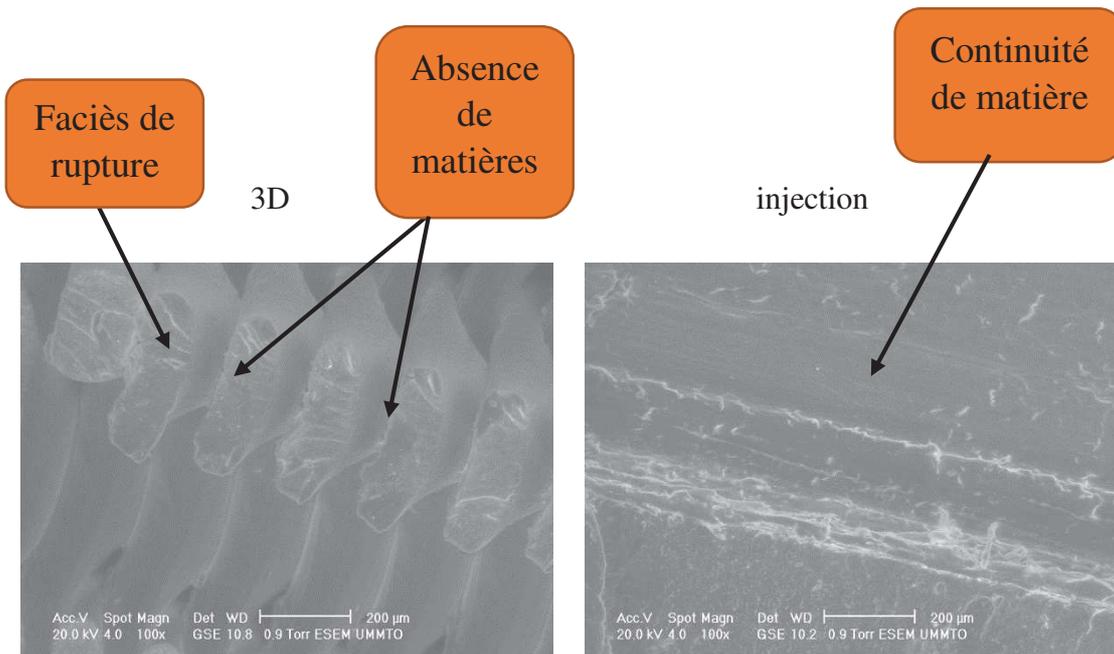


Figure IV.12 Micrographie des faciès de rupture des éprouvettes de traction

Conclusion :

La caractérisation du polymère ABS, élaboré par deux procédés de transformation différents (qui sont l'injection presse ou l'injection classique et le deuxième procédé qui est l'impression 3D), par les différentes techniques donne des caractéristiques de résistance, de déformation, de résilience ainsi que de dureté très différentes.

L'impression 3D, par sa structure en couche, et du fait du refroidissement rapide de ces couches, provoque une discontinuité de la matière dans les éprouvettes, ce qui produit à son tour une fragilisation de la matière et un durcissement de son état de surface.

On conclut à travers les résultats obtenus que le mode de transformation influence sur les caractéristiques des polymères.

Conclusion générale

La diversité des modes de transformation des matières plastiques rend le choix du procédé difficile. Le choix dépend du polymère et de l'utilisation finale du produit.

Pour avoir une idée sur l'importance du choix du mode de transformation du polymère, on a injectée de l'ABS avec deux procédés différents ; l'impression 3D et l'injection presse (injection plastique).

Le travail que nous avons mené le long de ce projet, a été bénéfique, il nous a permis d'enrichir nos connaissances, dans le domaine des polymères, en général et leurs modes de transformation, en particulier. Il nous a permis aussi de nous initier au monde industriel.

Notre sujet, intitulé « étude comparative de comportement mécanique de l'ABS : injection presse – impression 3D » a été réalisé en deux étapes. La partie élaboration a été réalisée au niveau de SISCOPLAST de Draa El Mizan, et la société AlcadWorks de Bordj El Kiffan et la partie caractérisation a été réalisée à l'EI de Freha et l'UMMTO.

A travers les résultats obtenus des différents tests nous avons noté les observations suivantes :

- L'indice de fluidité de notre ABS est de 22,3 g /10mn, valeur justifiant le choix du procédé de transformation ; l'injection au lieu de l'injection.
- En analysant les courbes contraintes déformations obtenues à partir des essais de traction, on constate une rupture ductile pour les éprouvettes injectée par injection presse, est une faible déformation pour les éprouvettes réalisé par impression 3D. la résistance maximum est plus importante dans les éprouvettes injectées par le premier procédé (l'injection presse).
- Toutes les caractéristiques extraites des courbes contraintes déformations (module de Young, résistance maximum, la déformation) sont plus importantes pour les éprouvettes injectées par le procédé injection presse.
- La valeur de la résilience est plus importante pour les éprouvettes injectées par procédé injection presse.

- Seule la valeur de la micro dureté se trouve élevée dans le procédé de l'impression 3D que dans l'injection presse. La vitesse de refroidissement de la matière est plus grande pour l'impression 3D que celle de l'injection presse.
- Les observations microscopiques (microscope optique et microscope électronique à balayage MEB) relève des structures différentes, la matière forme une quantité de matière homogène continue, sans vide à l'intérieur de la matière dans le procédé d'injection classique, par contre la structure se présente sous forme de couches discontinues superposées.

Le choix du procédé de transformation de la matière plastique est d'une importance capital pour l'obtention d'un produit fini ou semi fini.

Bibliographie

- [1] : Techniques de l'ingénieur, traité plastiques et composites, Polypropylènes AM3220.
- [2] : Sites http://perso.univ-rennes1.fr/jean-luc.audic/Cour_polym.pdf
- [3] : Techniques de l'ingénieur, traité plastiques et composites, Terpolymères ABS A3345
- [4] : Institut national de recherche et de sécurité 3^{ème} édition 2006
- [5] : Techniques de l'ingénieur, traité plastiques et composites, Injection des thermoplastiques : les presses A 3690
- [6] : Enseignants : HAMMAMI.T et LOUATI. H Cours de PMF des Matières plastiques.
- [7] : K.LATTARI : Etude, conception et réalisation d'un moule d'injection plastique/ Mémoire d'ingénieur/Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, promotion 2010.
- [8] : Techniques de l'ingénieur conception et production, fabrication-additive-bm7017
- [9] : Site : <https://www.sculpteo.com>
- [10] : Documentation offerte par la société AlcadWorks.
- [11] : Site : <http://www.primante3d.com/materiaux>
- [12] : Techniques de l'ingénieur, mesures-analyses, métrologie par imagerie et microscopie/microscopie-optique-r6712.
- [13] : JARDIN-NICOLAS HERVE - essais des matériaux.
- [14] : MARC Blétry- méthodes de caractérisation numérique des matériaux (2006-2007).
- [15] : Technique de l'ingénieur, traité Plastiques et Composites, Essais mécaniques des plastiques AM3510
- [16] : Chapitre 1 Méthodes de caractérisation des matériaux
- [17] : Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Laboratoire de métallurgie mécanique. C.DENERÉAZ, 02.2015.

[18] : Institut de Physique et Chimie des Matériaux de Strasbourg (IPCMS). Microscopie électronique à balayage. J. Faerber2004

[19] : JOEL HOUZET – lycée Diderot – 18 novembre 2009 .présentation du microscope électronique a balayage (MEB).

[20] : Site : <http://www.utc.fr/~tthomass/Themes/Unites/>

[21] : Essai de dureté - Brinell - Vickers –Rockwell. Cours technologie. Rocardier.
29/11/2010