

**République Algérienne Démocratique et populaire Ministère de
l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**

Université MOULOUD MAMMERRI –Tizi-Ouzou



Faculté du Génie de la construction

Département Génie Mécanique

Mémoire de Fin d'études en vue de l'obtention du diplôme

'Master En Génie Mécanique'

Option : **Fabrication Mécanique et productique**

Thème

**Caractérisation physico-chimique et mécanique
des mélanges PEHD/PEBD recyclé**

Proposé et dirigé par :

Mme.**MOHELLEBI Fadila**

présenté par :

Melle **DAHLAL Nadjat**

2022/2023

Remerciement

Je remercie en premier lieu le bon Dieu de m'avoir donné le courage d'aller au bout de mon travail

Le bon encadrement de ce travail a été assuré par **Mme.MOHELLEBI.FADILA**. Je voudrais exprimer ma profonde gratitude pour tout le soutien inestimable que m'avez apportée, vos conseils avisés et votre disponibilité ont été d'une importance capitale pour moi et je ne saurais jamais assez-vous remercier

Je remercie toute l'équipe de l'entreprise nationale de plastique et de caoutchouc (ENPC) filiale SISCOPLALAST de Draa-El-Mizan

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à **Mr F. BELLABAS** ingénieur au laboratoire de physique pour ses qualités humaine et l'aide précieux qu'il m'a apporté durant ma période de stage à l'entreprise Electro-Industrie d'AZAZGA

Je remercie chaleureusement **Mr LARBI SAID** ingénieur de l'unité de Recherche Matériaux Procédés et Environnement (UR-MPE) de l'Université de Boumerdès pour son aide et l'attention constante qu'il a apporté à mon égard

Je présente aussi mes remerciements les membres de jury d'avoir accepté de participer au jury de mémoire

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidée de près ou de loin

Dédicace

A l'âme de ma mère que dieu la garde dans son paradis.

A mon très très cher père que dieu le garde et le protège, qui fait tout ce qui est à son pouvoir pour mon bonheur.

A mon frère et mes sœurs.

A mes amis

A tous ceux qui me sont chère

Introduction générale	01
-----------------------------	----

Chapitre I : Généralité sur les polymères

I.1 Introduction	03
I.2 Généralité sur les polymères	03
I.2.1 Le monomère.....	03
I.2.2 Le polymère.....	03
I.2.3 La polymérisation.....	03
I.2.3.1. La polymérisation par étape (polycondensation)	03
I.2.3.2. La polymérisation en chaîne (polyaddition).....	03
I.2.3.3. Le degré de polymérisation	04
I.3 Classification des polymères	04
I.3.1 Selon leur nature chimique.....	05
I.3.2 Selon leur origine	05
I.3.3 Selon leur structure des chaînes (dimensionnalités)	05
I.3.4 Selon leur morphologie	06
I.3.5 Selon leur importance économique	07
I.3.6 Selon les usages technologiques	08
I.4 Propriétés des polymères.....	08
I.4.1 Les propriétés physiques	08
I.4.2 Les propriétés thermiques	08
I.4.3 Les propriétés électrique	09
I.4.4 Les propriétés mécaniques	09
I.5. Comportement mécanique des polymères.....	09
I.5.1. Comportement contraintes–déformations	09
I.5.1.1. Essai de traction	09

I.5.1.2. Les éléments influents sur le comportement contrainte–déformation.....	11
I .6 le polyéthylène.....	14
I.6.1. Historique	14
I.6.2. Définition	14
I.6.3 structure de polyéthylène à haute densité et le polyéthylène à base densité	15
I.6.4. Procédés de fabrication des polyéthylènes	16
I.6.5. Domaine d'utilisation du polyéthylène	16
I.7 Le polyéthylène à haute densité (PEHD)	16
I .7.1 Présentation	16
I.7.2 Propriétés des polyéthylènes à haute densité	16
I.7.3. Application du polyéthylène à haute densité (PEHD).....	18
I.7.4 Avantage du polyéthylène à haute densité (PEHD)	18
I.7.5 Inconvénients du polyéthylène à haute densité (PEHD)	18
I.8 Le polyéthylène à base densité (PEBD)	19
I.8.1 Présentation	19
I.8.2 Propriétés du polyéthylène du base densité (PEBD).....	19
I.8.3 Application du polyéthylène à base densité (PEBD)	20
I.8.4 Avantage du polyéthylène à base densité (PEBD)	20
I.8.5 Inconvénients du polyéthylène à base densité (PEBD).....	20
I.9 Conclusion.....	20

Chapitre II : Transformation des thermoplastiques

II.1 Introduction.....	21
II.2 Injection	21
II.2.1. Principe de l'injection plastique.....	22
II.2.2 Différentes presses d'injection.....	22

II.2.2.1 Presse horizontale	22
II.2.2.2 Presse verticale.....	23
II.2 .3. Les différentes parties ou d'une presse	24
II.2.3.1: Unité d'injection	24
II.2.3.2: Unité de fermeture	24
II.2.3.3 Le moule	25
II.2.4 Les phases de cycle d'injection.....	25
II.3 L'injection soufflage	26
II .4 l'extrusion	27
II.4.1: l'extrudeuse mono-vis.....	27
II.5 l'extrusion soufflage	28
II.6: Le thermoformage	29
II.6.1: principe du thermoformage.....	29
II.6.2: Les machines de thermoformage	30
II.6.3: Les phases du thermoformage	30
II.7: Le roto-moulage	31
II.7.1: Le principe du roto-moulage	32
II.7.2: Machines de roto-moulage.....	32
II.7.3: Les phases du roto-moulage.....	32
II.8 Le calandrage	33
II.8.1 Principe du calandrage	33
II.8.2. Les chaines de calandrage	34
II.9 Conclusion	35

Chapitre III : Elaboration et caractérisation des mélanges

III.1 Introduction	36
III.2 Elaboration des mélanges PEHD/PEBD	36

III.2.1 présentation des matériaux d'étude	36
III.2.2 : Elaboration des mélanges PEHD/PEBD	36
III.2.2.1 : Préparations des mélanges.....	36
III.2.2.2 : Extrusion des mélanges	37
III.2.2.3 Etape du broyage des joncs.....	37
III.2.2.4 Injection des mélanges PEHD/PEBD	38
III.3 Caractérisation des mélanges (PEHD/PEBD) ° élaborés	39
III.3.1 La caractérisation Physico-chimique des mélanges PEHD/PEBD.....	40
III.3.1.1. Le test de densité	40
III.3.1.2 l'indice de fluidité	40
a) Principe de la détermination de l'indice de fluidité.....	41
b) Appareillage	41
c) Calcul de l'indice de fluidité	41
III.3.2 La caractérisation mécanique des mélanges PEHD/PEBD	42
III.3.2.1. Essais de traction	42
a) Principe de l'essai	42
b) Présentation des éprouvettes normalisées.....	42
c) Présentation la machine Présentation la machine de traction.....	43
III.3.2.2. Essai de résilience.....	43
a) Eprouvettes utilisées	43
b) Présentation de la machine	44
c) Principe de fonctionnement	44
III.3.3 Caractérisation morphologiques des mélanges PEHD/PEBD.....	44
a) Principe de MEB	45
III.4. Conclusion	45

Chapitre IV : Résultats et discussions

Introduction	46
IV.1. Résultats de la caractérisation physico- chimique.....	46

IV.1.1. Résultats du test de densité.....	46
IV.1.2. Résultats del'indice de fluidité.....	47
IV.2. Résultats de la caractérisation mécanique	48
IV.2.1. Résultats de l'essai de traction	48
IV.2.1.1. Courbes contraintes déformation.....	48
IV.2.1.2.Détermination des caractéristiques mécaniques des mélanges	51
IV.2.2. Résultats de l'essai de Résilience	55
IV.3. Résultat de l'observation au microscope électronique à balayage(MEB)	57
IV 4 Conclusion.....	59
Conclusion générale	60
Référence Bibliographie	

Chapitre I

Figure I.1. Réaction de polycondensation pour la formation d'un polyester	3
Figure I.2 . Polymérisation par addition (formation du polyéthylène) et du polystyrène	4
Figure I .3. Modèle schématique de la synthèse d'un polymère	4
Figure.I.4. Représentation de la chaine d'un polymère linéaire.....	5
Figure.I.5 : Représentation schématique d'un polymère Bidimensionnel : le carbone graphite.6	6
Figure. I. 6. Représentation schématique d'un polymère Tridimensionnel	6
Figure I .7. Structure d'un polymère amorphe	6
Figure I.8 : Structure cristalline du polyéthylène	7
Figure II.9. Différents comportements de polymères en traction	10
Figure II.10. Différents comportements de polymères usuels en traction	11
FigureI.11. Incidence de la température sur le comportement contrainte-déformation du PMMA [3]	12
Figure II.12 Évolution de la rigidité du Polymère en fonction de la température et du degré de cristallisation	12
Figure II.13. Incidence de la vitesse de déformation et de la température sur le comportement contrainte-déformation des.....	13
Figure I.14. La formule semi développée du polyéthylène.....	14
Figure I.15 Schéma représentatif du polyéthylène.....	15
Figure I.16. Schématisation des ramifications dans les polyéthylènes	15
FigureI.17. : structure du Polyéthylène a) PEHD et b) PEBD.....	15

Chapitre II.

Figure II .1 : Répartition des procédés de mise en forme des matières plastique par taux.....	21
Figure II .2: Exemple de pièce obtenu par injection plastique	22
Figure II .3 : Principe de l'injection plastique	22
Figure II .4 : presse horizontale	23
Figure II .5 : Presse verticale	24

Figure II.6 : Système vis-piston	24
Figure II.7 : Unités d'une presse d'injection	25
Figure II.8 : Cycle d'injection.....	26
Figure II.9 : Injection soufflage	27
Figure II.10 : articles obtenus par extrusion	27
Figure II.11 : Schéma de l'extrudeuse monovis	28
Figure II.12 : Profil de vis zones géométriques	28
Figure II.13 : Extrusion soufflage.....	29
Figure II.14 : quelque objet par thermoformage.....	29
Figure II.15 : Formage par vide et formage par vide et comprimé.....	30
Figure II.16 : Machines de thermoformage	30
Figure II.17 : Les phases du thermoformage	31
Figure II.18 : Quelques objets obtenus par le roto-moulage	32
Figure II.19 : Exemple de poste de roto-moulage	32
Figure II.20 : Les phases du roto-moulage	33
Figure II.21 : Articles obtenus par le calandrage.....	33
Figure II.22 : Schéma de principe d'une chaîne calandrage.....	34
Figure II.23 : Chaîne de calandrage alimentée par mélangeur interne	34
Figure II.24 : Chaînes de calandrage alimentée par extrudeuse	35

Chapitre III.

FigureIII.1 : Aspect des polymères utilisés	36
Figure III.2 : Pesée des composants du mélange (PEHD/PEBD)	37
FigureIII.3 : La sortie de la matière de la filière de l'extrudeuse	37
FigureIII.4 : Les joncs des mélanges PEHD/PEBD placés dans le broyeur.....	38
FigureIII.5 : Presse à injection a) La presse à injection et b) le moule d'éprouvettes normalisées.....	38
FigureIII.6 : Epreuves obtenues après injection.....	38

Figure III.7 : Test de densité.....	40
Figure III.8 : Le Plastomètre	41
Figure III.9: Eprouvette de traction NF EN ISO 527 – 2	42
Figure III.10 : Les étapes de l'essais de traction	42
Figure III.11 : Déroulement de l'essais de traction	43
Figure III.12 : éprouvette utilisé pour l'essai de résilience	44
Figure III.13 : Le mouton Charpy	44
Figure III.14 : Représentation du microscope électronique à balayage	45

Chapitre IV.

Figure IV.1 : Variation de la densité des mélanges (PEHD/PEBD) en fonction du taux de PEBD.....	46
Figure IV.2 : Histogramme de la densitédes mélanges PEHD/PEBD.....	47
Figure IV.3 : Variation de l'indice de fluidité du mélanges (PEHD/PEBD) en fonction du PEBD.....	47
Figure IV.4 : Courbe contrainte –déformation du PEHD	49
Figure IV.5 : Courbe contrainte –déformation du PEBD	49
Figure IV.6 : Courbe contrainte –déformation des mélanges ;a)(90/10%) et b)(80/20%)	50
Figure IV.7 : Courbe contrainte –déformation des mélanges ;c)(70/30%) et d)(60/40%)	50
Figure IV.8: Courbe contrainte –déformation des mélanges ;e)(50/50%) et f)(40/60%).....	50
Figure IV.9: Courbe contrainte –déformation des mélanges ;g)(30/70%) et (20/80%).....	51
Figure IV10: Courbe contrainte –déformation du mélange (10/90%).....	51
Figure IV11: Variation de la contrainte Max en fonction du % du PEBD.....	52
Figure IV12 : Variation de la contrainte à la rupture en fonction du % du PEBD	53
Figure IV13 : Variation du module d'élasticité en fonction du % du PEBD.....	54
Figure IV14 : <i>Variation de la déformation en fonction du % du PEBD</i>	54
Figure IV15 : Variation de la résilience en fonction du % du PEBD	56
Figure IV16 : Micrographie MEB du polymère PEHD.....	57
Figure IV17 : <i>Micrographie MEB du mélange (70/30%) (PEHD/PEBD)</i>	58
Figure IV18 : <i>Micrographie MEB du mélange (30/70%) (PEHD/PEBD)</i>	58
Figure IV19 : <i>Micrographie MEB du polymère PEBD</i>	59

Tableau I.01 : Propriétés mécanique des polyéthylènes à haute densité	17
Tableau I.02 : Propriétés physique du PEHD	17
Tableau I.03 : Propriétés thermique de polyéthylène à haute densité	18
Tableau I.04 : Propriétés électrique du polyéthylène à haute densité.....	18
Tableau I.05 : Propriétés électrique du polyéthylène à basse densité.....	20
Tableau III.1 : Les différentes formulations des mélanges (PEHD/PEBD).....	36
Tableau III.2 . Températures de consignes de l'extrusion	37
Tableau III.3 : les différents paramètres de la presse à injection	39
Tableau IV.1 : Valeurs de la densité des mélanges PEHD/PEBD.....	46
Tableau IV.2 : Valeurs de l'indice de fluidité des mélanges PEHD/PEBD	47
Tableau IV.3 :Valeurs de la contrainte max des mélanges PEHD/PEBD	51
Tableau IV.4 :Valeurs de la contrainte à la rupture des mélanges PEHD/PEBD.....	52
Tableau IV.5 :Valeurs du module d'élasticité des mélanges PEHD/PEBD	53
Tableau IV.6 :Valeurs de la déformation à la rupture des mélanges PEHD/PEBD	54
Tableau IV.7 :Valeurs de la résilience des mélanges PEHD/PEBD	56
Tableau IV.8 :Valeurs moyenne de la résilience des mélanges PEHD/PEBD.....	56

Introduction Générale

Introduction générale

L'utilisation généralisée des matériaux plastiques offre des solutions de fabrication simples, des réalisations fiables et esthétiques grâce à la variété des procédés de mise en forme tels que l'injection, l'extrusion et le thermoformage. De plus, leur coût compétitif les place en concurrence directe avec d'autres matériaux tels que les métaux et le bois.

Le polyéthylène (**PE**) représente l'un des plastiques les plus largement utilisés à travers le monde. Il est présent en nombre important dans divers secteurs d'industries. En effet, le PE est essentiel pour l'emballage économique des produits alimentaires, permettant ainsi de prolonger leur durée de conservation. Il joue également un rôle crucial dans le transport sécurisé de produits chimiques, l'acheminement d'eau potable vers les populations, la protection des carrosseries de voitures neuves contre les égratignures, et bien d'autres applications pratiques de la vie quotidienne.

Le PEHD : polyéthylène haute densité et le PEBD : polyéthylène basse densité sont deux polyéthylènes de propriétés mécaniques de résistances différentes. Cette différence dans les propriétés mécaniques implique des applications différentes.

Les polyéthylènes haute densité (**PEHD**) sont largement utilisés pour fabriquer des caisses en plastique hautement résistantes, des canoës-kayaks, des emballages de produits détergents, des bidons d'huile moteur, des bouteilles de lait, des bouteilles de shampoing, des flacons de médicaments, ainsi que des bouchons pour les boissons gazeuses. Ils sont également utilisés dans la fabrication de conduites et de filets de signalisation pour les conduites.

Les polyéthylènes basse densité (**PEBD**) trouvent principalement leur utilisation dans l'emballage des denrées alimentaires et de divers produits industriels, ainsi que dans des applications telles que la câblerie, les géomembranes, les films d'étanchéité. De plus, ils sont utilisés sous forme de tuyaux ou pour créer des mélanges maîtres dans diverses industries.

Le mélange de polymère est une alternative pour générer de nouvelles propriétés de deux composants polymériques différents. L'industrie des polymères peut tirer profit de ces nouvelles formulations surtout si cela concerne le recyclage de déchets post production (déchets d'usine).

Dans notre travail, nous nous sommes intéressés au mélange de deux polymères : le PEHD et le PEBD. Le PEBD utilisé est un produit récupéré des déchets industriel résultant de la production par procédé de calandrage de sachets de lait.

L'étude porte sur l'optimisation des propriétés physico-chimiques et mécaniques de ces mélanges PEHD/PEBD recyclé.

Ce manuscrit expose les activités que nous avons entreprises pendant notre stage au sein de l'entreprise nationale SISCOPLAST sise à Draa-El-Mizan. Au cours de cette période, nous avons accompli la première phase du stage, laquelle impliquait le passage des mélanges par les procédés d'extrusion dans, le but d'homogénéiser les mélanges PEHD/PEBD recyclé, et d'injection plastique pour l'obtention d'éprouvettes normalisées. Les mélanges élaborés et

caractérisés sont au nombre de 11 mélanges : (100/0%), (90/10%), (80/20%), (70/30%), (60/40%), (50/50%), (40/60%), (30/70%), (20/80%), (10/90%) et (0/100%) (PEHD/PEBD)

La deuxième étape de notre étude consiste à la caractérisation physico- chimique et mécanique de ces mélanges élaborés.

Ce mémoire est subdivisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre, fait l'objet d'une synthèse bibliographique qui portera sur les généralités sur les polymères en se concentrant sur de nos mélanges soient le polyéthylène haute densité (PEHD) et le polyéthylène basse densité (PEBD).

Dans le deuxième chapitre, on présentera quelques techniques transformations des polymères et leurs procédés de mise en œuvre, notamment le procédé d'extrusion et le procédé d'injection.

Les matériaux d'études, le matériel et les techniques de caractérisation utilisés dans notre travail sont présenter dans le chapitre trois.

Le quatrième chapitre rassemble les résultats et interprétations des différentes courbes obtenues de la caractérisation des nos mélanges. Des discussions porteront sur ces résultats.

A la suite de cette étude, nous terminons par la conclusion et des perspectives

Chapitre I

Généralités sur les Polymères

I .1 Introduction

Les polymères appelés communément « matière plastiques », sont indissociables de notre environnement et de notre vie pratique. Aujourd'hui les polymères naturels qui comprennent des matériaux tels que le bois, le caoutchouc, la laine, le coton, la soie le cuir et le papier ont été complétés par des centaines de polymères synthétiques tel que : le PE, PP, PA, PS.... [1]

I .2 Généralité sur les polymères

I .2.1. Le monomère

Un monomère est une substance, le plus souvent organique ; utilisée dans la synthèse des oligomères et des polymères au cours d'une réaction d'oligomérisation ou de polymérisation. [2]

Le mot monomère vient du grec monos, un seul ou une seule ; et meros. [3]

I .2.2. Le polymère

Un polymère comporte plusieurs monomères, c'est une grande molécule constituée d'unités fondamentales appelées monomères (ou motifs monomères) reliées par des liaisons covalentes, pour en faire des composés de masse moléculaire élevée (Macromolécules)

Le terme macromolécule est souvent utilisé à la place de polymère. [2]

I .2.3. La polymérisation

La polymérisation désigne la réaction chimique de fabrication des macromolécules.

C'est la réaction qui, à partir des monomères, forme en les liants, des composés de masse moléculaire plus élevée : les polymères ou macromolécules. Les noyaux des monomères sont le plus souvent constitués d'un atome de carbone (molécules organiques). [2]

I.2.3.1. La polymérisation par étape (polycondensation)

La polycondensation est une réaction chimique au cours de laquelle il y a libération d'une molécule d'eau, d'ammoniac ou de glycol, les monomères s'associent avec élimination simultanée d'atome ou de groupes d'atomes. Les polyamides, les polyesters et certains polyuréthanes sont les exemples typiques de polymères obtenus par polycondensation [3].

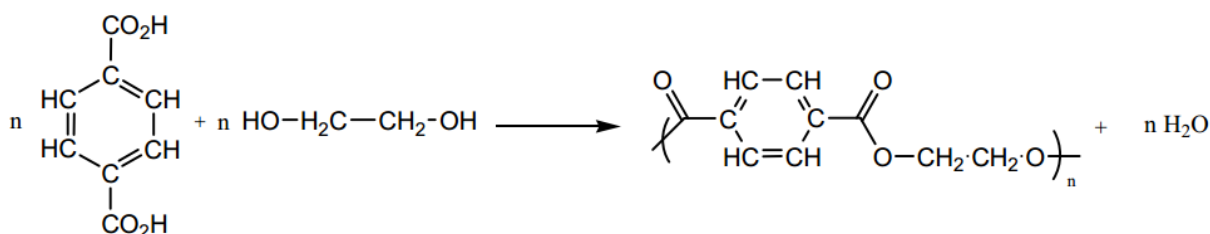


Figure I.1. Réaction de polycondensation pour le polyéthylène téréphtalate

I.2.3 2. La polymérisation en chaîne (polyaddition)

On additionne les monomères : il n'y a pas perte d'atomes dans la polymérisation en chaîne ; les monomères s'associent sans réaction d'élimination simultanée, la réaction par addition ne génère que des polymères de longueurs spécifiques sans aucun sous-produit, c'est le procédé le plus utilisé dans l'industrie : le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), les polyesters

I .3.1 Selon leur nature chimique: On distingue:

➤ *Polymères minéraux :*

Ils sont constitués soit de chaînes renfermant un seul corps simple : diamant, graphite, phosphore, soufre... Ou de chaînes renfermant plusieurs hétéroatomes : (silicates acides polyphosphoriques, chlorure de polyphosphonitrile).

➤ *Polymères organiques :*

C'est la classe la plus riche comme : les polydiènes, les polyacryliques, les polyamides, les polyvinyliques.

➤ *Polymères mixtes :*

Doués de propriétés intéressantes dont une bonne résistance thermique (~300°C – 350°C) comme les silicones. [4]

I .3.2. Selon leurs origines

On peut classer les polymères en trois groupes :

- *Les polymères naturels :* cellulose, caoutchouc naturel, etc.
- *Les polymères artificiels :* (dérivés des polymères naturels) : nitrate et acétate de cellulose, (caoutchouc fortement réticulé par le soufre)
- *Les polymères synthétiques :* produits par des réactions de polymérisation en chaîne ou de polycondensation [5]

I .3.3 Selon leur structures des chaînes: (dimensionnalités)

Les polymères peuvent encore être classés en trois catégories :

➤ *Polymères linéaire ou monodimensionnel*

Une macromolécule linéaire peut être très schématiquement représentée par un trait continu divisé en intervalles représentant chacun une unité monomère (figure I 4). [6]



Figure.I.4. Représentation de la chaîne d'un polymère linéaire. [6]

➤ *Polymère bidimensionnelle*

Ils se présentent sous la forme de feuillets bidimensionnels, d'épaisseur comparable à celle des molécules simples (figure I .5) [6]

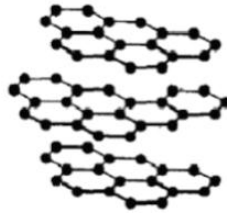


Figure.I.5 : Représentation schématique d'un polymère Bidimensionnel : le carbone graphite.
[6]

➤ *Polymères tridimensionnelle*

Les liaisons se développent dans les trois dimensions (formation d'un réseau tridimensionnel) et un élément de volume d'un tel système peut être représenté comme sur la figure I .6.[6]

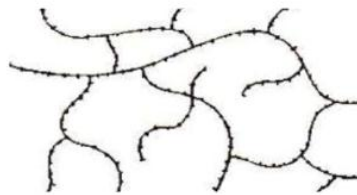


Figure. I. 6. Représentation schématique d'un polymère Tridimensionnel.[6]

I .3.4. Selon leurs morphologies

➤ *Polymère amorphe*

Dans la structure amorphe, les macromolécules sont flexibles et disposées 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 Polyméthacrylate (PMMA), pvc

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 détecte aucun ordre à l'aide des rayons X, on observe un halo amorphe. [8]

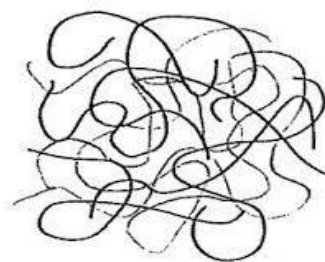


Figure I .7. Structure d'un polymère amorphe

➤ *Polymère semi cristallin*

La cristallinité des polymères désigne l'arrangement des chaînes moléculaires en un réseau atomique ordonné (plus complexe que des métaux).

Des chaînes peuvent être des zigzags plans régulièrement organisés comme dans le polyéthylène (PE), ou des hélices comme dans le PP. [8]

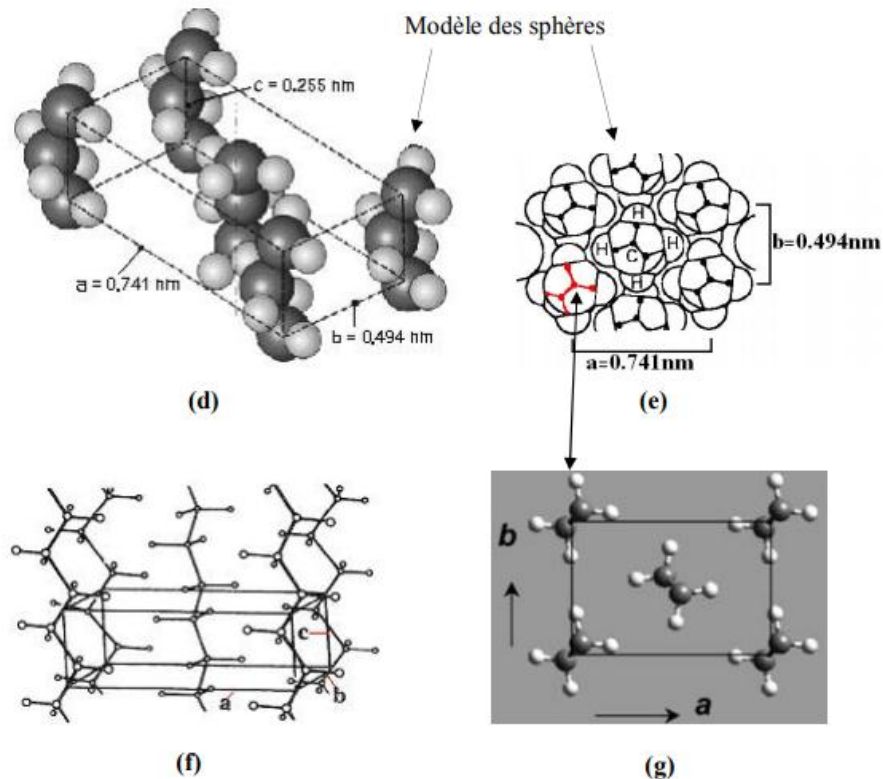


Figure I.8 : Structure cristalline du polyéthylène [9]

On distingue plusieurs mailles élémentaires correspondant chacune à un polymère bien défini : le polyéthylène cristallise selon une maille orthorhombique figure I.8, le polypropylène selon une maille monoclinique, le PET selon une maille triclinique...

I .3.5 Selon leur importance économique

Pour les polymères comme pour tout produit industriel, il existe une corrélation entre le tonnage et le prix. Ceci permet de distinguer trois grandes catégories de polymères commerciaux :

➤ *Les polymères de grande diffusion*

Dont le volume des ventes et de productions est élevé et dont le prix est faible Exemple : le Polyéthylène (PE), Polypropylène (PP), Polystyrène (PS), Polychlorure de vinyle (PVC).

➤ *Les polymères à haute performance*

les polymères nanostructures et les hydrogels sont souvent très spécialisés et ne sont pas utilisés dans des applications de masse. Ils sont principalement utilisés dans des domaines de

pointe tels que la recherche biomédicale, la nanotechnologie, la médecine régénérative, etc. En raison de cette spécialisation, leur marché est restreint, ce qui limite leur volume de ventes.

➤ **Les polymères techniques**

Dont le volume et le prix sont intermédiaires entre les deux catégories précédentes Exemple : polyamide, polyéthylène téréphtalate (PET) [10]

I .3.6 Selon les usages technologiques

On peut distinguer :

- Les fibres synthétiques (nylon, tergal) ou naturelles (coton, soie).
- Les plastiques : ce sont les plastiques au sens large, regroupant les thermodurcissables et les thermoplastiques.
- Elastomères : Doués de propriétés élastiques et / ou caoutchouteuse.
- Caoutchoucs synthétiques : polymères du butadiène de l'isoprène chloruré.
- Caoutchoucs naturels [11]

I .4. Propriétés des polymères

I .4.1. Les propriétés physiques

Rappelons qu'il existe une grande variété de matières plastiques, tout comme il existe un grand nombre d'alliages métalliques

Les propriétés physiques des matériaux polymères sont une moyenne de celles des composants quand il s'agit de masse volumique ou de la reprise d'humidité. Pour le reste, ces matériaux sont souvent inhomogènes et il n'y a pas de règle d'addition pour prévoir les propriétés physiques à partir de celles des composants [12]

➤ **La masse volumique**

Masse volumique des matières plastiques est peu élevée. La légèreté des polymères est sans aucun doute une des qualités qui a le plus largement contribué à leur diffusion.

En ce qui concerne le rapport (résistance à la traction / masse volumique), certains polymères sont en fait supérieurs bien à des matériaux métalliques [13]

La faible masse volumique des plastiques est due au faible poids atomique des principaux atomes de leurs chaînes (principalement l'hydrogène et le carbone :

I .4.2. Les Propriétés thermiques

➤ **Les températures**

La température de transition vitreuse "**T_g**" et la température de fusion "**T_f**" sont les deux températures fondamentales nécessaires dans l'étude des matériaux polymères.

Les températures caractéristiques d'un seul et même matériau peuvent alors être classées de la façon suivante :

Température de transition vitreuse < Température de cristallisation < Température de fusion < Température de décomposition thermique.[13]

I .4.3. Propriétés électriques

De par la nature même des liaisons atomiques qui existent dans les polymères (Liaisons covalentes le long des chaînes, liaisons de Van der Waal ou ponts hydrogène entre les chaînes), ceux-ci ne comprennent aucun porteur de charges électriques (électron ou ions).

Les matières plastiques ont donc une résistivité très élevée et constituent par conséquent d'excellents isolants électriques. Le comportement des polymères sous champs électriques de haute fréquence, dépend de la polarité de la molécule. Sur ce plan, les polyéthylènes et les polypropylènes, grâce à leur structure régulière constituée uniquement d'atomes de carbones et d'hydrogène, sont les plus intéressants [13]

On peut ainsi isoler des câbles électriques de haute fréquence avec ces polymères.

I .4.4. Propriétés mécaniques

La grande majorité des polymères sont utilisés pour supporter des charges, c'est-à-dire qu'ils ont une fonction mécanique. Pour assurer cette fonction souvent critique, il convient de dimensionner correctement les pièces de structures, afin d'assurer leur résistance mécanique et leur durée de vie en service. Les propriétés mécaniques des polymères sont fortement influencées par la température et la vitesse de déformation. Pour un même matériau, une augmentation de la température conduit à un comportement évoluant de fragile à ductile, de même qu'une décroissance de la vitesse de déformation [13]

I.5. Comportement mécanique des polymères

Un grand nombre des paramètres utilisés pour caractériser les matériaux, tel que le module d'élasticité ; la résistance à la traction, la résistance aux chocs et la limite à la fatigue, servent également à décrire les propriétés mécaniques des polymères.

La plupart des caractéristiques mécaniques des polymères varient beaucoup en fonction de la vitesse de déformation, de la température et la nature chimique du milieu (présence d'eau, d'oxygène, de solvants organiques...)

Le but implicite des essais mécaniques est d'établir l'équation d'état : $f(\sigma, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, t, T) = 0$ permettant de prédire le comportement du polymère en toutes circonstances.

I.5.1. Comportement contraintes-déformations

I.5.1.1. Essai de traction

Parmi tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement l'essai le plus fondamental. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques usuelles telles que le module d'élasticité, la contrainte au seuil d'écoulement, la contrainte au plateau de plasticité, la contrainte et l'allongement à la rupture.

La figure ci-dessous présente 4 types de comportements contrainte- déformation des matériaux polymères issus des essais de traction.

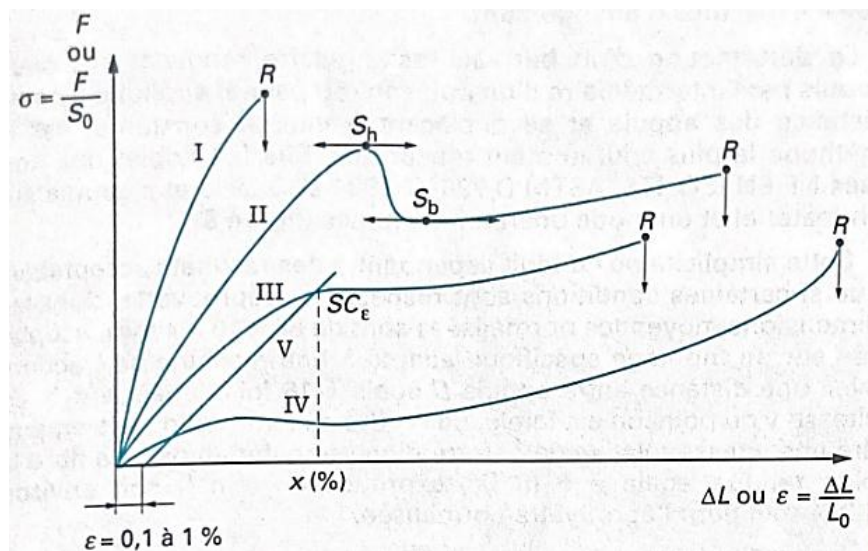


Figure II.9. Différents comportements de polymères en traction [14]

R rupture

S_h et S_b seuils d'écoulement haut et bas

SC_ϵ seuil conventionnel pour la déformation spécifiée

- La courbe I illustre le caractère en contraintes déformation d'un polymère fragile dont la rupture s'accompagne d'une déformation élastique.
- La courbe II montre que le matériau polymère ressemble à celui de nombreux matériaux métalliques : la déformation élastique initiale est suivie d'une déformation plastique. C'est le comportement d'un matériau élasto-plastique avec seuil d'écoulement.
- La courbe III montre le comportement mécanique d'un polymère plastique sans seuil d'écoulement.
- La courbe IV correspond à des déformations entièrement élastiques, analogue à celle des caoutchoucs (déformations réversibles prononcées résultant d'une contrainte faible), c'est le comportement mécanique des élastomères.
- La courbe V est parallèle à la tangente à l'origine de la courbe III au point d'abscisse ϵ et d'ordonnée nulle.

Figure I.10 ci-dessous donne des exemples de courbes contraintes déformations de quelques polymères usuels.

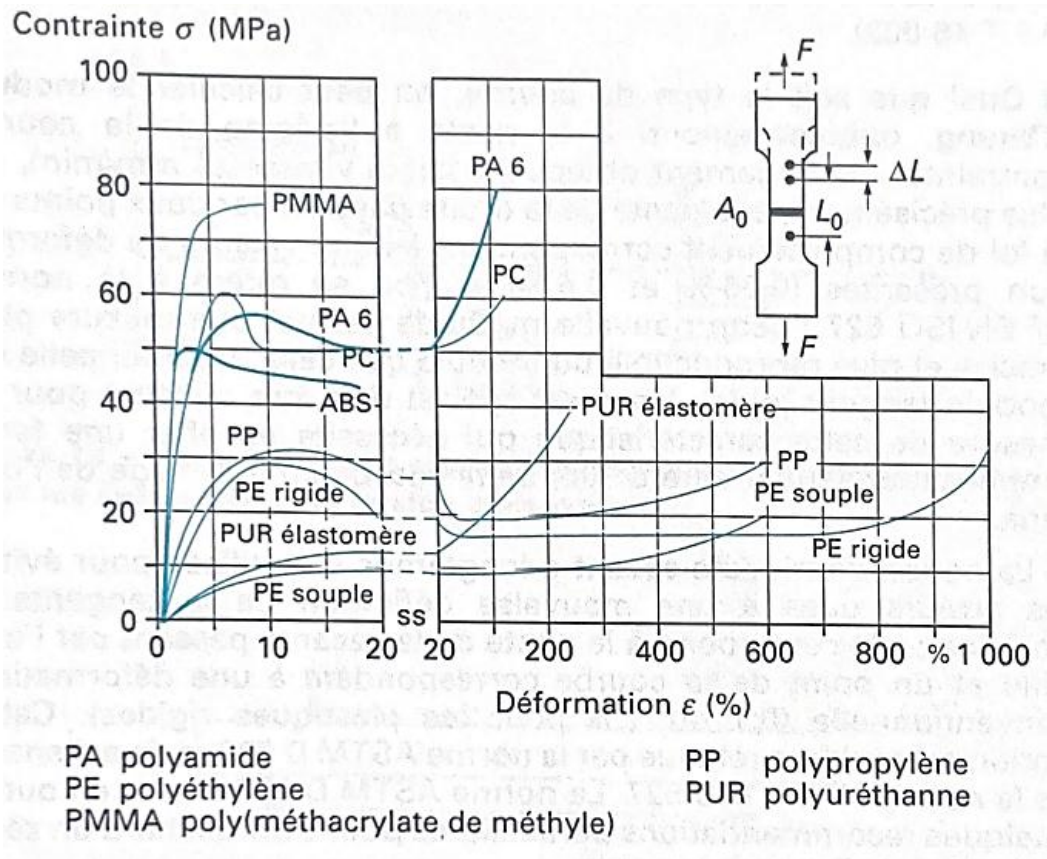


Figure II.10. Différents comportements de polymères usuels en traction [14]

I.5.1.2. Les éléments influents sur le comportement contrainte-déformation

- ***Incidence de la température sur le comportement mécanique***

La température a une influence sur le comportement contrainte-déformation. Une augmentation de température entraîne :

- 1) Une diminution du module d'élasticité,
- 2) Une baisse de la résistance à la traction,
- 3) Une hausse de la ductilité.

La figure I.11 illustre le comportement contrainte-déformation du Plexiglas, le matériau est entièrement fragile à $T=4^{\circ}\text{C}$ et devient parfaitement ductile à $T=50^{\circ}\text{C}$ et 60°C (déformation plastique très importante).

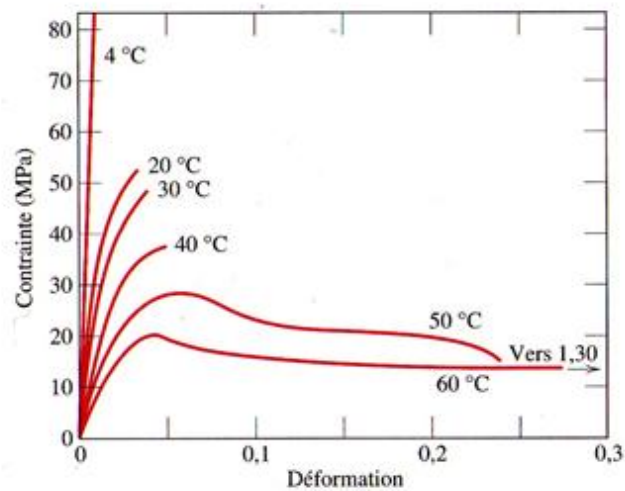


Figure I.11. Incidence de la température sur le comportement contrainte-déformation du PMMA[3]

- **La température de transition vitreuse T_g :**

La température de transition vitreuse T_g est très importante, en dessous de cette température, les macromolécules sont peu déformables et rigides (état vitreux).

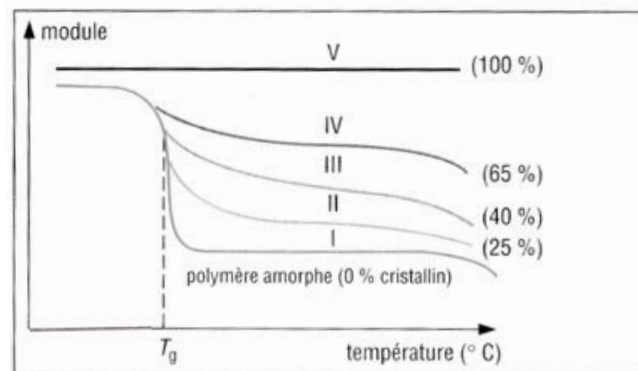


Figure II.12 Évolution de la rigidité du Polymère en fonction de la température et du degré de cristallisation [15]

Au-dessus de cette température, les mouvements des chaînes sont rendus possibles dans les zones désordonnées amorphes permettant des déformations plus importantes. Et plus facile (le module chute à partir de T_g).

- **Incidence de la vitesse de déformation sur le comportement contrainte- déformation**

La vitesse de déformation peut également exercer une influence importante sur les propriétés mécaniques. En général toute diminution de la vitesse de déformation a la même influence qu'une augmentation de la température, c.à.d. que le matériau devient plus mou et plus ductile.

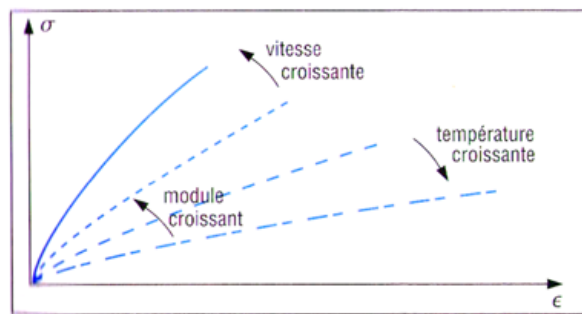


Figure II.13. Incidence de la vitesse de déformation et de la température sur le comportement contrainte-déformation des polymères [15]

- ***Incidence de la masse molaire sur le comportement contrainte- déformation***

On observe que la résistance à la traction des polymères augmente avec la masse molaire :

-plus le degré d'enchevêtrement dans la zone amorphe est grand, plus la masse molaire en nombre est grande, plus le polymère est résistant (de petites chaînes se démêlent plus facilement pour casser).

-la liaison inter cristallites, partie amorphe (de grandes chaînes participant à différents domaines cristallins assurent la liaison inter cristallites), plus ces liaisons sont importantes plus le polymère semi-cristallin est résistant.

En termes mathématiques, la résistance à la traction (R_m) est fonction de la masse molaire moyenne en nombre selon l'équation suivante :

$$(R_m) = R_{m\infty} - \frac{A}{M_n}$$

Où $R_{m\infty}$ est la résistance à la traction pour une masse infinie, et A, une constante.[3]

- ***Incidence du degré de cristallinité sur le comportement contrainte- déformation***

Pour les polymères partiellement cristallins, le taux de cristallinité (c.à. d le volume de matière bien ordonnée) influence les propriétés mécaniques.

Les liaisons de van der Waals existant entre les segments adjacents de chaînes moléculaires sont d'autant plus fortes que les chaînes deviennent serrées et compactes. Ces liaisons deviennent moins importantes dans les régions amorphes en raison du défaut d'alignement des chaînes. En conséquence, le module d'élasticité des polymères semi-cristallin augmente fortement avec le degré de cristallinité.

- ***Incidence de la préformation par étirage sur le comportement contrainte- déformation***

Parmi les procédés employés sur une base commerciale pour accroître la résistance mécanique et le module d'élasticité d'un polymère, on recourt fréquemment à la déformation de traction permanente. Ce procédé appelé étirage des polymères correspond au durcissement structural des métaux. Lorsque le polymère est étiré avec chauffage, il ne conserve sa structure moléculaire orientée que s'il est rapidement refroidi à la température ambiante. Le degré de rigidité et de résistance varie selon l'ampleur de la déformation du matériau. Par ailleurs les propriétés des polymères étirés sont fortement anisotropes.

- ***Incidence du traitement thermique sur le comportement contrainte- déformation***

Le traitement thermique (ou recuit) des polymères semi-cristallin modifie la taille et le degré de pureté des cristallites ainsi que la structure sphérolitique.

L'augmentation de la température du recuit des matériaux non étirés a les conséquences suivantes :

Un accroissement du module d'élasticité ;

Une augmentation de la limite d'élasticité ;

Une diminution de la ductilité.

Ces effets imputables au recuit des polymères sont contraires à ceux généralement observés dans les métaux.

Les effets du recuit sont contraires lorsqu'il s'agit d'un polymère étiré (fibres et pellicules)

I .6 le polyéthylène

I .6.1. Historique

L'histoire et le développement du polyéthylène est assez récente. A partir des expériences développées au début des années 30 par la "IMPERIAL CHEMICAL INDUSTRIES" (Angleterre), a été obtenue une substance blanche et pâle résultant de l'essai de faire réagir de l'éthylène à haute pression (1000 à 3000 kg/cm³). Cette substance fut identifiée comme de l'éthylène polymère ce polyéthylène est couramment appelé polyéthylène à basse densité. [7]

Bien que l'industrie de transformation des polymères ne mobilise que quelque pour cents de la production pétrolière et gazière. Des statistiques récentes montrent que plus de 90% des systèmes de distribution des gaz nouvellement installer sont fait en polyéthylène (PE) en raison de son cout relativement faible, sa facilité d'installation et de sa durabilité, sachant que 40% approximativement de PE produit dans le monde était de polyéthylène haute densité (PEHD) [1]

Les essais réalisés sur le polyéthylène révélèrent d'excellentes propriétés diélectriques et de haute résistance. Concrètement, sa résistance à l'eau en fait un parfait isolant pour les câbles sous-marins.[7].

I .6.2. Définition

Le polyéthylène est un polymère thermoplastique obtenu par la polymérisation (polyaddition) des monomères d'éthylène (CH₂=CH₂), Le polyéthylène est translucide, facile à manier et résistant au froid.Cette matière plastique représente à elle seule environ un tiers de la production totale des matières synthétiques et constitue la moitié des emballages plastiques. Le recyclage des produits usés en PE a pris de plus en plus d'importance, 50% du PE constituant les sacs poubelle sont recyclé [16]

La formule semi développée du polyéthylène est :

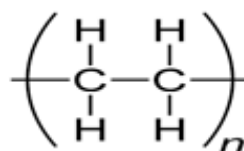


Figure I.14.La formule semi développée du polyéthylène

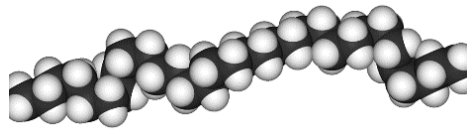


Figure I.15 Schéma représentatif du polyéthylène

Il existe différents polyéthylènes classés en fonction de leur densité, celle-ci dépend du nombre et de la longueur des ramifications présentes dans le matériau :

- Le PEHD, polyéthylène haute densité ;
- Le PEBD, polyéthylène basse densité ;
- Le PEBDL, Le polyéthylène de basse densité linéaire ;
- Le PEMD, Le polyéthylène moyenne densité

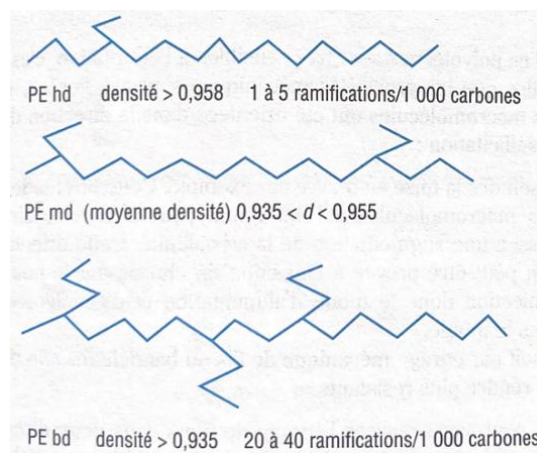


Figure I.16. Schématisation des ramifications dans les polyéthylènes [14]

I.6.3 structure de polyéthylène à haute densité et le polyéthylène à base densité

Le PEBD est plus ramifié que le PEHD, ce qui signifie que les chaînes ne s'assemblent pas bien entre elle, la structure de PEBD donne une densité plus faible et une flexibilité plus grande à celle qu'on peut obtenir dans le cas PEHD, qui se cristallise pour donner un solide rigide [17]

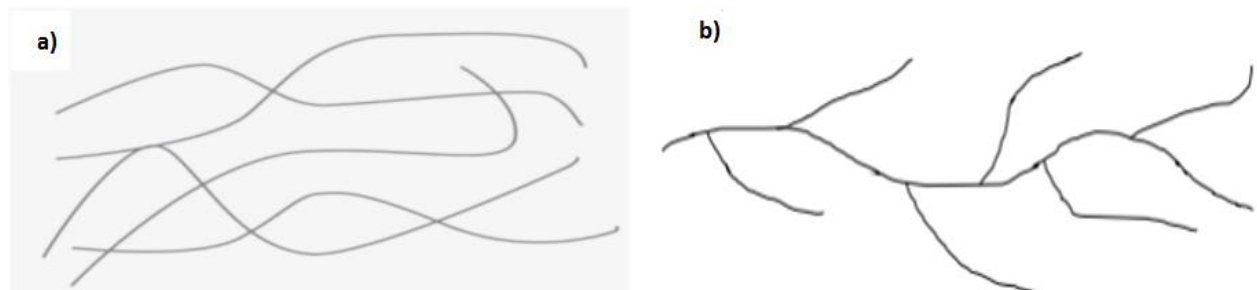


Figure I.17. : structure du Polyéthylène
a) Structure du PEHD et b) Structure du PEBD [17]

I .6.4. Procédés de fabrication des polyéthylènes

Deux technologies de polymérisation de l'éthylène ont été mises en évidence :

- La polymérisation par voie radicalaire, par Imperial Chemical Industries (I.C.I), ce procédé donne naissance au polyéthylène basse densité [18]
- La polymérisation par voie ionique, opérant à basse pression qui conduit à un polyéthylène de haute densité ou à un polyéthylène de basse densité linéaire [18]

I .6.5. Domaine d'utilisation du polyéthylène

Le polyéthylène est utilisé dans plusieurs domaines tel que :

- L'isolation et la protection des câbles électriques
- La Tuyauterie : pipe à gaz naturel et eaux...etc.
- L'industrie alimentaire : bidon d'huile...etc.
- Les équipements de navire et de voiture...etc.

I .7 Le polyéthylène à haute densité (PEHD)

I .7.1 Présentation

Le PEHD est un thermoplastique blanc, moins translucide et plus rigide que le PEBD. La molécule de PEHD est un long assemblage linéaire de 500 à 1000 molécules de l'éthylène pratiquement sans ramifications qui se cristallise pour donner un solide rigide.

Le polyéthylène haute densité (PEHD) est obtenu par la polymérisation cationique catalysée de l'éthylène. On utilise principalement les catalyseurs Ziegler-Natta et les catalyseurs à base de chrome (procédé de Philips) réduits et activés à haute température (400°C-800°C) [19] sa masse volumique est la plus importante de tous les polyéthylènes et varie entre 0.955 et 0.970 g/cm³

I .7.2 Propriétés des polyéthylènes à haute densité

➤ *Les propriétés mécaniques*

A 23°C les polyéthylènes à haute densité sont au-dessus de leur température de transition vitreuse ($T_g = -100^\circ\text{C}$), leur phase amorphe est caoutchouteuse, et ceci est sensible au niveau des propriétés mécaniques.

La nature para fini que du polyéthylène à haute densité, en fait un matériau avec de bonnes propriétés de frottement (surtout sous forme injectée) ; les facteurs de frottement dynamique pour une vitesse donnée sont indépendants de la pression de surface ($s=0,15$ à $0,25$), pression admissible $\leq 10\text{N/mm}^2$, vitesse $\leq 2\text{m/s}$.

On résume les différentes caractéristiques de ce matériau dans le tableau I .01 [20]

Tableau I .1. Propriétés mécanique des polyéthylènes à haute densité [20]

Propriétés	Unités	PEHD
Masse volumique	g/cm ³	≥ 0.955

Indice de fluidité (190°C)	g/10min	0,3-18
Contrainte au seuil d'écoulement (traction)	MPA	25-30
Résistance à la rupture	MPA	30-35
Allongement rupture	%	500-1100
Module d'élasticité en traction	MPA	800-1100

➤ **Les propriétés physiques**

Les polyéthylènes à haute densité sont opaques en forte épaisseur et transparents en films. L'augmentation de la cristallinité se traduit par une diminution de la stabilité et de la diffusivité (d'une part de la perméabilité) des diffusants car leur transport ne peut s'effectuer dans la phase amorphe (tableau I .2) [21]

Tableau I .2. Propriétés physique du PEHD [21]

Transmission lumineuse	Masse volumique g/cm ³	Absorption d'eau %	Taux de cristallinité %
Mauvaise	0,95	0,01	70 à 80

➤ **Les propriétés chimiques**

Les polyéthylènes à haute densité possèdent une grande stabilité chimique, à des températures inférieures à 60°C, ils sont pratiquement insolubles, ils ne sont attaqués ni par les acides (sauf oxydants), ni par les bases, ni par les solutions de sel. Ils sont insolubles dans l'eau, mais ils sont sensibles à l'état naturel à l'action des ultraviolets en présence d'oxygène (air) ; pour cela, ils sont chargés de poudres de carbone, 2 à 3% ou de stabilisants lumière. Ils sont sensibles au feu et à la fissuration sous contrainte en présence de savon, alcool...etc.[22]

➤ **Les propriétés thermiques**

En absence de contraintes, le polyéthylène à haute densité peut supporter une température de 110°C à 120°C (stérilisation par exemple), mais cette température décroît avec la charge \leq 100°C ; augmente avec le taux de réticulation. Le passage de la température de transition vitreuse est d'autant moins sensible que le polyéthylène à haute densité est plus cristallin, sa température de fusion est au voisinage de 137°C (tableau I .03)

Tableau I .3. Propriétés thermique de polyéthylène à haute densité [23]

Coefficient de dilatation 10-5 /°C	Conductivité 10-4 cal/s.cm	Chaleur spécifique Cal/g. °C	Fléchissement Sous charge 0,186h	Température de fusion °C	Comportement au froid
11 à 13	11 à 12	0,55	42 à 54	137°C	Bon

➤ **Les propriétés électriques**

Les polyéthylènes à haute densité sont d'excellents isolants électriques, ceci explique leur tendance à être électrostatiques. Ils ont une résistance très élevée et une rigidité électrique élevée. [24]

Tableau I .4. Propriétés électrique du polyéthylène à haute densité [24]

Résistivité Ω.CM	Rigidité diélectrique KV/MM	Constante diélectrique	Facteur de perte	Résistivité à l'arc
108	18 à 24	2,3	3 à 5	190

I .7.3. Application du polyéthylène à haute densité (PEHD)

Bouteille de lait bidon d'huile, flacons détergents solides et liquides, bidons produits sanitaires, bidons produits chimiques, réservoirs à essence, réservoirs casiers seaux, ménager bouteilles...[25]

I .7.4 Avantage du polyéthylène à haute densité (PEHD)

- Mise en œuvre aisée, injection, extrusion.
- Excellentes propriétés d'isolation électrique.
- Grande inertie chimique.
- Qualité alimentaire.
- Perte du caractère perméable des PE que ce soit à l'eau, mais aussi à l'air et aux Hydrocarbures.
- Résistance aux chocs.[25]

I .7.5 Inconvénients du polyéthylène à haute densité (PEHD)

- Sensible en présence d'oxygène.
- Sensible à la fissuration sous contrainte.
- Mauvaise tenue à la chaleur
- Collage important [25]

I .8 Polyéthylène à base densité (PEBD)

I .8.1 Présentation

Ce polymère thermoplastique de grande consommation est obtenu par polymérisation radicalaire de l'éthylène avec un initiateur de radical libre (tel que le peroxydes et l'oxygène), en opérant sous haute pression (82_276MPa) à environ 132 à 332°C.

Dans le PEBD serait une chaîne complètement ramifiée de groupement (-CH₂-). Cette structure donnant ainsi une densité plus faible et une flexibilité plus grande à celle quand peut obtenir dans le cas de PEHD [25].

I.8. 2. Propriétés du polyéthylène à base densité (PEBD)

➤ *Propriétés physico-chimiques*

Le polyéthylène à basse densité PEBD est un polymère semi-cristallin, de densité située entre 0.910 et 0.925 g cm³. Et sa température de fusion cristalline est située entre 105°C et 115°C [26]

En général, le PEBD présente une bonne résistance chimique :

- Sa température de fusion cristalline est située entre 105°C et 115°C ;
- Son taux de cristallinité est d'environ 65-70% ;
- Très résistant aux acides faibles ;
- Résistant aux acides forts non oxydants ;
- Très résistant aux bases faibles et fortes.

➤ *Propriétés thermique*

La température de fusion des polyéthylènes dépend fortement de la masse volumique et donc de la cristallinité. Elle est de l'ordre de 105 à 115°C

➤ *Propriétés électriques*

Le PEBD est une substance non polaire, [28] caractérisée par :

- Une permittivité relative faible (≈ 2 à 3) limitant ainsi le courant de déplacement ;
- Un facteur de pertes diélectriques relativement faible ;
- Une rigidité diélectrique élevée ;

Le tableau I.5 ci-dessus montre les valeurs des propriétés électrique propriétés de polyéthylène à basse densité [29]

Tableau I .5. Propriétés électrique du polyéthylène à basse densité [24]

Propriétés	Unités	PEBD
Masse volumique	g/cm ³	0,910-0 ,925
Permittivité de relative	-	2 - 3
Facteur de perte diélectrique	-	2,10 ⁴
Rigidité diélectrique	kV/mm	30 \geq pour épaisseur de 1 mm
Résistance transversale	Ω .cm	1,10 ¹⁸

➤ *Propriétés mécanique*

Les propriétés mécaniques du PEBD dépendent essentiellement de sa masse molaire et de sa cristallinité. Nous pouvons citer entre autres [28]

- La résistance à la traction variant de 9 à 23MPa ;
- L'allongement à la rupture variant de 150% à 1000% ;
- Le module d'élasticité en traction variant de 200 à 500MPa.

I .8.3 Application du polyéthylène à base densité (PEBD)

Emballage industriel, emballage alimentaire, emballage produits hygiéniques, isolation câbles d'énergie et de télécommunications, gainage câbles téléphoniques, articles ménagers, bouchons, couvercles, poignées, sacs, cabas, transport de l'eau, emballage du lait revêtement de pipe-line[25]

I .8.4 Avantage du polyéthylène à base densité (PEBD)

- Solidité, résistances aux chocs et à l'abrasion, même à froid.
- Inerte chimique, et non toxique pour usage alimentaires. Résistance à la corrosion et à l'oxydation.
- Adaptabilité.
- Sécurité.[25]

I .8.5 Inconvénient du polyéthylène à base densité (PEBD)

- Résistance à la température de l'eau limitée.
- Rapide propagation de fissures
- Ne peut ni se coller ni se visser.
- Les extrémités ont tendance à se fermer.
- Pas résistant au feu.[25]

I .9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons rappelé quelques généralités et propriétés des polymères, ensuite on a vu la présentation et propriétés de polyéthylène haute densité et le polyéthylène base densité qui sont les deux composants des mélanges que nous avons élaborés dans cette étude.

Chapitre II.

Transformation des Thermoplastiques

II.1 Introduction

Comme pour les métaux, les produits en matières plastiques peuvent être fabriqués par enlèvement de matière, par pliage et par soudage. Ces techniques de transformation restent cependant marginales.

Généralement l'obtention des pièces de formes données est faite par des procédés de mise en forme permettant de réaliser des séries importantes ou de produit en continu. Pour les matières thermoplastiques, on emploie principalement les procédés suivants :

- L'injection.
- L'extrusion soufflage
- L'injection soufflage
- Le thermoformage
- Le roto moulage.
- Le calandrage

Ces procédés sont aussi utilisés pour les matières thermodurcissables, mais qui nécessitent une attention particulière pour la température [30]

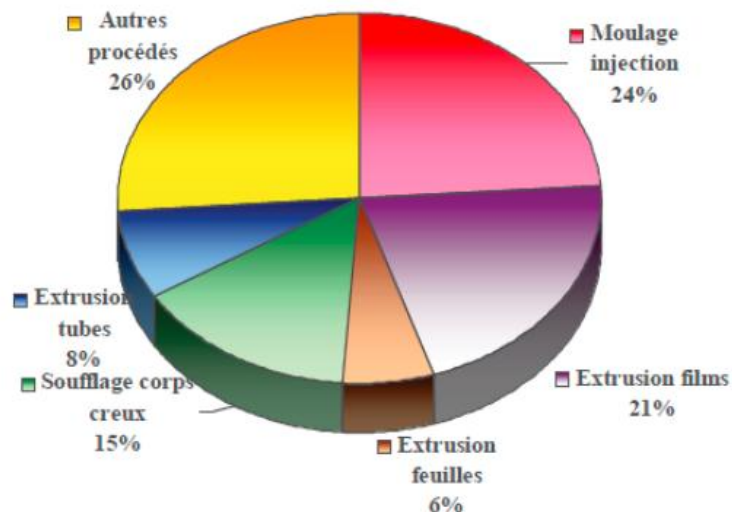


Figure II.1 : Répartition des procédés de mise en forme des matières plastique par taux [27]

II.2 Injection

Le procédé d'injection a pour objectif de fabriquer rapidement et en grandes quantités des objets. Cette technique permet d'obtenir des pièces finies en matière plastique, de formes complexes, et cela en une seule opération. La gamme de poids des pièces produites peut varier de quelques grammes à plusieurs kilogrammes. [30]

Le matériau thermoplastique est préalablement rendu liquide par chauffage. Il est alors injecté sous haute pression. Jusqu'à 1800 bar, dans la cavité du moule. On doit ensuite attendre que la matière plastique soit suffisamment froide et rigide avant d'ouvrir le moule et d'en éjecter la pièce sans risque de déformation, l'ensemble de ces étapes est assuré par une machine qui s'appelle : Presse d'injection [31].



Figure II .2: Exemple de pièces obtenues par injection plastique [32]

II.2.1. Principe de l'injection plastique

Le processus consiste à chauffer la matière sous forme de granulés jusqu'à ce qu'elle devienne molle, puis à l'injecter dans un moule sous haute pression.

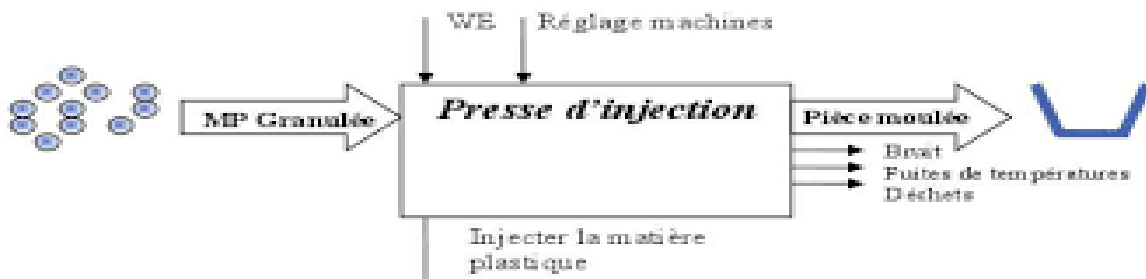


Figure II .3 : Principe de l'injection plastique

II .2.2 Différentes presses d'injection

Il existe plusieurs presses d'injection plastique, mais on distingue deux configurations

II.2.2.1 Presse horizontale

La machine de moulage par injection horizontale est le type le plus courant sa partie de serrage de moule 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 réparer son barycentre est bas, son installation stable suite à la confection du produit, 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 inclinée où 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. [34]

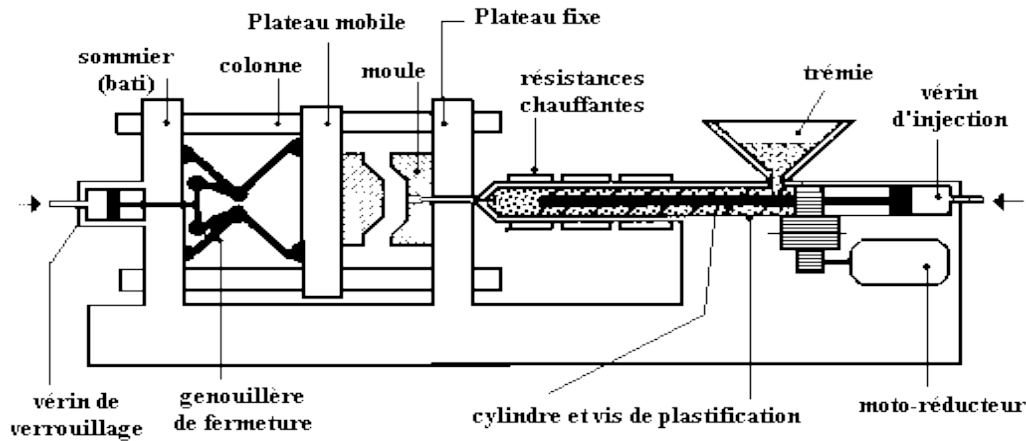


Figure II.4 : presse horizontale

Principales caractéristiques

- C'est une machine de grande envergure, 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 moule 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.2.2.2 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'elles-mêmes. [34]

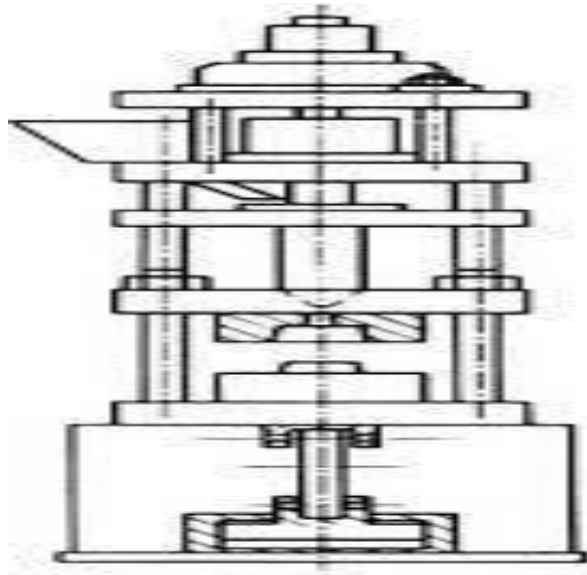


Figure II.5 : Presse verticale

II. 2 .3. Les différentes parties d'une presse à injection

II.2.3.1: Unité d'injection

Cette partie de la 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 et d'injection en un seul mécanisme. [35]

- Phase de plastification :

La vis tourne pour faire fondre et homogénéiser les granulés qui viennent de la 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. [35]

- 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. [35]

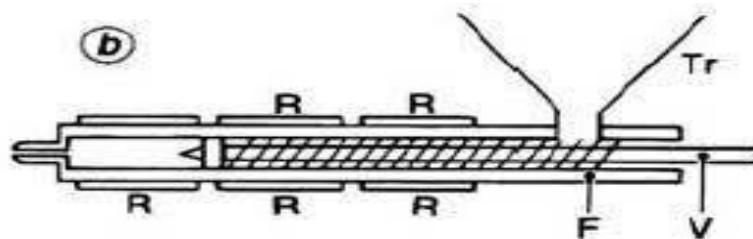


Figure II.6 : Système vis-piston

II.2.3.2: Unité de fermeture

Ce système assure les fonctions, fermeture, verrouillage, ouverture et démoulage. Le dispositif de manœuvre des plateaux porte-moule doit assurer l'ouverture, la fermeture et le verrouillage du moule avec une force suffisante pour s'opposer à l'ouverture du 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 du moule fermées pendant son remplissage sous haute pression. Ces fonctions importantes peuvent être assurées de différentes manières soit mécanique, hydraulique ou mixte [35]

II.2.3.3 Le moule

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 du moule comporte, une plaque porte empreinte femelle, quatre colonnes de guidage, une plaque semelle, une buse d'injection, et une bague de centrage, quant à la partie mobile, elle comporte, une plaque porte empreinte male, des bagues de guidage des colonnes, des tasseaux, une batterie d'éjection composée de deux plaques et d'éjecteurs cylindriques, et enfin, une plaque semelle. [35]

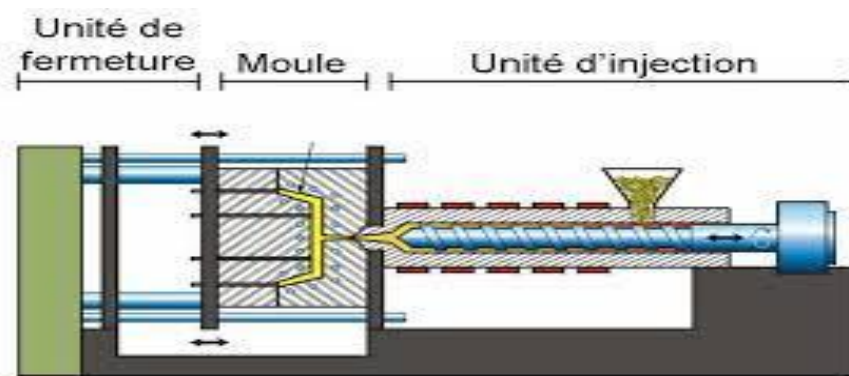


Figure II.7 : Unités d'une presse d'injection

II.2.4 Les phases de cycle d'injection

Nous représentons les étapes de l'injection dans la figure II.8. Le procédé d'injection se déroule en quatre étapes :

- La phase de dosage

Les granulés de polymère tombent depuis une trémie dans un ensemble vis-fourreau. Ils sont ensuite fondus progressivement par actions conjuguées des colliers chauffant le fourreau, du cisaillement de la matière, provoqué par la rotation de la vis et la friction des granulés (entre eux et contre les parois du fourreau et de la vis). La matière fondue est alors convoyée en avant de la vis (via un clapet anti-retour) dans l'espace créé par le recul progressif de cette dernière lors de sa rotation [36].

- La phase d'injection.

Grâce à un mouvement de translation de la vis, le polymère fondu est transféré du réservoir à un moule via des canaux. Ce mouvement de translation est généré par un vérin, à travers le clapet anti-retour qui, dans cette phase, empêche la matière de rebrousser chemin [36].

- **La phase de compactage.**

Durant le compactage, le moule est maintenu sous pression pour rester fermé, Le polymère fondu continue à être injecté pour compenser le rétrécissement, ou retrait, de la matière qui refroidit pendant que la matière est compactée par la vis [36].

- **La phase de refroidissement.**

Lorsque le polymère est entièrement figé au niveau du ou des seuils d'injection, il n'est plus nécessaire d'appliquer une pression de maintien, et la pièce continue de se refroidir jusqu'à ce qu'elle soit complètement solidifiée. La vis reprend son cycle de rotation à l'étape 1 [36].

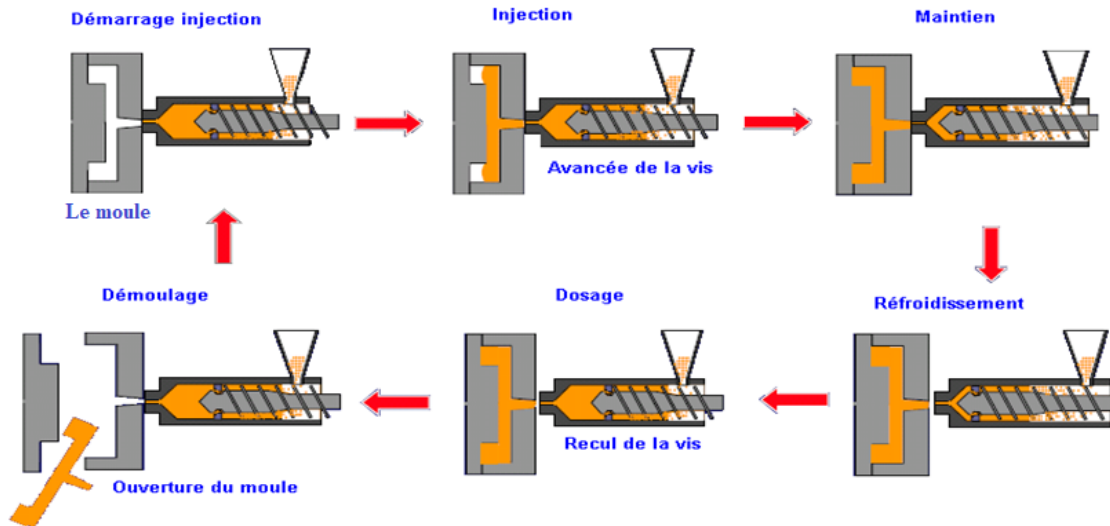


Figure II.8 : Cycle d'injection [36]

II.3 L'injection soufflage

L'injection-soufflage est un procédé de mise en forme de matériaux polymères thermoplastiques qui est utilisé pour fabriquer des corps creux, tels que des flacons et bouteilles.

Ce procédé consiste à combiner la technique d'injection avec celle du soufflage. La matière est injectée pour former une « éprouvette » (préforme) qui peut intégrer le vissage final de la pièce. La préforme peut être stockée, transportée ou directement réchauffée pour être ensuite soufflée à la forme voulue. L'éprouvette est alors enfermée dans un moule de soufflage en deux demi-coquilles ayant la forme désirée. Une extrémité de la préforme est pincée. De l'air comprimé (le plus souvent) est ensuite injecté dans la cavité par l'orifice de la préforme afin de plaquer la matière contre l'empreinte refroidie et figer la pièce dans sa forme finale [35].

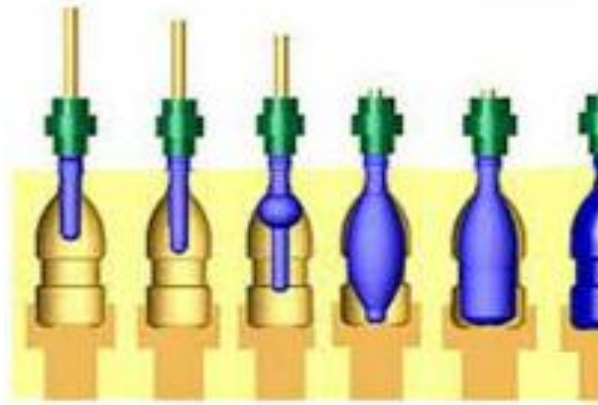


Figure II.9 : Injection soufflage [35]

II.4. l'extrusion

L'extrusion est un procédé largement employé en plasturgie, car la plupart des matières thermoplastiques sont extrudées au moins une fois lors de leur préparation. Cependant, certaines matières sont directement utilisées pour produire des objets finis.

L'extrusion est notamment couramment utilisée pour la fabrication de produits semi-finis tels que des plaques, des feuilles et des tubes[30].



Figure II.10 : Articles obtenus par extrusion

II.4.1: l'extrudeuse mono-vis

Une extrudeuse mono-vis est constituée d'une vis sans fin en rotation à l'intérieur d'un fourreau chauffé, figure II.11, ce système assure les trois fonctions suivantes.

- **Une fonction de convoyage** : le polymère descendant de la trémie sous forme de poudre ou de granulés est compacté et convoyé c'est le principe de la vis d'Archimède [30]
- **Une fonction de plastification** : le passage de l'état solide à l'état liquide est réalisé progressivement grâce à la fois à la chaleur fournie par conduction et à la dissipation d'énergie de cisaillement ; [30]

- **Une fonction de pompage** : le diamètre de la vis augmente entre la zone d'alimentation et la zone terminale de l'extrudeuse, ce qui aboutit à mettre le polymère liquide en pression pour obtenir un débit régulier dans la filière. [30]

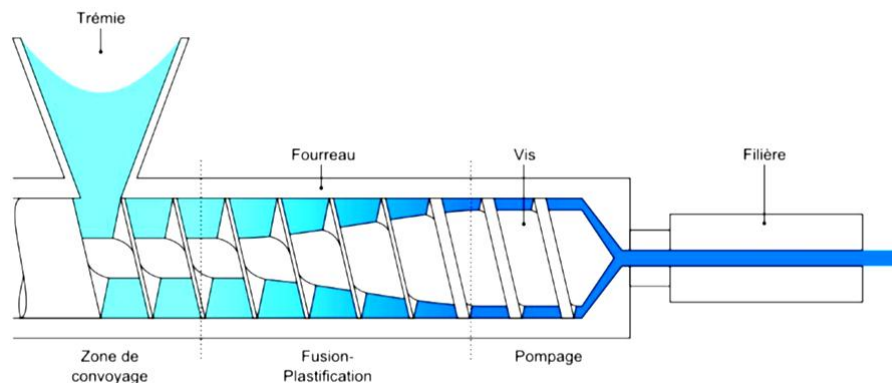


Figure II.11 : Schéma de l'extrudeuse monovis [36]

- Les lignes d'extrusion sont principalement utilisées pour :
- La fusion du polymère et sa mise en pression sont les résultantes de l'énergie mécanique, fournie par la vis et l'énergie thermique, fournie par la régulation du fourreau. [36] mettent c'est l'énergie mécanique – source de déformations visqueuses au sein du polymère – qui est largement prépondérante [36].

- **Géométrie de la vis de l'extrudeuse mono vis**

Le diamètre du corps de la vis augmente toujours de l'arrière vers l'avant de la machine, soit sur toute la longueur, soit sur une partie seulement. Dans ce dernier cas, qui est le plus courant, on peut alors distinguer trois zones liées à la géométrie de la vis :

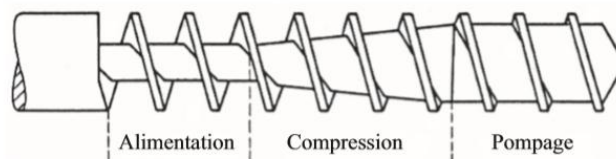


Figure II.12 : Profil de vis zones géométriques [37]

- la zone d'alimentation, où le diamètre de la vis, et donc la profondeur du chenal, est constante ;
- la zone de compression, où le diamètre augmente progressivement ;
- la zone de pompage, où le diamètre est de nouveau constant, mais plus important qu'en alimentation.

II.5 l'extrusion soufflage

Permet de réaliser des films d'épaisseur inférieure à 0,2 mm Une filière annulaire (pouvant atteindre 1,80 m de diamètre) produit une gaine dans laquelle on admet de l'air sous pression. Le gonflage permet d'étirer la matière et d'obtenir l'épaisseur désirée. [35]

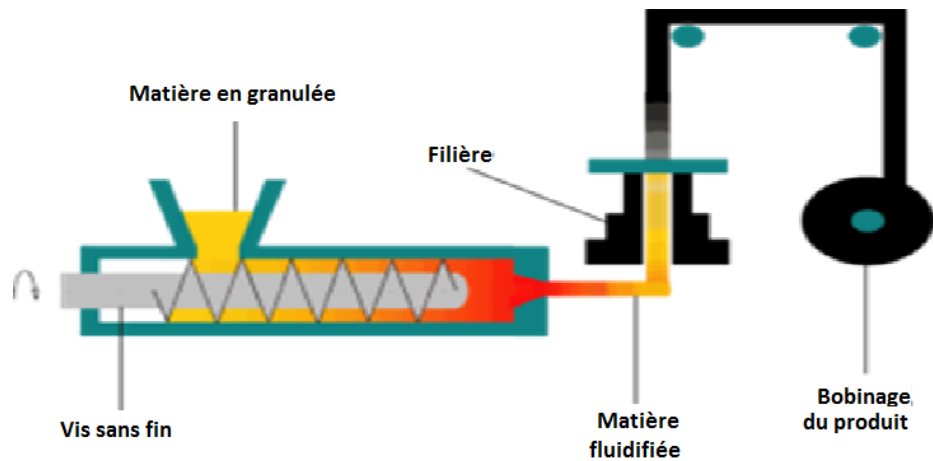


Figure II .13 : Extrusion soufflage

II .6: Le thermoformage

Le thermoformage est un procédé de transformation qui utilise des produits semi-finis tels que des feuilles et des plaques et les transforme en objets finis à large domaine d'applications comme les carrosseries, planches à voile, bateaux, vasques de luminaires, vitres blindées, panneaux publicitaires emballages de produits alimentaires et d'articles de consommation[38]



Figure II .14 : Quelque objet par thermoformage

II .6.1: Principe du thermoformage

Le thermoformage est la technique consistant à former à l'aide d'un moule, une feuille de plastique ramollie par chauffage. La feuille ainsi déformée épouse la forme du moule et en refroidissant conserve sa forme.

La technique de thermoformage utilise des produits semi-ouvrés (plaques et feuilles rigides en thermoplastiques) pour les transformer en objets tridimensionnels [35]

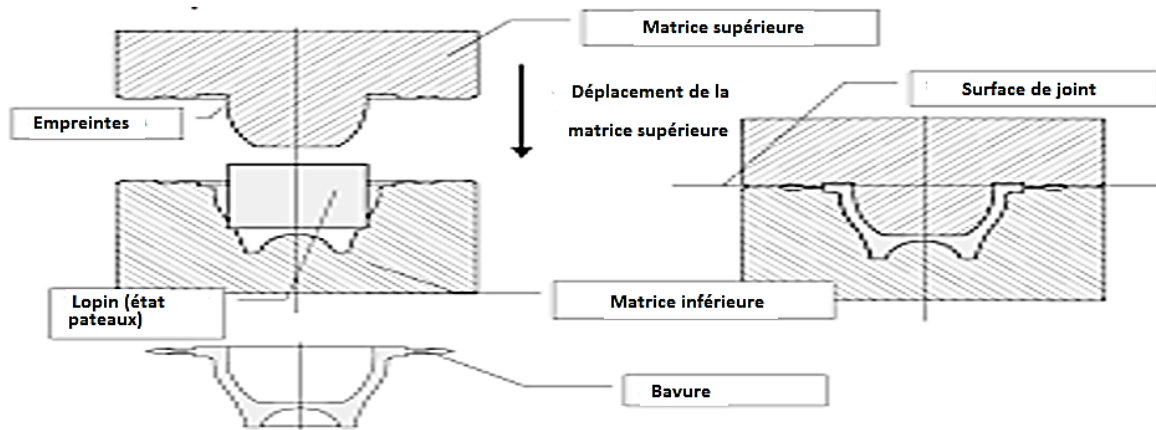


Figure II.15 : Formage par vide et formage par vide et comprimé [39]

II.6.2: Les machines de thermoformage

Une machine de thermoformage, figure II.16, est généralement constituée d'un poste de chauffage, d'un poste de formage, d'un poste de découpe et d'un poste d'empilage.

Actuellement, ces machines sont équipées d'automates ou commandés par ordinateur assurant le réglage et le suivi des principales opérations et une reproductibilité fiable du cycle de formage pour que les objets thermoformés aient la qualité requise. [35]



Figure II.16 : Machines de thermoformage [35]

II.6.3: Les phases du thermoformage

La feuille de plastique est tendue sur un cadre chargé de la maintenir et chauffée par des résistances. Une fois ramollie, le moule situé en dessous de la feuille est remonté. On crée alors une dépression entre la feuille et le moule en aspirant l'air grâce à une pompe à vide. La pression atmosphérique située au-dessus de la feuille plaque alors la feuille sur le moule. On peut résumer le cycle de mise en forme en thermoformage par les phases suivantes : [35]

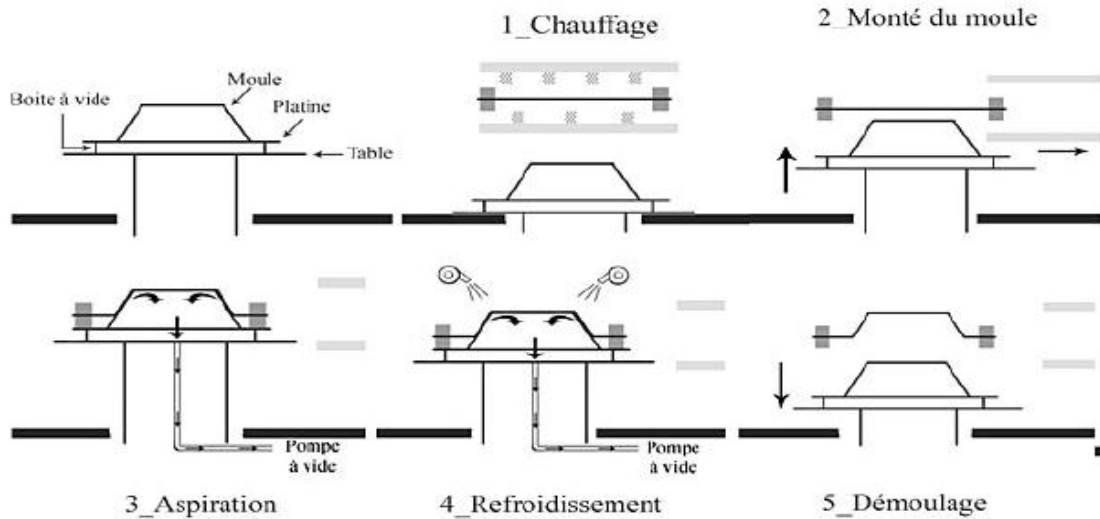


Figure II.17 : Les phases du thermoformage

- 1- Chauffage de la plaque thermoplastique préalablement fixée à l'endroit approprié de la machine.
- 2- Une fois la température de thermoformage est atteinte, retraitement des appareils de chauffage et élévation du plateau portant le moule générant ainsi une pression sur la plaque ramollie sous l'action de la chaleur
- 3- Aspiration d'air (entre la plaque et le moule) pour que la feuille adhère au moule.
- 4- Refroidissement de la plaque thermoformée et descente du moule

En fait, il existe trois grandes techniques de base pour obtenir ce résultat

- L'évacuation d'air pour que la feuille adhère au moule (Exemple ci-dessous)
- L'utilisation d'air pressurisé pour pousser la feuille contre le moule (Thermo-compression).
- L'utilisation d'une force mécanique assistée par tampon (Emboutissage à chaud).

Ces techniques peuvent être employées ensemble dans tout équipement de formage standard selon le modèle de la pièce à former.

II.7: Le roto-moulage

Le moulage par rotation est une méthode de transformation des polymères permettant la production d'articles creux avec des contenances très diversifiées (de quelques dixièmes de litre à des milliers de litres). Le moulage par rotation permet de produire des petites et des grandes séries de pièces [35].



Figure II.18 : Quelques objets obtenus par le roto-moulage

II.7.1. Le principe du roto-moulage

Le principe de cette méthode de transformation consiste à introduire de la matière (sous forme de poudre) dans un moule qu'on chauffe et qu'on introduit en double rotation. La matière fondue parvient ainsi à couvrir toutes les parois du moule et épouse alors sa forme. Le polymère le plus utilisé en Roto-moulage est le PE (90% des applications) ; PP, PC, PA, PVC sont également utilisés. Pour être roto-moulé le PE doit être sous forme poudre avec une taille des particules entre 100 à 500 μm . [35]

II.7.2. Machines de roto-moulage

Un poste de roto-moulage doit assurer principalement la rotation du moule autour de deux axes perpendiculaires. Le temps de cycle est important en comparaison aux autres procédés (15-40 minutes par cycle) ; donc ces postes ont une faible cadence de production (figure II.19) ci-dessus [35].



Figure II.19 : Exemple de poste de roto-moulage [40]

II.7.3: Les phases du roto-moulage

Le procédé est basé sur la rotation d'un moule chauffé dans un four sur deux axes perpendiculaires. Durant la rotation, tous les points de la surface interne du moule occupent

toutes les positions de l'espace et sont périodiquement en contact avec le produit. Le procédé comprend 4 phases principales [35] :

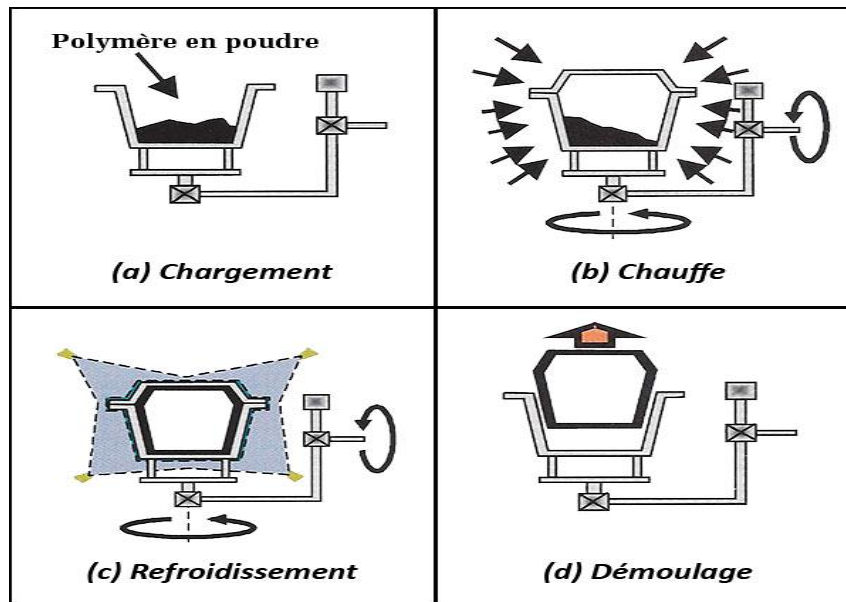


Figure II .20 : Les phases du roto-moulage

II .8. Le calandrage

Le calandrage est un procédé de fabrication en continu de films de thermoplastiques par laminage de la matière entre plusieurs cylindres parallèles.

Ces cylindres sont chauffés et entraînés mécaniquement et forment la machine de calandrage qu'on appelle : Calandre. Leur nombre se situe généralement entre 3 et 6 cylindres. La feuille obtenue est étirée puis refroidie avant d'être enroulée [35].



Figure II .21 : Articles obtenus par le calandrage

II .8.1. Principe du calandrage

La matière à calandrer préalablement malaxée et chauffée passe dans la calandre pour être laminée par les cylindres chauffés et tournants. Toutes les bulles d'air sont alors chassées de la matière laminée. Un détecteur de particules métalliques qui agit par séparation magnétique est prévu à l'entrée de la matière.

Une graineuse et rouleaux décolleurs peuvent être prévus à la sortie de la matière afin de modifier l'aspect de la surface de la feuille.

Un convoyeur de stabilisation sert à transporter et étier le film laminé à la sortie de la calandre.

Des tambours refroidissent ce film par action de contact. Une jauge d'épaisseur est également récente sur la chaîne pour mesurer l'épaisseur du film calandré. A la sortie de la chaîne, des coupe-lisières sont prévues pour la finition par découpage des bords de la feuille à enrouler et enfin, une enrouleuse sert à bobiner le film à stocker. [35]

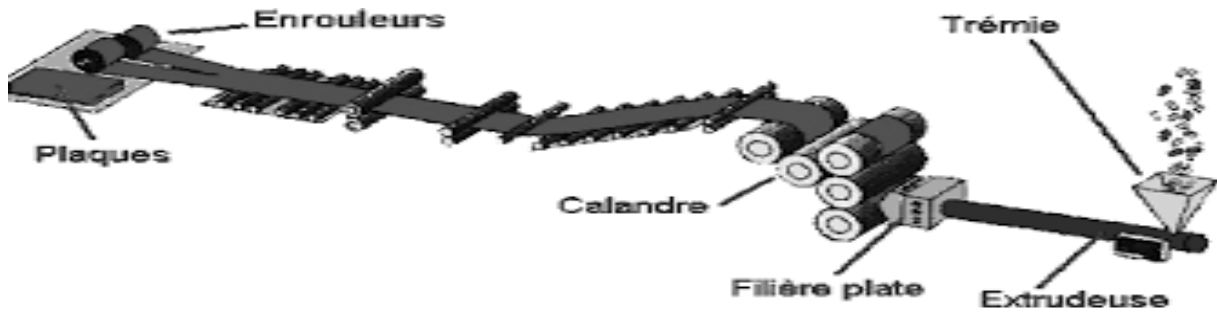
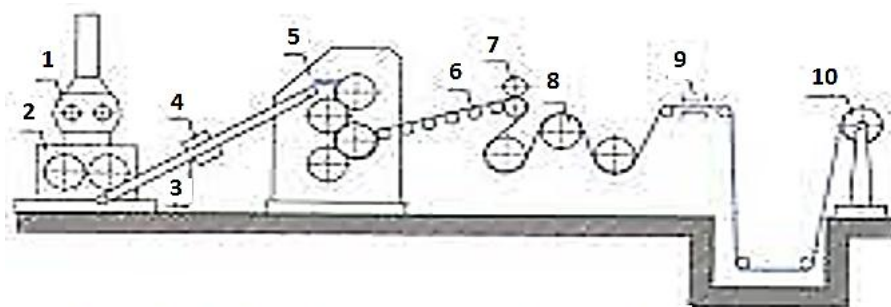


Figure II .22 : Schéma de principe d'une chaîne calandrage [35]

II.8.2. Les chaînes de calandrage

Suivant la nature du matériau à calandrer on distingue deux types de chaînes de calandrage :

- Une chaîne de calandrage-alimentation par mélangeur interne (technique généralement utilisée dans le cas du PVC).
- Une chaîne de calandrage-alimentation par extrudeuse [35]



(a) chaîne de calandrage-alimentation par mélangeur interne

- | | |
|--------------------------|---------------------------------------|
| 1. malaxeur interne | 6. transporteur |
| 2. mélangeur à cylindres | 7. cylindres graveurs |
| 3. transporteur | 8. tambours de refroidissement |
| 4. séparateur magnétique | 9. dispositif de paisillage des bords |
| 5. calandre en "Z" | 10. enrouleur |

Figure II .23: Chaîne de calandrage alimentée par mélangeur interne [35]

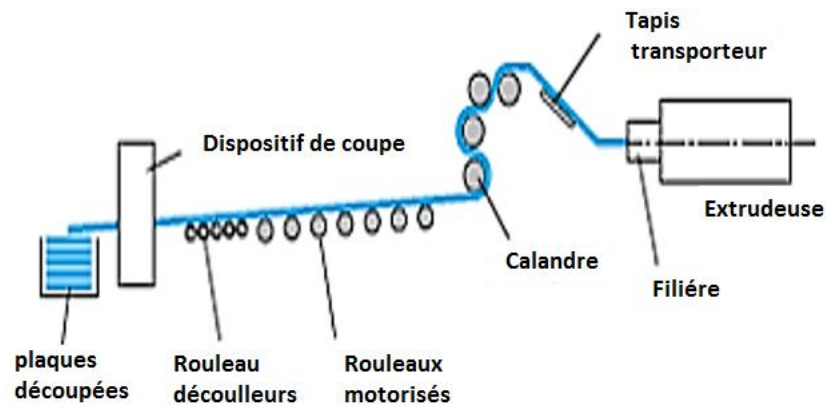


Figure II.24:Chaines de calandrage alimentées par extrudeuse

II.9 Conclusion

Les procédés de mise en œuvre des matières plastiques cités précédemment nous permettent l'obtention des produits finis ou semis finis avec une cadence journalière importante. De plus, pour changer la forme d'un produit il suffit de changer le moule ou la filière, ce qui permet aux domaines qui utilisent cette matière de développer leurs produits avec des nouvelles formes et des designs attirants.

Dans notre travail, nous avons utilisé le procédé d'extrusion monovis pour le mélangeage et l'homogénéisation des composants du mélange et le procédé d'injection plastique pour l'obtention d'éprouvettes normalisées à caractériser et à analyser.

Chapitre III

Elaboration et caractérisation des mélanges

Chapitre III : Elaboration et caractérisation des mélanges

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons aborder le processus d'élaboration de mélanges de polymères dont les composants sont le polyéthylène à haute densité PEHD et le polyéthylène à basse densité PEBD.

Nous présentons les différentes techniques de caractérisation physico-chimique, mécaniques et morphologiques que nous avons utilisé dans notre étude.

III.2 Elaboration des mélanges PEHD/PEBD**III.2.1 Présentation des matériaux d'étude**

Les deux polymères utilisés pour les différentes formulations sont fournis par l'entreprise nationale SISCOPLAST, Draa El Mizan. Le polyéthylène haute densité (PEHD) et le polyéthylène basse densité (PEBD) recyclé de l'industrie

Ces deux polymères sont produits par SABIC (pour PEHD) et ALCUDIA (pour le PEBD). Ces deux polymères se présentent sous forme de granulés blancs, comme illustré dans la figure III.1.

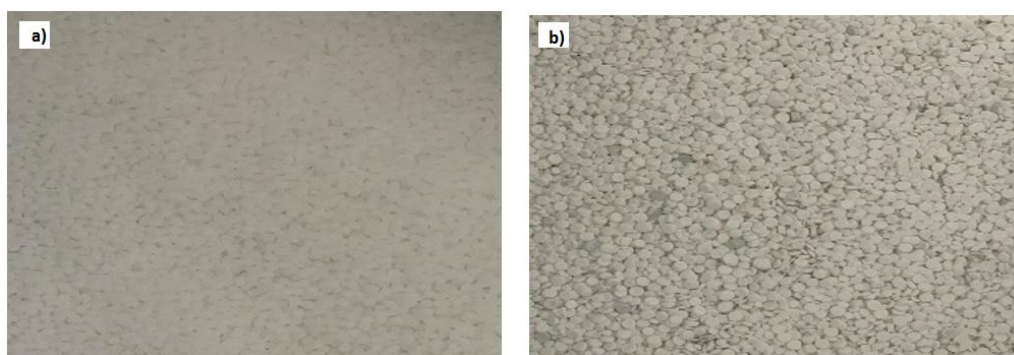


Figure III.1 : Aspect des polymères utilisés
a) Granulés de PEHD et b) Granulés de PEBD recyclé

III.2.2 : Elaboration des mélanges PEHD/PEBD

Les différentes étapes suivies pour la réalisation des mélanges sont présentées ci-dessous :

III.2.2.1 : Préparations des mélanges

Les mélanges préparés avec différents pourcentages massiques sont récapitulés dans les tableaux suivants :

Tableau III.1 : Les différentes formulations des mélanges (PEHD/PEBD)

Différents mélanges	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
PEHD(%)	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
PEBD(%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

La figure III.2 montre la pesée des composants des mélanges.



Figure III.2 : Pesée des composants du mélange (PEHD/PEBD).

III.2.2.2 : Extrusion des mélanges

Les mélanges sont acheminés à travers l'extrudeuse afin d'assurer une répartition uniforme de la phase minoritaire dans la matrice (homogénéisation). Les mélanges sortent de l'extrudeuse sous forme de longues tiges appelées "Joncs".

Les paramètres d'extrusion utilisés sont les suivants : une cadence (vitesse d'étirage) de 15,34 m/min et un débit de 92 g/min.

Les températures de consignes de l'extrudeuse augmentent en se rapprochant de la tête de l'extrudeuse (sortie du produit), ces températures sont :

Tableau III.2. Températures de consignes de l'extrusion

Zones	Convoyage	fusion	Pompage	Filière
Température	T1=150°C	T2=160°C	T3=170°C	T4=190°C

La figure III.3, montre le jonc du mélange PEHD/PEBD à la sortie de la filière de l'extrudeuse.



Figure III.3 : La sortie de la matière de la filière de l'extrudeuse.

III.2.2.3 Etape du broyage des joncs

Les joncs obtenus sont refroidis et découpés en pailles puis passés dans un broyeur afin de les granuler.



Figure III.4 : Les joncs des mélanges PEHD/PEBD placés dans le broyeur

III.2.2.4 Injection des mélanges PEHD/PEBD

Après la granulation des joncs des mélanges, nous les passons dans la presse à injection afin d'obtenir des éprouvettes normalisées qui seront ensuite caractérisées par différentes techniques.

L'injection des éprouvettes se fait à l'aide d'une presse à injection, comme illustré dans la figure III.5 ci-dessous.



Figure III.5 : Presse à injection

a) La presse à injection et b) le moule d'éprouvettes normalisées

Lors du processus d'injection, le gradient de température augmente progressivement de l'alimentation jusqu'à la buse d'injection. La pression est ajustée pour garantir le meilleur remplissage possible du moule, qui permet de mouler une éprouvette de type barreau ayant des dimensions de 127 x 12,7 x 12,7 mm³, une éprouvette de type haltère, ainsi qu'un disque d'une épaisseur de 3 mm et d'un diamètre de 50mm.

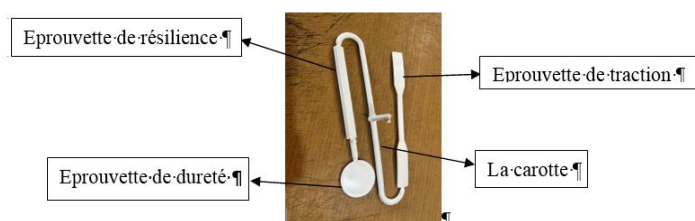


Figure III.6 : Eprouvettes obtenues par injection

Paramètres de la presse à injection

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

Tableau III.3 : les différents paramètres de la presse à injection

Paramètre	Valeur
Temps de cycle	38 s
Retrait/avance de chariot	2 s
Temps d'injection	2.77 s
Temps de maintien	2 s
Temps de refroidissement	9.85 s
Temps de pose	8 s – 1 s
Température de moule	18°C
Température de l'eau	20°C
Force de fermeture	70 tonne
Vitesse de rotation de la vis	300 trs/min
Pression d'injection	40 bars
Pression de maintien	110 bars
Contre pression	5 bars
Vitesse de rechargement de la vis	3 trs/min
Vitesse d'ouverture de moule	3 trs/min
Vitesse de fermeture de moule	2.5 trs/min
Vitesse d'injection	3 trs/min
Vitesse d'éjection	2.5 trs/min
Vitesse retour d'éjecteur	5 trs/min

Les températures de la buse d'injection sont données pour les premiers mélanges : (100/0%), (90/10%), (80/20%), (70/30%) : (60/40%), (50/50%) (PEHD/PEBD),

Zone de l'injection	Zone1	Zone2	Zone3
Température	180°C	190°C	200°C

Pour les autres mélanges ; (40/60%), (30/70%), (20/80%) : (10/70%), (0/100%) (PEHD/PEBD) les températures de consignes de l'injection sont :

Zone de l'injection	Zone1	Zone2	Zone3
Température	180°C	170°C	160°C

III.3 Caractérisation des mélanges (PEHD/PEBD) élaborés

Après l'élaboration de nos mélanges (PEHD/PEBD) par procédés d'extrusion puis d'injection, nous allons les caractériser par plusieurs techniques. La caractérisation physico-

chimique que nous avons menée consiste à la détermination de la densité des mélanges et de l'indices de fluidité des polymères de bases ainsi que de leurs mélanges. La caractérisation mécanique s'est faite via l'essai de traction et l'essai de résilience. Des observations au microscope électronique à balayage des faciès de rupture en résilience ont permis de voir la morphologie des mélanges.

III.3.1 La caractérisation Physico-chimique des mélanges PEHD/PEBD

Nous avons effectué un test de densité et un test d'indice de fluidité.

III.3.1.1. Le test de densité

Le test de densité d'un solide consiste à mesurer la différence de poids de ce solide entre deux pesées : l'un à l'air et l'autre dans un liquide dont la densité est connue, tel que l'eau.

La densité du solide est ensuite calculée à partir de cette différence de poids.

Ce test a été appliqué aux 11 mélanges afin de déterminer leurs densités volumiques respectives.

La figure III.7 montre le déroulement du test de densité.

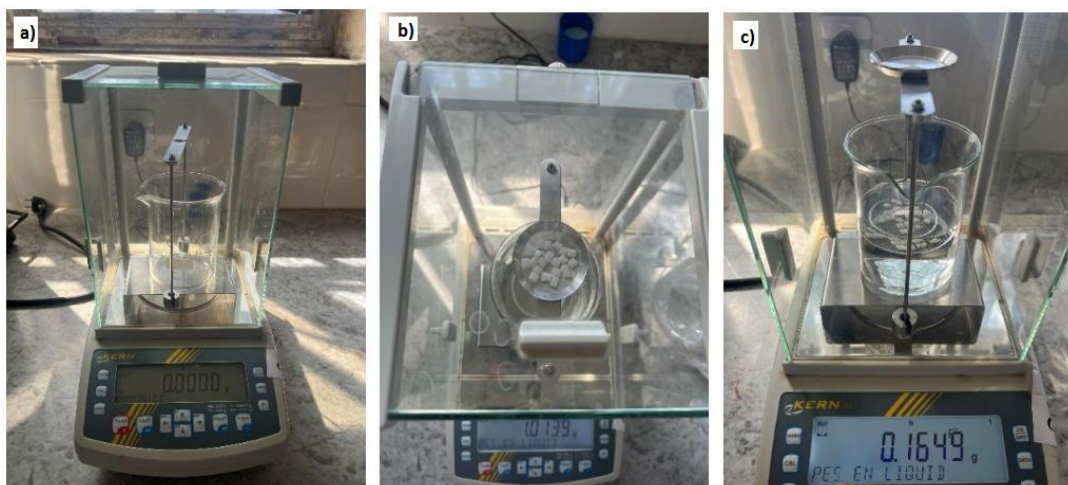


Figure III.7 : Test de densité

a) Balance analytique, b) Pesée du solide à l'air et c) Pesée du solide dans l'éthanol
L'Appareillage et produits utilisés pour le test de densité sont cités ci- dessous :

- Balance analytique 220g d'une précision de 0,1mg conçu pour le mesurage de la densité.
- Kit de densité
- Thermomètre-10 à 100°C
- Bécher pour liquide d'immersion
- Liquide d'immersion : Ethanol

III.3.1.2 l'indice de fluidité

L'indice de fluidité, le Melt Flow Index (MFI), également connu sous les noms de Melt Flow Rate (MFR) et Melt Index (MI), est une mesure de la masse écoulee à travers une filière d'un matériau thermoplastique à l'état fondu, c'est-à-dire à un état fluide ou déformable. Cette

mesure est effectuée dans des conditions spécifiques de température et de pression. Le MFI, ou indice de fluidité, fournit des informations sur les caractéristiques de transformation du matériau, notamment sa capacité à être moulé ou extrudé.

a) Principe de la détermination de l'indice de fluidité

Indice de fluidité consiste à évaluer la masse de matière plastique qui traverse une filière spécifique sous l'effet d'une pression déterminée, pendant une durée et à une température fixée.

b) Appareillage

L'appareil est principalement composé d'une extrudeuse (plastomère) fonctionnant à une température fixe. Sa forme générale est illustrée dans la figure suivante :

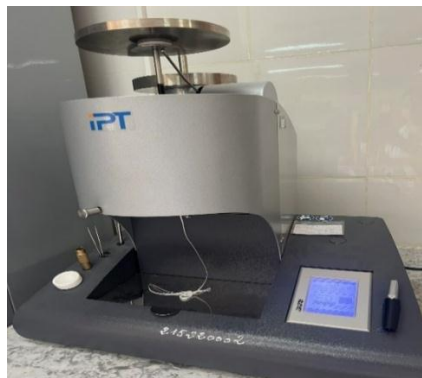


Figure III.8 : Le Plastomètre

Le thermoplastique est placé à l'intérieur d'un cylindre vertical
L'appareillage comporte les parties principales suivants :

- Un cylindre
- Un piston
- Une filière
- Charges de 2,16kg et 5kg
- Balance avec une erreur maximale admissible de $\pm 1\text{mg}$

c) Calcul de l'indice de fluidité

L'IF est calculé par la forme suivante :

$$\text{IF}(T,M) = \frac{M_{\text{moy}} \times S}{t_{\text{moy}}} \text{ g/10min} \quad (\text{III.1})$$

Avec :

T : Température d'essai (190°C)

M : Masse réelle (2.16Kg)

M_{moy} : Masse moyenne des extrudât en gamme

T_{moy} : Intervalle de temps entre deux coup d'extrudât

S : Temps de référence en sec (600 sec)

Cette équation permet de calculer le MFR en fonction des paramètres de température, de charge, de masse et de temps.

III.3.2 La caractérisation mécanique des mélanges PEHD/PEBD

La caractérisation mécanique consiste en l'essai de traction et l'essai de résilience.

III.3.2.1. Essais de traction

L'essai de traction permet de déterminer des caractéristiques normalisées des matériaux, qui sont souvent requises dans les cahiers des charges. Cela comprend la limite d'élasticité, la charge maximale supportée, l'allongement à la rupture, et permet également de déduire la relation rationnelle entre la contrainte appliquée et la déformation subie par le matériau.

a) Principe de l'essai

L'essai consiste à placer une éprouvette du matériau entre deux mors de la machine de traction, on applique une contrainte jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La température de l'essai est la température ambiante de 23°C, la vitesse de l'essai est de 25mm/min.

b) Présentation des éprouvettes normalisées

L'éprouvette comprend toujours, entre des repères séparés par une distance l_0 , une section constante S . La forme de l'éprouvette est prismatique. Les extrémités, ou têtes, de l'éprouvette ont une section supérieure à S , ce qui permet de les fixer sur la machine d'essai.

Nos éprouvettes élaborées pour l'essai de traction sont selon la norme (NF EN ISO 527- 2) comme le montre la figure III.9.

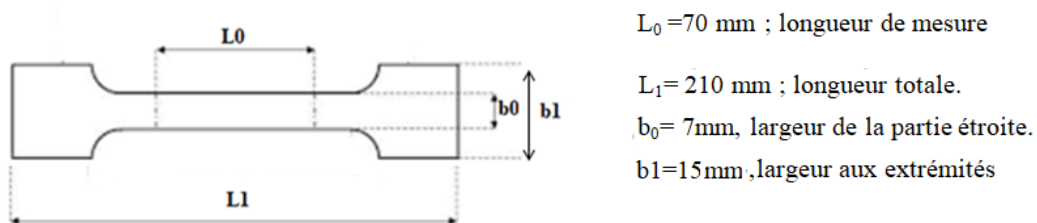


Figure III.9: Eprouvette de traction NF EN ISO 527 – 2

Avant la rupture de l'éprouvette, celle-ci passe par des étapes comme illustré sur la figure III.10.

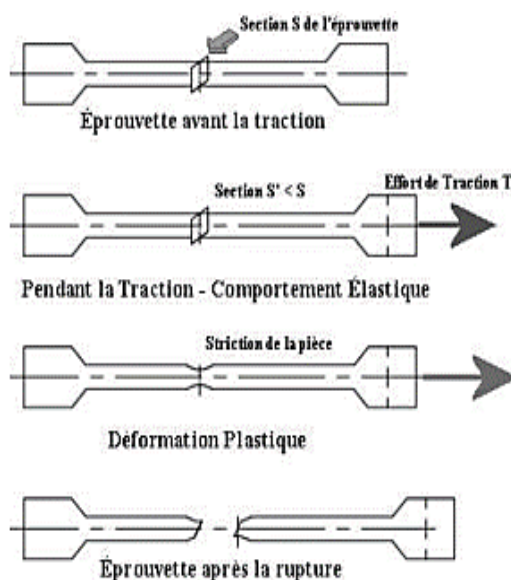


Figure III.10 : Les étapes de l'essai de traction

c) Présentation la machine de traction

Une machine de traction se compose d'un bâti rigide comportant une traverse fixe à laquelle l'une des extrémités de l'éprouvette est solidement attachée. L'autre extrémité de l'éprouvette est fixée à une traverse mobile. Le déplacement de cette traverse mobile peut être assuré soit par une commande hydraulique, soit par des vis sans fin. Pendant l'essai, la charge exercée sur l'éprouvette est mesurée à l'aide d'un dynamomètre, tandis que l'allongement subi par l'éprouvette est mesuré au moyen d'un extensomètre. Ces mesures permettent d'obtenir un enregistrement de la courbe brute de traction, représentant l'évolution de la force appliquée par rapport à l'allongement du matériau.



Figure III.11 : Déroulement de l'essai de traction

La machine de traction utilisée dans notre caractérisation, est une ZWICK/Z010, se trouvant à l'unité de recherche URMPE Bouterdes.

III.3.2.2. Essai de résilience

La résilience, généralement symbolisée par la lettre K, représente la capacité d'un matériau à absorber les chocs sans se rompre. Cette propriété est cruciale dans de nombreux domaines où la résistance aux impacts est essentielle, comme dans l'ingénierie des matériaux et les constructions.

La mesure de la résilience est effectuée à l'aide de machines d'essai spécifiques, notamment les machines Charpy et Izod.

a) Eprouvettes utilisées

L'éprouvette utilisée dans notre étude, est selon la norme NE3.03.070, un barreau de section carrée (12.7mm x12.7mm) comprenant en son milieu une entaille de forme ∇ à 45°, d'une épaisseur 2.5mm. et de longueur 63.5mm.

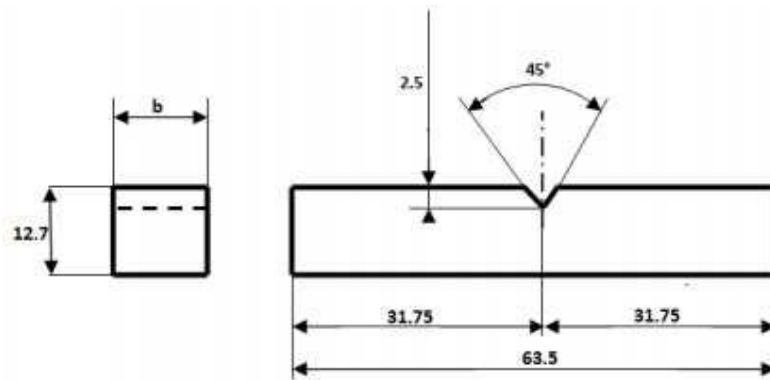


Figure III.12 : Eprouvette utilisée pour l'essai de résilience

b) Présentation de la machine

La température du déroulement du test est la température ambiante, soit 23°C. Les essais ont été réalisés à l'entreprise électro industrie d'Azazga, sur un mouton de Charpy de type ZWICK 5102.

L'appareil Charpy est composé d'un couteau fixé sur un marteau qui oscille dans un plan vertical autour d'un axe. Lors de l'essai, une partie de l'énergie accumulée dans la chute du pendule est utilisée pour briser l'éprouvette. Le centre de gravité du pendule est généralement très proche de l'arête du couteau du pendule.



Figure III.13 : Le mouton Charpy

c) Principe de fonctionnement

L'essai consiste à briser d'un seul coup de mouton-pendule une éprouvette qui est entaillée en son milieu et repose sur deux appuis. On mesure l'énergie absorbée, exprimée en joules (J), à partir de laquelle on calcule la résilience de la rupture de l'éprouvette, exprimée en joules par centimètre carré (J/cm²).

III.3.3 Caractérisation morphologiques des mélanges PEHD/PEBD

La caractérisation morphologique de nos mélanges consiste en l'observation au microscope électronique à balayage (MEB).

La microscopie électronique à balayage (MEB) permet d'effectuer des analyses chimiques sur des volumes de matière extrêmement petits, de l'ordre de quelques micromètres cubes. Il permet également d'obtenir des images révélant la distribution spatiale des éléments, à travers des images en rayons X ou en électro diffusion.

a) Principe de MEB

Un faisceau très fin d'électrons, monocinétique, balaie la surface d'un échantillon où se produisent des interactions détectées par un capteur qui contrôle la brillance d'un oscilloscope cathodique dont le balayage est synchronisé avec celui du faisceau d'électrons, on peut ainsi comparer le MEB à un système de télévision en circuit fermé.



Figure III.14 : Représentation du microscope électronique à balayage

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons élaboré des éprouvettes en suivant les étapes telle l'extrusion et l'injection. La caractérisation par les différents techniques nous permettra d'analyser le comportement physico-chimique, mécanique et morphologique des différents mélanges et d'obtenir des résultats afin de les étudier.

Chapitre IV

Résultats et discussions

Chapitre IV Résultats et discussions

Introduction

Nos allons présenter l'essentiel de nos résultats de la caractérisation physico-chimique et de la caractérisation mécaniques.

IV.1. Résultats de la caractérisation physico- chimique

IV.1.1. Résultats du test de densité

Dans le tableau ci-dessous, on note les résultats de densité du PEHD, du PEBD ainsi que pour tous les mélanges PEHD/ PEBD ainsi élaborés.

Tableau IV.1 : Valeurs de la densité des mélanges PEHD/PEBD

Mélanges PEHD/PEBD	(100/0)	(90/10)	(80/20)	(70/30)	(60/40)	(50/50)	(40/60)	(30/70)	(20/80)	(10/90)	(0/100)
Densité	0,938	0,937	0,937	0,937	0,935	0,934	0,933	0,932	0,93	0,928	0,926

A partir des valeurs de densité portées dans le tableau IV.1 nous traçons la courbe de variation de la densité en fonction du taux de PEBD dans le mélange PEHD/PEBD, ainsi que l'histogramme correspondant.

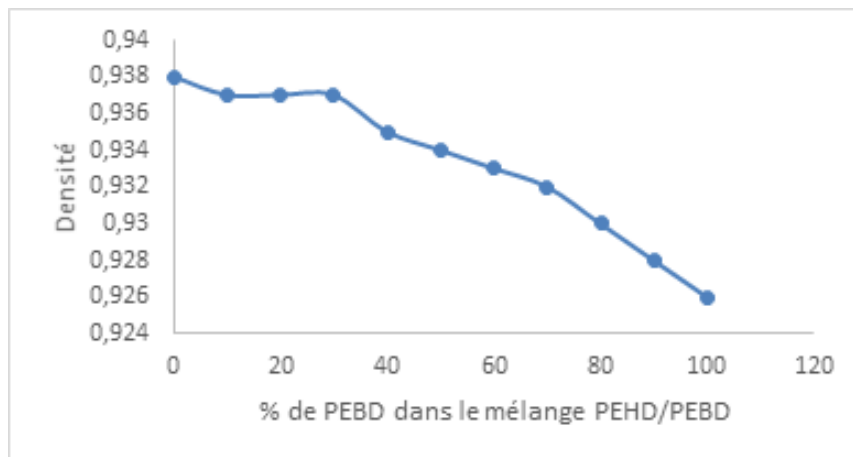


Figure IV.1 : Variation de la densité des mélanges PEHD/PEBD en fonction du taux de PEBD

Selon la figure IV.1, nous remarquons que la densité des mélanges PEHD/PEBD diminue avec l'augmentation du taux de PEBD dans le mélange.

Le PEHD a une microstructure semi cristalline avec une densité de 0,938, plus importante que celle du PEBD, qui a une structure amorphe (lâche) dont la densité est évaluée à 0,926.

Plus la quantité de PEBD augmente, dans le mélange, plus la quantité de branchements sur la chaîne principale du PEHD augmente, donc le volume du mélange augmente, ce qui implique la diminution de la densité (masse volumique).

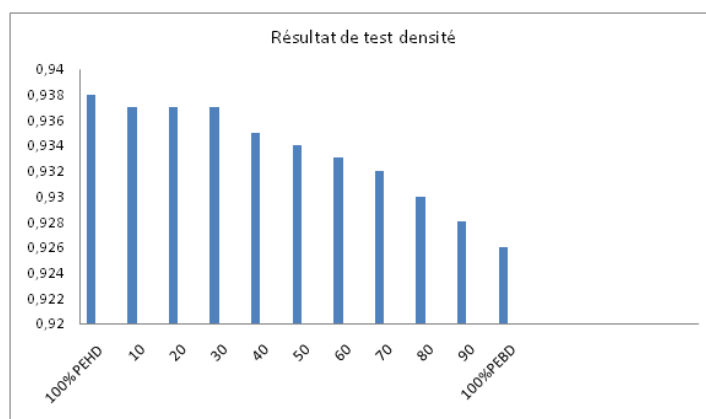


Figure IV.2 : Histogramme de la densité des mélanges PEHD/PEBD

Sur la figure IV.2, nous remarquons que les compositions 10, 20 et 30% PEBD dans le mélange, ont la même valeur de densité. A partir de 40% de PEBD dans le mélange PEHD/PEBD, la densité est décroissante, jusqu'à la valeur de densité du PEBD.

IV.1.2. Résultats del'indice de fluidité

Sur le tableau IV.2, nous portons les valeurs de l'indice de fluidité (MFI) de nos mélanges (PEHD/PEBD)

Tableau IV.2 : Valeurs de l'indice de fluidité des mélanges PEHD/PEBD

Mélanges (PEHD/PEBD)	100/0	90/10	80/20	70/30	60/40	50/50	40/60	30/70	20/80	10/90	0/100
MFI (g/10min)	14,208	9,513	7,024	4,228	2,150	2,077	1,726	0,937	0,625	0,456	0,300

A partir des valeurs de l'indice de fluidité tirées du tableau IV.2, nous traçons la figure IV.3, courbe de variation de l'indice de fluidité en fonction de la variation de la concentration du PEBD dans le mélange PEHD/PEBD.

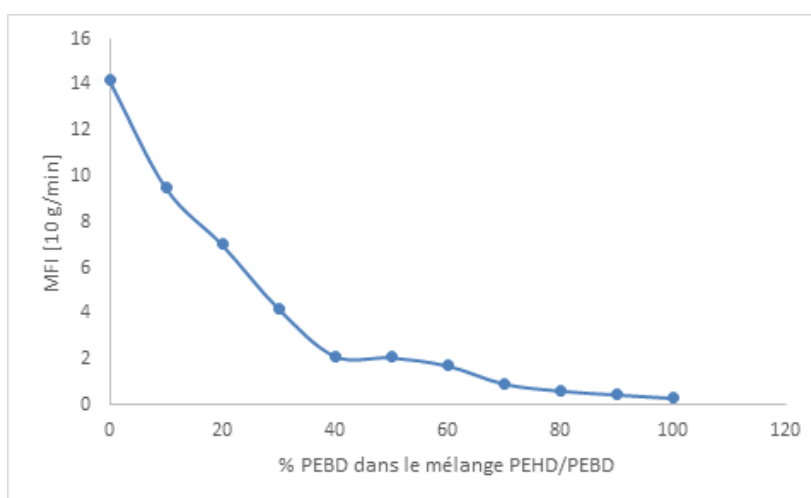


Figure IV.3 : Variation de l'indice de fluidité du mélange PEHD/PEBD en fonction du PEBD

La courbe présente trois variations :

- De la concentration 0% PEBD (100%PEHD) jusqu'au mélange (40/60) PEHD/PEBD, la fonction indice de fluidité est décroissante avec l'augmentation de la

concentration du PEBD dans le mélange. La vitesse de variation de l'indice de fluidité dans ce domaine (pente de la courbe dans cet interval) est de $V_1 = -0,29$ (g/10min)/10% de PEBD.

- De la concentration 40% PEBD jusqu'à 60 PEBD, la fonction indice de fluidité est presque constante, avec une vitesse $V_2 = -0,021$ (g/10min)/10% de PEBD, soit, en valeur absolue, 13 fois plus faible que V_1 , vitesse de variation de l'indice de fluidité du premier domaine.

- De la concentration 60 % PEBD jusqu'à 100% PEBD, l'indice de fluidité est décroissant avec une vitesse $V_3 = -0,033$ (g/10min)/10% de PEBD. Cette vitesse de variation de l'indice de fluidité est plus faible (en valeur absolue) que V_1 (9 fois), est 1,5 fois plus faible V_2 .

Remarque :

La valeur de l'indice de fluidité du PEHD est 47 fois plus grande que celle du PEBD, l'ajout du PEBD au PEHD a diminué l'indice de fluidité de ce dernier progressivement jusqu'à atteindre la valeur la plus faible qui correspond à l'indice de fluidité du PEBD.

IV.2. Résultats de la caractérisation mécanique

La caractérisation mécanique que nous avons menée consiste en l'essai de traction et l'essai de résilience (résistance au choc de nos matériaux).

IV.2.1. Résultats de l'essai de traction

Dans ce qui suit nous donnons les courbes contraintes déformations du PEHD, PEBD ainsi que leurs mélanges, nous déterminons les caractéristiques mécaniques usuelles (contrainte maximale (σ_{max}), contrainte à la rupture (σ_{rup}), déformation ($\epsilon_{\sigma_{max}}$) et le module d'élasticité).

IV.2.1.1. Courbes contraintes déformation

Cinq éprouvettes de chaque mélange ont été testées, selon la norme (NF EN ISO 527- 2) dans le laboratoire à la température ambiante 23°C.

Nous présentons ci-dessous les courbes contraintes –déformations de nos mélanges.

➤ *Courbe contrainte – déformation du PEHD*

La figure IV.4 présente les courbes contraintes déformations de cinq éprouvettes de PEHD.

Les courbes sont caractéristiques du comportement de polymères élastoviscoplastique avec seuil d'écoulement, un plateau plastique assez important, ce comportement définit les polymères résistants.

Les éprouvettes 1 et 2 ont été étirées avec une vitesse de déformation de 5mm/min, leurs déformations ont dépassé les 350%.

Les éprouvettes 3,4 et 5 ont été étirées avec une vitesse de déformation de 25 mm/min, leurs déformations moyennes sont de 85,20 %.

Dans la suite des essais nous avons opté pour la vitesse de déformation de 25mm/min.

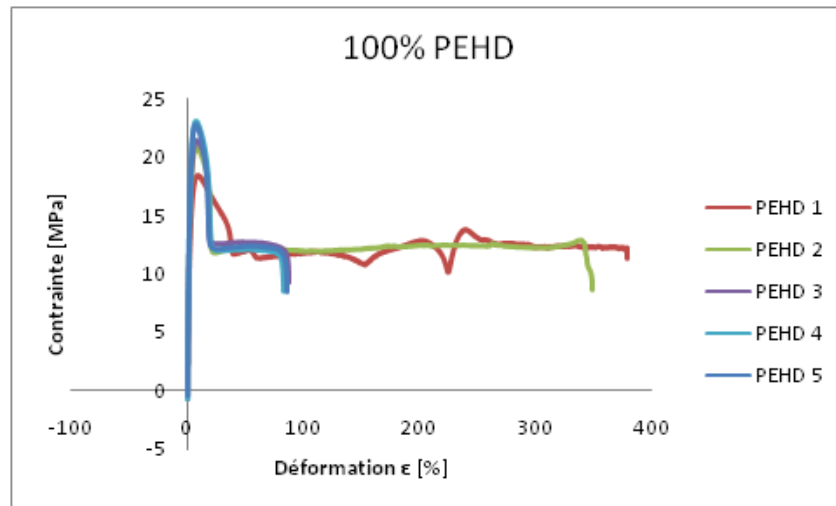


Figure IV.4 : Courbe contrainte –déformation du PEHD

➤ *Courbe contrainte – déformation du PEBD*

La figure IV.5 présente la courbe contrainte –déformation du polymère PEBD.

Cinq éprouvettes de PEBD ont été testées à la vitesse de 25mm/min.

Les courbes représentées sur la figure IV.5 sont typique d'un polymère élasto-viscoplastique sans seuil d'écoulement, comportement des polymères résilients.

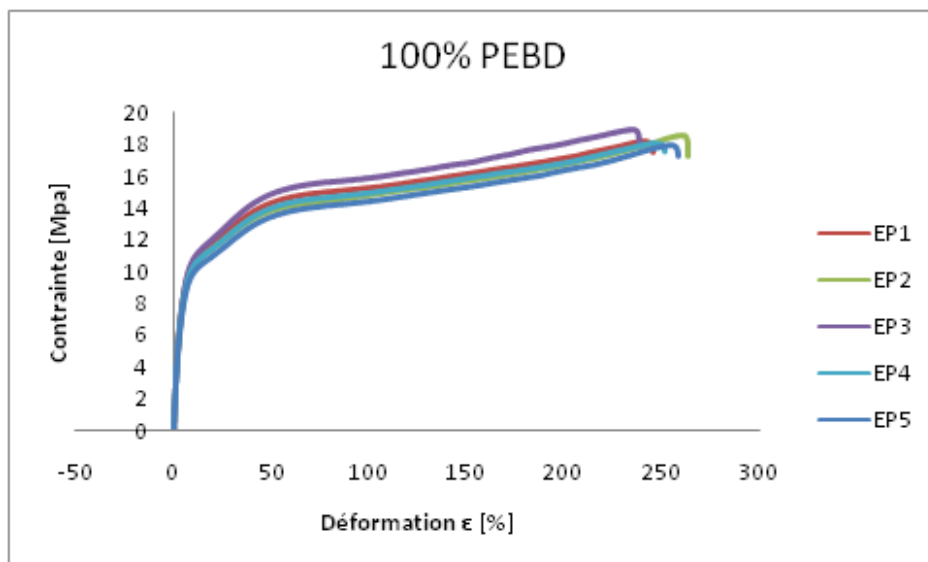


Figure IV.5 : Courbe contrainte –déformation du PEBD

➤ *Courbes contraintes –Déformation des mélanges PEHD/PEBD*

Les courbes représentées sur la figure IV.6, ont des allures de comportement mécanique, allant du comportement de la courbe a), courbe du mélange PEHD/PEBD (90/10) qui est similaire à celle du PEHD (figure IV.4), cette allure se retrouve aussi dans les courbes des mélanges (b), c), d) e) et f)).

Le comportement mécanique des mélanges PEHD/PEBD, a gardé la même allure que celle du comportement mécanique du PEHD, jusqu'au mélange (40/60), toutes ces courbes ont un seuil d'écoulement avant le plateau plastique. A partir de la concentration (40/60), l'allure des courbes contrainte déformation change et devient ressemblant à celle du PEBD (sans seuil d'écoulement).

Une transition de comportement mécanique a eu lieu pour nos mélanges au environ de (40/60).

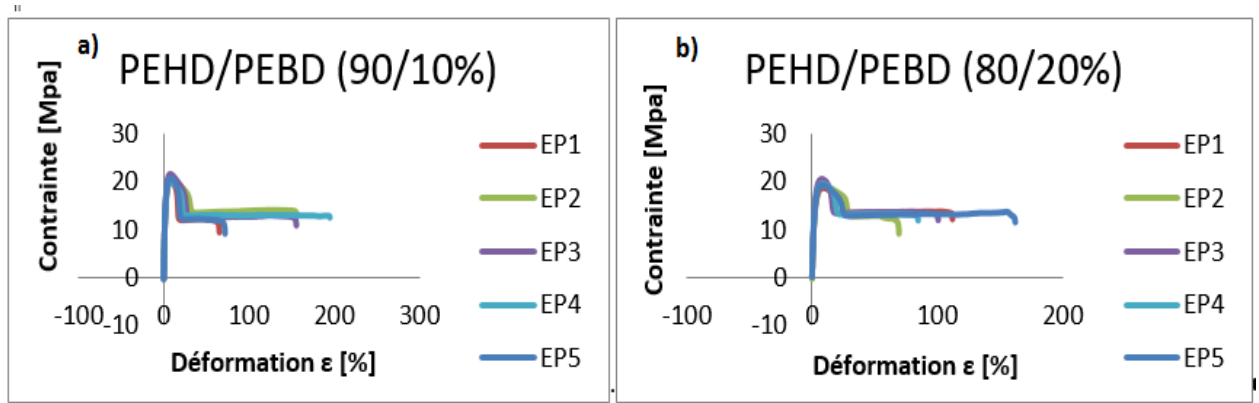


Figure IV.6 : Courbe contrainte –déformation des mélanges ; a)(90/10%) et b)(80/20%)

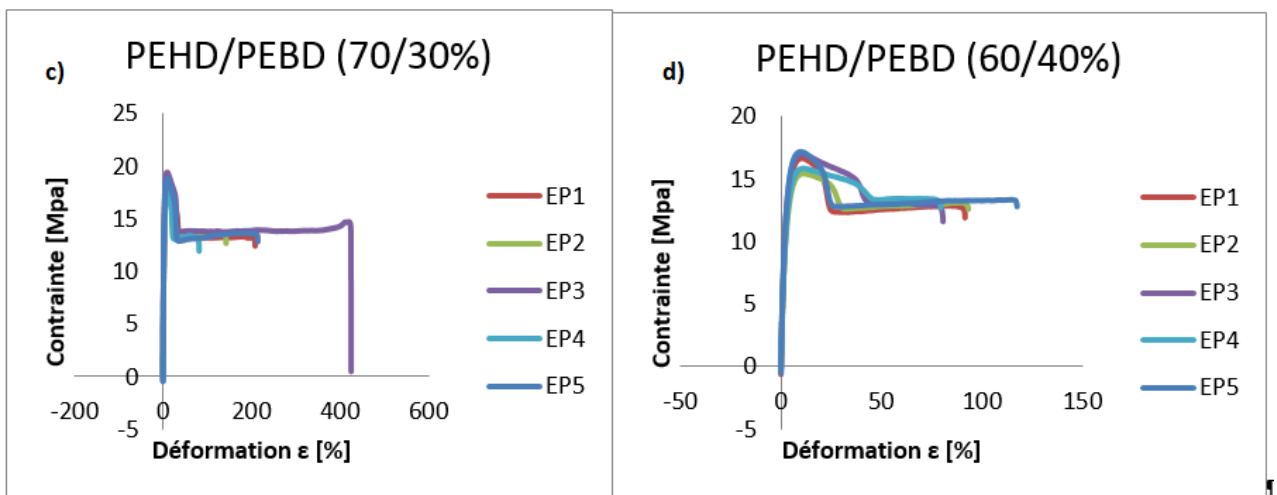


Figure IV.7: Courbe contrainte –déformation des mélanges ; c)(70/30%) et d)(60/40%)

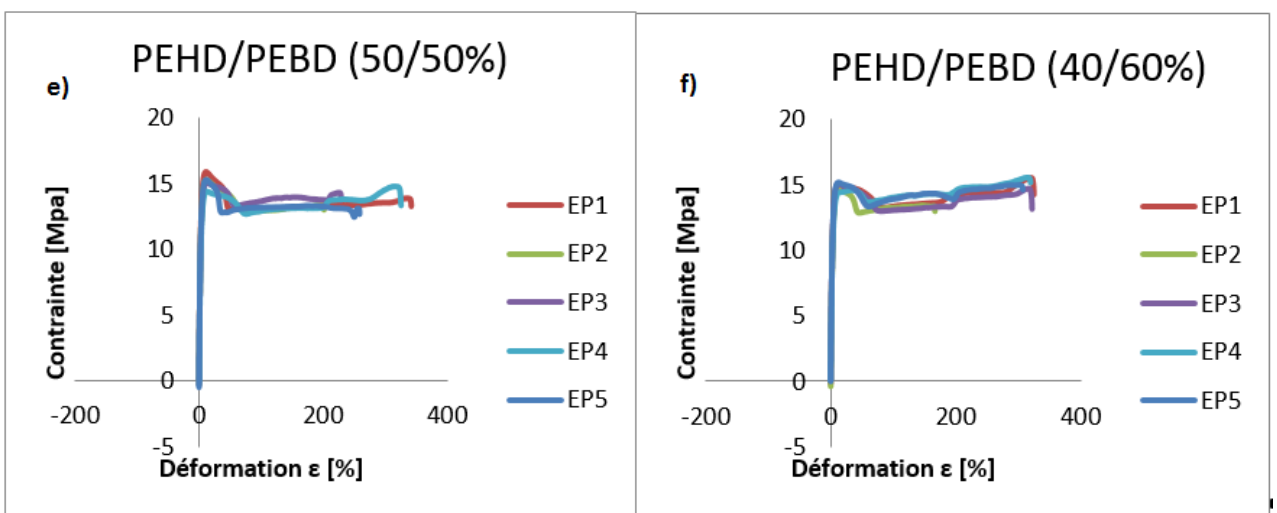


Figure IV.8: Courbe contrainte –déformation des mélanges ; e)(50/50%) et f)(40/60%)

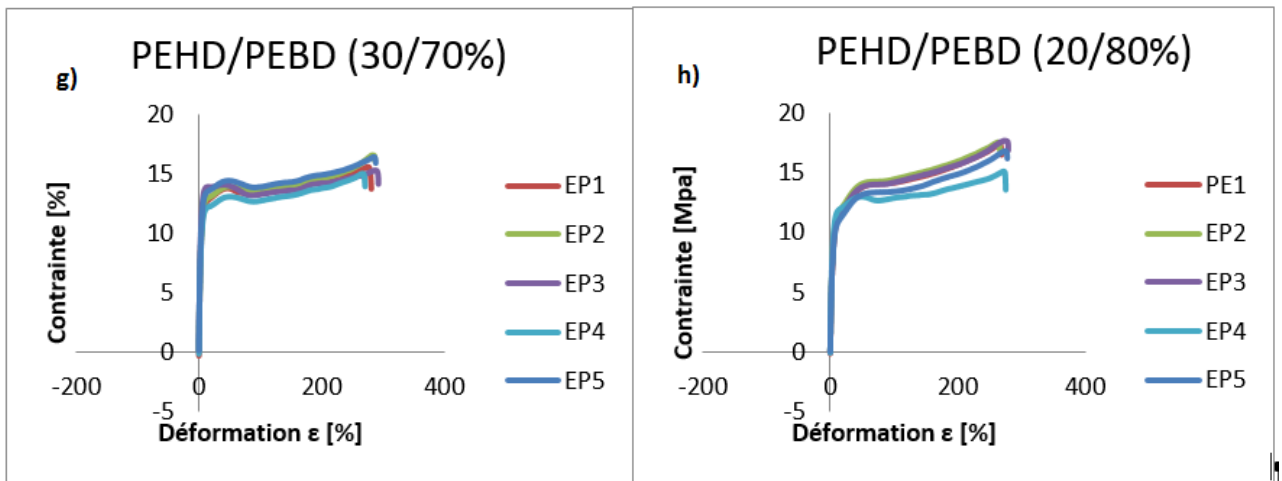


Figure IV.9: Courbe contrainte –déformation des mélanges ;g)(30/70%) et (20/80%)

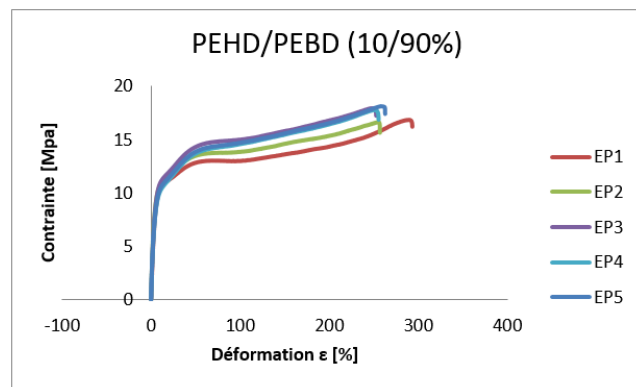


Figure IV.10: Courbe contrainte –déformation du mélange (10/90%)

IV.2.1.2. Détermination des caractéristiques mécaniques des mélanges

A partir des courbes contraintes –déformation des différents mélanges PEHD/PEBD, nous tirons les caractéristiques usuelles telles que la contrainte max (σ_{max}), la contrainte à rupture (σ_{rup}), le module d'élasticité (E) et la déformation (ϵ_{rup}).

➤ **La contrainte maximale σ_{max}**

On porte dans le tableau IV.3 les valeurs moyennes de la contrainte maximale ainsi que l'écart type correspondant à chaque valeur de contrainte et cela pour tous les mélanges élaborés.

Tableau IV.3 : Valeurs de la contrainte max des mélanges PEHD/PEBD

mélanges	100/0	90/10	80/20	70/30	60/40	50/50	40/60	30/70	20/80	10/90	0/100
Σ_{max} [MPa]	22,04	20,706	19,534	18,466	16,414	15,276	15,226	15,806	16,93	17,454	18,32
Ecart Type	1,0885	0,6770	0,6680	0,7639	0,7451	0,4085	0,3464	0,6835	1,0616	0,6733	0,3860

A partir des valeurs de la contrainte maximale portées dans le tableau IV.3, nous traçons la courbe de variation de la contrainte max en fonction du taux de PEBD dans le mélange PEHD/PEBD.

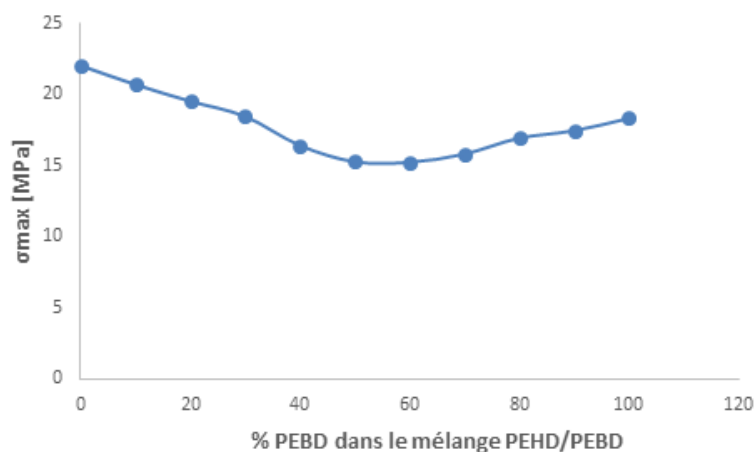


Figure IV.11 : Variation de la contrainte Max en fonction du % du PEBD

Le PEHD est un polymère plus résistant que le PEBD, l'ajout de quantité de 10% et 20% de PEBD au PEHD fait diminuer légèrement la contrainte max du PEHD. A partir de l'ajout de 30% de PEBD, la contrainte max du mélange devient plus faible que celle du PEBD.

La variation de la contrainte max du mélange s'effectue en deux parties :

- Nous remarquons une diminution de la contrainte max du 0% PEBD (100%PEHD) jusqu'au mélange (40/60) PEHD/PEBD.
- Une augmentation de la contrainte max est observée à partir de la composition de (30/70) PEHD/PEBD.

➤ **La contrainte à la rupture σ_{rup}**

On porte dans le tableau IV.4 les valeurs moyennes de la contrainte à la rupture ainsi que l'écart type correspondant à chaque valeur de contrainte et cela pour tous les mélanges élaborés.

Tableau IV.4 : Valeurs de la contrainte à la rupture des mélanges PEHD/PEBD

mélanges	100/0	90/10	80/20	70/30	60/40	50/50	40/60	30/70	20/80	10/90	0/100
σ_{rup}	8,7175	10,92	11,292	12,4425	12,294	13,212	14,03	14,776	16,02	16,656	17,486
Ecart Type	0,4006	1,7431	1,2598	0,3854	0,5303	0,3982	0,9415	1,1470	1,4018	0,7355	0,2811

A partir des données du tableau IV.4, nous traçons la courbe de variation de la contrainte à la rupture en fonction du taux de PEBD dans le mélange PEHD/PEBD, représentée dans la figure IV.8.

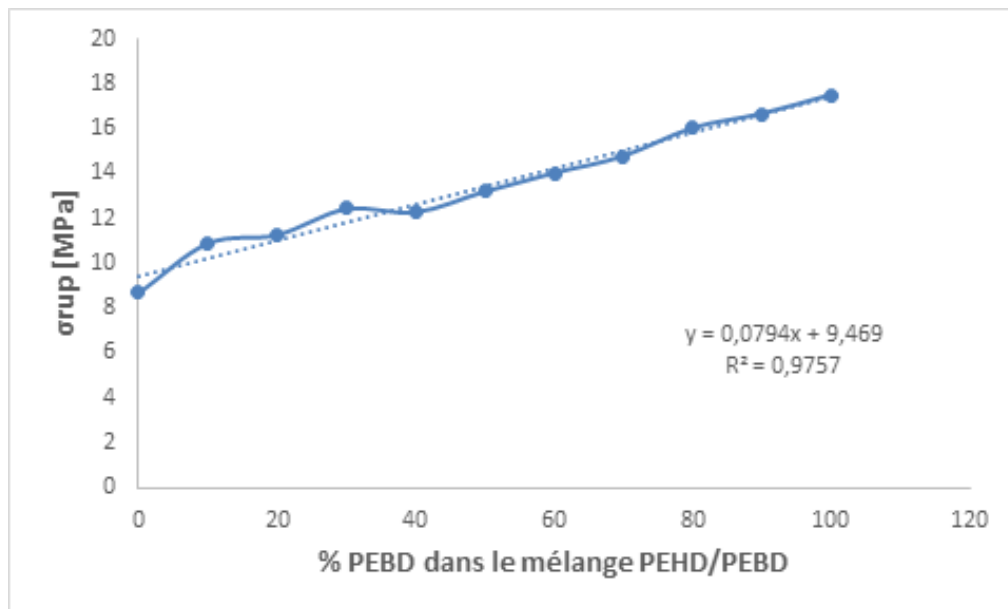


Figure IV.12: Variation de la contrainte à la rupture en fonction du % du PEBD

Le PEBD est un polymère plus ductile et déformable que le PEHD, l'ajout du PEBD au PEHD rend le mélange de plus en plus ductile. Cette augmentation est linéaire comme constaté sur la figure IV.8.

➤ **Le module d'élasticité E**

On porte dans le tableau IV.5 les valeurs moyennes du module ainsi que l'écart type correspondant à chaque valeur de module et cela pour tous les mélanges élaborés.

Tableau IV.5 : Valeurs du module d'élasticité des mélanges PEHD/PEBD

mélanges	100/0	90/10	80/20	70/30	60/40	50/50	40/60	30/70	20/80	10/90	0/100
E	1457,25	1306,39	1197,43	1052,20	852,14	752,29	711,37	541,26	406,09	333,79	336,75
Ecart Type	58,297	56,018	36,722	44,100	72,119	50,620	34,662	66,446	45,524	60,195	42,117

A partir des valeurs du module d'élasticité données par le tableau IV.5 nous traçons la courbe de variation du module en fonction du taux de PEBD dans le mélange PEHD/PEBD.

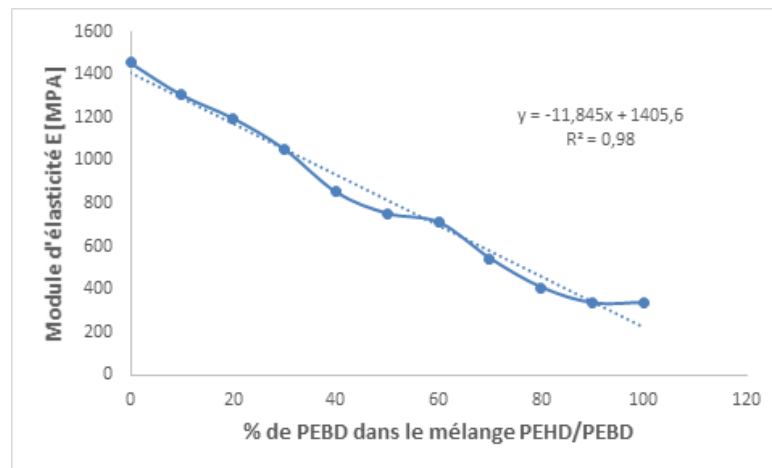


Figure IV.13: Variation du module d'élasticité en fonction du % du PEBD

Le module d'élasticité des mélanges PEHD/PEBD est décroissant avec l'augmentation du taux de PEBD dans le mélange, cette décroissance est presque linéaire.

➤ **La déformation ϵ_{rup}**

On porte dans le tableau IV.6 les valeurs moyenne de la déformation à la rupture ainsi que l'écart type correspondant à chaque valeur de déformation et cela pour tous les mélanges élaborés.

Tableau IV.6 : Valeurs de la déformation à la rupture des mélanges PEHD/PEBD

mélanges	100/0	90/10	80/20	70/30	60/40	50/50	40/60	30/70	20/80	10/90	0/100
b	85,20	128,648	105,708	161,555	92,45	271,332	288,078	283,846	273,144	264,112	251,986
Ecart Type	2,649	57,198	35,394	62,375	15,26	60,817	68,177	8,4439	5,8490	16,658	9,8835

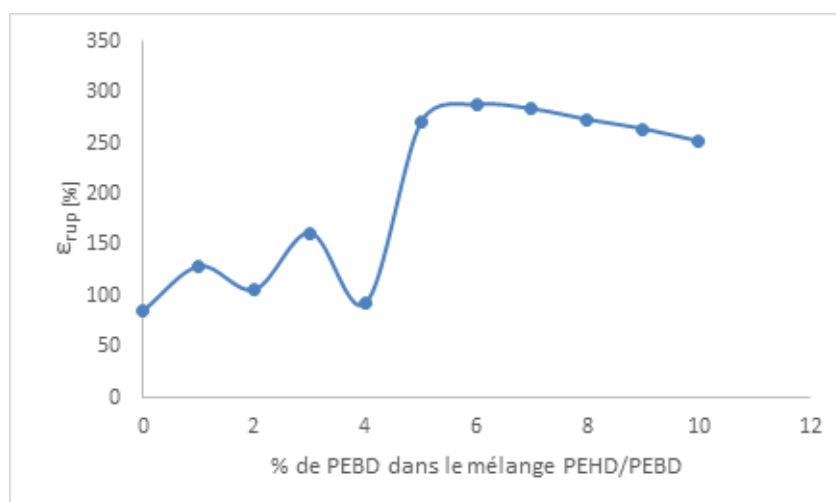


Figure IV.14: Variation de la déformation en fonction du % du PEBD

La figure IV.10 présente la variation de la déformation des mélanges en fonction du taux de PEBD dans le mélange PEHD/PEBD.

Nous observons sur cette courbe deux domaines de variation :

- De la composition 0% PEBD (100% PEHD) jusqu'à la composition (50/50) (PEHD/PEBD), les valeurs de déformations sont oscillantes, tantôt croissante, tantôt décroissante.
- A partir de la composition (40/60) PEHD/PEBD la déformation des mélanges est diminuée

IV.2.2. Résultats de l'essai de Résilience

Des éprouvettes de résilience au nombre de 9 à 10 ont été testées selon la norme (NE3.03.070), à la température ambiante de 23°C.

Les résultats de la résistance au choc de nos éprouvettes, pour chaque mélange, sont portés sur le tableau IV.7 ci-dessous :

Tableau IV.7 : Valeurs de la résilience des mélanges PEHD/PEBD

Mélange (PEHD/PEBD) : (100/0)										
Eprouvette	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Résilience J/Cm ²	0,282	0,394	0,337	0,354	0,354	0,366	0,261	0,317	0,364	
Mélange (PEHD/PEBD) : (90/10)										
Eprouvette	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Résilience J/Cm ²	0,558	0,523	0,411	0,433	0,443	0,491	0,501	0,546	0,508	0,354
Mélange (PEHD/PEBD) : (80/20)										
Eprouvette	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Résilience J/Cm ²	0,586	0,519	0,601	0,432	0,591	0,504	0,483	0,741	0,596	0,570
Mélange (PEHD/PEBD) : (70/30)										
Eprouvette	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Résilience J/Cm ²	0,662	0,840	1,018	0,911	0,879	0,913	0,939	0,638	0,708	
Mélange (PEHD/PEBD) : (60/40)										
Eprouvette	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Résilience J/Cm ²	0,823	1,215	1,484	0,881	1,164	0,878	1,176	0,954	1,276	1,351
Mélange (PEHD/PEBD) : (50/50)										
Eprouvette	1	2	3	4	5	6	9			
Résilience J/Cm ²	1,528	1,657	1,370	1,495	1,358	1,399	1,535			
Mélange (PEHD/PEBD) : (40/60)										
Eprouvette	1	2	3	4	5	6	7	8		
Résilience J/Cm ²	1,945	2,133	2,735	1,820	2,249	2,028	2,738	3,208		
Mélange (PEHD/PEBD) : (30/70)										
Eprouvette	2	3	4	5	7	9				
Résilience J/Cm ²	3,383	3,364	3,662	3,347	3,624	3,450				

Mélange (PEHD/PEBD) : (20/80)									
Eprouvette	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Résilience J/Cm ²	12,970	12,508	12,473	11,073	12,033	12,710	12,009	12,700	13,150
Mélange (PEHD/PEBD) : (10/90)									
Eprouvette	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Résilience J/Cm ²	13,396	13,601	12,785	12,962	12,735	13,919	12,973	12,790	13,387
Mélange (PEHD/PEBD) : (0/100)									
Eprouvette	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Résilience J/Cm ²	12,683	12,569	13,366	12,407	13,140	12,010	12,484	12,711	13,097

Dans le tableau IV.8, nous portons les valeurs moyennes de résilience de nos mélanges ainsi que les écarts type correspondant.

Tableau IV.8 : Valeurs moyenne de la résilience des mélanges PEHD/PEBD

Mélanges (PEHD/PEBD)	(100/0)	(90/10)	(80/20)	(70/30)	(60/40)	(50/50)	(40/60)	(30/70)	(20/80)	(10/90)	(0/100)
Moyenne de résilience J/Cm ²	0,336	0,476	0,562	0,834	1,120	1,477	2,357	3,471	12,402	13,172	12,718
Ecart type	0,042	0,064	0,084	0,133	0,225	0,108	0,484	0,137	0,626	0,419	0,421

Nous traçons sur la figure IV.11a la variation de la résilience en fonction de la quantité du PEBD dans le mélange PEHD/PEBD.

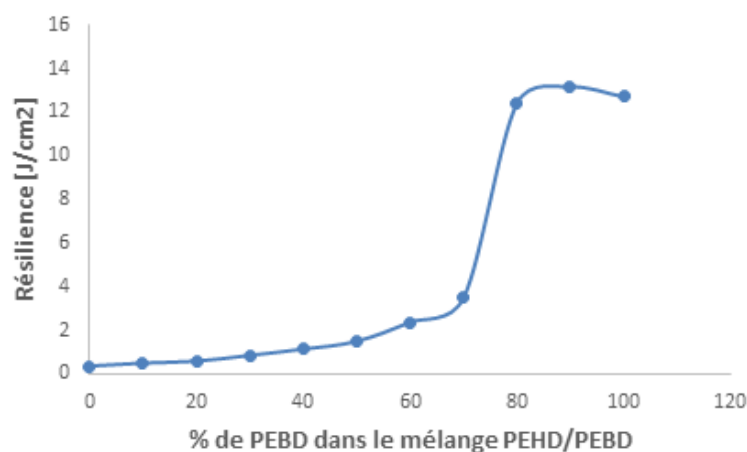


Figure IV15: Variation de la résilience en fonction du % du PEBD

La variation de la résilience de nos mélanges s'effectue en trois allures :

- De la composition (100/0) PEHD/PEBD jusqu'à la composition (30/70) la variation est lente avec une vitesse de $0,226 \text{ J/Cm}^2$ par 10% de PEBD dans le mélange.
- De la composition (30/70) PEHD/PEBD jusqu'à la composition (20/80), nous observons un saut de variation allant de la valeur $3,471 \text{ J/Cm}^2$ à la valeur $12,402 \text{ J/Cm}^2$, soit une variation de 3,57.
- De la composition (20/80) PEHD/PEBD jusqu'à la composition (0/100), nous remarquons une légère augmentation (de $12,402 \text{ J/Cm}^2$ jusqu'à $13,172 \text{ J/Cm}^2$, pour la composition 10/90) puis une légère diminution dans la valeur de la résilience, allant de $13,172 \text{ J/Cm}^2$ jusqu'à la valeur de $12,718 \text{ J/Cm}^2$.

IV.3. Résultat de l'observation au microscope électronique à balayage (MEB)

Les faciès de rupture en résilience de nos éprouvettes en été analysé par microscopie électronique à balayage afin de trouver une relation entre le comportement mécanique de ces matériaux et leurs structures microscopiques.

➤ Observation au MEB du polymère 100% PEHD

La figure IV.12 donne les observations au MEB du PEHD ; à des agrandissements a) $100 \mu\text{m}$, b) $50 \mu\text{m}$ et c) $20 \mu\text{m}$.

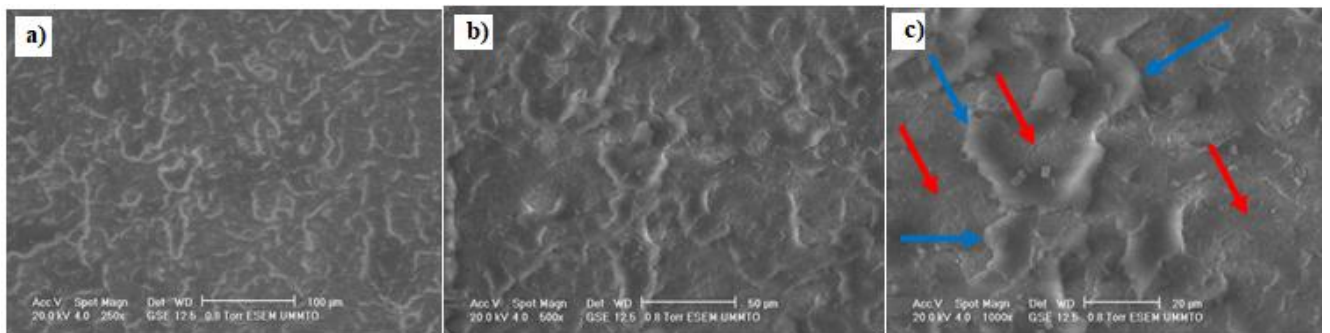


Figure IV16 : Micrographie MEB du polymère PEHD

Sur la micrographie d a) de la figure IV.12, nous observons l'état de surface du faciès de rupture en résilience du PEHD, toutes les micrographies a), b) et c) montrent une matière homogène. A l'agrandissement $100 \mu\text{m}$, on voit un nombre important de courbures de petites longueurs. Sur la micrographie c), avec un agrandissement de $20 \mu\text{m}$ nous observons plus clairement le faciès de rupture en résilience, qui paraît être une surface plane (flèches en rouge) avec un peu de matière étirée pendant la rupture (flèche bleue). Selon les résultats du test de résilience, le comportement mécanique en résilience du PEHD est un comportement fragile avec une résilience de $R=0,336 \text{ J/Cm}^2$.

➤ Observation au MEB du mélange (70/30%) (PEHD/PEBD)

Sur les micrographies a), b) et c) de la figure IV.13, nous observons l'état de surface de rupture en résilience du mélange 70/30% PEHD/PEBD, les surfaces de rupture paraissent homogènes.

En comparant la micrographie a) de ce mélange (agrandissement $100 \mu\text{m}$) avec la micrographie a) du PEHD, on voit que des lignes courbées longues, représentées par des flèches bleues sur la

micrographie a), apparaissent autour des courbures de petites longueurs (courbures correspondantes à la structure du PEHD représentées par des flèches rouges) et continues.

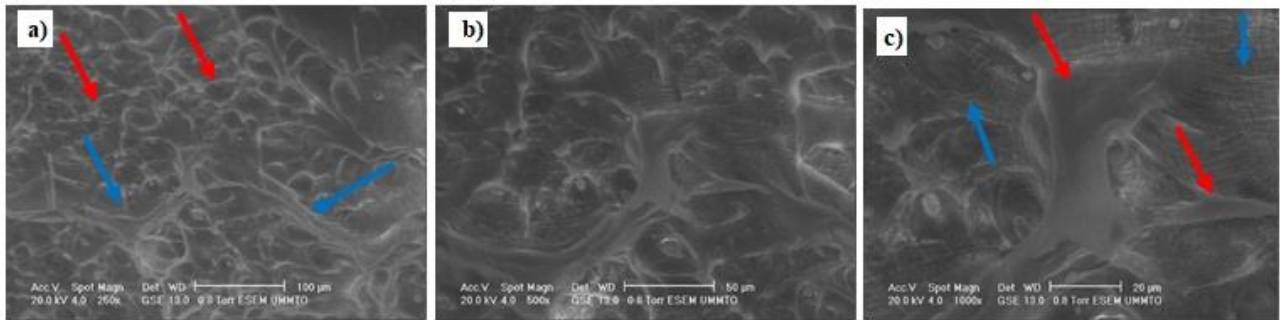


Figure IV17 : Micrographie MEB du mélange (70/30%) (PEHD/PEBD)

A l'agrandissement $20\mu\text{m}$, micrographie c) nous observons des surfaces planes (indiquées par des flèches rouges) délimitant des surfaces constituées de filaments, représentées par des flèches bleus. Le résultat de résilience de ce mélange est $R = 0,834 \text{ J/Cm}^2$, cette valeur de résilience est 2,5 fois plus grande que la résilience du PEHD.

➤ **Observation au MEB du mélange (30/70%) (PEHD/PEBD)**

La figure IV.14 présente la micrographie MEB du mélange (30/70%) PEHD/PEBD.

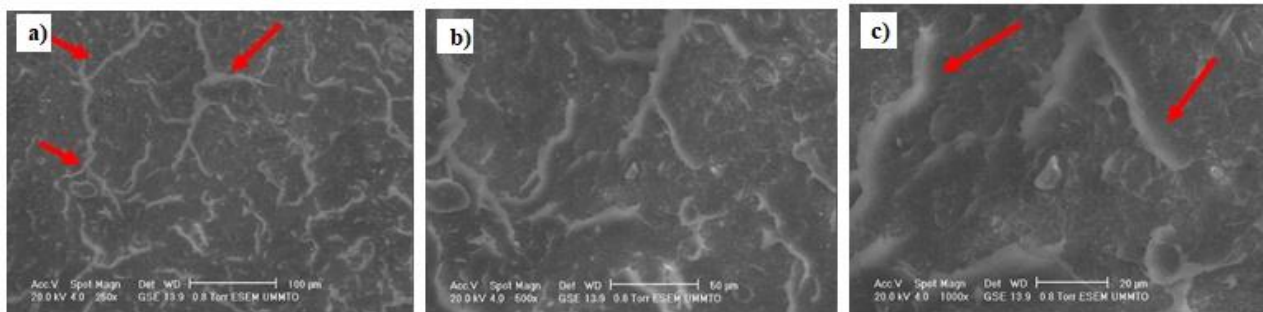


Figure IV18 : Micrographie MEB du mélange (30/70%) (PEHD/PEBD)

Sur la micrographie a) des lignes claires (flèches rouges), courbées, larges et longues apparaissent sur la surface de rupture, l'aspect de la surface est différents de celui du PEHD et du mélange 70/30 PEHD/PEBD. La résilience de ce mélange est $R = 3,471 \text{ J/Cm}^2$ est 10,33 fois plus résilient que le PEHD et 4,16 fois plus résilient que le mélange 70/30.

➤ **Observation au MEB du polymère 100% PEBD**

La figure IV.15 présente la micrographie MEB du polymère 100% PEBD.

Sur la micrographie a) nous observons un nombre important de lignes courbées, continues, longues presque aussi large que celles de la micrographie a) de la figure IV.14 du mélange 30/70 PEHD/PEBD. Ces lignes reflètent le caractère de résilience du PEBD. La résilience du PEBD donnée selon le test de résilience est $R = 12,718 \text{ J/Cm}^2$ est 37,85 fois plus forte que la résilience du PEHD.

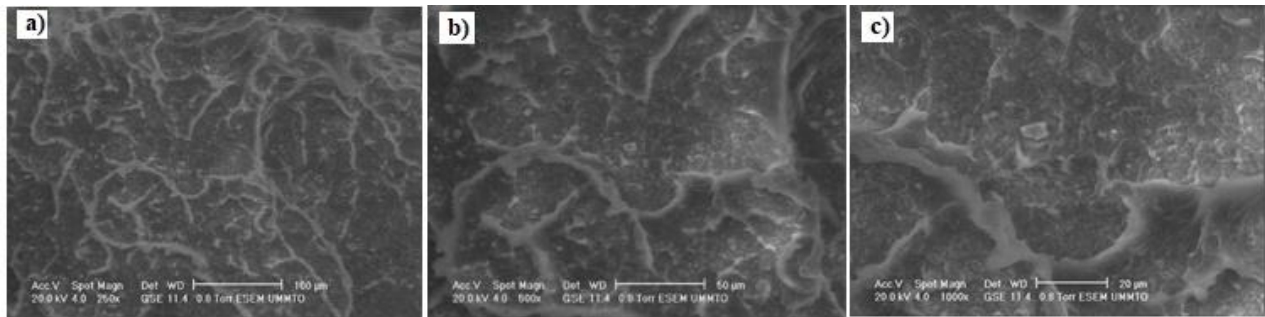


Figure IV19 : Micrographie MEB du polymère PEBD

IV 4 Conclusion

Notre étude s'est basée sur le mélange de deux polymères de la même famille, du polyéthylène, le PEHD et le PEBD.

- La caractérisation physicochimique, qui a consisté en l'essai de densité et l'indice de fluidité, ont montré que la densité du mélange est décroissante avec l'augmentation du taux de PEBD dans le mélange, même constatation pour les résultats de l'indice de fluidité ; le PEHD étant plus fluide que le PEBD, l'ajout de ce dernier diminue l'indice de fluidité des mélanges. Une légère transition dans la courbe de variation de la densité est observée pour la composition 40% PEBD, alors que pour la courbe indice de fluidité cette transition à 40% du PEBD est très accentuée.
- La caractérisation mécanique qui a consisté en l'essai de traction et l'essai de résilience en montrant que les deux polymères de base ont des comportements différents et que leurs mélanges ont des propriétés mécaniques intermédiaires.
- L'analyse morphologique a consisté en l'observation au microscope électronique à balayage des faciès de rupture en résilience des polymères : 100% PEHD, (70/30), (30/70) PEHD/PEBD et 100% PEBD.
- la micrographie MEB du PEHD montre une matière homogène avec des surfaces de rupture franche indiquant un caractère de faible résilience.
- Sur les micrographies des mélanges (70/30%) et (30/70%) nous observons des lignes courbées qui augmentent de largeur avec l'augmentation de la concentration du PEBD dans le mélange, ces lignes reflètent de caractère résilient du mélange.
- L'aspect de surface du faciès de rupture du PEBD est chargé de ces lignes courbées, qui se sont étirées lors de la rupture ductile du PEBD.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Notre travail a consisté en l'élaboration de mélanges de polymères la famille du polyéthylène, le PEHD/PEBD recyclé à différentes compositions, par les procédés d'extrusion puis d'injection. Les deux polymères, la PEHD et le PEBD ont des comportements mécaniques différents, le premier est un polymère semi cristallin, résistant et le second est un polymère amorphe et résilient.

Les caractérisations physico-chimiques et mécaniques de nos éprouvettes montrent que le mélangeage mécanique est un bon moyen pour optimiser les propriétés mécaniques des composants du mélange, les mélanges PEHD/PEBD ont des comportements mécaniques intermédiaires entre ceux du PEHD et ceux du PEBD.

Les résultats obtenus révèlent :

- La densité du mélange est décroissante avec l'augmentation du taux de PEBD dans le mélange
- La densité de mélanges est presque constante, jusqu'à la concentration 40% de PEBD, où la densité devient décroissante.
- L'indice de fluidité des mélanges est décroissant avec une grande vitesse jusqu'à la concentration de 40% PEBD dans le mélange où il devient décroissant avec une vitesse moins sévère.
- Le comportement mécanique des mélanges, à garder la même allure que celle du PEHD, jusqu'au mélange (40/60) PEHD/PEBD toutes ces courbes ont un seuil d'écoulement avant le plateau plastique. A partir de mélanges (40/60) PEHD/PEBD, l'allure des courbes contraintes déformation change et devient ressemblante à celle de PEBD (sans seuil d'écoulement). Les mélanges élaborés ont un comportement résistant jusqu'à la concentration de 40%PEBD où leurs comportements devient résilient.
- La contrainte max diminue avec l'augmentation du PEBD dans le mélange, contrairement à la contrainte à la rupture qui augmente avec l'augmentation du PEBD dans le mélange.
- L'observation au microscope électronique à balayage des faciès de rupture en résilience de certain de nos polymères, montre que l'aspect des mélanges est homogène. La surface de rupture du PEHD présente des surfaces franches reflétant un comportement à faible résilience. La morphologie du faciès de rupture en résilience du PEBD est formée du grand nombre de lignes courbées, constituées de la matière du PEBD qui s'est étirée avant la rupture, reflétant un caractère ductile de la rupture en résilience.
- Pour les mélanges PEHD/PEBD observés, leurs morphologies sont constituées de ces lignes courbées observées dans le faciès de rupture du PEBD.

Perspectives

- Pour bien achever notre étude de ce mélange PEHD/PEBD, nous souhaitons effectuer quelques analyses supplémentaires telles que la diffraction RX pour voir l'évolution du taux de cristallinité de ces mélanges de l'état cristallin du PEHD

vers l'état amorphe du PEBD. Des analyses DCS pour voir aussi la variation de la température de fusion ainsi que de la Tg du mélange.

- Nous souhaitons aussi cerner la concentration de 40%PEBD dans le mélange, par car elle présente un mélange intéressant du point de vue comportement mécanique, où toutes les caractéristiques mécanique et physico-chimiques connaissent une transition importante au voisinage de cette concentration,

Référence

Bibliographie

- [01] :Dj.Naitslimani ;M .Yakhoubi «Influence de la dégradation par ultra-violet sur le comportement mécanique du PEHD» mémoire de fin d'étude ;UMMTO .Algérie (2021-2022)
- [02] : Pr. BENRABAA Rafik cours (IAP : institut algérien du pétrole), 2015.
- [3] :Wililiam D. Classister ,Jr « science et génie des matériaux » édition MODULO
- [04] :F.Annab, K. Zdira, « Etude de la polymérisation cationique et modification du 4-vinyle chlorure de benzyle », mémoire de master, université Larbi Ben M' Hidi Oum El Bouaghi Algérie (2015).
- [05] : [En ligne];disponible sur le site: <http://mms2.ensmp.fr/mat-paris/elaboration/polycop/ch-4-Elab-polymeres.pdf>, Date de consultation : 19/01/2020 (9h.45min).
- [06] :Tomalia, J. M .J. Fréchet Documentation d' [4] D.A.. Dendrimers and otherDendriticPolymers;Wiley, New York, 2001.
- [07] :Gottfried. W.Ehrenstein. F Montagne, Matériaux polymères: Structure, propriétés et application, Ed Hermes Science, Allemagne, 2000
- [08]: C. Decker; Polymérisation sous rayonnement UV ; Techniques de l'ingénieurtraité Plastiques et composites ; A M 3 044
- [09] :LABED Abdellatif thèse « Caractérisation Morphologique et Mécanique du Polyéthylène Semi Cristallin Extrudé » Mémoire Présenté en vue de l'obtention du diplôme de magister
- [10] :Y. Bendahma, « Etude de la diffusion des molécules de bas poids moléculaire dans des réseaux de polymères acryliques», mémoire de magister, Université Abou BekrBelkaid Tlemcen, Algérie (2011).
- [11] : [Behrens et coll., 1995], Behrens G., Kuhn L.T., Ubic R., Heuer A.H., Raman Spectra of Vateritic Calcium Carbonate, SpectroscopyLetters 28 (6) (1995), pp 983-995.
- [12]: A; SAEEDI Mojtaba*1, Poostforush Mohammad2 and Jiriyaie Salman1, Thermal Degradationmechanism of HDPE Nano composites containing NanoCaCO3, Research Journal Of Engineering Sciences, Vol. 3(6), 15-28, June (2014).
- [13] : CARREGA Marc, Aide-mémoire, Matières plastiques, 2ème édition, ©Dunod, Paris, 54-62, 2005, 2009.
- [14] : Patricia KRAWCZAK, « Essais mécanique des plastiques » Technique de l'ingénieur AM 3 510
- [15] : j-p.Trotignon « Matières plastique » AFNOR
- [16] : A, Nechad. "Elaboration d'une membrane de filtration d'eau à base de polyéthylène à basse densité et de gypse de Bouzgaïa », mémoire de magister, Université HassibaBenbouali ,Chlef, 2008/2009.
- [16] : J.P, Arlie. "Les thermoplastiques de grand tonnage", pp27-34, 2ième édition, Editions Technip, 1987.
- [17] : Y. MESSAOUDI, F. MESSAOUDI « Elaboration et caractérisation de matériaux à base d'une matrice polyéthylène » mémoire de Master, Université A. Mira de Bejaia, Algérie (2021/2022)

[18] : A, Nechad. "Elaboration d'une membrane de filtration d'eau à base de polyéthylène à basse densité et de gypse de Bouzggaiïa", mémoire de magister, Université HassibaBenbouali ,Chlef, 2008/2009.

[19] :C.Peru. Polyéthylène haute densité PEHD , Techniques d'Ingénieur . Paris : s.n., 2008. AM3315.

[20] : Gottfried W. Ehrenstein, Fabienne Montagne matériaux polymères : structure, propriétés et application ; Hermès Science publication, 2000.

[21] : Catalogue du Groupe CHIALI, Siège et Direction Générale : Voie A. Zone Industrielle B.P 160. SIDI BELABES, 22000 Algérie. Caractéristiques de la matière PE, p2.

[22] : Gottfried W.Ehrenstein, Fabienne Montagne matériaux polymères : Structure, propriétés et applications ; Hermès science publications, 2000.

[23] : Reynald Dossogne ; « polyéthylène haute densité PEHD » technique d'ingénieur, A3315

[24] : Michel frontanille, Yves Gnanou, _chimie et physico chimie des polymères”, 2eme et 3eme cycle école d'ingénieur

[25] :R.Dossogne. Polyéthylène haute densité , Technique d'Ingénieur. France : s.n., 1996.

[26] : Comparaison entre les polyéthylènes haute et basse debsité .www.polyéthylène haute densié. [En ligne] [Citation : 17 4 2018.]

[27] : S. Fusesserry, “Polyéthylènes basse densité”, Techniques de l'Ingénieur, Publication A3310, 1996.

[28] : J.P, Tratignon., P, Verdu et A .J. M, Dobraczynki. "Matières plastiques", PP 40-44, Nathan, 4ième édition, Paris, 1989.

[29] : L. Boukezzi. "Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de polyéthylène Réticulé Chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension", thèse de doctorat. Ecole Nationale Polytechnique, 2007.

[30] : HAMMAMI.T et LOUATI : Cours de PMF des Matières plastiques

[31] : J-P TROTIGNON, J VERDU, A DOBRACZYNSKY, M PI PERAUD: Matières plastiques structures, propriétés, mise en œuvre et normalisation ; Edition Nathan, 2006.

[32] : NEXT POST « Fabrication de pièces en plastique »

[34] : catalogue Rabourdin Industrie, composants standard pour moules et outillages ; 1-52.

[35] : J_P Trognon « Matière plastique ». AFNOR

[36] :Jean-François AGASSANT, Plastiques et composites, techniques-ingenieur, www.techniques-ingenieur.fr

[37] : Jean- François Agassant, mise en forme des polymères, Approche thermomécanique de la plasturgie, 4° édition lavoisier

[38] : Michel Biron : Aide-mémoire/ Transformation des matières plastiques

[39] : EL H Achemi.BAHLOUL « Technique de Fabrication conventionnelles et avancées »
polycopie de cours (2017/2018)

[40] : KERPONT « Fabrication de pièce plastique roto moulée »