

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERRI DE TIZI OUZOU  
FACULTÉ DU GENIE DE LA CONSTRUCTION  
DEPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



## MEMOIRE

*De fin d'études*

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

Options :

- Fabrication mécanique et productique 2,3.
- Science des matériaux 1.

**Thème :**

ETUDE DU COMPORTEMENT MECANIQUE  
DES MELANGES POLYMERIQUES

PPH/PPC

Proposé et dirigé par :

MOHELLEBI Mouloud

Réalisé par :

1. BOUAZA Ahmed

2. AMMAR Karim

3. GHERBI Ahmed Hamza

2014/2015

# Remerciements

Nous remercions à prime abord DIEU le tout puissant qui nous a donné la force, la volonté et le courage pour accomplir ce travail.

Nos remerciement vont conjointement et tout particulièrement à Monsieur et Madame MOUHELLEBI, de nous avoir proposés ce sujet de fin d'étude et aussi de nous avoir encadrés. Nous tenons également, à lui exprimer notre profonde reconnaissance pour sa disponibilité à tout moment, ses encouragements, ses conseils ainsi que pour la confiance qu'il a nous.

Je remercie Toute l'équipe de l'entreprise nationale  
de plastique et de caoutchoute (ENPC), filiale  
SISCOPLALAST de Draa-El-Mizan.

Enfin, je remercie chacun des membres du jury pour  
le temps pris afin d'évaluer ce modeste travail.

Nous adressons nos remerciements aux membres  
du jury, devant qui nous avons l'honneur d'exposer  
notre travail, et qui ont pris peine de lire avec soin  
ce mémoire pour juger son contenu.

Nos sincères sentiments vont à tous ceux qui, de  
près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce  
projet, particulièrement nos chères familles et nos  
amis(es).

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail a ceux qui me pérenne la dignité,  
l'honneur et la joie de ma vie mes très chers parents et je dis merci a  
leurs soutien, patience et confiance.*

*\* Mes frères et ma sœur.*

*\* Mes bons amis.*

*\* A toutes les personnes qui m'ont aidé de prés et de loin.*

*\* A tous les étudiants de la promotion 2014-2015.*

**HAZMA**

# Table des matières

---

Introduction générale

Introduction générale .....01

Chapitre I : Généralités sur les polymères

Introduction.....3

I.Généralités sur les polymères .....3

I.1 Historique .....3

I.2 Définition .....6

I.3 Origines des polymères .....6

□ Origine végétale .....6

□ Origine animale.....7

□ Origine naturelle .....7

I.4 Elaboration des polymères .....7

I.4 .1 Polymérisation en chaîne .....8

I.4.1.1 La polymérisation radicalaire .....9

a) L'amorçage.....9

b) La propagation .....10

c) La terminaison.....10

I.4.1.2 La polymérisation cationique .....11

I.4.1.3 La polymérisation anionique .....11

I.4.2 polycondensations .....11

I.5 Classification des différents polymères .....12

I.5.1 selon la structure .....12

a)structure primaire .....13

□ Les homopolymères .....13

□ Les copolymères .....13

b) structure secondaire .....15

c) structure tertiaire .....15

I.5.2 Selon la morphologie .....15

## Table des matières

---

a) Polymère semi-cristallins .....	15
b) Polymère amorphe .....	16
I.5.3 selon certaines propriétés .....	16
a) Les thermoplastiques.....	16
c) Les thermodurcissables .....	17
d) Les élastomères .....	18
I.6 Caractéristiques des polymères .....	19
I.7 Formulation du polymère .....	20
I.7.1 Plastifiants .....	20
I.7.2 Stabilisants .....	20
I.8 Mise en œuvre des polymères .....	21
I.8.1 Mise en œuvre des thermoplastiques .....	22
I.8.1.1 Extrusion .....	22
a) L'extrudeuse mono vis .....	22
b) L'extrudeuse bi-vis .....	24
c) L'extrusion soufflage de corps creux .....	25
d) Extrusion-soufflage de gaine (extrusion-gonflage) .....	25
e) Extrusion de plaques et de feuilles .....	26
I.8.1.2 injection .....	26
a) L'injection-soufflage (ou bi-étirage-soufflage) .....	28
I.8.1.3 Le calandrage .....	29
I.8.1.4 Le rotomoulage .....	30
I.8.1.5 Thermoformage.....	31
a) Matériaux thermoformables .....	32
b) les étapes de thermoformage .....	32
c) types de thermoformage .....	33
I.8.2 Mise en œuvre des thermodurcissables .....	35
I.8.2.1 Moulage par compression .....	36
a) Cycle de moulage .....	36
conclusion .....	37

# Table des matières

---

## Chapitre II : Stéréorégularité et caractéristiques du polypropylène (PPH/PPC)

Introduction.....	38
II.1 Généralités sur le Polypropylène.....	38
Un homopolymère.....	39
Un copolymère.....	39
Les compounds.....	39
II.2 Cristallisation du Polypropylène.....	40
II.3 Structure Cristalline du Polypropylène.....	42
II.3.1 Structure cristalline de PPH.....	42
II.3.1.1 Structure cristalline du polypropylène isotactique PPI.....	42
a) Forme $\alpha$ .....	42
b) Forme $\beta$ .....	43
c) Forme $\delta$ .....	43
d) Forme Smectique.....	44
II.3.1.2 Structure cristalline du polypropylène syndiotactique.....	44
II.3.1.3 Les différentes conformations des chaînes cristallines du PPs.....	44
II.3.1.4 Structure cristalline du polypropylène atactique PPa.....	45
II.3.2 Structure cristalline du polypropylène copolymère PPC.....	45
II.4 Propriétés du polypropylène.....	46
II.4.1 Propriétés du polypropylène homopolymère.....	46
II.4.1.1 propriété de polypropylène PPI.....	46
a) Propriétés thermiques du PPI.....	46
b) Propriétés mécaniques du PPI.....	47
c) Propriétés annexes du PPI.....	47
II.4.1.2. Propriétés du polypropylène syndiotactique.....	47
a) Propriétés thermiques du PPs.....	47
b) Propriétés mécaniques du PPs.....	48
c) Propriétés annexes.....	48
II.4.2 Propriété du polypropylène copolymère.....	48
Conclusion.....	49

# Table des matières

---

## Chapitre III : Méthodes expérimentales (Matériels et mode opératoire)

Introduction .....	50
III.1. Caractérisation physique .....	50
III.1.1. Indice de fluidité.....	50
III.1.2. Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier IRTF.....	53
a. Définition .....	53
b. Principe .....	53
c. Spectres infrarouges.....	54
d. Conditions d'analyse .....	54
e. Principe d'analyse.....	55
f. Préparation des pastilles .....	55
g. Enregistrement d'un spectre .....	56
III.2 : Caractérisation mécanique .....	57
III.2.1. Essai de traction .....	57
a) Principe de l'Essai .....	57
b) Présentation des éprouvettes normalisées .....	57
c) Présentation de la machine de traction .....	58
III.2.2. Essai de résilience (Résistance à l'impact).....	59
a. Principe : .....	59
b. Les éprouvettes utilisées .....	60
c. La machine de Charpy .....	60
d. Principe .....	61
III.3 Caractérisation morphologique .....	62
a. Microscopie électronique à balayage.....	62
b. Principe de fonctionnement : .....	62
III.4 Elaboration des mélanges .....	63
a. Mélange à froid .....	63
b. Mélange à chaud (extrusion).....	63
c. Le découpage et le broyage .....	65
d. Injection des éprouvettes .....	65

# Table des matières

---

c. Température de la buse d'injection .....	68
Conclusion : .....	69

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

Introduction .....	70
IV.1 Caractérisation physique .....	70
IV.1.1 Indice de fluidité.....	70
IV.1.2 Spectroscopie Infrarouge .....	71
□ Le spectre de 100PPC : .....	72
□ Le spectre de 55PPC-45PPH : .....	73
□ Le spectre de 40PPH-60PPC : .....	74
□ Le spectre de 50PPH-50PPC : .....	75
□ Le spectre de 100PPH : .....	76
□ La superposition des spectres obtenus des différents échantillons.....	76
IV.2. Courbes Contrainte-Déformation : .....	79
□ Polymère 100% PPH .....	79
□ Polymère 100% PPC .....	79
□ Mélange 90% PPH/10% PPC .....	81
□ Mélange 80% PPH/20% PPC .....	81
□ Mélange 70% PPH/30% PPC .....	82
□ Mélange 60% PPH/40% PPC .....	82
□ Mélange 50% PPH/50% PPC .....	83
□ Mélange 45% PPH/55% PPC .....	83
□ Mélange 40% PPH/60% PPC .....	84
□ Mélange 30% PPH/70% PPC .....	84
□ Mélange 20% PPH/80% PPC .....	85
□ 10% PPH/90% PPC .....	85
IV.2.2 Variations du module d'élasticité des différents mélanges .....	85
IV.2.3 Variations de l'allongement à la rupture des différents mélanges .....	86
IV.2.4. Variations de la contrainte au seuil d'écoulement .....	87
IV.2.5 Résilience : .....	87

## Table des matières

---

IV.2.6. Micodureté .....	89
IV.3. Caractérisation morphologique .....	89
Conclusions :.....	91
Conclusion général	
Conclusion général.....	92

# Liste des figures

---

## Chapitre I : Généralité sur le polymère

Figure I. 1: Evolution de la production mondiale des plastiques XX <sup>ème</sup> siècle.....	05
Figure I. 2 : Polymère amorphe.....	16
Figure I.1 : Schéma de l'extrudeuse mono vis.....	23
Figure I.3: Dispositif de soufflage de gaine .....	26
Figure I.4 : Machine d'injection plastique .....	27
Fig. I. 5 : Les différentes phases du cycle d'injection.....	28
Figure I.6 : Procédé d'injection –soufflage.....	29
Figure I.7 : Procédé de calandrage.....	30
Figure I.8 :Cycle de rotomoulage.....	31
Figure I.9 : Cycle de thermoformage.....	33
Figure I.10 : Schéma d'une machine de thermoformage à moule positif.....	34
Figure III.11 : Principe de thermoformage sur un moule négatif.....	35
Figure III.12: Moule de compression.....	36

## Chapitre II : Stéréorégularité et propriété du polypropylène (PPH/PPC)

Figure II.1 : Unité de répétition du polypropylène.....	39
Figure II.2 : Représentation d'une chaîne d'un polypropylène : Structure chimique du polypropylène, a) polypropylène isotactique, b) polypropylène Syndiotactique, c) polypropylène atactique .....	40
Figure II.3 : Structure d'un polymère semi-cristallin .....	41
Figure II.4 : Illustration des différentes structures composant un cristal de polymère, a) modèle de faisceaux, b) modèle de lamelles et c) structure sphérolitique .....	42
Figure II.5 : Conformations des chaînes du polypropylène isotactique Droite (R) - et Gauche (L) - les hélices dans leur configuration Haut (up) et Bas (down) .....	43
Figure II.6 : Les différentes conformations des chaînes du sPP.....	45

## Liste des figures

---

### Chapitre III : Méthodes expérimentales (Matériels et mode opératoire)

Figure III.1 : Procédés de fabrication en fonction IF .....	51
Figure III.2 : Le plastomètre. ....	52
<i>Figure III.3 : Mortier en agate pour le broyage.</i> .....	55
Figure III.4 : (a) Presse à pastiller en acier inoxydable permettant de réaliser des pastilles, (b) l'appareil utilisé pour la formation des pastilles (pastilleuse ou pompe hydraulique).....	56
Figure III.5 : <i>Supports pour pastilles.</i> .....	56
Figure III.6 : <i>Spectrophotomètre à Transformée de Fourier Modèle ALPHA-T Brüker.</i> .....	57
Figure III.8 : Machine de la traction .....	59
Figure III.9 : Eprouvette de résilience .....	60
Figure III.10 : Essai de résilience sur Mouton Charpy. ....	61
Figure III.11 : Empreinte laissée par le pénétrateur. ....	61
Figure III.12 : Duromètre ZWICK/ROELL .....	63
Figure III.13 : Microscope Electronique à Balayage .....	64
Figure III.14 : Mélangeur électrique. ....	64
Figure III.15 : vis extrusion et température utilise .....	65
Figure III.16 : a) Système de refroidissement de la matière. b) La sortie de la matière .....	66
Figure III.17 : <i>Présentation de l'appareil de Découpe (a) et du broyeur (b).</i> .....	66
Figure III.18 : Machine à injection et moule éprouvette.....	67
Figure III.19 : Les différentes phases du cycle d'injection.....	68
Figure III.20 : Buse d'injection et température utilisé.....	69

### Chapitre IV : Résultats et interprétations

Figure IV.1 : Variation des indices de fluidité en fonction du taux de PPC dans le mélange PPC/PPH .....	71
Figure IV.2 : Spectre IR de 100PPC. ....	72
Figure IV.3 : Spectre IR de 55PPC-45PPH.....	73
Figure IV.4 : Spectre IR de 40PPH-60PPC.....	74
Figure IV.5 : Spectre IR de 50PPH-50PPC.....	75
Figure IV.6 : Spectre IR de 100PPH. ....	76

## Liste des figures

---

Figure IV.7 : Spectres IR des différents échantillons.....	77
Figure IV.8 : Courbe contrainte / déformation du polymère 100% PPH.....	79
Figure IV.9 : Courbe contrainte / déformation du polymère 100% PPC .....	80
Figure IV.10 : Courbe contrainte / déformation du mélange 90% PPH/10%PPC.....	80
Figure IV.11 : Courbe contrainte / déformation du mélange 80% PPH/20%PPC.....	81
Figure IV.12 : Courbe contrainte / déformation du mélange 70% PPH/30%PPC.....	81
Figure IV.13 : Courbe contrainte / déformation du mélange 60% PPH/40%PPC.....	82
Figure IV.14 : Courbe contrainte / déformation du mélange 50% PPH/50%PPC.....	82
Figure IV.15 : Courbe contrainte / déformation du mélange 45% PPH/55%PPC.....	83
Figure IV.16 : Courbe contrainte / déformation du mélange 40% PPH/60%PPC.....	83
Figure IV.17 : Courbe contrainte / déformation du mélange 30% PPH/70%PPC.....	84
Figure IV.18 : Courbe contrainte / déformation du mélange 30% PPH/70%PPC.....	84
Figure IV.19 : Courbe contrainte / déformation du mélange 10% PPH/90%PPC.....	85
Figure IV.20 : Variations du module d'élasticité des différents mélanges en fonction du taux de PPH dans le mélange PPH/PPC .....	85
Figure IV.21 : Variation de l'allongement à la rupture des mélanges en fonction du taux de PPH dans le mélange PPH/PPC. ....	86
Figure IV.22 : Variation de la contrainte au seuil des mélanges en fonction du taux de PPH dans le mélange PPH/PPC.....	87
Figure IV.23 : Variation de la résilience en fonction du taux de PPH dans le mélange PPH/PPC .....	88
Figure IV.24 : Microdureté des polymères 100%PPH 100%PPC et du mélange 50%PPH/50%PPC.....	89
Figure IV.25 : Micrographie des faciès de rupture du polymère 100%PPH.....	90
Figure IV.26 : Micrographie des faciès de rupture du polymère 100%PPC.....	90
Figure IV.27 : Micrographie des faciès de rupture du polymère 50%PPC/50%PPH.....	91

# Liste des tableaux

---

## Chapitre I : Généralités sur les polymères

Tableau I.1 : Thermoplastique et leur caractéristique.....	17
Tableau I.2 : Valeurs indicatives de réglage des températures d'extrusion pour différentes matières : .....	23
Tableau 1.3 : Plages de formabilité des principaux polymères utilisés en thermoformage .....	32

## Chapitre III : Méthodes expérimentales (Matériels et mode opératoire)

Tableau III.1: Procédé de fabrication en fonction IF .....	51
Tableau III.2 : Condition normalisées du plastomètre .....	52
Tableau III.3 : Dimensions des éprouvettes de traction .....	58
Tableau III.4 : Paramètre d'injection .....	68

## Chapitre IV

Tableau IV.1 : Valeurs des indices de fluidité des différents mélanges PPC/PPH	
Tableau IV.2 : Valeurs de la résilience en fonction du taux de PPC dans le mélange PPC/PPH	

## Introduction

Du bois, du coton jusqu'à un univers sans limite de produits plastiques, l'homme se trouve maintenant dépendant des polymères, produit synthétique remplaçant les métaux, les céramiques dans certains domaines.

Dans ce chapitre nous allons survoler le monde des polymères, en commençant par la découverte du produit plastique, sa diffusion dans le monde, nous allons donner la définition puis la classification des différents polymères, nous terminerons le chapitre par les procédés de mise en œuvres des différents polymères.

## I. Généralités sur les polymères

### I.1 Historique

L'historique des matières plastiques débute en 1869 à la suite d'un concours, dont l'objet était de trouver une matière destinée à remplacer l'ivoire naturel des boules de billard. Les frères HYATT (USA) mirent au point le **CELLULOÏD** (ou nitrate de cellulose) produit d'origine végétale (le bois ; le coton)

C'est ainsi que naquit la première matière plastique. Pendant quarante ans, le celluloid fut la seule matière plastique utilisée jusqu'à ce qu'un chimiste belge, fabriqué en 1909 la première matière plastique totalement synthétique (la bakélite).

Les matières plastiques sont pratiquement nées avec le siècle. En effet, à la fin du siècle dernier n'existaient, plutôt à l'échelle artisanale qu'industrielle, que quelques matériaux plastiques, dont les plus importants, à base de matières naturelles, étaient : Le Celluloïd

La Galalithe.

C'est en 1909 qu'un chimiste belge, BACKELAND découvrit les résines formo-phénolique dont l'exploitation dès 1920 sous le nom de « BAKELITE » marque véritablement le début de la première des plastiques.

De 1920 à 1940, on assiste au développement de ces résines de condensation « phéno /formol » qui grâce à leurs propriétés isolantes, contribuent à celui de l'électricité

# Chapitre I : Généralités sur les polymères

---

De 1940 à 1955, naît industriellement en France, la matière première thermoplastique utilisée à grande échelle. C'est le chlorure de polyvinyle plastifié, employé pendant la guerre comme produit de remplacement du caoutchouc, devenu impossible à importer.

En Amérique, apparaît le premier polyamide, le « nylon » en remplacement des fibres textiles naturelles, et en particulier, la soie.

Après la guerre, le chlorure de polyvinyle rigide, grâce à sa bonne tenue chimique aux acides et aux bases, contribue à la renaissance de l'industrie chimique et pour des applications à températures modérées, concurrençant avec succès les aciers inoxydables, dans la fabrication des cuves de stockage ou des canalisations de transport des produits corrosifs.

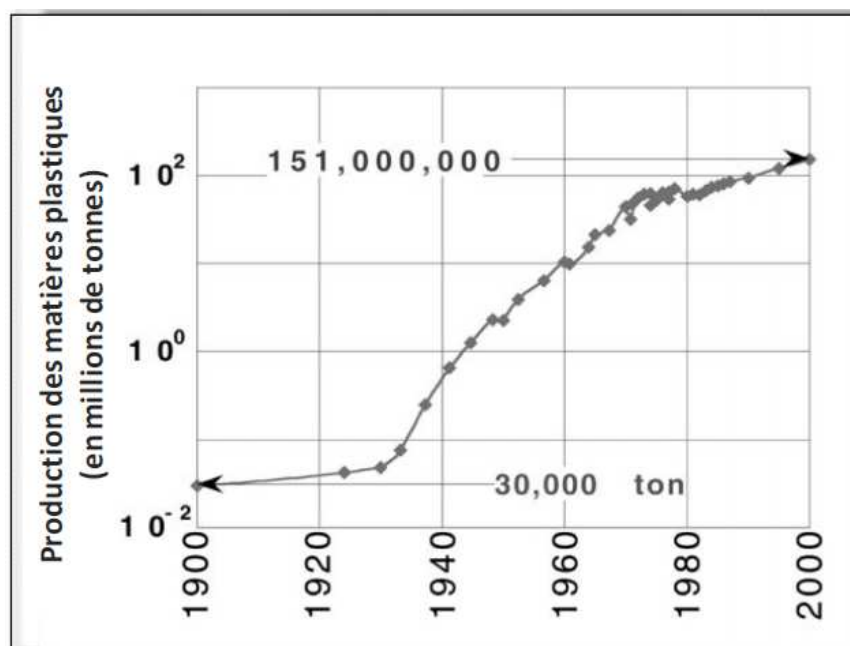
En 1950, on assiste au développement des transports automobiles et au besoin croissant en pétrole comme source d'énergie. La « pétrochimie » permet alors la naissance d'une multitude de matériaux thermoplastiques, dérivés des carbures oléfiniques, obtenu par cracking des produits pétroliers : Ethylène, benzène, propylène, acétylène, etc.

En 1900, la production mondiale des matières plastiques était de 25 kilotonnes, valeur qui a doublé durant la première trentaine d'année. Cependant, cette production a connu un essor spectaculaire à partir de la seconde guerre mondiale avec une augmentation de 25% /an (Figure I.1) [1].

En 2000, la production mondiale des polymères (caoutchoucs compris) a été d'environ 151 millions de tonnes alors qu'en 2003 elle atteignait 190 millions de tonnes. Ce chiffre peut paraître faible, comparé à celui de la production d'acier (environ 965 millions de tonnes), mais vu la faible masse volumique des polymères (de l'ordre de  $1100 \text{ kg.m}^{-3}$  en moyenne, très inférieure à celle de l'acier ( $7900 \text{ kg.m}^{-3}$ )) leur production volumique est plus importante : 173 millions de  $\text{m}^3$  par an pour les polymères contre 122 millions de  $\text{m}^3$  pour l'acier [2]. En 2007, cette production a augmenté à 260 millions de tonnes [3]. La consommation de ces matériaux ne va cesser de croître comme en témoignent les perspectives, qui estiment que ces chiffres vont doubler 10 fois durant la 1<sup>ier</sup> moitié du 2<sup>ème</sup> siècle [4].

## Chapitre I : Généralités sur les polymères

Vers 2014, la consommation mondiale des polymères de commodité, seulement, tels que le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), le polychlorure de vinyle (PVC) et le polystyrène (PS), se rapprochera de 180 millions de tonnes par an [4]. Le matériau le plus consommé étant le polyéthylène



**Figure I. 1: Evolution de la production mondiale des matières plastiques durant le XX<sup>ème</sup> siècle [1]**

L'utilisation des mélanges de polymères afin d'améliorer les propriétés des produits finis a participé significativement dans l'augmentation de la production des matières plastiques. Ces mélanges de polymères, dont les propriétés peuvent être très supérieures à celles des constituants, ont mené à une commercialisation très réussie du HIPS, de l'ABC, du PVC modifié et du HIPP des années 40 du XX<sup>ème</sup> siècle. Ils sont devenus tellement importants que dès l'apparition d'un nouveau polymère dans le marché, on assiste rapidement à la commercialisation de ses mélanges. Parfois, pour une stratégie économique, les mélanges sont brevetés avant même l'introduction de la nouvelle résine de base dans le marché.

## I.2 Définition

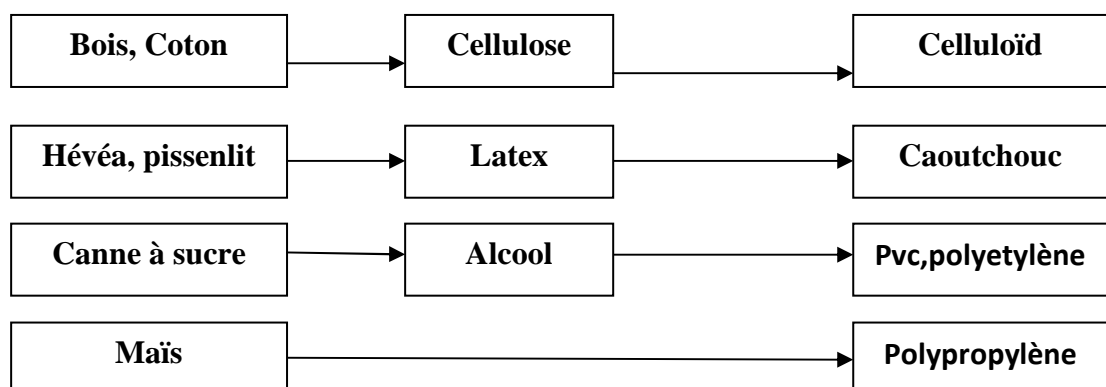
Le mot polymère est dérivé du mot grec signifiant « plusieurs partis ». Un polymère est un composé de longues chaînes moléculaires appelées macromolécules. L'échelle macromoléculaire, les polymères ont essentiellement deux structures différentes. L'état amorphe qui est caractérisé par une structure de type pelote statistique, dans laquelle on ne distingue aucun ordre à grande échelle. L'état cristallin qui lui est caractérisé par un ordre à grande distance.

. Les polymères sont synthétisés en reliant des molécules de monomères entre elles par des liaisons chimiques covalentes. [5]

## I.3 Origines des polymères

Les substances de bases nécessaires à l'élaboration des matières plastiques peuvent être choisies dans les trois règnes de la nature qui sont suivantes :

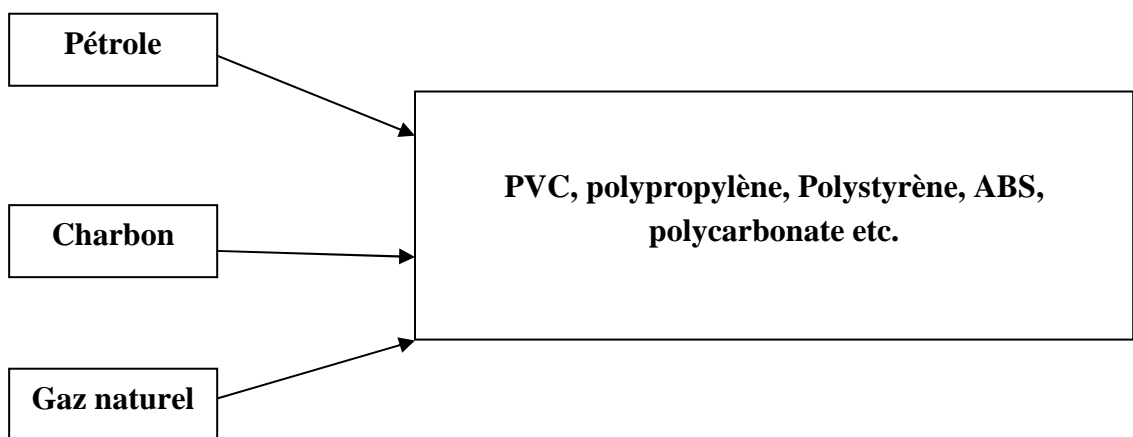
❖ Origine végétale : on trouve principalement:



❖ **Origine animale** : on peut trouver :



❖ **Origine naturelle** : qui contient le:



## I.4 Elaboration des polymères

On distingue deux grandes catégories de réactions chimiques permettant la préparation des polymères :

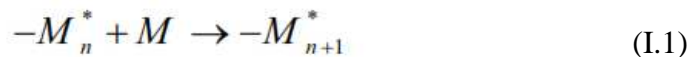
- La polymérisation en chaîne, pour produire par exemple le polyéthylène, le polystyrène, le polypropylène.
- La polycondensation (polymérisation par étapes, pour produire par exemple le PET (Polyéthylène téréphtalate))

# Chapitre I : Généralités sur les polymères

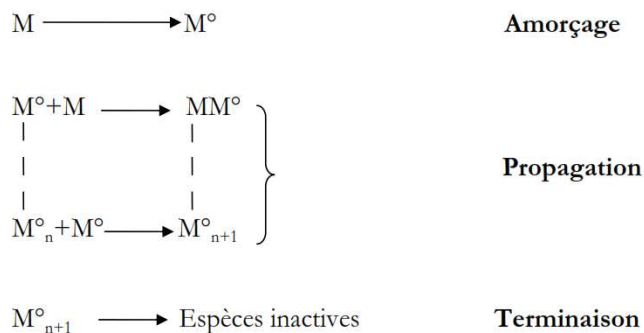
## I.4 .1 Polymérisation en chaîne

La polymérisation en chaîne représente à elle seule plus de 90 % de la production mondiale des matières plastiques. La majorité des polymères tels que le polyéthylène, le polypropylène, le polybutadiène, le polystyrène, le poly méthacrylate de méthyle, le polychlorure de vinyle, le poly (acétate de vinyle) et le poly acrylonitrile sont produits par polymérisation en chaîne.

Une réaction de polymérisation en chaîne, est une réaction conduisant à la formation de polymères par additions successives de monomères sur une extrémité active de la chaîne macromoléculaire (centre actif noté \*) On peut la schématiser par :



La « chaîne cinétique » commence par l'élaboration du centre actif qui constitue le site d'amorçage, capable d'attaquer une première molécule de monomère. L'ensemble de ces deux événements constitue la réaction d'amorçage proprement dite. La molécule formée reste porteuse d'un centre actif de même nature et est donc capable d'attaquer une nouvelle molécule de monomère, et ainsi de suite. La chaîne cinétique se poursuit donc par un grand nombre de réactions de cette nature, dites *réactions de propagation*. Elle se termine par la destruction du centre actif, dite *réaction de terminaison*. Ces différentes étapes sont schématisées ci-dessous :



# Chapitre I : Généralités sur les polymères

---

Le centre actif peut être un radical libre (Polymérisation radicalaire), un carbocation (Polymérisation cationique) ou un carboanion (Polymérisation anionique) [6].

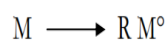
**I.4.1.1 La polymérisation radicalaire** : La polymérisation par voie radicalaire est une réaction qui, comme son nom l'indique, fait intervenir comme espèce réactive  $R^*$  appelée radical libre. Cette technique trouve son succès dans sa facilité de mise en œuvre, la durée de réaction est très courte et la formation des polymères de hauts poids moléculaires est aussi rapide [10].

**a) L'amorçage** : nommée également initiation, elle comprend deux réactions successives :

- La génération de radicaux (dits primaires) à l'aide d'une substance dénommée amorceur A.



- L'addition du radical primaire sur une première unité monomère M pour former le premier maillon de la chaîne polymère en croissance.

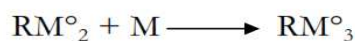


Cette étape apporte l'énergie nécessaire à l'activation d'un certain nombre de chaînes radicalaires. Elle est le plus souvent chimique, grâce à la décomposition thermique d'un amorceur. Elle peut aussi être photochimique et, dans ce cas, l'activation est provoquée par un rayonnement (UV).

- **L'amorçage chimique** : est le plus souvent utilisé au niveau industriel. Son principe est que dans le milieu réactionnel, il existe des molécules capables de se composer thermiquement ou par des réactions chimiques en radicaux libres. Son avantage est la vitesse à laquelle les amorceurs se décomposent en radicaux et la possibilité de leur réaction avec les monomères.
- **L'amorçage thermique** : en général utilisé spécifiquement dans un certain intervalle de température, en fonction de la cinétique de décomposition des amorceurs thermiques.

- **L'amorçage photochimique** : L'activation photochimique est l'une des méthodes les plus efficaces pour créer des espèces réactives et amorcer ainsi des réactions chimiques pouvant conduire à la synthèse de nouveaux matériaux bien définis ; les échantillons sont exposés à un rayonnement lumineux : le plus souvent c'est le rayonnement UV, mais aussi par radiation  $\gamma$  ou par bombardement par un faisceau d'électrons (EB). Elle implique en général l'utilisation de photoamorceurs qui sont excités par le rayonnement et permettent la production de radicaux ou de carbocations, soit directement, soit indirectement par des processus de transfert d'énergie. Un des problèmes rencontrés et difficiles à résoudre est l'effet inhibiteur de l'oxygène sur les polymérisations radicalaires.[10]

**b) La propagation** : La propagation se fait par additions successives de molécules de monomères sur la partie active de la chaîne croissante. Cette réaction se fait en une fraction de seconde et ramène à une géante molécule, avec un radical libre au bout de la chaîne. Un processus est maintenant indispensable qui va terminer la grande chaîne, la réaction de terminaison.



**c) La terminaison** : La réaction de terminaison consiste en la destruction du centre actif qui est localisé à l'extrémité de la chaîne en croissance et peut, en principe, se faire de différentes façons (chocs sur une paroi, réaction avec des impuretés, etc.). Cette réaction peut s'effectuer suivant deux mécanismes, couplage ou dismutation. Dans le cas d'une polymérisation, cette réaction arrête la croissance des chaînes macromoléculaires ; les macromolécules sont ainsi terminées.

## I.4-1-2 La polymérisation cationique :

La partie est un carbocation, où un des atomes de carbone porte une charge positive, associée à un contre-ion chargé négativement.

Les monomères peuvent être :

- Des oléfines (isobutylène).
- Des éthers vinyliques  $\text{CH}_2=\text{CHOR}$ .
- Des carbures insaturés (styrènes, indène, benzofurane).
- Des composés hétérocycliques (oxirane, tétrahydrofurane, cyclosiloxane).

Le groupe R doit être donneur d'électrons (isobutylène, éther vinylique) ou stabiliser le cation par résonance (styrène).

## I.4.1.3 La polymérisation anionique :

La partie active est un carbanion (l'un des atomes de carbone porte une charge négative) ou un oxanion (la charge négative est portée par un atome d'oxygène) associé à un contre-ion  $\text{Me}^+$ , chargé positivement et souvent métallique. La polymérisation peut se faire par ouverture d'une double liaison (styrène, diènes, acrylonitrile, vinylpyridine) ou d'un cycle (oxirane, lactone, lactame...).

## I.4.2 polycondensations :

La polycondensation représente moires de 10 % de la production mondiale des matières plastiques.

Les polycondensats fournissent un ensemble de molécules dotées de propriétés nouvelles et a grande valeur ajoutée : matériaux a haute résistance thermique ou chimique, fibres a haute ténacité, mousses rigides a porosité contrôlée, etc.

La plupart des polymères techniques comme les polyesters, polyamides, polyuréthannes, polycarbonates, polyamides et poly-siloxanes, les polymères cristaux liquides, les

# Chapitre I : Généralités sur les polymères

---

polysulfones, et la plupart des thermodurcissables (époxydes, phénol- formaldéhyde) sont produits par polycondensation.

Dans ce type de polymérisation, les macromolécules résultent de réactions successives entre les fonctions antagonistes portées par des molécules plurifonctionnelles (fonctionnalité sup ou egal deux). La réaction se produit dans les conditions où réagissent habituellement les fonctions organiques concernées, par simple chauffage ou en présence d'un catalyseur convenable. Les condensations qui, généralement, éliminent à chaque étape un tiers constituant, comme l'eau, un alcool ou un hydracide, interviennent au départ entre molécules monomères puis, au fur et à mesure de l'avancement de la réaction, entre les molécules polymères formées, pour conduire (théoriquement) au stade ultime de l'unique macromolécule.[11]

3 types de réaction de polycondensation sont distingués :

- ✓ Réactions qui se font avec élimination du produit de condensation.
- ✓ Réactions sans formation de produit secondaire de réaction.
- ✓ Polymérisation par recombinaison des radicaux.

## **I.5 Classification des différents polymères :**

### **I.5.1 selon la structure :**

On classe les polymères selon la nature du monomère qui les constitue ainsi que la disposition des radicaux sur la chaîne hydrocarbure, et aussi la disposition spatiale des polymères.

#### **a)structure primaire :**

On parle de deux types de polymères :

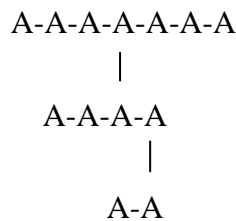
- Les homopolymères ;
- Les copolymères ;

# Chapitre I : Généralités sur les polymères

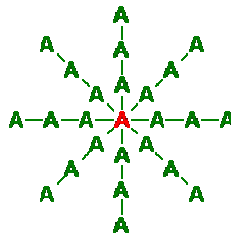
## ❖ Les homopolymères :

Les homopolymères sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité. Parmi les homopolymères, on peut citer le polyéthylène. Il existe, au sein des homopolymères, différentes familles. Parmi eux, nous trouvons :

- les homopolymères : A-A-A-A-A-A-A
- les homopolymères branchés :

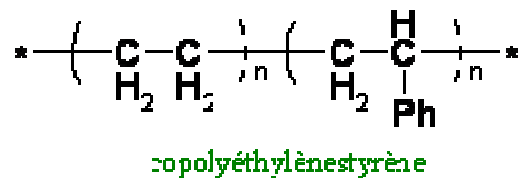


- Les homopolymères étoilés :



## ❖ Les copolymères :

Les copolymères sont des polymères qui possèdent plusieurs unités. Comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se classer dans différentes familles. On parle alors de modes de copolymères



# Chapitre I : Généralités sur les polymères

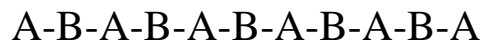
---

Parmi les différents modes de copolymères, nous trouvons :

- le mode statistique :



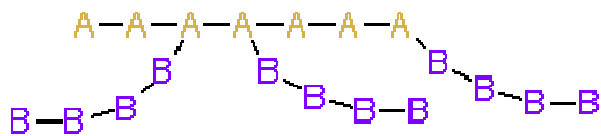
- le mode alterné :



- le mode séquencé :



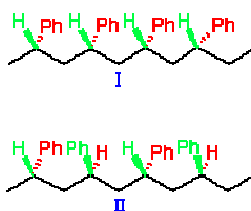
- le mode greffé :



Les polymères, qu'ils soient homo ou copolymères, peuvent être réticulés. Un polymère réticulé est un polymère dont certaines de ses chaînes sont reliées entre elles par des ponts chimiques covalents. La plupart des polymères doivent être réticulés avant leur utilisation. En effet, un polymère est un liquide et pour le maintenir en place, il faut le réticuler.

La structure primaire est l'enchaînement covalent des motifs monomères. Ainsi du point de vue stéréoisomérique, le motif  $-CH_2-CH(Ph)-CH_2-CH(Ph)-CH_2-CH(Ph)-$  va avoir plusieurs formes :

# Chapitre I : Généralités sur les polymères



Le cas I est un isomère iso tactique et le cas II est le cas syndiotactique. Quand il n'y a aucun ordre dans le polymère, on parle d'isomère atactique. L'existence de plusieurs formes stéréoisomériques va entraîner des propriétés physiques complètement différentes entre les stéréo-isomères.

## b) structure secondaire :

C'est la conformation d'une chaîne isolée. Ainsi, en solution, la chaîne se met en pelote statistique ; La pelote statistique est sans arrêt en train de bouger mais elle occupe un volume hydrodynamique à peu près constant : sous forme solide, on retrouve la chaîne sous deux formes :

La chaîne garde son organisation en pelote et le solide obtenu est amorphe.

La chaîne s'organise du fait d'interactions particulières (liaisons H, interactions polaires).

## c) structure tertiaire :

Cette structure touche à l'organisation des chaînes au sein du matériau. Certains polymères, à l'état solide, gardent leur forme pelote. On va donc avoir un matériau constitué de pelotes statistiques enchevêtrées.

## I.5.2 Selon la morphologie :

### a) Polymère semi –cristallins :

Une partie du polymère est fortement organisée grâce aux interactions de Vander Waals entre les chaînes.

Le taux de cristallinité est :

**$X_m$** =masse de la phase cristalline/masse totale.

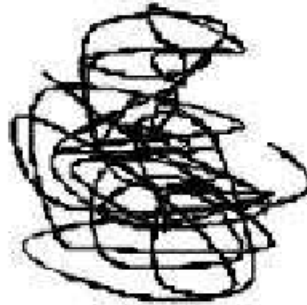
**$X_v$** =volume de la phase cristalline/volume totale.



**Figure I. 1 :** polymère semi-cristallin.

**b) Polymère amorphe :**

Il n'y a pas d'ordre à grande distance, l'organisation se rapproche très fort de celles des liquides.



**Figure I. 2 :** polymère amorphe.

### **I.5.3 selon certaines propriétés :**

Selon le comportement thermomécanique, on distingue trois grandes familles :

- Les thermoplastiques ;
- Les thermodurcissables ;
- Les élastomères ;

**a) Les thermoplastiques :**

Les thermoplastiques ramollissent sous l'effet de la chaleur. Ils deviennent souples ; malléables et durcissent à nouveau quand on les refroidit. Comme cette transformation est réversible, ces matériaux conservent leurs propriétés et ils sont facilement recyclables. Leurs polymères de base sont constitués par des macromolécules linéaires,

## Chapitre I : Généralités sur les polymères

reliées par des liaisons faibles qui peuvent être rompues sous l'effet de la chaleur ou de fortes contraintes.

- b) Elles peuvent alors glisser les unes par rapport aux autres pour prendre une forme différente et quand la matière refroidit, les liaisons se reforment et les thermoplastiques gardent leur nouvelle forme. L'allongement varie entre (100-500)%.

On trouve principalement :

Thermoplastique	Caractéristique
PVC (chlorure de polyvinyle)	souple et rigide
PVC rigide	lisse, brillant, en plaques ou profile couleurs variés
PMMA (polyméthacrylate de méthyle)	lisse, brillant, transparent
PP (polypropylène)	se plis à froid, souple
Polystyrène choc	pour le thermoformage
PET (téréphtalate...)	dont on fait des bouteilles

**Tableau I.1 :** Thermoplastique et leur caractéristique.

### c) Les **thermodurcissables** :

Les thermodurcissables sont des plastiques qui prennent une forme définitive au premier refroidissement. La réversibilité de forme est impossible car ils ne se ramollissent plus une fois moulés. Sous de très hautes températures, ils se dégradent et brûlent (carbonisation). Les molécules de ces polymères sont organisées de longues chaînes dans lesquelles un grand nombre de liaisons chimiques solides et tridimensionnelles ne peuvent pas être rompues et se renforcent quand le plastique est chauffé. La matière thermodurcissable garde toujours sa forme en raison de ces liaisons croisées et des pontages très résistants qui empêchent tout glissement entre les chaînes [5].

# Chapitre I : Généralités sur les polymères

---

Les plus connus sont :

- Polyuréthanes ;
- Les polyesters insaturés ;
- Les phénoplastes ;
- Les résines époxydes et phénoliques ;

## d) Les élastomères :

Ces polymères présentent les mêmes qualités élastiques que le caoutchouc. Un élastomère au repos est constitué de longues chaînes moléculaires repliées sur elles mêmes. Sous l'action d'une contrainte, les molécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres et se déformer. Pour que le matériau de base présente une bonne élasticité ; il subit une vulcanisation. C'est un procédé de cuisson et de durcissement qui permet de créer un réseau tridimensionnel plus ou moins rigide sans supprimer la flexibilité des chaînes moléculaires. On introduit dans l'élastomère au cours de la vulcanisation du soufre, du carbone et différents agents chimiques.

Différentes formulations permettent de produire des caoutchoucs de synthèse en vue d'utilisations spécifiques. Les élastomères sont employés dans la fabrication des coussins, de certains isolants, des pneus [11].

## Exemples :

- Polybutadiène ;
- Poly (butadiène/styrène) ;
- Polyéthylène chloré ;

## I.6 Caractéristiques des polymères

Les caractéristiques spécifiques des polymères vont varier d'un matériau à l'autre, les principales sont :

### ➤ La légèreté :

-La densité de la plupart des polymères est comprise entre 0,9 et 1,8

# Chapitre I : Généralités sur les polymères

---

## ➤ La résistance mécanique :

-Elle variable suivant la composition chimique.

-Les pièces plastiques sont souvent plus résistantes et légères que les pièces métalliques assurant les mêmes fonctions.

## ➤ La transparence :

-Certains polymères ont un coefficient de transmission de la lumière voisin de celle de verre, et bon nombre sont transparents translucides

## ➤ L'inaltérabilité :

-Ils résistent aux agressions extérieures et à de nombreux produits chimiques.

-Certains demandent une protection contre les (u-v).

## ➤ L'esthétique :

-Les couleurs sont variées et les possibilités de mise en œuvre nombreuses.

-L'aspect lisse et fini du matériau confère à l'objet une impression « design ».

## ➤ L'isolation :

-Ce sont des bons isolants électriques, thermiques et acoustiques.

## ➤ L'imperméabilité :

-Ils assurent une bonne barrière aux gaz et à l'eau.

## ➤ La glisse :

-Ils le plus souvent un faible coefficient de frottement.

## ➤ L'entretien :

-Ils sont d'un entretien, ils ne nécessitent aucun traitement de surface, ils résistent à la corrosion.

## I.7 Formulation du polymère :

Un polymère industriel est toujours formulé, soit pour le stabiliser en cours de mise œuvre, soit pour faciliter sa transformation, soit pour ajuster ses propriétés finales.

### I.7.1 Plastifiants :

Un plastifiant est un solvant lourd qui incorporé aux polymères :

- Détruit partiellement les interactions entre chaines.
- Responsables de la cohésion mécanique et transforme un matériau initialement rigide en matériau souple, flexible.
- Structure de réseau tridimensionnel limitant le glissement des chaines les unes par rapport aux autres.
- Diminue la température de transition vitreuse.

### I.7.2 Stabilisants :

- **Anti-oxygène** : les anti-oxygènes sont utilisés dans la plupart des polymères hydrocarbonés, en particuliers PE, PP caoutchoucs et copolymères divers .Ils sont utilisés en concentration généralement inférieure à 1 % (sauf le noir de carbone) et dans ces conditions ne modifient pas sensiblement la couleur et les propriétés physiques des polymères .leur but est de retarder l'oxydation thermique au cours de la transformation et de l'utilisation.
- **Stabilisants thermiques du PVC** : Spécifiques des polymères chlorés ces stabilisants retardent le dégagement de HCL et la formation des structures conjuguées très colorées. Les organostanniques sont particulièrement puissants et permettent notamment d'obtenir des produits transparents et incolores.
- **Stabilisants « lumières »** tel que :

Pigments :(ex noir de carbone), absorbeurs UV (qui empêchent la pénétration des UV au sein du matériau), extincteurs et stabilisants polyfonctionnels (plusieurs fonctions stabilisantes).

# Chapitre I : Généralités sur les polymères

---

- **Autres adjuvants** tel que :

Colorants, anti chocs (systèmes multi phases), ignifugeants, lubrifiants , anti-retrait , agents nucleants (accélèrent la cristallisation) et agents de démoulage.

## I.8 Mise en œuvre des polymères :

Les techniques de transformation des plastiques sont choisies en fonction de plusieurs facteurs :

- ✓ Selon la nature du matériau (thermoplastique ou thermodurcissable).
- ✓ S'il est thermoplastique, selon la température à laquelle il ramollit.
- ✓ Selon la stabilité à l'air du matériau formé.
- ✓ Selon la forme et la taille du produit fini.

Certains de ces procédés sont très semblables à ceux servant à la fabrication des métaux et des céramiques.

Le formage des polymères s'effectue habituellement à haute température et souvent par application d'une pression. La température de formage des thermoplastiques amorphes est supérieure à leur température de transition vitreuse, tandis que celle des thermoplastiques semi-cristallins est voisine de leur température de fusion ; par ailleurs, la pression appliquée doit être maintenue pendant le refroidissement de la pièce afin qu'elle conserve sa forme.

### I.8.1 Mise en œuvre des thermoplastiques :

#### I.8.1.1 Extrusion :

L'extrusion des polymères est l'un des procédés essentiels pour former les matériaux thermoplastiques disponibles (en granulés ou en poudre) ; en tubes ou gaines, profilés, films ou plaques dont la longueur n'est pas limitée. L'extrusion consiste à convoier le polymère solide puis à le fondre et à le soumettre à une pression grâce à l'action d'une vis qui tourne à l'intérieur d'un fourreau chauffé, le polymère est ensuite entré dans une filière d'extrusion puis refroidi .

# Chapitre I : Généralités sur les polymères

---

On distingue deux types d'extrudeuses :

a) L'extrudeuse mono vis :

Une extrudeuse mono vis comporte une vis sans fin qui tourne à l'intérieur d'un fourreau cylindrique, régulé en température par des systèmes de chauffe et de refroidissement. Le polymère sous forme solide (granulés, poudre) est introduit dans la trémie située à une extrémité de la machine. La trémie peut être mise sous atmosphère contrôlée pour éviter la reprise d'humidité. La principale fonction de l'extrudeuse est de convoier le polymère, de le fondre et de le mettre en pression, pour qu'il puisse franchir, tandis que la filière est placée à son extrémité. D'un point de vue industriel, on cherche à obtenir à la sortie de la machine un débit régulier, avec un matériau homogène, à la température contrôlée, des conditions de production satisfaisantes (débit maximal, consommation énergétique limitée) [8].

On peut citer trois zones phénoménologiques :

- **la zone de convoyage** : le polymère descendant de la trémie sous forme de poudre ou de granulés est compacté et convoyé ;
- **la zone 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 le travail des forces de cisaillements au sein du matériau ;
- **la zone 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.

- **Chauffage et régulation de la température :**

Le cylindre est chauffé et refroidi ce qui permet de répartir et de maintenir avec précision la température adéquate dans toutes les zones (voir tableau ci-dessous) chaque zone est équipée d'un régulateur de température.

En général ce chauffage est assuré par des résistances électriques. Le refroidissement peut être assuré par circulation d'air autour du cylindre ou de fluide introduit dans les tubulures de circulation autour du cylindre. La zone située au niveau de l'orifice d'alimentation est refroidie

# Chapitre I : Généralités sur les polymères

(en général par circulation d'eau ) pour empêcher le collage de granulés et la formation d'une voûte de matière dans la trémie qui couperait l'alimentation .

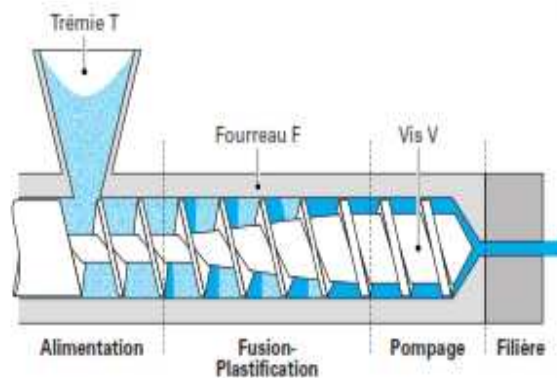


Figure I.1 : Schéma de l'extrudeuse mono vis.

Tableau I.2 : valeurs indicatives de réglage des températures d'extrusion pour différentes matières :

Matière	Zone de convoyage	Zone de plastification	Zone de pompage
PVC rigide	155-C°	165-C°	175-185 (C°)
PE basse densité	125-C°	125-C°	130-C°
PE haute densité	140-C°	160-C°	165-C°
PA	275-C°	225-C°	225-235 (C°)
PVC plastifié (60 %)	175-C°	165-C°	150-160 (C°)
PP	185-C°	200-C°	220-230 (C°)

A la sortie de l'extrudeuse, le polymère fondu entre dans une filière, qui a pour but de répartir le flux de matière et de le faire passer à travers un orifice, qui lui donne une forme correspondant à différents types de produits.

# Chapitre I : Généralités sur les polymères

---

- **Types de filières :**

La filière est l'outil qui donne la forme aux flux de la matière plastifiée afin d'obtenir le profil demandé. Elle amovible et doit se démonter facilement pour être nettoyée ou changée.

Du point de vue fonctionnel, on peut classer les filières de la façon suivante :

- Filières sans poinçon : pour les profils pleins (joncs, fils, plaques) ;
- Filières avec poinçon : pour les profils creux (tubes à section circulaire, rectangulaire, gaines) ;
- Filières pour la réalisation de gainages des profils en métal ou autres matières ou pour la réalisation de gaines gonflées ;
- Filières pour la co-extrusion (co-extrusion : c'est une technique de fabrication d'un extrudant dont la section se compose de zone ou de couches de différentes matière) ;

b) **L'extrudeuse bi-vis :**

L'extrudeuse se compose de deux vis qui tournent dans deux orifices du cylindre, les deux vis (filetées à droite ou à gauche) peuvent tourner dans le même sens (corotative), ou une vis filetée à droite et l'autre filetée à gauche peuvent tourner en sens inverse (contrarotative).

L'extrudeuse à deux vis utilisée pour la production de profilés de grande dimension, en raison de la régularité.

Ce genre de machines garantit une plastification délicate de la matière et une excellente homogénéité.

c) **L'extrusion soufflage de corps creux :**

Dans une opération de soufflage de corps creux le polymère fondu est expulsé par une filière de forme tubulaire en mode continu ou discontinu pour former une paraison. Ensuite, la paraison est gonflée à l'intérieur d'un moule pour produire un corps creux ; (par exemple des bouteilles).

L'épaisseur de la paraison dépend de la géométrie finale de la filière. Pendant cette opération, les déformations de surface les plus aisément observables sont les raies de filière.

### d) Extrusion – soufflage de gaine (extrusion –gonflage) :

Soufflage de gaine est un processus où le polymère fondu s'écoule par une filière annulaire. Le polymère fondu forme alors un tube, gonflé grâce à une surpression d'air pour former une bulle. L'épaisseur de la gaine est déterminée par le gonflement et la vitesse d'étirage. Le soufflage de gaine est probablement le procédé de transformation dominant pour les polymères commerciaux tels que Les films [3].

La qualité du film est déterminée par l'homogénéité d'épaisseur le long de la circonférence de la bulle et également par la propriété optique et mécanique.

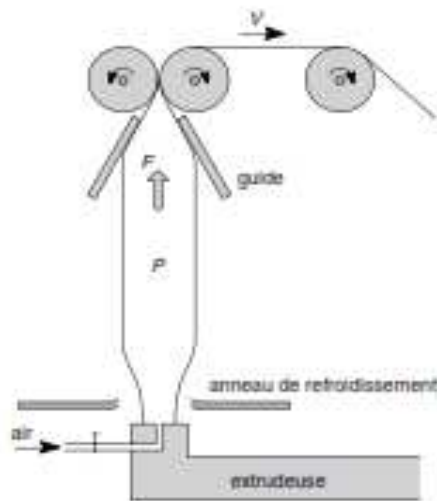


Figure I.3: Dispositif de soufflage de gaine

### e) Extrusion de plaques et de feuilles :

Les profilés très plats et larges sont considérés comme des plaques ou feuilles et leur production par extrusion est courante dans l'industrie. L'extrusion de ces articles exige un équipement spécial pour ce qui concerne la tête, la filière et les dispositifs de réception.

## Avantages et les inconvénients de l'extrusion :

- **Avantages:** prix des pièces peu élevé, temps de cycle très court, possibilité de renfort des pièces en utilisant une double épaisseur.
- **Inconvénients :** faible rigidité de certaines zones étirées, pas de constance d'épaisseur et un étirement différent suivant les zones, prix des outillages reste élevé.

## I.8.1.2 injection :

Le procédé d'injection permet de fabriquer des pièces de géométrie complexe en une seule opération.

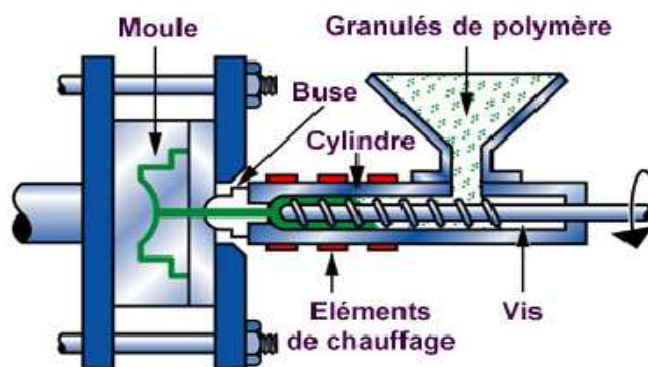


Figure I.4 : machine d'injection plastique

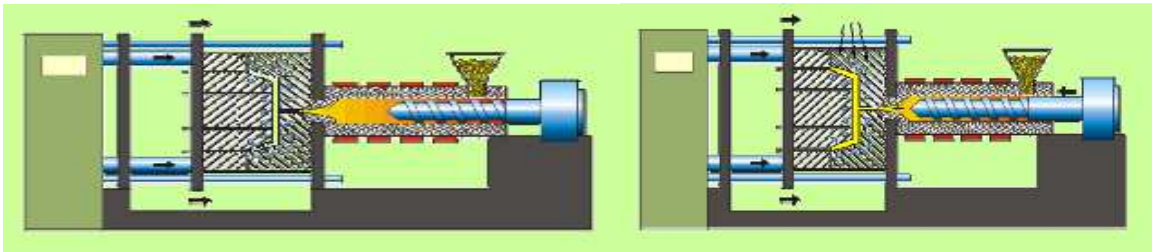
Les différentes phases du cycle d'injection se déroulent de la manière suivante :

- La matière plastique sous forme de granules, est versée dans une trémie pour alimenter une vis sans fin logée dans un tube chauffé (semblable à celui de l'extrudeuse mono vis)
- Dans un premier temps, la buse à l'extrémité du fourreau étant obturée, la vis tourne en reculant et le polymère fondu s'accumule en tête de vis (fig. 5-1).

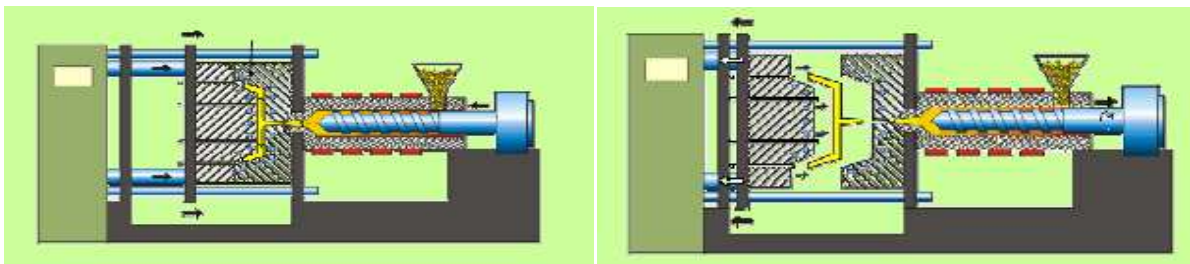
## Chapitre I : Généralités sur les polymères

- Une fois que la quantité de polymère nécessaire à la fabrication de la pièce a été fondue, la buse s'ouvre et la vis se transforme en piston qui injecte à grande vitesse le polymère chaud dans un moule fermé et froid (fig. 5-2).
- Le refroidissement du polymère se fait au contact avec les parois du moule (fig. 5-3).
- Ejection de la pièce (fig. 5-4).

Ce procédé permet une transformation en discontinu des thermoplastiques. On obtient après démoulage des produits finis ou semi-finis de formes complexes .C'est une méthode de production très rapide pour produire des objets en très grande quantité.[8][3]



1- Fermeture du moule et plastification. 2-Injection



3-refroidissement.

4-Ouverture du moule et éjection de la pièce

**Figure. I. 5 : Les différentes phases du cycle d'injection.**

# Chapitre I : Généralités sur les polymères

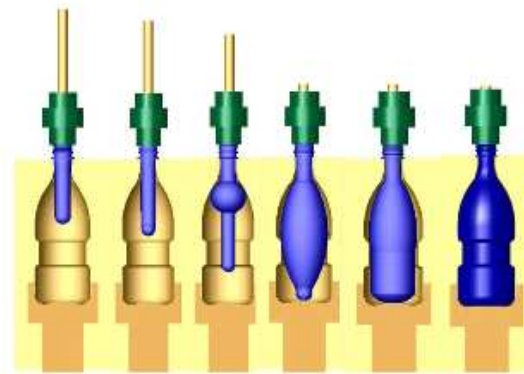
---

a) L'injection –soufflage (ou bi étirage-soufflage) :

Est un procédé utilisé pour fabriquer la plupart des bouteilles et des flacons. qui présentent de bonnes propriétés mécaniques.

Le cycle de fabrication se compose de quatre étapes :

- Réalisation par injection d'une préforme.
- Transfert de cette préforme dans une station de réchauffage pour que le matériau soit réchauffé dans un domaine caoutchouteuse.
- Transfert de la paraison chaude dans un moule et soufflage pour que le polymère vienne en contact avec les parois du moule.
- Refroidissement et éjection de la pièce.



**Figure I.6 : procédé d'injection –soufflage.**

## **Les avantages et les inconvénients de l'injection :**

- **Avantages :** grande capacité de production, procédé totalement automatisable, pièces utilisables à la sortie des presses, belle finition des pièces et variété de couleur impressionnante, précision intéressante selon le choix de la matière, productivité très intéressante
- **Inconvénients :** Prix élevé des outillages, retrait

## I.8.1.3 Le calandrage :

Ce procédé de transformation en continu aboutit à des feuilles, de plaques ou des films. Il consiste à faire passer la matière à l'état pâteux entre deux cylindres chauffants écartés de l'épaisseur désirée. A la sortie de la calandre, le produit passe dans un refroidisseur, puis est éventuellement enroulé en bobines. Le calandrage est surtout appliqué au PVC.

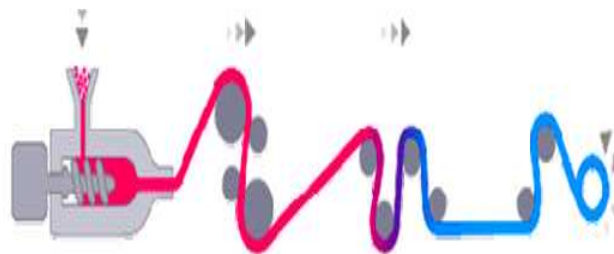
On distingue trois groupes de calandres :

- Les calandres utilisées pour la fabrication de feuilles ; de films et de plaques souples à partir d'un mélange de résine thermoplastique avec les différents additifs. Ce sont des machines lourdes à plusieurs cylindres (4 à 6) de grand diamètre consomment beaucoup d'énergie.
- Les calandres destinées à la finition de feuilles ou de plaques extrudées par la filière plate.
- Les calandres auxiliaires utilisées par plusieurs techniques de finition telles que plaxage ; enduction ; et grainage.

Boudineuse  
enrouleuse

calandre à (04) cylindres

refroidissement



**Figure I.7: Procédé de calandrage.**

### Les avantages et les inconvénients de calandrage :

- **Avantages :** Un très bel aspect de surface, une très grande régularité d'épaisseur.
- **Inconvénients :** Le prix est élevé.

### I.8.1.4 Le rotomoulage :

Le rotomoulage est utilisé pour la fabrication d'objets creux de grandes dimensions ou de formes complexes et pour les petites séries.

On introduit le polymère sous forme de poudre, dans un moule (fig. a) que l'on fait tourner dans toutes les directions (fig. c) pour que la matière couvre toute la paroi, puis on chauffe pour la gélifier et enfin on refroidit (fig. e)[7].



(a) Remplissage du moule      (b) chauffage      (c) rotation



(d) Rotation      (e) refroidissement      (f) éjection

Figure I.8 : Cycle de rotomoulage

#### Les avantages et les inconvénients de rotomoulage :

- **Avantages** : Prix des moules et des pièces peu élevés ; une épaisseur constante ;
- **Inconvénients** : Temps de cycle relativement longs ; pas de bons états de surface ; retrait est important pour les grandes dimensions ;

## I.8.1.5 Thermoformage

Le thermoformage est l'un des grands procédés de mise en forme des polymères permettant de réaliser, à partir de feuilles ou plaques généralement extrudées ou calandrées, des objets concaves d'épaisseurs et de dimensions diverses. Il consiste à chauffer une feuille de polymère jusqu'à une température permettant sa déformation, puis à la mettre en forme dans un moule. Après refroidissement, on obtient l'objet désiré. L'utilisation de cette technique est possible grâce au comportement des matières thermoplastiques (plus marqué pour les amorphes) qui prennent une consistance caoutchouteuse au-dessus de leur température de transition vitreuse et peuvent donc être aisément formées et figées dans cet état par refroidissement [9].

### a) Matériaux thermoformables :

Les polymères thermoplastiques sont les matériaux thermoformables par excellence ; surtout les thermoplastiques amorphes ; Parmi eux le polystyrène reste le plus utilisé.

Le tableau 5-1 ci-dessous présente des plages de formabilité de certains polymères :

**Tableau 5-1** : Plages de formabilité des principaux polymères utilisés en thermoformage

Polymère	symbole	Type	Tg(C°)	Tf(C°)	Plage de formage(C°)
Polystyrène	PS	Amorphe	90	-	130-182
Polychlorure de vinyle	PVC	Amorphe	90	-	100-155
Poly (acryl butadiène styrène)	ABS	Amorphe	90 -120	-	130-180
Poly (méthylméthacrylate)	PMMA	Amorphe	100	-	150-190
Polycarbonate	PC	Amorphe	150	-	170-200
Polypropylène	PP	Semi-cristallin	5	165	150-165
Polyéthylène téréphtalate	PET	Semi-cristallin	70	255	120-180

# Chapitre I : Généralités sur les polymères

b) les étapes de thermoformage :

- Fixation d'une plaque ou d'une feuille rigide sur un cadre.
- Chauffage de la plaque au-dessus de la température de transition vitreuse du polymère.
- Formage par aspiration et maintien de la déformation de la feuille jusqu'à la fin du refroidissement.
- Refroidissement de l'objet à la température ambiante.
- Démoulage et découpage des bords s'il est nécessaire.

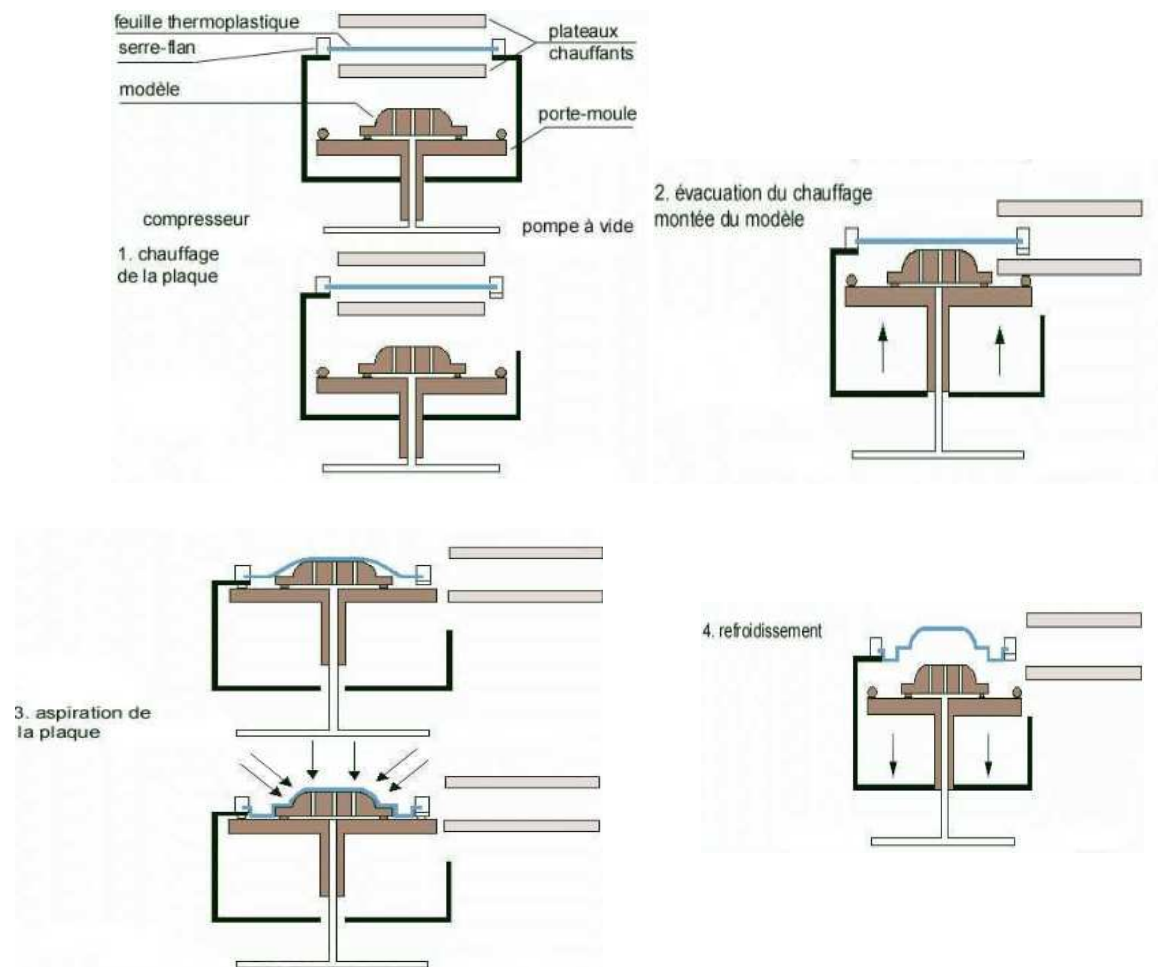


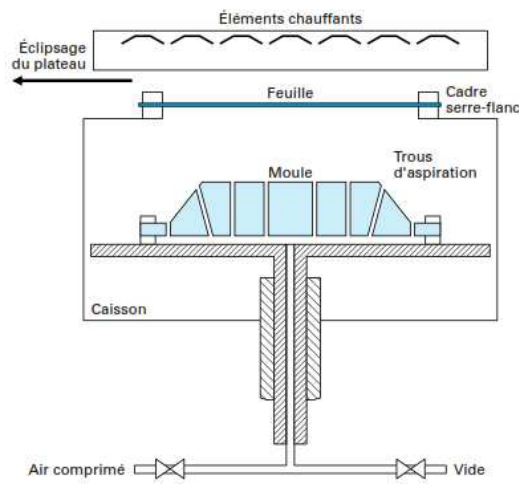
Figure I.9: cycle de thermoformage.

c) types de thermoformage :

La géométrie de la pièce à réaliser va imposer le type de moule et par conséquent, le type de formage. On distingue le formage négatif et le formage positif.

➤ **formage sur un moule positif :**

Le thermoformage avec ces moules est appelé « drapage » car la feuille Préchauffée est drapée sur le moule par la pression atmosphérique externe, l'air entre le moule et la feuille est aspiré par une pompe à vide

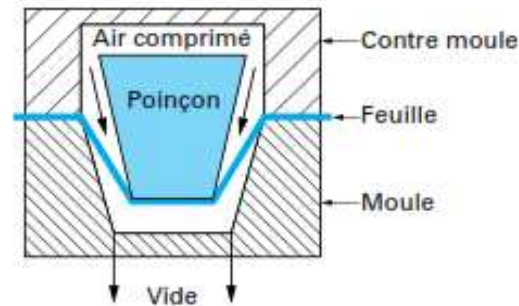


**Figure I.10 : Schéma d'une machine de thermoformage à moule positif.**

Pour ce type de moule, la distribution d'épaisseur dans l'objet n'est pas homogène, l'épaisseur du haut de l'objet est légèrement inférieure à l'épaisseur initiale de la feuille, les flancs par contre sont très étirés et très fins. La forte épaisseur au sommet est accentuée par le refroidissement de la feuille par contact avec le moule.

➤ **Formage sur un moule négatif :**

Le moule est conçu comme une cavité percée de petits orifices pour l'évacuation de l'air emprisonné entre la feuille et lui-même. Pour déformer la feuille, on emploie généralement une pression d'air (**Figure III.11**), dans le cas des thermoformages profonds ( $H/D$  supérieur à 1). On utilise des poinçons mécaniques, ces derniers facilitent à la fois la déformation et la régularisation des épaisseurs finales.



**Figure III.11 : principe de thermoformage sur un moule négatif.**

➤ **les moules :**

Le choix du matériau constitutif d'un moule est directement relié à la cadence de production ; si la série est faible, on utilise généralement le bois où les résines synthétiques; pour les grandes séries de plusieurs milliers de pièces, on préférera d'utiliser l'aluminium ou l'acier, La maîtrise du chauffage et du refroidissement du moule est essentielle pour la qualité des objets et leur stabilité dimensionnelle. Le bois et les résines synthétiques étant mauvais conducteur thermique, le temps de cycle est long pour éviter les échauffements de la surface ; dans le cas des résines synthétiques, on ajoute souvent des charges conductrices mais, malgré un circuit de refroidissement, les échauffements restent largement supérieurs à ceux de l'acier ou de l'aluminium, par contre L'acier et l'aluminium, présentent une grande résistance mécanique, ce qui autorise des circuits de refroidissement très performants, permettant d'atteindre les plus hautes cadences de production.

## **I.8.2 Mise en œuvre des thermodurcissables**

Comme tous les plastiques, les matières thermodurcissables présentent certaines conditions (température, temps) la plasticité nécessaire à leur mise en forme. Les thermodurcissables peuvent donc être démoulés à chaud, contrairement aux Thermoplastiques qui doivent être démoulés après refroidissement. Dans le cas du moulage des matières thermodurcissables, il est préférable de parler de fluidité plutôt que de viscosité.

la fabrication des polymères thermodurcissable se déroule habituellement en deux étapes. Il faut d'abord préparer un polymère linéaire (parfois appelé pré-polymère) à l'état liquide et de faible masse molaire. Le matériau acquiert ensuite la dureté et la rigidité du produit fini dans un moule ayant la forme voulue. Cette deuxième étape, appelée « durcissement », peut avoir

## Chapitre I : Généralités sur les polymères

lieu durant le chauffage ou par ajout de catalyseurs et se déroule souvent sous pression. Durant le durcissement, des modifications chimiques et structurales se produisent à l'échelle moléculaire et entraînent la formation d'une structure réticulée. Après le durcissement, les polymères thermodurcissables peuvent être retirés du moule même s'ils sont encore chauds, puisqu'ils ont acquis une stabilité dimensionnelle. Les matériaux thermodurcissables sont difficiles à recycler, ils sont utilisables à des températures plus élevées que les thermoplastiques et encore ils sont chimiquement plus inerte.

### I.8.2.1 Moulage par compression :

C'est la technique la plus simple. On utilise la matière sous forme de poudre, ou de granulés, Cette technique consiste à presser, à chaud, la matière dans un moule. Le moule est ensuite fermé à l'aide d'une presse hydraulique. Sous l'action de la chaleur et de la pression, la matière commence par se fluidifier et prend la forme du moule. La mauvaise conductivité thermique de la matière, le gradient de température de la masse dans le moule est important. La couche en contact avec la surface du moule commence à réticuler avant le cœur, ce qui provoque des tensions internes. Il est donc recommandé d'éviter le moulage par compression des pièces trop épaisses ou comportant de fortes variations d'épaisseur.

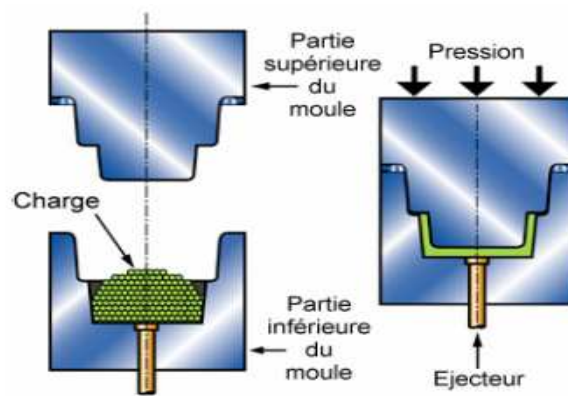


Figure III.12: moule de compression.

# Chapitre I : Généralités sur les polymères

---

a) Cycle de moulage :

Les différentes phases du cycle se déroulent de la manière suivante :

Chargement du moule, fermeture du moule, dégazage éventuel, cuisson; ouverture du moule, éjection des pièces, nettoyage du moule ;

➤ **Chargement du moule :**

La quantité de matière doit être soigneusement ajustée avant son introduction dans le moule. Les poudres à mouler sont dosées soit par pesée, soit à l'aide d'un doseur volumétrique ou encore en utilisant des pastilles d'une masse connue.

➤ **fermeture du moule :**

La fermeture doit être lente pour permettre aux gaz de s'échapper ; ce dernier est dû à l'humidité, et aussi à l'air contenu dans les empreintes du moule.

➤ **Dégazage éventuel :**

On procède à une réouverture du moule, limitée dans le temps pour l'évacuation des gaz. Le dégazage est effectué juste en fin de fermeture du moule. Il n'est pas toujours nécessaire et doit être réalisé avec précaution car il peut provoquer des traces de recollement de matière sur la pièce.

➤ **cuisson :**

Cette opération de réticulation conduit à l'état rigide permettant le démoulage à chaud. Elle demande un certain temps qui peut être, par exemple, de l'ordre de 1 min par mm d'épaisseur pour une compression simple sans préchauffage.

➤ **Ouverture du moule :**

Elle doit être lente pour ne pas détériorer les pièces.

➤ **éjection des pièces :**

Les pièces sont enlevées en toute précaution ce qui diminue les risques de déformation.

➤ **nettoyage du moule :**

On utilise généralement de l'air comprimé pour enlever les bavures.

➤ **Les avantages et les inconvénients de Le moulage par compression :**

- **Les avantages :** Pression utilisée est relativement faible, moulage de pièces de grande surface, pertes de matière plus faibles (absence de carotte), retrait plus faible, déformation des pièces moulées moins remarquable.
- **les inconvénients :** Temps de cycle plus longs, opération d'ébavurage importante. grande différence d'épaisseur.

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons fait une synthèse bibliographique associée aux généralités sur les polymères . Ainsi, les polymères sont classés comme des matériaux complexes en comparaison aux matériaux issus de petites molécules. Est aussi nous avons passé en revue toutes les techniques de transformation des polymères. Ainsi, nous avons décrit succinctement l'extrusion, l'injection, le thermoformage, le calandrage, le roto moulage.

# Chapitre II : Stéréorégularité et propriété du polypropylène (PPH/PPC)

---

## Introduction

Ce chapitre est consacré à la définition du polypropylène, en commençant par donner la formule chimique du monomère qui forme le modèle à répétitions dans la chaîne du polymère, on donne aussi la classification des polypropylène selon leur composition chimique (comportant uniquement le monomère propylène, ou en plus du propylène existe d'autres éléments chimiques). Nous nous intéressons dans ce qui suit au polypropylène homopolymère le PPH ainsi qu'au PPC qui est le polypropylène copolymère.

## II.1 Généralité sur le Polypropylène

Le polypropylène (PP) est un des matériaux thermoplastiques le plus important d'un point de vue économique. En 2002, la production de l'Europe occidentale a atteint environ 8 million de tonne.

Le polypropylène est une polyoléfine saturée c'est l'un des quatre thermoplastiques les plus utilisés avec le polyéthylène (PE), le polystyrène (PS) et le poly(chlorure de vinyle) (PVC). Le polypropylène est formé de chaînes linéaires constituées des motifs propylène (CH<sub>2</sub>=CH-CH<sub>3</sub>) (le monomère) répétés par la polymérisation dont la formule générale (polymère) est représentée sur la figure II-1.

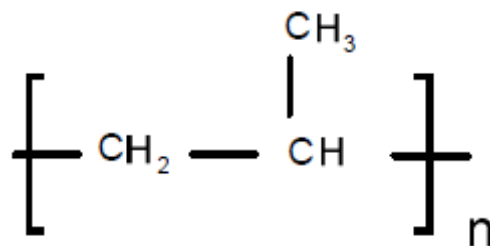


Figure II.1 : Unité de répétition du polypropylène [12]

Sous le nom de polypropylène se cache en réalité tout un ensemble de matériaux. On peut au moins distinguer les homopolymères, les copolymères et les compounds.

## Chapitre II : Stéréorégularité et propriété du polypropylène (PPH/PPC)

**Un homopolymère** est obtenu par polymérisation Ziegler Natta d'un seul monomère, en l'occurrence le *propylène*. Ce dernier est gazeux à température ambiante, très soluble dans l'acide acétique et insoluble dans l'eau.

**Un copolymère** est un assemblage aléatoire ou ordonné d'au moins deux monomères, Dans le cas du polypropylène, il est obtenu par copolymérisation de *propylène et d'éthylène*. La structure de ces copolymères est semblable à celle des homopolymères avec une distribution statistique des motifs éthyléniques (copolymères statistiques). On estime que 20% de la production de matériaux étiquetés PP sont en fait des copolymères.

**Les compounds** sont des mélanges de PP et d'additifs minéraux ou des mélanges PP/élastomère. Parmi les charges minérales entrant dans la composition de compounds a base PP, citons par exemple : les fibres de mica et des composés comme le talc ou le carbonate de calcium, la teneur de ces composés incorporés au PP n'excède pas 40%. Leur incorporation au PP améliore les propriétés thermiques et/ou mécaniques de ce dernier (tenue thermique - rigidité — résistance au choc...).

Les compounds PP/élastomère sont caractérisés par une résistance aux chocs accrue à température ambiante et jusqu'à des températures allant jusqu'à  $-40^{\circ}\text{C}$ . Par contre, leur rigidité et leur tenue thermique sont plus faibles que celles des PP non modifiés. Les différentes configurations possibles du polypropylène homopolymère sont présentées sur la figure II.2 [12].

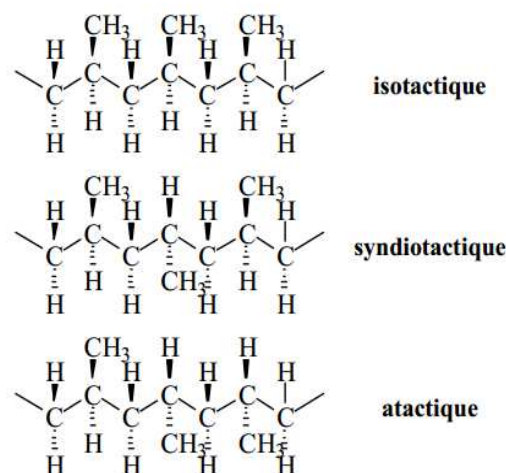


Figure II.2 : Représentation d'une chaîne d'un polypropylène : Structure chimique du polypropylène, a) polypropylène isotactique, b) polypropylène Syndiotactique, c) polypropylène atactique [13]

## Chapitre II : Stéréorégularité et propriété du polypropylène (PPH/PPC)

---

Les chaînes de polypropylène isotactique (PPi) et syndiotactique (PPs) peuvent s'aligner les unes par rapport aux autres du fait de leur stéréorégularité et ainsi former des structures cristallines. Ce sont des polymères semi-cristallins. En revanche, les chaînes de polypropylène atactique ne peuvent pas s'aligner de cette façon du fait de (absence de stéréorégularité au sein des chaînes). Par conséquent, le polypropylène atactique (PPa) est entièrement amorphe. Le degré de cristallinité d'un échantillon de PPi ou de PPs dépend de son histoire thermique et de la structure moléculaire des chaînes.

### II.2 Cristallisation du Polypropylène

Les polypropylènes isotactique et syndiotactique sont des polymères semi-cristallin, cela est montré sur la figure II.3.

Les deux phases sont liées entre elles par des segments de chaînes macromoléculaires appelés molécules de lien, car ces dernières peuvent participer à la formation de plusieurs lamelles cristallines en même temps [13].

Les matériaux semi-cristallins ont la particularité de pouvoir cristalliser lorsqu'ils se trouvent à des températures comprises entre leur température de transition vitreuse  $T_g$  et leur température de fusion  $T_f$ . Néanmoins, seule une partie des chaînes peut cristalliser et former ainsi les zones cristallines. Le reste constitue la zone amorphe.

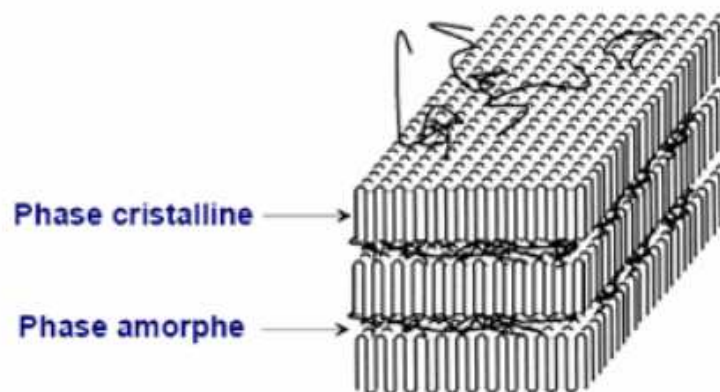


Figure II.3: Structure d'un polymère semi-cristallin [14]

## Chapitre II : Stéréorégularité et propriété du polypropylène (PPH/PPC)

Il existe trois manières différentes de faire cristalliser un polymère semi-cristallin. : la cristallisation non-isotherme, la cristallisation isotherme, appelée recuit, et enfin la cristallisation induite [15].

La formation de structures cristallines fait intervenir deux mécanismes :

Dans un premier temps, une partie des chaînes s'arrangent entre elles pour former des structures très organisées sous forme de lamelles cristallines constituées de mailles cubiques, orthorhombiques et hexagonales. Ces premiers arrangements constituent des germes de cristallisation.

Les lamelles formées au cours de l'étape précédente croissent à partir du germe de manière radiale pour former à l'échelle supérieure une structure tridimensionnelle : le sphérolite.

Un échantillon de polymère semi-cristallin est constitué d'un nombre élevé de sphérolites.

Au sein du sphérolite, la zone inter et intra-lamellaire est généralement constituée de phase amorphe.

Dans un polymère semi-cristallin, les sphérolites sont contigus et leur diamètre est déterminé par le nombre de germes formés qui dépend des conditions de cristallisation.

La figure II.4 présente un modèle de sphérolite avec une vision détaillée d'empilement de lamelles.

Les taux de cristallinité et la structure cristalline, en particulier la forme des sphérolites ainsi que la structure et l'organisation des lamelles, dépendent de la nature du polymère (nature des chaînes), l'histoire thermique et les conditions de cristallisation [17].

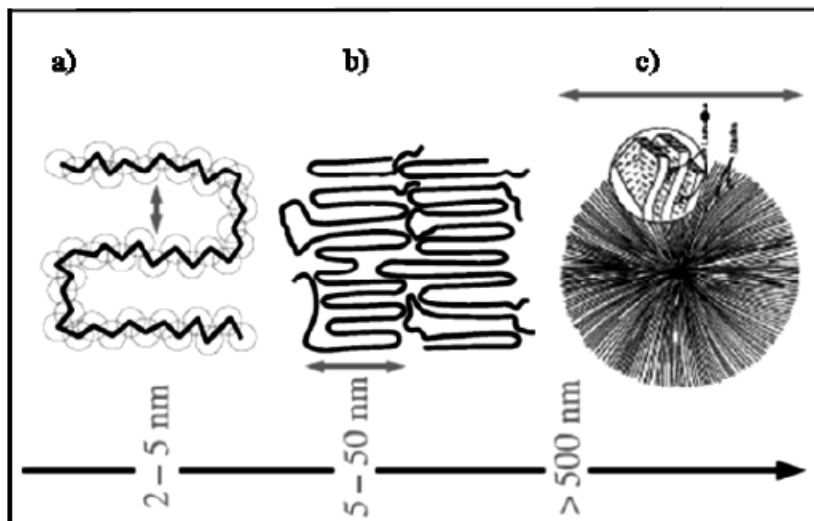


Figure II.4 : Illustration des différentes structures composant un cristal de polymère, a) modèle de faisceaux, b) modèle de lamelles et c) structure sphérolitique [16]

### II.3 Structure Cristalline du Polypropylène

#### II.3.1 Structure cristalline de PPH

Le polypropylène homopolymère, constitue uniquement d'une même molécule de base (le propylènes) se classe à son tour trois polymères selon la disposition du groupement méthyle dans la macro chaîne moléculaire, on distingue trois polypropylène : l'isotactique, le syndiotactique et l'atactique.

##### II.3.1.1 Structure cristalline du polypropylène isotactique PPI

Le polypropylène isotactique peut se présenter sous quatre formes cristallines différentes selon les conditions de cristallisation. Il est important de noter que quelle que soit la forme cristalline, les chaînes se trouvent toujours en conformation de type hélice, qui favorise l'arrangement régulier des chaînes entre elles et la formation des structures cristallines. Les quatre polymorphes du PPI sont présentes ci-dessous.

##### a) Forme $\alpha$

La forme  $\alpha$  est la forme cristalline la plus fréquemment rencontrée au sein d'un échantillon PPI. Celle-ci est obtenue sous des conditions de cristallisation « classiques », qu'il s'agisse de cristallisation isotherme ou non-isotherme sur toute la gamme de température et ce, pour tout type de PPI. La forme  $\alpha$  est caractérisée par des chaînes arrangées selon une maille de type monoclinique [13], Les différentes conformations de chaînes possibles de Polypropylène Isotactique PPI sont représentées forme  $\alpha$  la figure II.5.

## Chapitre II : Stéréorégularité et propriété du polypropylène (PPH/PPC)

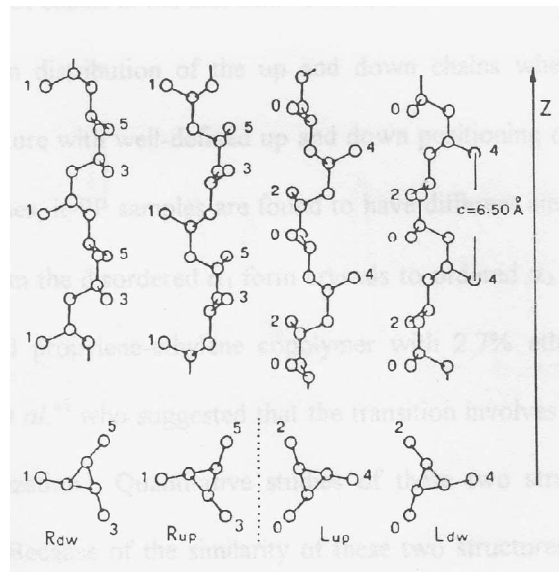


Figure II.5: conformations des chaînes du polypropylène isotactique Droite (R) - et Gauche (L) - les hélices dans leur configuration Haut (up) et Bas (down) [14]  
 $a = 6.65\text{Å}$ ,  $b = 20.96\text{Å}$ ,  $c = 6.5\text{Å}$  et  $\beta = 99^\circ$

### b) Forme $\beta$

La forme  $\beta$  est une forme cristalline relativement courante au sein d'échantillons de PPI. La forme  $\beta$  est caractérisée par un arrangement des chaînes selon une maille hexagonale [14].

La forme  $\beta$  est obtenue en parallèle à la production de cristaux  $\alpha$  sous certaines conditions particulières de cristallisation (hautes vitesses de refroidissement et dans une gamme de température particulière). Des cristaux de forme  $\beta$  peuvent également être produits en quantités importantes lors de cristallisations induites par cisaillement [14]. Enfin, il est possible d'obtenir une quantité importante de cristaux  $\beta$  sous des conditions de cristallisation classiques suite à l'incorporation dans le polymère d'agents nucléons  $\beta$ , par exemple dans le but d'optimiser certaines propriétés mécaniques et l'allongement à la rupture.

### c) Forme $\delta$

La forme  $\delta$  est une forme cristalline rencontrée beaucoup plus rarement que les formes  $\alpha$  et  $\beta$ . Elle est obtenue pour des polypropylènes de faibles poids moléculaires ou lors

## Chapitre II : Stéréorégularité et propriété du polypropylène (PPH/PPC)

---

de cristallisation effectuées sous haute pression. Il est d'ailleurs assez difficile d'obtenir la forme  $\delta$  pure. Au sein de cette forme cristalline, les chaînes sont arrangées dans une maille de type triclinique [15].

### d) Forme Smectique :

La forme smectique est une forme métastable de PPI caractérisée par une structure à mi-chemin entre la forme amorphe et une structure cristalline. En effet, la forme smectique est une forme relativement ordonnée mais qui comprend néanmoins un grand nombre de défauts cristallographiques. Elle est généralement obtenue suite à une trempe du polypropylène isotactique fondu. Il est intéressant de noter que cette forme cristalline particulière est stable à la température ambiante mais qu'elle se transforme en forme  $\alpha$  à partir de 60°C [16].

### II.3.1.2 Structure cristalline du polypropylène syndiotactique :

De manière générale, le taux de cristallinité du polypropylène syndiotactique est nettement plus faible que celui du polypropylène isotactique. Néanmoins, le polymorphisme du PPs est particulièrement complexe avec quatre formes cristallines possibles au sein desquelles les chaînes peuvent adopter des conformations différentes.

### II.3.1.3 Les différentes conformations des chaînes cristallines du PPs :

Les chaînes de PPs peuvent adopter trois conformations possibles selon la forme cristalline de l'échantillon. La première conformation, la plus stable, correspond à une conformation hélice avec une symétrie et une séquence d'angle de torsion le long de la chaîne. La deuxième conformation de chaîne est une conformation de type trans-planaire avec une symétrie et une séquence d'angle de torsion [17]. Enfin une dernière conformation possible mais plus rare est une conformation de type hélice avec une symétrie et une séquence d'angle de torsion [17]. Les différentes conformations de chaînes possibles sont représentées sur la Figure II.6

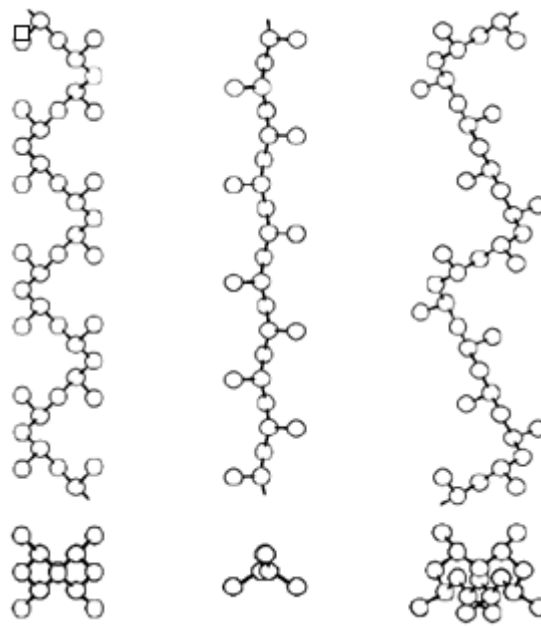


Figure II.6 : les différentes conformations des chaînes du sPP

### II.3.1.4 Structure cristalline du polypropylène atactique PPa :

Si l'assemblage est aléatoire, le polymère sera atactique. La conséquence est que, dans ce dernier cas, le manque de régularité rend la cristallisation impossible ou très difficile et le polymère se présentera sous forme amorphe (ce qui peut être intéressant pour la qualité optique, mais ne favorisant pas les propriétés mécaniques).

### II.3.2 Structure cristalline du polypropylène copolymère PPC :

Le propylène peut former des copolymères avec les oléfines différentes: l'éthylène, le butène, même l'octane et l'hexane.

Quand est copolymères l'éthylène avec le propylène, il agit comme un défaut structurel ou chimique le long du squelette du polymère. Il a également été observé que sur l'introduction de ces groupes, cristallinité, épaisseur du cristal et des propriétés connexes comme la température de fusion, le module de traction et une diminution de l'opacité avec l'augmentation de la teneur en comonomère [18].

## Chapitre II : Stéréorégularité et propriété du polypropylène (PPH/PPC)

---

Il a été observé que la structure cristalline de copolymères propylène / éthylène varie entre deux extrêmes 1-7%. Pour de faibles teneurs en éthylène, la structure cristalline est semblable à celle de polypropylène, tandis que la teneur plus élevée est similaire à celle du polyéthylène. Un comportement similaire a été observée pour polypropylène / butène copolymères.

Il a été montré que l'inclusion d'unités de comonomère d'éthylène dans la chaîne de polypropylène peut avoir une influence sur la régularité de la structure moléculaire [19].

### **II.4 Propriétés du polypropylène :**

#### **II.4.1 Propriétés du polypropylène homopolymère :**

##### **II.4.1.1 propriété de polypropylène PPI :**

Le polypropylène isotactique est encore aujourd'hui la forme isomère la plus intéressante en particulier grâce à son taux de cristallinité relativement élevée comparé aux formes atactiques et syndiotactiques ainsi qu'à sa facilité de mise en œuvre. Ses propriétés thermiques et mécaniques sont caractéristiques d'un matériau thermoplastique.

##### **a) Propriétés thermiques du PPI :**

Le polypropylène isotactique possède une gamme de températures de fusion comprises entre 140 °C et 170 °C et une température de transition vitreuse comprise entre - 20 °C et 10 °C selon les grades, ce qui fait de l'iPP une polyoléfine de grande commodité. Sa température de fusion relativement basse ainsi que ses propriétés de viscosité intéressantes facilitent sa mise en œuvre. Comme indiqué précédemment, le PPI possède une bonne aptitude à la cristallisation avec des taux de cristallinité compris entre 40 % et 50 % selon les conditions de cristallisation, la nature, le passé thermique de l'échantillon et les conditions de cristallisation. Par ailleurs, la vitesse de cristallisation élevée du PPI favorise sa mise en forme [20]. Par conséquent, ces paramètres contribuent à faire de l'iPP un polymère de grande commodité et c'est pourquoi il est très utilisé pour

## Chapitre II : Stéréorégularité et propriété du polypropylène (PPH/PPC)

---

des applications de type filage, réalisation de films par extrusion [21] ou d'articles par moulage par injection [21].

### **b) Propriétés mécaniques du PPI :**

De part son taux de cristallinité élevée, le PPI présente une rigidité relativement importante. La valeur maximale du module d'Young en traction est comprise entre 1 et 2,5 GPa ce qui est relativement élevée [22]. Par ailleurs, le PPI possède une gamme de déformation élastique relativement étroite avec un seuil de plasticité aux alentours de 10 % d'élongation et de ce fait le PPI ne présente quasiment aucune propriétés élastiques [22]. Enfin, toutes ces propriétés varient en fonction des grades du PPI, c'est-à-dire de la structure chimique et de la microstructure de l'échantillon ainsi que de la cristallinité et de la structure cristalline résultant de sa mise en œuvre.

### **c) Propriétés annexes du PPI :**

En marge de propriétés thermiques et mécaniques intéressantes, le PPI présente d'autres propriétés plus spécifiques qui contribuent à développer son expansion sur la marche comme d'excellentes propriétés électriques, une bonne résistance aux solvants ainsi qu'à l'environnement chimique en général.

### **II.4.1.2. Propriétés du polypropylène syndiotactique :**

#### **a) Propriétés thermiques du PPs :**

Comme indique précédemment, le polypropylène syndiotactique possède une aptitude à la cristallisation beaucoup plus limitée que celle du PPI puisque les taux de cristallinité dépassent rarement 20 %. Par conséquent, le PPs possède une gamme de température de fusion plus faible comprise entre 90 °C et 140 °C [23]. La température de transition vitreuse du PPs se situe quant à elle, comme pour le PPI, entre -10 °C et 10 °C [23].

## Chapitre II : Stéréorégularité et propriété du polypropylène (PPH/PPC)

---

Par ailleurs, le sPP présente une faible vitesse de cristallisation, ce qui nuit grandement à sa mise en œuvre. Par conséquent, la formation de films et de filaments de sPP pur à l'échelle industrielle est très difficile voire impossible. La mise en œuvre complexe du sPP ainsi que la gamme de températures de fusion relativement faible sont des facteurs majeurs limitant le nombre d'applications de cette polyoléfine.

### **b) Propriétés mécaniques du PPs :**

Les propriétés mécaniques du PPs sont complexes et étroitement liées à son polymorphisme présenté précédemment. Les échantillons de PPs non orientés et les échantillons orientés comme par exemple les filaments et films présentent des comportements différents.

### **c) Propriétés annexes :**

En dehors de ses propriétés thermiques et mécaniques, le PPs présente des propriétés qui sont très différentes de celles associées aux polypropylènes conventionnels. Le PPs présente une très bonne transparence naturelle ainsi qu'une excellente résistance aux rayonnements UV. Les pigments se dispersent particulièrement bien dans les matrices PPs, conférant par conséquent des couleurs plus brillantes et intenses aux échantillons produits.

En résumé, le PPs est un matériau aux propriétés atypiques. Il possède une dureté importante (i.e. capacité à absorber une énergie importante au cours d'une déformation) et un potentiel élastique prometteur pour des échantillons orientés. Néanmoins, ces propriétés intéressantes n'éliminent pas les faiblesses du PPs comme une ductilité et des propriétés mécaniques en général assez faibles comparées à la forme isotactique du polypropylène. De même, sa mise en œuvre est délicate du fait de sa faible vitesse de cristallisation. Par conséquent, les mélanges de PPs avec d'autres polymères tels l'HDPE ou le PPa ont été étudiés ces dernières années pour tenter de compenser les mauvaises propriétés mécaniques du PPs tout en conservant une part importante des propriétés intéressantes apportées par le PPs (dureté, élasticité, résistance au choc...) [24].

## Chapitre II : Stéréorégularité et propriété du polypropylène (PPH/PPC)

---

### II.4.2 Propriété du polypropylène copolymère :

Les copolymères à base de propylène du commerce contiennent souvent de 1 à 7% en moles de motifs éthylène.

Les copolymères montrent une raideur plus faible en raison de l'insertion d'unités récurrentes d'éthylène. L'interruption de la séquence de propylène conduit à d'autres propriétés telles que la cristallinité plus faible et une résistance aux chocs élevée. Une large gamme de propriétés peut être obtenue à partir de différents les qualités des matériaux de compositions différentes, différents poids moléculaires et la distribution de composition différente. Également des propriétés cristallographiques comme le volume de la cellule de l'unité ou de l'énergie libre de surface du pli de la chaîne peuvent changer avec l'augmentation de la teneur en comonomère [25].

#### **Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçut sur la diversité du polypropylène, cette diversité est dû soit a la position du groupement méthyle sur la macro chaine du polymère, ou a l'existence d'un autre monomère dans la chaine principale, ceci qui confer des caractéristiques différentes pour chaque polypropylène ainsi élaboré. Dans le chapitre suivant nous allons utilise deux polypropylènes (le premier homopolymère le second est un copolymère) pour former des mélanges qu'on analysera dans la suite du travail.

### Introduction :

Dans ce chapitre, on s'intéresse à la caractérisation des mélanges d'un point de vue :

- **Physique** consistant en la détermination des indices de fluidité qui permettent de choisir le mode d'élaboration (extrusion, injection, calandrage, rotomoulage...) des produit finis à partir des mélanges ainsi que l'analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier
- **Mécanique** pour la détermination des propriétés usuelles telles que le module de Young ( $E$ ), la contrainte au seuil d'écoulement ( $\sigma_{max}$ ), ainsi que les taux de déformations  $\epsilon_{max}$  des mélanges élaborés PPC/PPH. De plus, les différentes éprouvettes sont soumises à des tests de résilience en vue de la détermination de la résistance aux chocs ainsi que la détermination de l'évolution de la micro-dureté
- **Morphologique** : La Microscopie Electronique à Balayage (MEB), nous permettra l'analyse des faciès de rupture.

### III.1. Caractérisation physique

#### III.1.1. Indice de fluidité

L'indice de fluidité ou Melt Flow Index (MFI) est la masse de polymère extrudé, à température de fusion constante à travers une filière cylindrique sous l'action d'une charge.

La connaissance de l'indice de fluidité est un moyen simple et rapide pour appréhender les différences de viscosité de plusieurs matériaux plastique, fournissant ainsi une indication utile de leur fluidité lors de la transformation et choisir le procédé de fabrication adéquat.

A titre indicatif, le tableau ci-dessous nous renseigne sur le choix du mode d'élaboration de matériaux polymériques en fonction de l'indice de fluidité. On note que les polymères à grand indice de fluidité se prêtent mieux à l'élaboration par extrusion et que pour un faible indice de fluidité, l'extrusion est la plus adaptée. La figure III.1: représente le procédé de fabrication à adopter en fonction de l'indice de fluidité IF

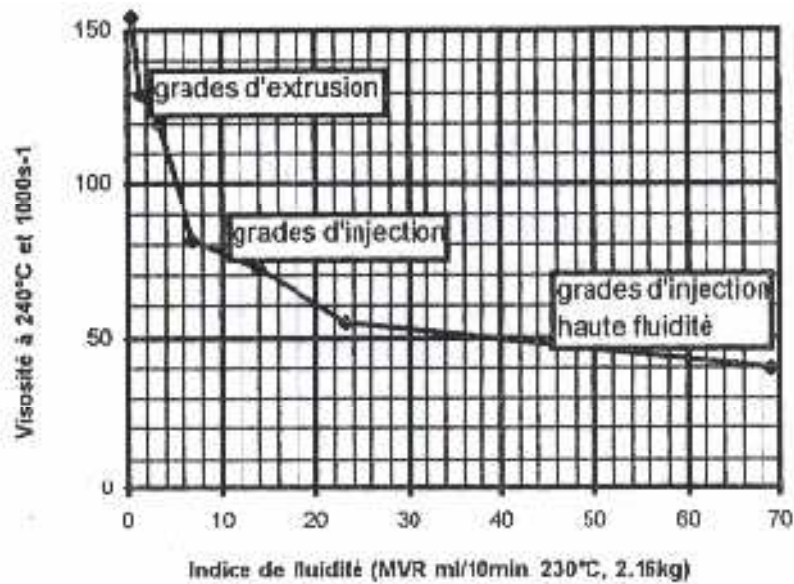


Figure III.1 Procédés de fabrication en fonction IF

Lorsque la viscosité est grande le procédé adapter ces extrusions donc en remarque l'indice de fluidité est faible on déduit que la viscosité et la masse molaire du polymère sont élevées ( $IF \Rightarrow \eta \downarrow \text{ et } Mw \downarrow$ ).

On donne ci-dessous quelques exemples pratiques de procédés de fabrication en fonction de l'indice de fluidité

Tableau III.1: Procédé de fabrication en fonction IF

Procédé	Produit fabriqué	MFI
<b>Extrusion</b>	Tuiles	< 0,1
	Feuilles, bouteilles, tubes fins	0,1 – 0,5
	Fils, câbles	0,1 – 1
	Feuilles minces	0,5 – 1
	Cordes, multifilaments	1 – 40
	Bouteilles	1 – 2
	Film	9 - 15
<b>Moulage par injection</b>	Pièces diverses	> 12
<b>Enduction</b>		9 – 15
<b>Thermoformage</b>		0,2 – 0,5

### Plastomètre :

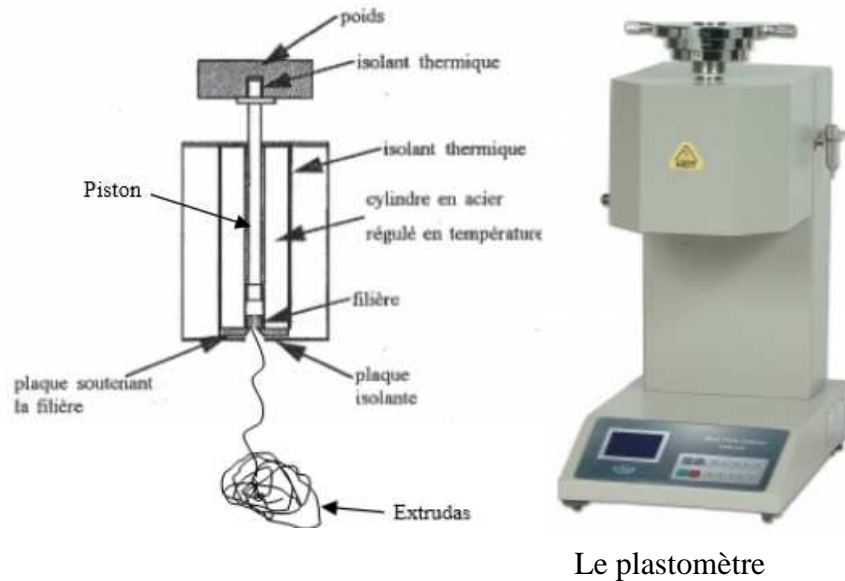


Figure III.2 : Le plastomètre et principe de fonctionnement.

### Mode opératoire

Le cylindre et le piston doivent être à la température choisie depuis au moins 15 minutes. Ensuite, on place 4 à 8 g de l'échantillon dans le cylindre selon l'indice de fluidité avec les conditions normalisées du plastomètre (voir le tableau III.2), et on comprime la matière en exerçant une pression sur le piston.

Tableau III.2 : Condition normalisées du plastomètre

Indice de fluidité	Masse de l'échantillon dans le cylindre en (g)	Intervalle de temps en (s)
0.1 à 0.5	4 à 5	240
0.5 à 01	4 à 5	120
01 à 3.5	4 à 5	60
3.5 à 10	5 à 8	30
10 à 25	6 à 8	10 à 15

On charge ensuite le piston avec une masse de poids donné et on laisse descendre sous l'effet de la pesanteur. Le polymère fondu passe à travers le cylindre. Un dispositif permet de sectionner à intervalles de temps réguliers, la matière extrudée qu'on recueille. La moyenne du poids des extrudés, nous permet d'obtenir l'indice de fluidité

L'indice de fluidité à chaud (I.F) est donné, en gramme durant le temps de référence, par la formule suivante :

$$IF = \frac{(s * m)}{t} \quad [g/10min] \quad (III.1)$$

s : temps de référence en seconde (s=600s).

m : masse moyenne des extrudés obtenues en (g).

t : intervalle de temps (en seconde) entre deux coupes d'un extrudé.

### III.1.2. Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier IRTF

#### a. Définition

Le rayonnement infrarouge (IR) fut découvert en 1800 par Frédéric Wilhelm Hershel. Il est basé sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé. Elle permet via la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques, d'effectuer l'analyse des fonctions chimiques présentes dans le matériau [26]. Il permet ainsi d'identifier les fonctions caractéristiques d'une molécule.

La spectroscopie moyenne infrarouge ( $4000 \text{ cm}^{-1} - 400 \text{ cm}^{-1}$ ) la plus adaptée pour l'élucidation de la structure moléculaire.

Les molécules diatomiques symétriques ( $O_2, N_2 \dots$ ) n'absorbent pas l'infrarouge [27].

#### b. Principe

Les molécules subissent des mouvements de vibration internes (d'élongation et de déformation). Quand une lumière IR traverse un échantillon, certaines liaisons absorbent de l'énergie pour changer de fréquence de vibration, faisant apparaître des bandes dans le spectre.

## Chapitre III : Méthodes expérimentales (Matériels et mode opératoire)

---

On utilise pour identifier des liaisons chimiques dans les molécules organiques, ils permettent de déterminer les fonctions chimiques dans ces molécules [28].

### c. Spectres infrarouges

Définition : On appelle nombre d'onde  $\sigma$  l'inverse de la longueur d'onde

$$\sigma = 1/\lambda : \quad \text{III.2}$$

Avec

$\sigma$  : nombre d'onde ( $\text{cm}^{-1}$ )

$\lambda$  : longueur d'onde (cm)

$$T(\%) = I/I_0 \quad \text{III.3}$$

Avec

T: la transmission

I : l'intensité transmise

$I_0$  : l'intensité incidente

Un spectre infrarouge représente la transmittance en fonction du nombre d'onde.

L'analyse s'effectue par un balayage des longueurs d'onde avec l'obtention d'un spectre infrarouge présentant des bandes d'absorption. L'analyse des fonctions organiques présentes dans la molécule s'effectue à l'aide de table indiquant la nature de la fonction selon le nombre d'onde mesuré. Une faible valeur de transmittance correspond à une forte absorption.

### d. Conditions d'analyse

Les échantillons sont analysés à l'état solide sous forme de pastilles fines. Les pastilles sont préparées avec un mélange de 95% massique de KBr et 5% de l'échantillon, préalablement broyé et séché, pendant au moins 24 heures à 120 °C.

Les halogénures des métaux alcalins ont la propriété de former un verre transparent sous haute pression (7000-10000 bar). KBr est utilisé le plus couramment, parce qu'il est transparent jusqu'à  $400 \text{ cm}^{-1}$  (c'est un élément neutre qui n'absorbe pas les rayonnements IR).

### Chapitre III : Méthodes expérimentales (Matériels et mode opératoire)

---

Une presse hydraulique est utilisée pour former les pastilles. L'échantillon est placé entre deux pastilles métalliques tenues dans le cylindre. La connexion latérale sert à évacuer l'air, ce qui est nécessaire pour éviter l'inclusion de bulles qui provoqueraient la cristallisation du KBr.

Les spectres IRTF ont été réalisés à l'aide d'un spectrophotomètre à Transformée de Fourier modèle ALPHA-T Brüker (figure 4). Ils ont été réalisés dans le domaine du moyen infrarouge, correspondant à des nombres d'onde ( $\nu = 1/\lambda$ ) compris entre  $400\text{ cm}^{-1}$  et  $4000\text{ cm}^{-1}$  moyen.

#### e. Principe d'analyse

On prépare les pastilles pour les 5 échantillons : 100PPC, 100PPH, 50PPH-50PPC, 55PPC-45PPH, 40PPH-60PPC.

#### f. Préparation des pastilles

On commence par le broyage des échantillons : 4 à 5 mg de la substance à analyser est mélangé avec 100 à 140 mg de KBr dans un mortier en agate (Figure III.3), les mélanges sont broyés très finement pour les rendre plus fin (poudre).



Figure III.3 : Mortier en agate pour le broyage.

La presse est assemblée (figure III.4.a): le cylindre est placé sur son socle et une pastille métallique est introduite avec la face polie vers le haut. On ajoute la poudre que l'on étale

## Chapitre III : Méthodes expérimentales (Matériels et mode opératoire)

d'une manière homogène. La deuxième pastille métallique est posée sur la poudre avec la face polie vers le bas. Il est impératif de placer la poudre entre les deux faces polies.

La pompe à vide est branchée et l'ensemble est mis sous une pression de 10 tonnes à l'aide d'une pompe hydraulique pour 2 fois (figure III.4.b).



Figure III.4 : (a) Presse à pastiller en acier inoxydable permettant de réaliser des pastilles, (b) l'appareil utilisé pour la formation des pastilles (pastilleuse ou pompe hydraulique).

### g. Enregistrement d'un spectre

La pastille obtenue pour chaque mélange est placée dans un support adapté au spectromètre (Figure III.5). Les pastilles de KBr sont placées dans le spectromètre (Figure III.6), et les spectres sont enregistrés en suivant les instructions sur l'ordinateur.



Figure III.5 : Supports pour pastilles.

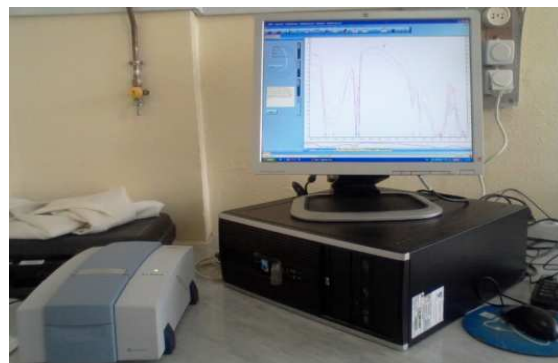


Figure III.6 : Spectrophotomètre à Transformée de Fourier Modèle ALPHA-T Brüker.

### III.2 : Caractérisation mécanique :

Les essais mécaniques sont indispensables à l'étude des matériaux. Pourtant, tous sont des essais de structure, dont les résultats ne sont pas une image simple du comportement intrinsèque des matériaux. En fait, l'expérimentateur n'a accès qu'aux grandeurs mesurables (force, déplacement, couple), alors que l'analyse mécanique doit s'appuyer sur des grandeurs intrinsèques (contraintes, déformations). Une modélisation de l'essai est donc toujours nécessaire pour relier sans ambiguïté les contraintes aux forces et les déformations aux déplacements.

#### III.2.1. Essai de traction

L'essai de traction est le moyen le plus couramment employé pour caractériser le comportement mécanique d'un matériau, consiste à partir d'un dispositif appropriée, à tirer avec un effort progressif sur les deux têtes d'une éprouvette de forme normalisée jusqu'à sa rupture, en suivant un processus de mise en charge à une vitesse de déformation constante. Cet essai est caractérisé par sa facilité de mise en œuvre et par la richesse des informations fournies., ces essais nous ont permis de déterminer les propriétés mécaniques caractéristiques usuelles telles que le module de Young , les contraintes au seuil d'écoulement, au plateau de plasticité et à la rupture respectivement.

##### a) Principe de l'Essai

Cet essai destructif consiste à soumettre des éprouvettes du matériau concerné, en forme de barreau cylindrique ou prismatique comportant une partie centrale calibrée à section constante  $S_0$  et longueur  $L_0$  raccordée à chaque extrémité à deux textes de section plus importante à un effort de traction, et cela généralement jusqu'à la rupture.

L'éprouvette utilisée de géométrie parfaitement définie est encastrée à ses deux extrémités dans des mors ou des mâchoires. L'un de ces mors est fixe. L'autre est mobile et relié à un système d'entraînement à vitesse de déplacement imposée ainsi qu'à un système dynamométrique.

## Chapitre III : Méthodes expérimentales (Matériels et mode opératoire)

### b) Présentation des éprouvettes normalisées

L'éprouvette d'essai est prélevée dans le matériau à caractériser et usinée à des dimensions normalisées, afin d'assurer une meilleure comparaison des essais effectués dans différents laboratoires. Pour chaque type de matériau, il existe un type d'éprouvette, Nous présentons ci-dessous (Figure III.7) la géométrie des éprouvettes normalisées utilisées dans notre travail.

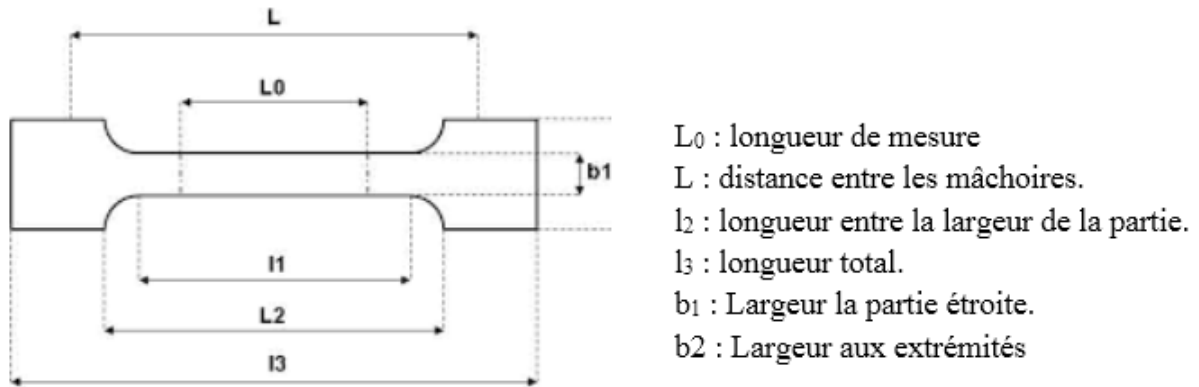


Figure III.7 ; Géométrie de l'éprouvette de traction

Les dimensions des éprouvettes sont représentées dans le tableau III.3

Tableau III.3 Dimensions des éprouvettes de traction

Dimension des éprouvettes	Valeurs	Unité
Longueur entre repères ( $L_0$ )	70	mm
Largeur ( $l$ )	7	mm
Epaisseur ( $e$ )	3	mm
Section initiale ( $S_0$ )	21	mm <sup>2</sup>

### c) Présentation de la machine de traction

La machine de traction (IBERTEST) est constituée essentiellement d'une traverse Inférieure fixe sur laquelle repose un dynamomètre errant à mesurer le déplacement et la Force appliquée à l'éprouvette et d'une traverse supérieure mobile entraînée par deux vis sans fin mises en rotation par un moteur électrique situé dans le compartiment inférieur de la Machine. Sur chacune des traverses se trouvent des mors permettant de fixer l'éprouvette. La Machine est pilotée automatiquement par un microordinateur. La Machine est pilotée automatiquement par un microordinateur (Figure III.8).



Figure : III.8. Machine de la traction

### III.2.2. Essai de résilience (Résistance à l'impact)

La connaissance des caractéristiques mécaniques déduites de l'essai de traction peut être insuffisante, puisque des ruptures peuvent être obtenues en dessous de la limite élastique dans des conditions particulières qui rendent le matériau fragile.

Tous les matériaux contiennent un certain nombre de microfissures qui deviennent instables et conduisent à la rupture lorsque la force appliquée dépasse une valeur critique.

#### a. Principe :

L'essai consiste à évaluer l'énergie qu'il faut fournir à un pendule pesant pour briser une éprouvette entaillée du matériau à tester. L'Énergie absorbée est obtenu en comparant la différence d'énergie potentielle entre le départ du pendule et la fin de l'essai. La machine est munie d'index permettant de connaître la hauteur du pendule au départ ainsi que la position la plus haute que la pendule atteindra après la rupture de l'éprouvette

## Chapitre III : Méthodes expérimentales (Matériels et mode opératoire)

L'énergie obtenue (en négligeant les frottements) est égale à :

$$W = m \cdot g \cdot h - m \cdot g \cdot h' \quad (\text{III.4})$$

m : masse du mouton-pendule (g).

g : accélération de la pesanteur (environ  $9.81 \text{ m.s}^{-2}$ ).

h : hauteur du mouton-pendule à sa position de départ h': hauteur du mouton-pendule à sa position d'arrivée, une éprouvette préalablement entaillée en son milieu et à mesurer l'énergie W (en joules) absorbée par la rupture. **La résilience** est définie par la lettre K ( $\text{Joules/cm}^2$ ).

### Les éprouvettes utilisées

Les éprouvettes injectées de type barreau ( $120 \times 12.7 \times 6 \text{ mm}^3$ ) ont été coupées à des longueurs de 63mm afin de les caractériser par des tests chocs Charpy entaillées à température égale à  $23^\circ\text{C}$ .

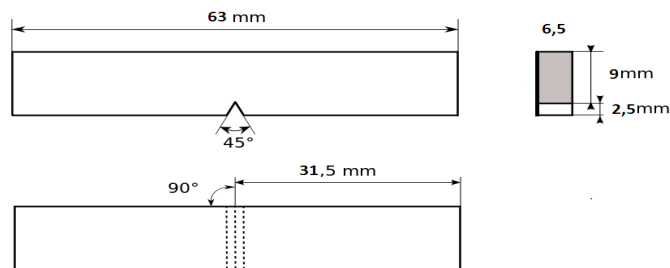


Figure : III.9. Eprouvette de résilience.

#### b. La machine de Charpy

Les essais sont réalisés à l'entreprise Electro-industries de Fréha sur la machine ZWICK 5102 Elle est mesurée sur des machines du type Charpy (éprouvette sur deux appuis) ou Izod (éprouvette encastrée). Notre essai se réalise sur une machine du type Izod. On mesure la résistance au chocs du matériau.

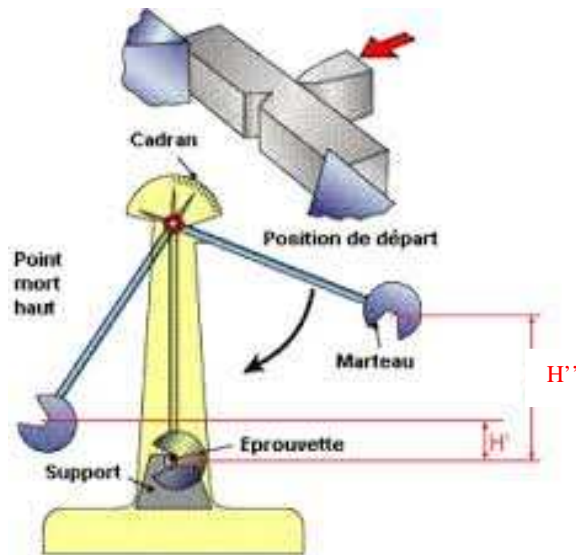


Figure : III.10. Essai de résilience sur Mouton Charpy.

### III.2.3 Micro dureté

#### a. Principe

L'essai consiste à soumettre une éprouvette à un effort de compression uniaxiale, à l'aide d'un pénétrateur (de forme pyramidale, pour les essais Knoop) pendant un certain temps.

L'empreinte (Figure VI.11) laissée par le pénétrateur sur l'échantillon permettra de déterminer la dureté de celui-ci.

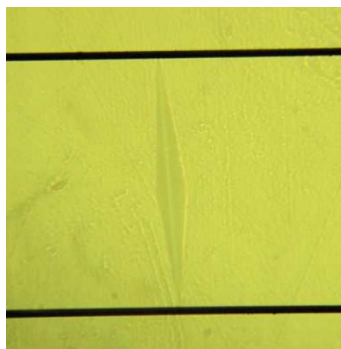


Figure III.11 : Empreinte laissée par le pénétrateur.

## Chapitre III : Méthodes expérimentales (Matériels et mode opératoire)

Les essais de micro dureté ont été réalisés à température ambiante (298 K), sur des éprouvettes plates, avec une force de chargement constante  $F = 25\text{gf}$  appliquée pendant 20s. Le microduromètre utilisé est de marque ZWICK/ROELL (Figure III.11). Il a une capacité de chargement max de 1Kgf, une durée de chargement max de 60s ainsi qu'un zoom optique X100. Il est piloté par un logiciel interne qui traite et donne directement la dureté. Il est constitué :

- d'un bâti rigide muni d'une base mobile qui permet de centrer l'éprouvette ;
- d'une partie microscope pour voir l'empreinte couplée au pénétrateur qui exerce l'effort à l'aide d'un moteur électrique ;
- d'un écran et d'un pavé digital qui permettent d'entrer les paramètres relatifs à l'essai et de lire les résultats ;



Figure III.12 : Duromètre ZWICK/ROELL

### III.3 Caractérisation morphologique

#### a. Microscopie à balayage électronique

Les caractérisations morphologiques des différents faciès de rupture ont été réalisées grâce au Microscope Électronique à Balayage (MEB)

#### b. Principe de fonctionnement

Un faisceau d'électrons balaie la surface de l'échantillon, ils sont réfléchis (ou rétrodiffusés) et collectés par un détecteur ; le signal ainsi obtenu est transformé en un point lumineux sur l'écran de ce tube à rayons cathodiques. La brillance de ce point dépend de l'intensité du signal détecté, sa position sur l'écran correspond à celle du point frappé par le

## Chapitre III : Méthodes expérimentales (Matériels et mode opératoire)

faisceau d'électrons. L'image résultante permet d'étudier les caractéristiques de la surface de l'échantillon et peut être photographiée.



Figure III.13 : Microscope Electronique à Balayage

### III.4 Elaboration des mélanges

Ce travail a été réalisé au groupe de l'Entreprise Nationale de Plastique et de Caoutchouc (ENPC), filiale de SISCOPLAST de Draa- EL- Mizan. L'objectif est de réaliser des éprouvettes en plastiques avec différents pourcentages en masses, des polymères présentés ci-dessus.

Nous présenterons ci-dessous les différentes étapes suivies pour la réalisation de ce travail :

#### a. Mélange à froid

Cette étape consiste à mélanger deux polymères à des fractions massiques différentes, de façon à avoir une masse de 1 Kg de chaque mélange. Les mélanges à froid sont réalisés à l'aide d'un mélangeur électrique (Figure III.14), qui sert à la disparition des grains des deux polymères entre eux, afin d'obtenir une répartition plus au moins régulière.



Figure III.14 : Mélangeur électrique.

### b. Mélange à chaud (extrusion)

Les mélanges passeront dans une extrudeuse (mélange à chaud) mono vis, de façon à assurer l'homogénéisation et la répartition régulière de la phase minoritaire dans la phase majoritaire. Les mélanges qui sortent de l'extrudeuse sous forme de tiges seront découpés à l'aide d'un sécateur.

#### Paramètres d'extrusion

Cadence = 15.34 m/min

Température :

T1= 200 °C

T2= 190 °C

T3= 170 °C

T4= 160 °C

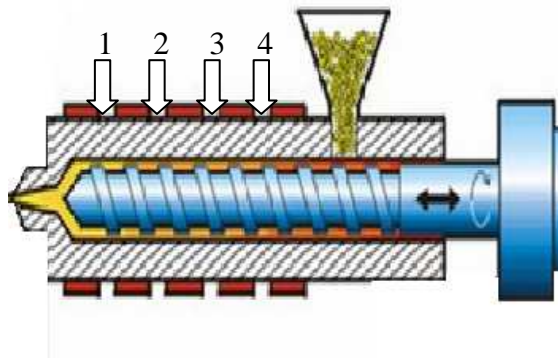


Figure III.15 : Température d'extrusion et utilisées



Figure III.16 : a) Système de refroidissement de la matière. b) La sortie de la matière de L'extrudeuse. c) Etireuse et découpage à l'aide de sécateur.

### C. Le découpage et le broyage

Cette étape consiste à découper les tiges obtenus, à l'aide d'une découpeuse, puis on passe au broyage pour faire broyer ces mélanges.

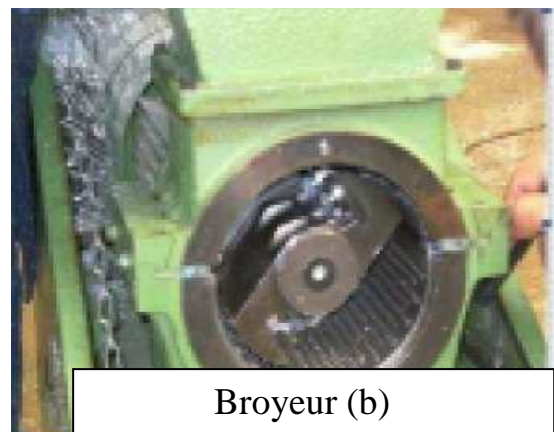


Figure III.17 : Présentation de l'appareil de Découpe (a) et du broyeur (b).

### c. Injection des éprouvettes

Après la préparation des mélanges, une étape d'injection est nécessaire afin de réaliser des éprouvettes destinées à être caractérisées par la suite.

L'injection d'éprouvettes s'effectue sur une machine à injection ARBOURG qui est illustrée sur la figure III.18 ci-dessous. Le gradient de température est croissant de l'alimentation à la buse d'injection, et la pression est adaptée afin d'assurer le meilleur remplissage possible du moule. Ce dernier permet de mouler une éprouvette de type barreau de dimensions  $120 \times 12 \times 6 \text{ mm}^3$ , une éprouvette de type haltère, et un disque d'épaisseur 3mm et de diamètre égal à 50mm (figure III.18 ).



Figure III.18 Machine à injection et moule éprouvette

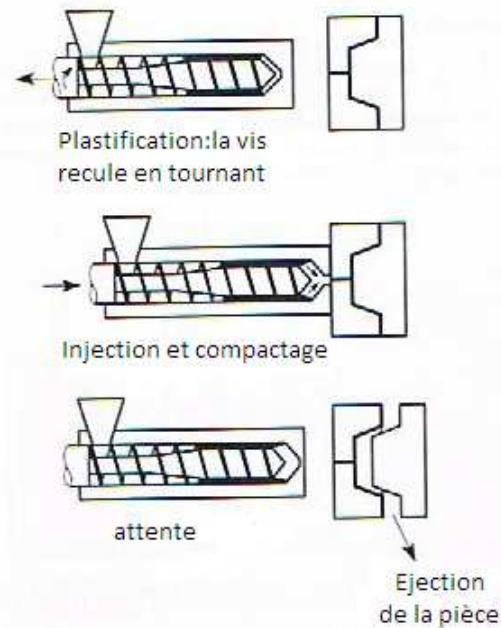
Les différentes phases du cycle d'injection, sont décrites à la Figure III.19, se déroulent de la manière suivante :

- Le polymère est fondu dans un dispositif vis.
- Dans un premier temps, la buse à l'extrémité du fourreau étant obturée, la vis tourne en reculant et le polymère fondu s'accumule en tête de vis.
- Une fois que la quantité de polymère nécessaire à la fabrication de la pièce a été fondue, la buse s'ouvre et la vis se transforme en piston qui injecte à grande vitesse le polymère chaud dans un moule fermé et froid : c'est la phase de **remplissage** durant laquelle les pressions engendrées sont considérables du fait de la forte viscosité du polymère mais également des grandes vitesses d'injection.
- Le refroidissement du polymère est lent du fait de sa faible conductivité thermique. . Il est donc possible de compenser en partie la variation de volume

### Chapitre III : Méthodes expérimentales (Matériels et mode opératoire)

spécifique du polymère en continuant à injecter du polymère liquide sous forte pression : c'est la phase de **compactage**.

- Une fois que le canal reliant la buse de la presse à injecter au moule est solidifié, il n'y a plus de compactage possible. La pièce continue à se refroidir dans le moule puis, après éjection, à l'extérieur du moule.



**Figure III.19** : Les différentes phases du cycle d'injection.

Certaines phases du cycle d'injection peuvent, bien entendu, se dérouler simultanément. Il est possible d'achever le refroidissement d'une pièce dans le moule tout en débutant la plastification du polymère pour la fabrication de la pièce suivante.

Les paramètres de la machine d'injection sont résumés dans le tableau suivant.

Tableau III.4 : Paramètre d'injection

Paramètre	valeur
Temps du cycle	28.8 s
Retrait / avance du chariot	5.8 s
Temps d'injection	2.2 s
Temps de maintien	2 s

Temps de refroidissement	18 s
Temps de pose	.8s
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 tr/min
Vitesse d'éjecteur	2.5 trs/min
Vitesse retour d'éjecteur	5 trs/min

**d. Température de la buse d'injection :**

T1= 200°C

T2= 190 °C

T3= 180 °C

T4= 160 °C

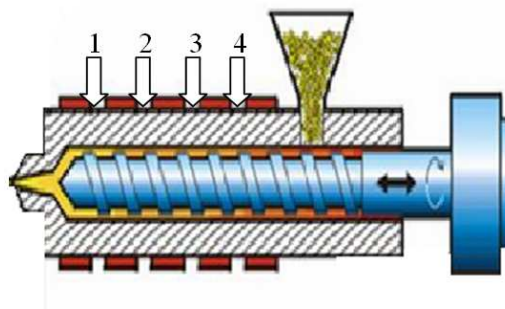


Figure III.20 : températures d'injection utilisés

### Conclusion

Après le choix de la matière première à utiliser, l'élaboration puis la caractérisation par les différentes techniques nous permettrons d'analyser le comportement mécanique des différents mélanges et d'obtenir des résultats à analyser.

### Introduction

On s'intéresse ici à la présentation des résultats obtenus suites aux différents essais effectués sur les différentes éprouvettes à savoir :

- Détermination de l'indice de fluidité.
- Une analyse spectrale IRTF.
- Essais de traction.
- Essai de résistance aux Chocs.
- Essai de microdureté (dureté Knoop)
- Une caractérisation Morphologique au MEB.

Une interprétation et discussion suivra chaque résultat.

### IV.1 Caractérisation physique

#### IV.1.1 Indice de fluidité

L'indice de fluidité à chaud, (MFI : melt flew index), est donné en gramme durant le temps de référence, par la formule III.1, ces expériences ont été menées au niveau du laboratoire « Matériaux » de la société nationale ENIEM située à Oeud Aissi. On note pour les différents mélanges les indices de fluidité que nous avons consignés dans le tableau suivant :

Tableau IV.1. Valeurs des indices de fluidité des différents mélanges PPC/PPH

Désignation du mélange	Indice de fluidité [g/10min]
100PPH/0%PPC	27,96
80PPH/20%PPC	31,92
70PPH/30%PPC	35,52
50PPH/50%PPC	34,08
45PPH/55%PPC	46,66
40PPH/60%PPC	60

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

20PPH/80%PPC	57,12
100%PPC	64,32

A partir des valeurs du tableau ci-dessus on, trace la courbe de la variation des indices de fluidité en fonction du taux de PPC dans le mélange PPH/PPC.

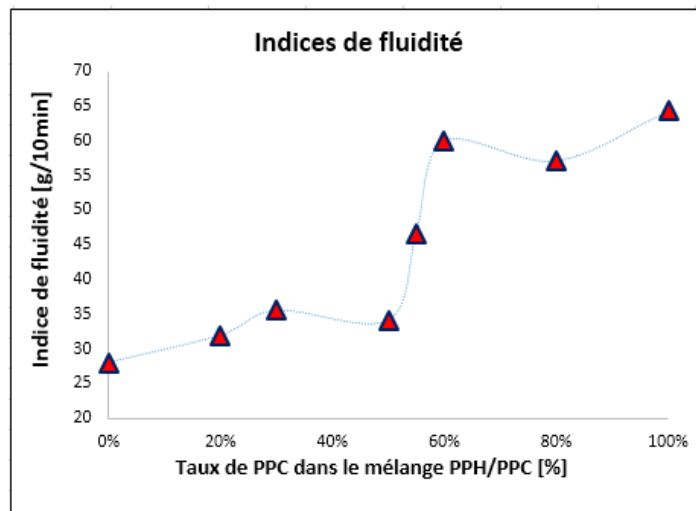


Figure IV.1 : Variation des indices de fluidité en fonction du taux de PPC dans le mélange PPC/PPH

La Figure IV.1 montre que l'indice de fluidité augmente avec le taux de PPC dans le mélange. On note aussi que le mode d'élaboration par injection est le plus adapté en se référant au tableau III.1, on constate que la plus faible valeur de l'indice de fluidité de nos mélanges est de 27,96 g/10mn, qui correspondent au domaine d'injection haute fluidité.

### IV.1.2 Spectroscopie Infrarouge

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire de méthodes physico-chimiques d'analyse et de production des polymères de la faculté des hydrocarbures et de la chimie à l'Université « M'Hamed Bougara de Boumerdès ».

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

Après l'analyse des échantillons, nous avons obtenu des résultats sous forme des spectres et qui représentent les bandes d'absorption des différents échantillons.

- **Le spectre de 100PPC**

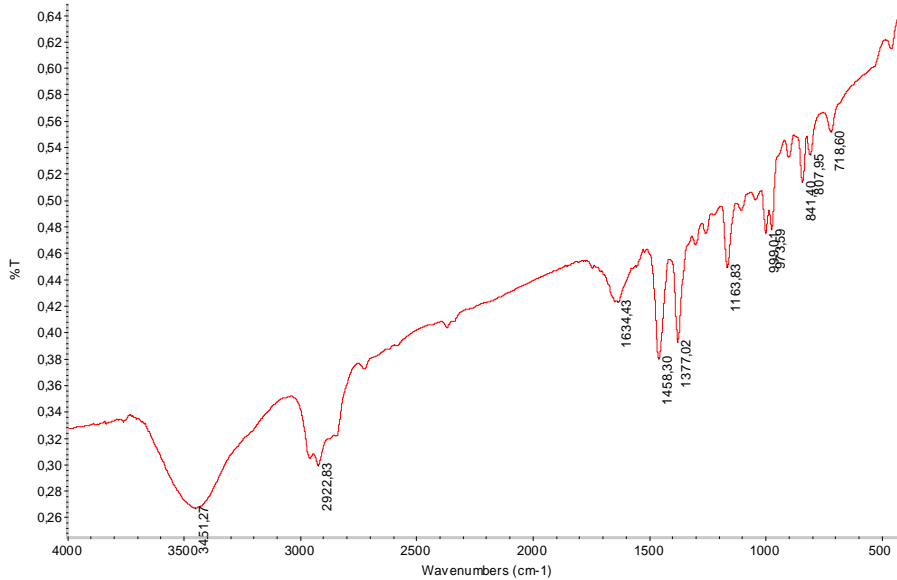


Figure IV.2 : Spectre IR de 100PPC.

L'examen du spectre obtenu (figure IV.2) fait apparaître des bandes d'absorptions suivantes :

- On remarque un pic de forte intensité et large avec un nombre d'ondes  $\sigma = 3412,7 \text{ cm}^{-1}$  qui indique la liaison O-H libre. L'élément Oxygène n'appartenant pas à la chaîne hydrocarbure de notre mélange de base (l'Oxygène n'appartient ni au PPH ni au PPC) son existence dans le spectre IR revient sûrement au phénomène d'oxydation atmosphérique lors des différentes manipulations d'extrusion et injection.
- Un pic de valeur  $\sigma = 2922,83 \text{ cm}^{-1}$  correspond à la zone de liaison C-H (carbone trigonal)
- Un pic de valeur  $\sigma = 1634,43 \text{ cm}^{-1}$  avec une faible absorption de liaison C-C.
- $\sigma = 1458,30 \text{ cm}^{-1}$  correspond à la liaison C-H (carbone tétragonal).
- $\sigma = 1377,02 \text{ cm}^{-1}$  et  $\sigma = 1163,83 \text{ cm}^{-1}$  indiquant la liaison C-O.

Enfin, les pics qui se situent entre  $\sigma = 718,60 \text{ cm}^{-1}$  et  $\sigma = 900 \text{ cm}^{-1}$  correspondent aussi à une liaison C-H.

- Le spectre de 55PPC-45PPH

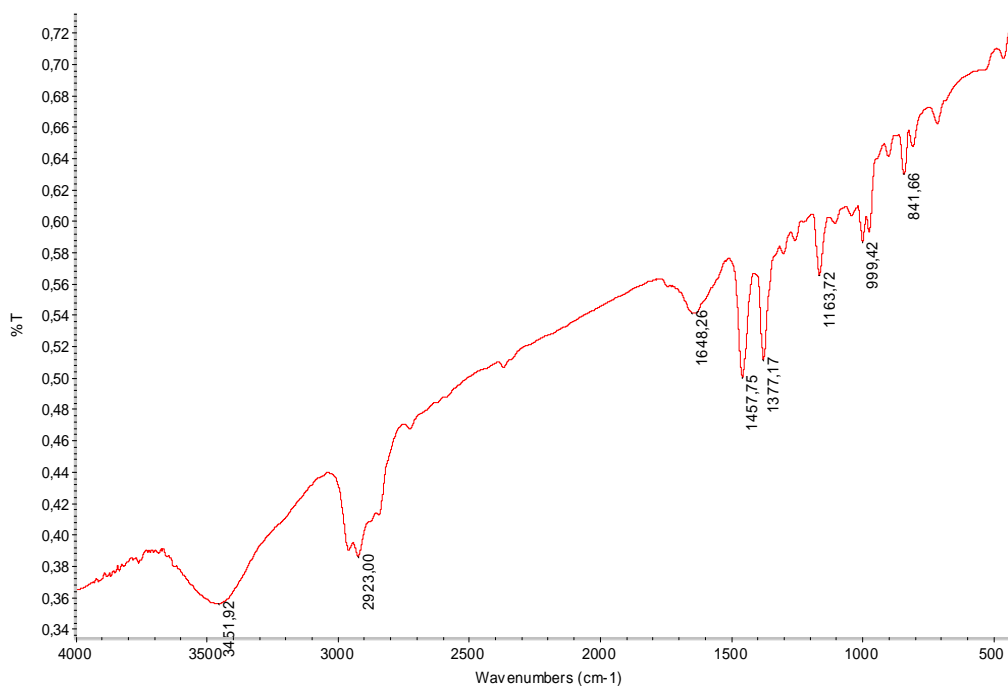


Figure IV.3 : Spectre IR de 55PPC-45PPH.

L'examen du spectre obtenu (Figure IV.3) fait apparaître des bandes d'absorptions suivantes :

- Un pic pour  $\sigma = 3451,92 \text{ cm}^{-1}$ , on remarque un pic de forte intensité et large qui indique la liaison O-H libre.
- Un pic pour  $\sigma = 2923 \text{ cm}^{-1}$ , correspond à la zone de liaison C-H (carbone trigonal).
- $\sigma = 1648,20 \text{ cm}^{-1}$  correspond à une liaison C=C et  $\sigma = 1457,75 \text{ cm}^{-1}$  à une liaison C-H (carbone tétragonal).
- Pour  $\sigma = 1377,17 \text{ cm}^{-1}$ , le pic indique la liaison C-O.

- Le spectre de 40PPH-60PPC

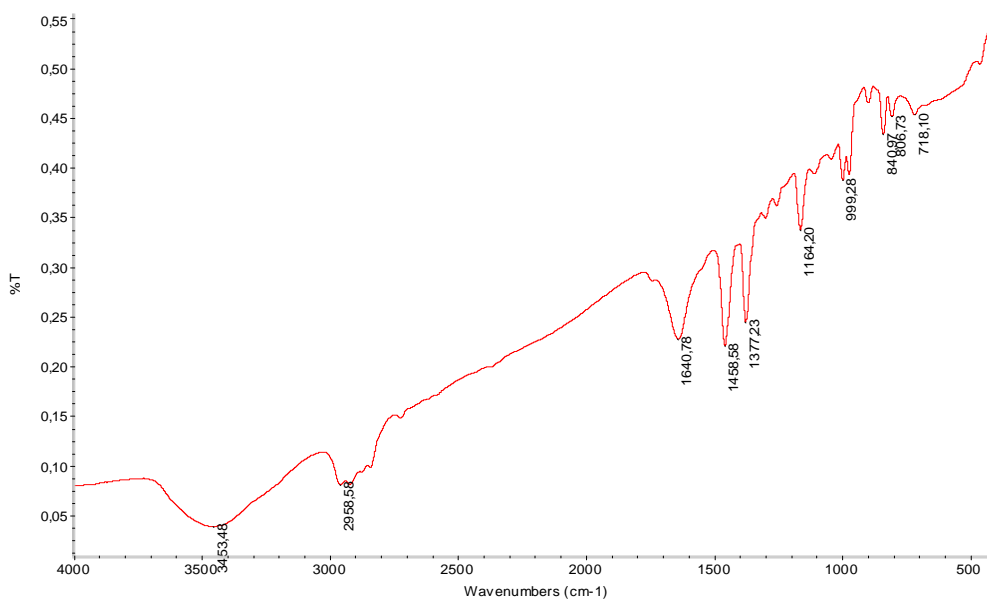


Figure IV.4 : Spectre IR de 40PPH-60PPC.

On remarque un pic de fort intensité et large à  $\sigma = 3453,48 \text{ cm}^{-1}$  qui indique la liaison O-H libre et à  $\sigma = 2958,58 \text{ cm}^{-1}$  qui correspond à la zone de la liaison C-H (carbone trigonal).

Pour  $\sigma = 1640,78 \text{ cm}^{-1}$ , le pic correspond à la liaison C=C,  $\sigma = 1458,58 \text{ cm}^{-1}$  à une liaison C-H (carbone tétragonal) et  $\sigma = 1377,23 \text{ cm}^{-1}$  indique une liaison C-O.

- Le spectre de 50PPH-50PPC

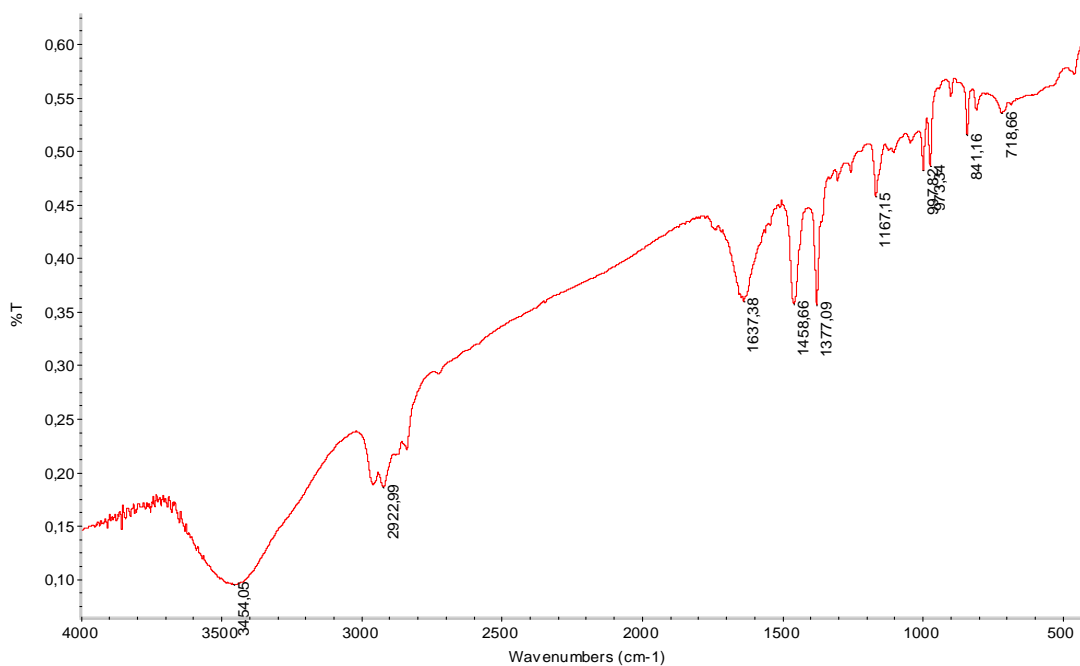


Figure IV.5: Spectre IR de 50PPH-50PPC.

Pour  $\sigma = 3454,05 \text{ cm}^{-1}$ , on remarque un pic de fort intensité et large qui indique une liaison de O-H libre et  $\sigma = 2922,99 \text{ cm}^{-1}$  qui correspond à la zone de liaison C-H (carbone trigonal).

$\sigma = 1637,36 \text{ cm}^{-1}$  correspond à une liaison C-C,  $\sigma = 1458,66 \text{ cm}^{-1}$  à une liaison C-H (carbone tétraédrique) et  $\sigma = 1377,09 \text{ cm}^{-1}$  indique une liaison C-O.

- Le spectre de 100PPH

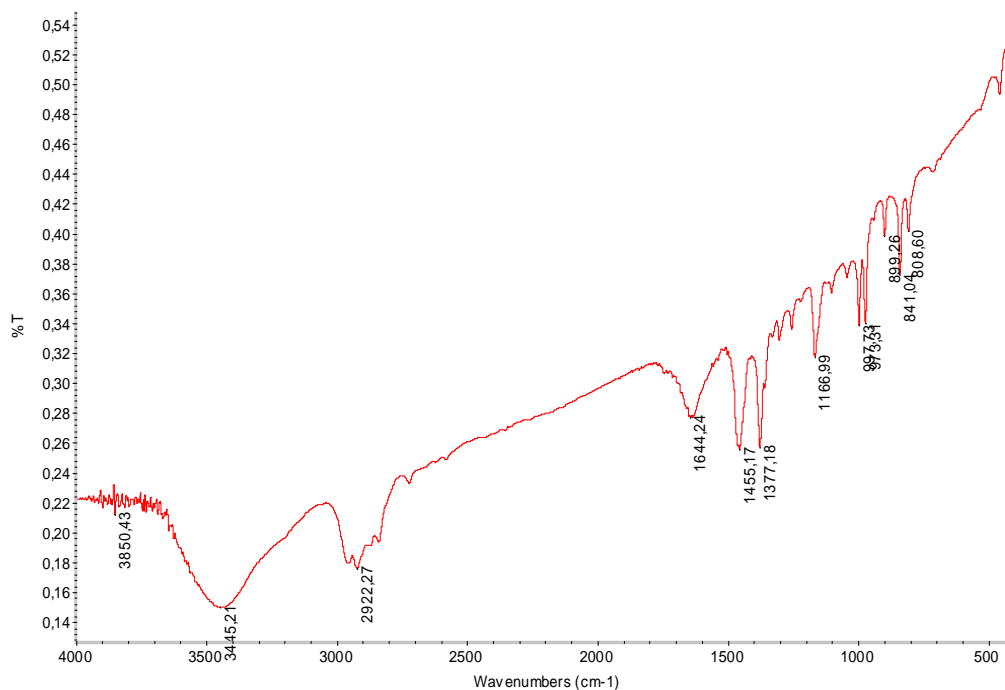


Figure IV.6: Spectre IR de 100PPH.

Pour  $\sigma = 3445,21 \text{ cm}^{-1}$ , on remarque un pic de forte intensité et large qui indique une liaison de O-H libre.

Et  $\sigma = 2922,21 \text{ cm}^{-1}$  qui correspond à la zone de liaison C-H (carbone trigonal).

$\sigma = 1644,21 \text{ cm}^{-1}$  correspond à une liaison C-C et  $\sigma = 1456,17 \text{ cm}^{-1}$  une liaison C-H (carbone tétraédrique).

Pour  $\sigma = 1377,18 \text{ cm}^{-1}$ , le pic indique la liaison C-O.

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

- La superposition des spectres obtenus des différents échantillons

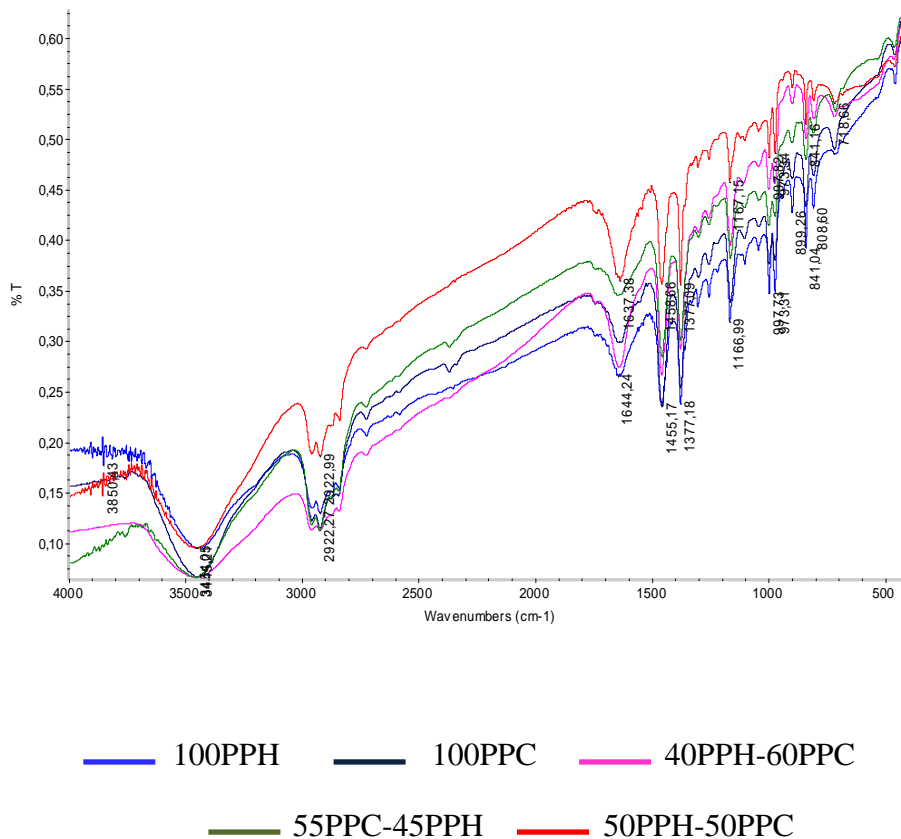


Figure IV.7: Spectres IR des différents échantillons.

La figure IV.7 donne la superposition des spectres infrarouge des différents échantillons, on voit que tous les spectres ont même allure, présentent presque les mêmes pics, cela s'explique par le fait que les deux composants du mélange contiennent uniquement des liaisons  $\sigma$  simples de type C-C ou C-H (monomère propène seule ou propène plus éthylène), tous les spectres présentent aussi la liaison  $\sigma$  de type O-H qui est preuve d'une oxydation atmosphérique affectant nos mélanges lors de leurs transformations.

### Pour la 1<sup>ère</sup> liaison O-H libre

- Les mélanges 100 PPC, 40PPH-60PPC et 55PPC-45PPH, on remarque une transmission faible pour le nombre d'onde de la liaison O-H qui signifie une forte absorption.
- Les mélanges 100PPH et 50PPH-50PPC ont une faible absorption au niveau de cette liaison.

### Pour la 2<sup>ème</sup> liaison C-H carbone trigonal

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

---

- Une forte absorption pour les mélanges 100 PPC, 40PPH-60PPC et 55PPC-45PPH.
- Une moyenne absorption pour le mélange 100 PPH et faible pour celui de 50PPH-50PPC.

### Pour la 3<sup>ème</sup> liaison C-C

- Une forte absorption pour les mélanges 100 PPH et 40PPH-60PPC.
- moyenne absorption pour les mélanges 100 PPC et 55PPC-45PPH et faible pour celui de 50PPH-50PPC.

### Pour la 4<sup>ème</sup> liaison C-H (carbone titragonal)

- Une forte absorption pour les mélanges 100 PPH et 40PPH-60PPC.
- Une moyenne absorption pour les mélanges 100 PPC et 55PPC-45PPH et faible pour celui de 50PPH-50PPC.

### Pour la 5<sup>ème</sup> liaison C-O

- Une forte absorption pour les mélanges 100 PPH et 100 PPC.
- Une moyenne absorption pour les mélanges 40PPH-60PPC et 55PPC-45PPH et faible pour celui de 50PPH-50PPC.

### Pour la 6<sup>ème</sup> liaison C-H

- Une forte absorption pour les mélanges 100 PPH et 100 PPC.
- Une moyenne absorption pour le mélange 55PPC-45PPH et faible pour celui de 50PPH-50PPC et 40PPH-60PPC.

### IV.2. Courbes Contrainte-Déformation

Dans cette partie, on se propose d'étudier le comportement mécanique des mélanges PPH/PPC. Nous déterminons d'abord pour chaque mélange Via 5 éprouvettes, les courbes contrainte-déformation. Puis nous déterminons les propriétés mécaniques, caractéristiques usuelles telles que le module de Young, les contraintes aux seuils d'écoulement ainsi que les déformations à la rupture.

#### ➤ Polymère 100%PPH

Les courbes de traction du polymère 100% PPH présentent un grand plateau de déformation plastique qui atteint les 300%. Elles montrent aussi une bonne résistance à la traction.

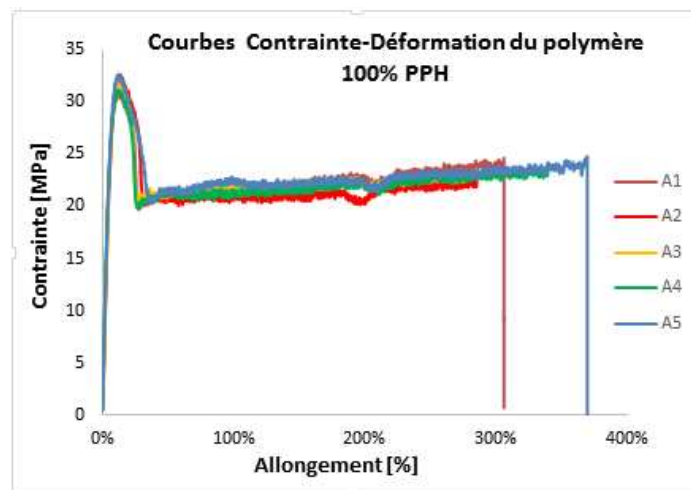


Figure IV.8. Courbe contrainte / déformation du polymère 100% PPH

#### ➤ Polymère 100%PPC

Les courbes de traction du polymère 100% PPC présentent une faible déformation plastique qui ne dépasse pas 30%. Elles montrent aussi une faible résistance à la traction par rapport à l'homopolymère PPH.

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

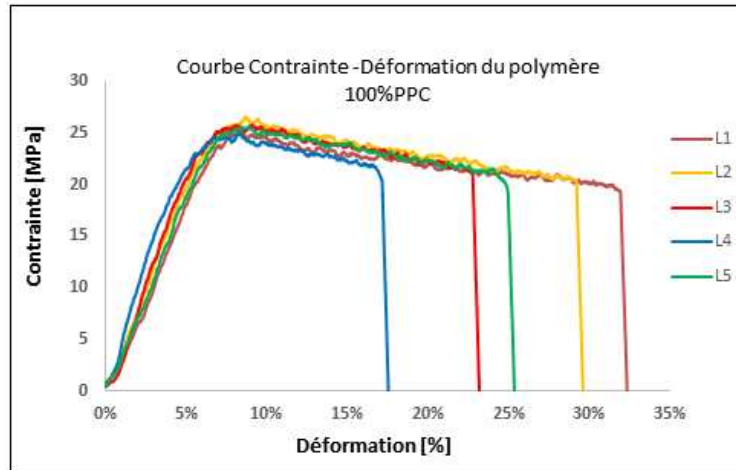


Figure IV.9. Courbe contrainte / déformation du polymère 100%PPC

### ➤ Mélange 90%PPH/10%PPC

L'ajout de 10% en masse de PPC à la matrice PPH engendre une augmentation de l'allongement à la rupture.

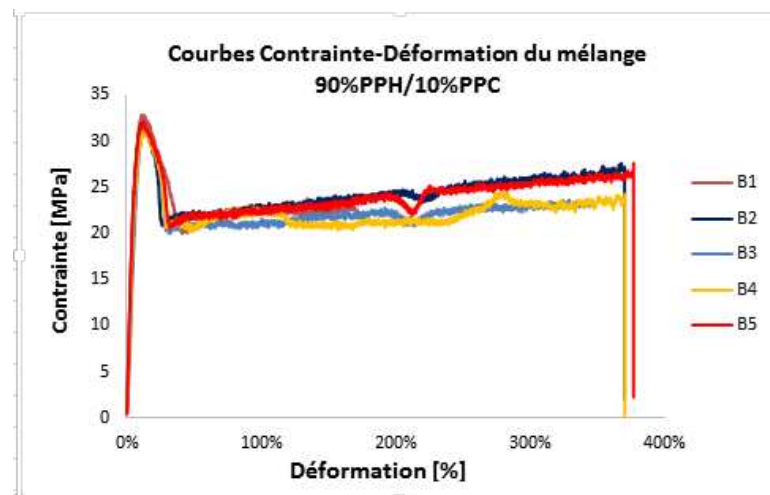


Figure IV.10. Courbe contrainte / déformation du mélange 90% PPH/10%PPC

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

### ➤ Mélange 80%PPH/20%PPC

Nous observons le même phénomène avec l'ajout de 20% de PPC dans la matrice PPH

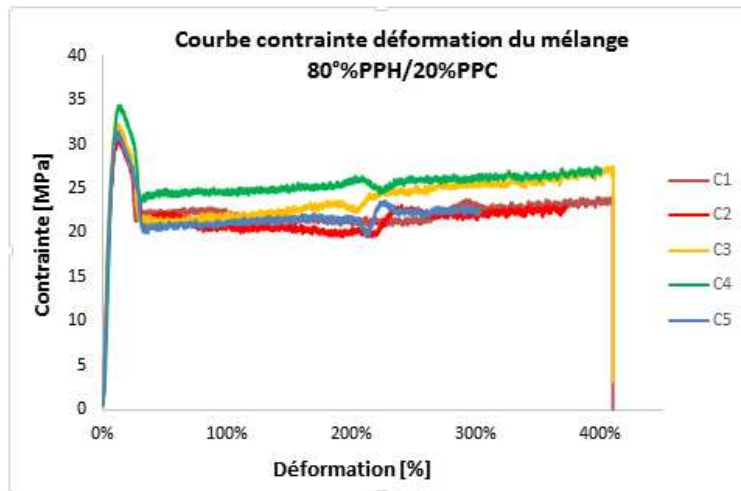


Figure IV.11. Courbe contrainte / déformation du mélange 80% PPH/20%PPC

### ➤ Mélange 70%PPH/30%PPC

L'ajout de 30% en masse de PPC à la matrice PPH engendre une augmentation de l'allongement à la rupture par rapport au PPH seul, mais on constate une légère baisse de la contrainte à la rupture.

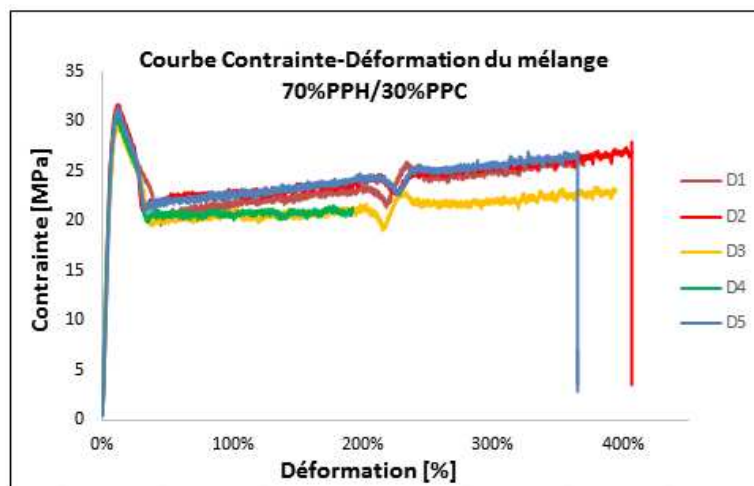


Figure IV.12. Courbe contrainte / déformation du mélange 70% PPH/30%PPC

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

### ➤ Mélange 60%PPH/40%PPC

L'ajout de 40% en masse de PPC à la matrice PPH engendre une légère diminution de la contrainte au seuil d'écoulement.

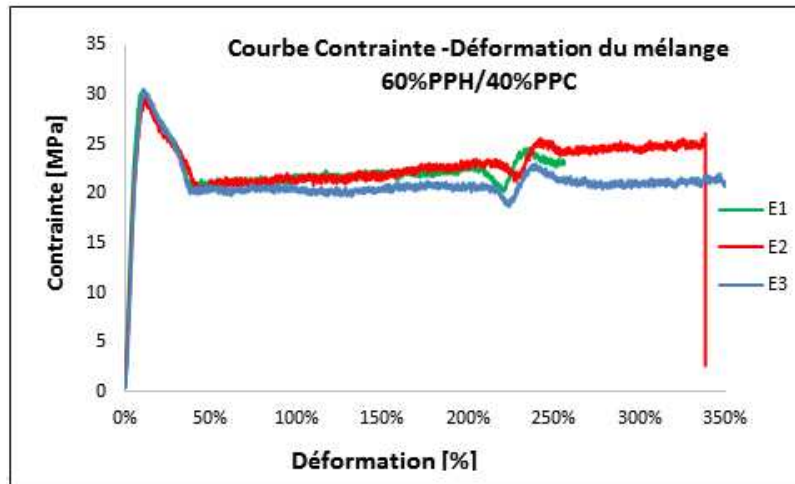


Figure IV.13 Courbe contrainte / déformation du mélange 60% PPH/40%PPC

### ➤ Mélange 50%PPH/50%PPC

On enregistre pour le mélange 50%PPH-50%PPC une diminution de la contrainte au seuil d'écoulement par rapport au PPH seul.

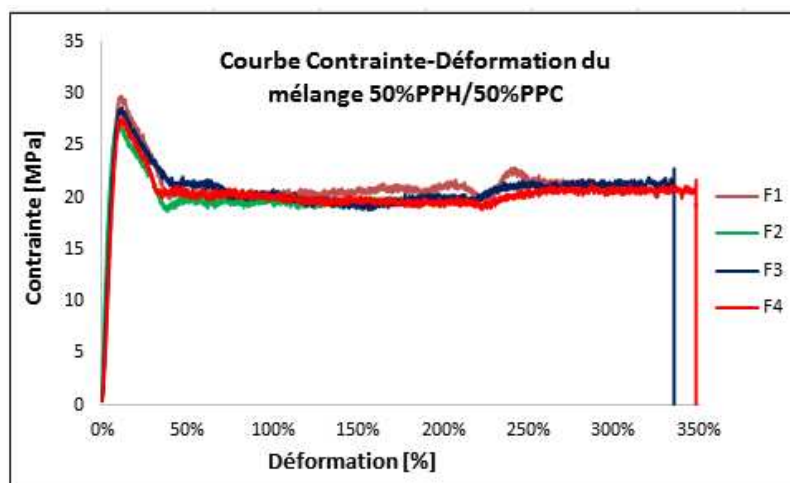


Figure IV.14. Courbe contrainte / déformation du mélange 50% PPH/50%PPC

### ➤ Mélange 45%PPH/55%PPC

L'ajout de 45% de PPH dans la matrice PPC engendre une augmentation de la contrainte au seuil d'écoulement et une augmentation par rapport au PPH seul.

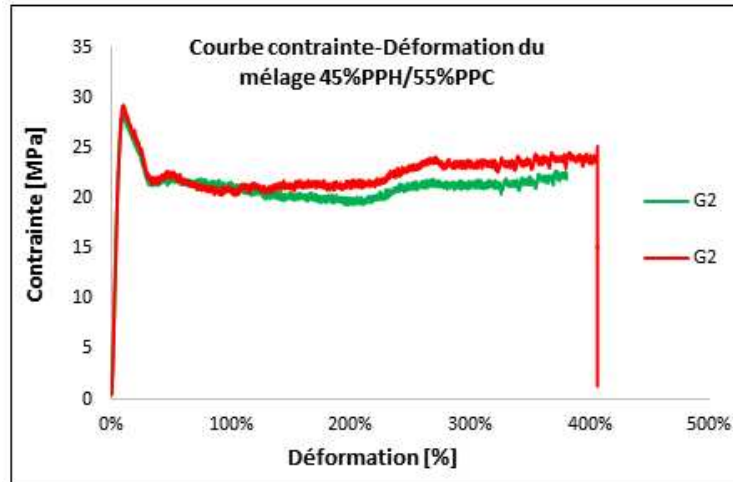


Figure IV.15 : Courbe contrainte / déformation du mélange 45% PPH/55%PPC

### ➤ Mélange 40%PPH/60%PPC

L'ajout de 40% de PPH dans la matrice PPC engendre une diminution de la contrainte au seuil d'écoulement par rapport au PPH seul.

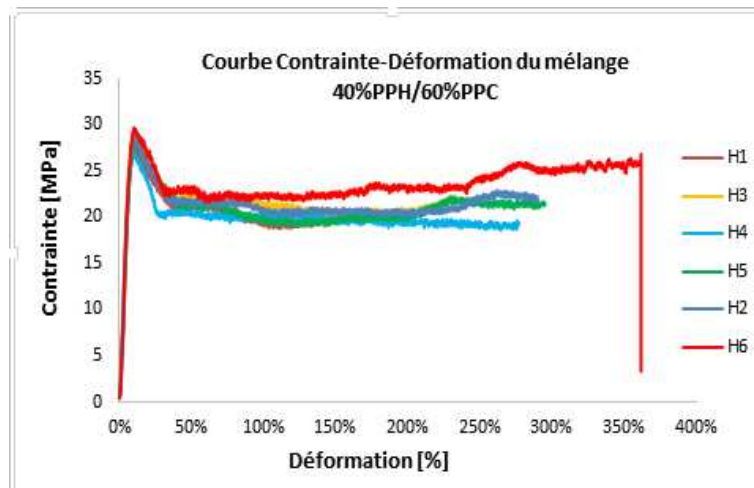


Figure IV.16 : Courbe contrainte / déformation du mélange 40% PPH/60%PPC

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

### ➤ Mélange 30%PPH/70%PPC

L'ajout de 30% de PPH dans la matrice PPC engendre une faible diminution de la contrainte au seuil d'écoulement et une grande diminution de l'allongement à la rupture par rapport au PPH seul.

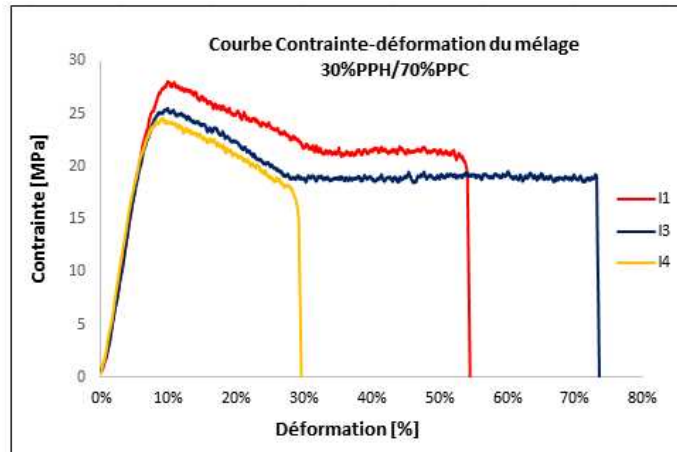


Figure IV.17 : Courbe contrainte / déformation du mélange 30% PPH/70%PPC

### ➤ Mélange 20%PPH/80%PPC

L'ajout de 20% de PPH dans la matrice PPC engendre une faible diminution de la contrainte au seuil d'écoulement et une grande diminution de l'allongement à la rupture par rapport au PPH seul.

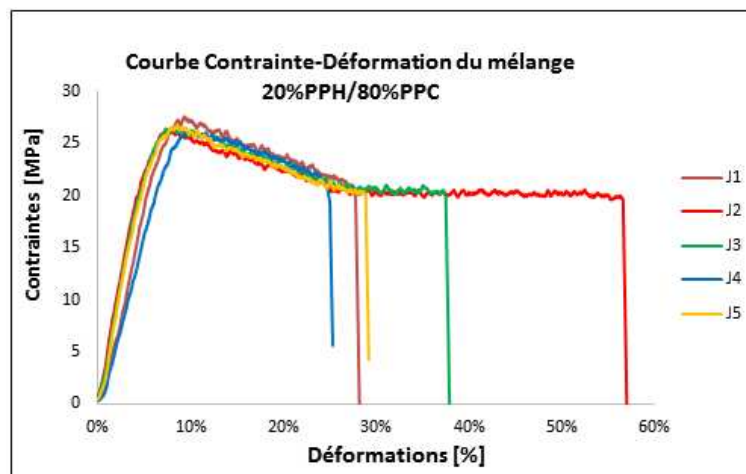


Figure IV.18 : courbe contrainte / déformation du mélange 20% PPH/70%PPC

### ➤ 10%PPH/90%PPC

L'ajout de 10% de PPH dans la matrice PPC engendre une faible diminution de la contrainte au seuil d'écoulement et une grande diminution de l'allongement à la rupture par rapport au PPH seul

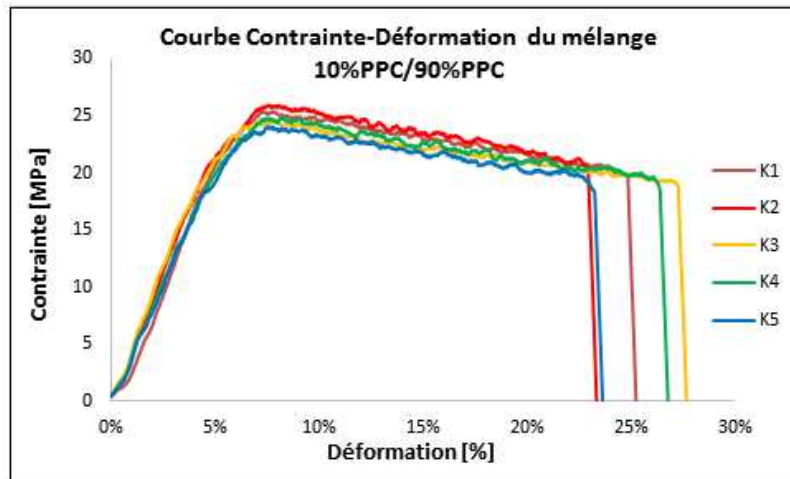


Figure IV.19 : Courbe contrainte / déformation du mélange 10% PPH/90%PPC

### IV.2.2 Variations du module d'élasticité des différents mélanges

Pour déterminer le module d'élasticité des mélanges nous calculons la moyenne des valeurs obtenues pour chaque éprouvette et nous obtenons le graphe de la figure IV.20

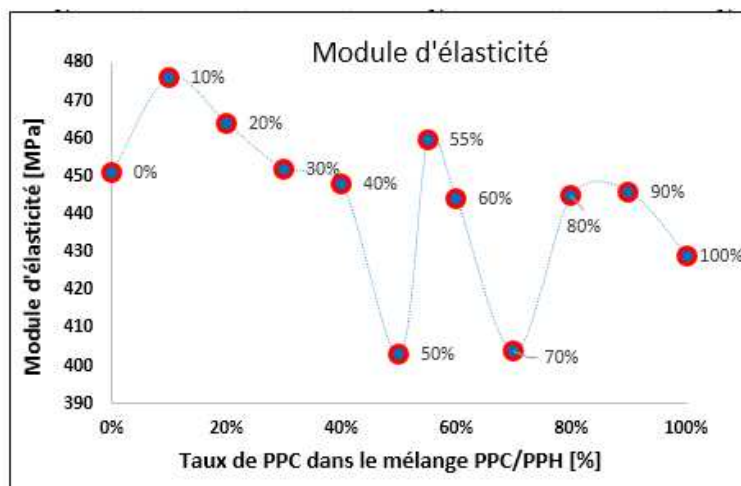


Figure IV.20 : Variation du module d'élasticité des mélanges en fonction du taux de PPH dans le mélange PPH/PPC

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

Nous constatons sur le graphe que le mélange 10%PPC/90%PPH présente la plus grande rigidité. On note aussi que deux mélanges particuliers présentent la plus faible rigidité, à savoir, le mélange 50%PPH/50%PPC et le mélange 30%PPC/70%PPH.

### IV.2.3 Variations de l'allongement à la rupture des différents mélanges

Comme pour le module d'élasticité, pour déterminer l'allongement à la rupture des mélanges nous calculons la moyenne des valeurs obtenues pour chaque éprouvette et nous obtenons le graphe de la figure IV.21.

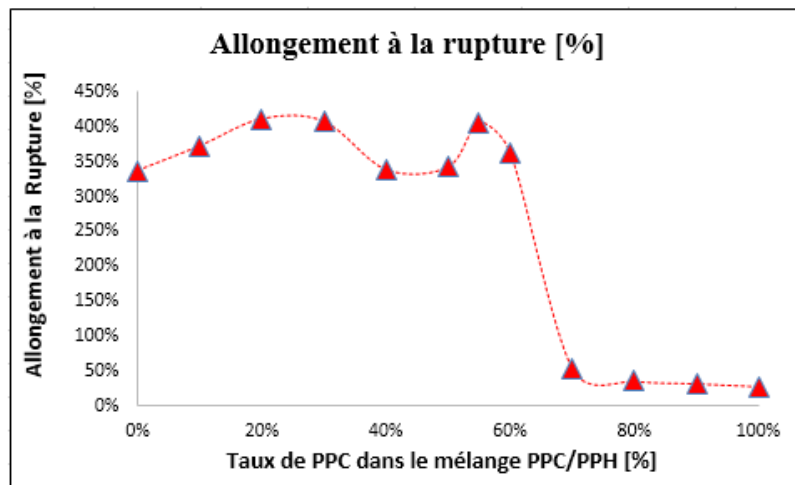


Figure IV.21 : Variation de l'allongement à la rupture des mélanges en fonction du taux de PPH dans le mélange PPH/PPC.

Nous constatons sur le graphe que le polymère 100%PPH présente une très grande ductilité (grand allongement à la rupture) et que l'ajout de PPC jusqu'au taux de 60% engendre une faible variation de cet allongement. Nous constatons aussi que le polymère 100%PPC présente une faible ductilité (faible allongement à la rupture) et que l'ajout de PPH jusqu'au taux de 30% engendre une faible variation de cet allongement

### IV.2.4. Variations de la contrainte au seuil d'écoulement

Comme pour le module d'élasticité, pour déterminer la contrainte au seuil d'écoulement des mélanges, nous calculons la moyenne des valeurs obtenues pour chaque éprouvettes et nous obtenons le graphe de la figure IV.22.

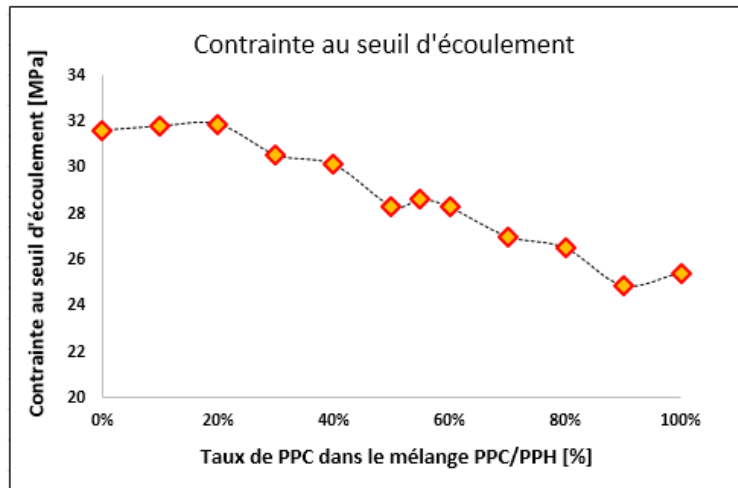


Figure IV.22 : Variation de la contrainte au seuil des mélanges en fonction du taux de PPH dans le mélange PPH/PPC

Nous constatons sur le graphe que la contrainte au seuil d'écoulement diminue avec le taux de PPC dans le mélange PPH/PPC.

### IV.2.5 Résilience

Pour la caractérisation concernant la résistance aux chocs, nous avons effectué des essais sur 5 éprouvettes pour chaque échantillon et nous retenons la valeur moyenne que nous regroupons dans le tableau suivant :

Tableau IV.2 : Valeurs de la résilience en fonction du taux de PPC dans le mélange PPC/PPH

Mélange	Résilience [kJ/m <sup>2</sup> ]
0%	2,428

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

10%	3,105
20%	4,216
30%	4,722
40%	5,441
50%	5,574
55%	5,899
60%	5,735
70%	6,078
80%	6,495
90%	6,881
100%	5,683

A partir du tableau ci-dessus nous traçons la courbe de variation de la résilience en fonction du taux de PPC dans le mélange PPH/PPC, représentée par la figure IV.23.

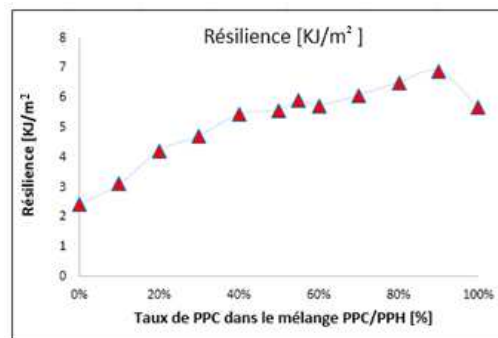


Figure IV.23 : Variation de la résilience en fonction du taux de PPH dans le mélange PPH/PPC

Le graphe ci-dessus montre que la résilience du polymère PPH est presque trois fois plus petite que celle du PPC. On remarque aussi que cette résilience augmente avec l'augmentation du taux de PPC dans le mélange PPH/PPC. On note aussi que l'ajout de 10% en masse de PPH dans la matrice PPC fait gagner au mélange environ 20% de résilience (résultat intéressant).

### IV.2.6. Micodureté

La micodureté du polymère 100%PPH est quasi constante sur tous les points de prélèvement. Cela prouve que le PPH présente une seule phase qui est à base du monomère propylène.

La micodureté du polymère 100%PPC présente des valeurs variables, ce qui prouve la coexistence de deux phases qui sont à base du monomère propylène et du monomère éthylène. La micodureté du mélange 50%PPC-50%PPH prend des valeurs intermédiaires entre le 100%PPH et 100%PPC, ce » est supérieure à celle du PPH.

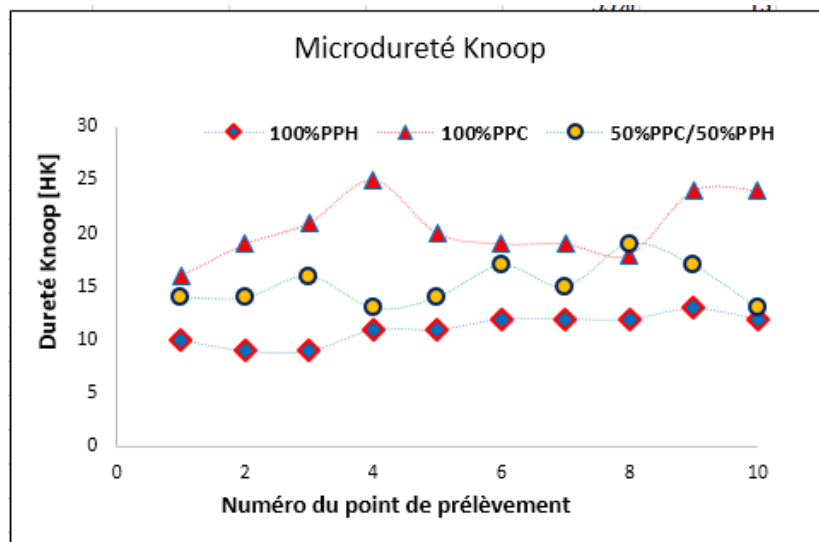


Figure IV.24 : Microdureté des polymères 100%PPH-100%PPC et du mélange 50%PPH-50%PPC

### IV.3. Caractérisation morphologique

La caractérisation morphologique via la microscopie électronique à balayage nous donne les faciès de rupture de nos éprouvettes de tractions, elle met en évidence la morphologie des mélange PPC/PPH.

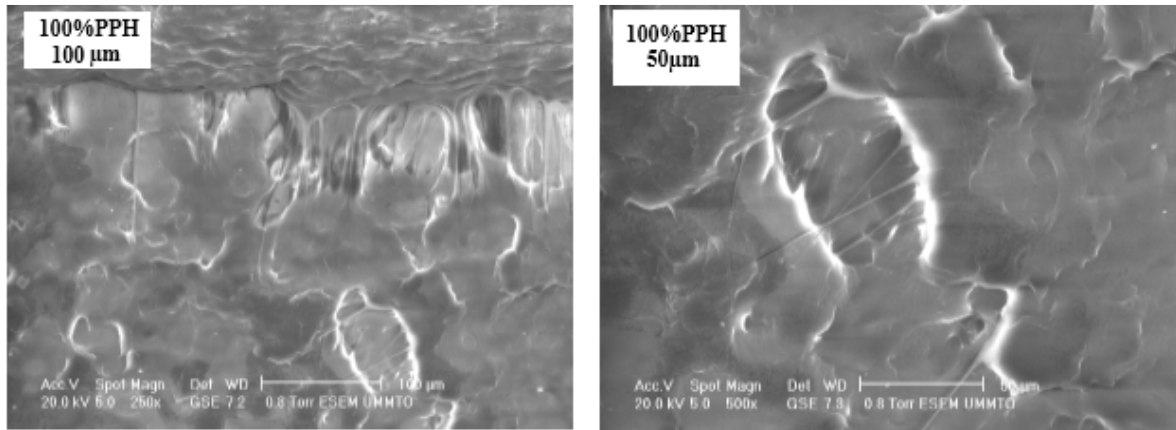


Figure IV.25. Micrographie des faciès de rupture du polymère 100% PPH

La Figure IV.25 donne les Micrographies du faciès de rupture pour l'éprouvette de traction du mélange 100% PPH. On voit clairement la nature ductile du polymère sur l'agrandissement à 100 $\mu$ m. Sur l'agrandissement à 50 $\mu$ m apparait le caractère monophasique du polymère.

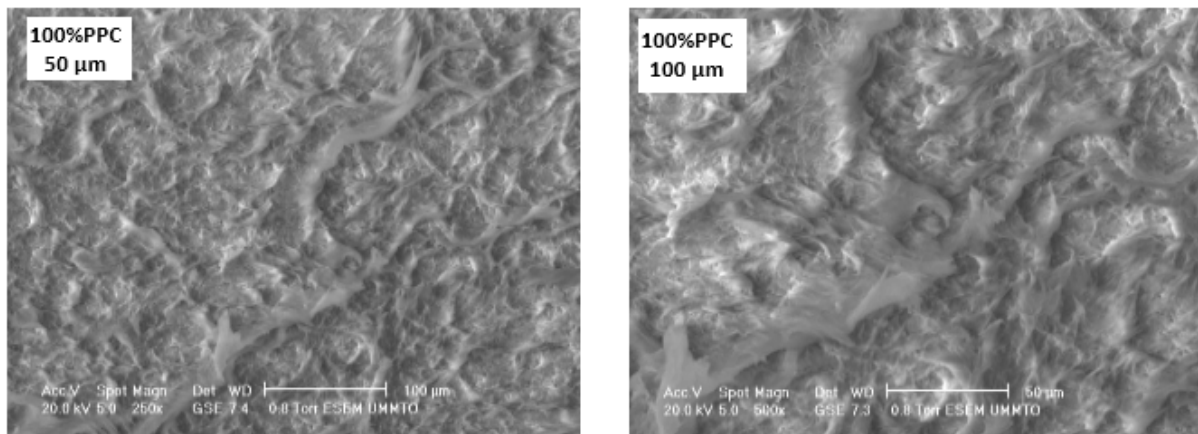


Figure IV.26 : Micrographie des faciès de rupture du polymère 100% PPC

La figure IV.26 donne les Micrographies du faciès de rupture pour l'éprouvette de traction du mélange 100% PPC. Sur l'agrandissement à 100 $\mu$ m apparait le caractère fragile et sur l'agrandissement à 50 $\mu$ m apparait le caractère monophasique du polymère.

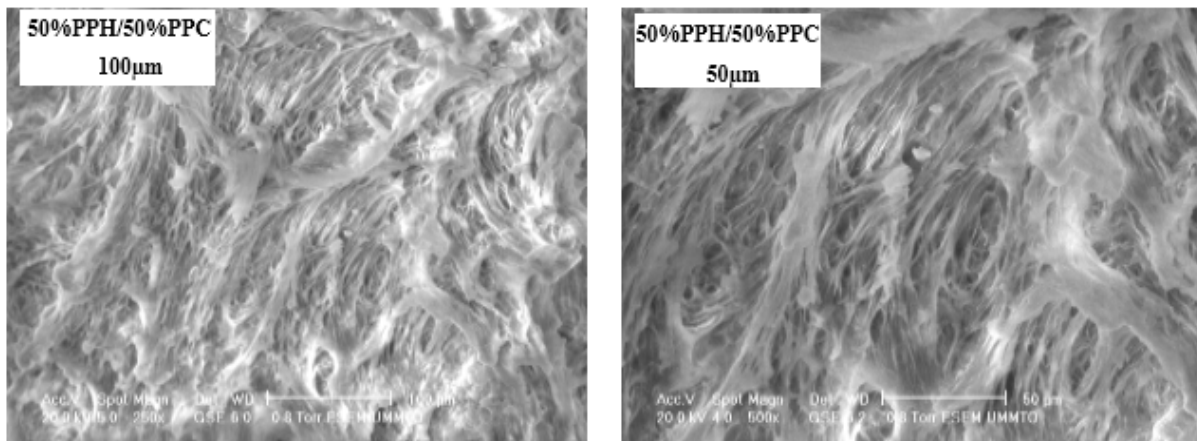


Figure IV.27 : Micrographie des faciès de rupture du polymère 50%PPC/50%PPH

La figure IV.27 donne les Micrographies du faciès de rupture pour l'éprouvette de traction du mélange 50%PPC/50%PPH. Sur l'agrandissement à 100µm apparaît le caractère ductile et sur l'agrandissement à 50µm apparaît le caractère monophasique du polymère.

### Conclusion :

Après élaboration des mélanges par injection, l'analyse des éprouvettes par les différentes méthodes de caractérisation, nous n'avons constaté que le déficit des propriétés mécaniques des mélanges (PPH50%-PPC 50 %) cela est justifier par l'essai de traction et infrarouge, le 100 % PPH est plus rigide par rapport a 100% PPC, l'ajout de 5% PPC pour le mélange (50%-50%) améliore la rigidité de notre mélange para port au 100% PPH. on a constaté aussi que la dureté de PPH est presque double que celle de PPC.

## Conclusion générale

---

Dans le cadre de ce travail, nous avons traité un problème concernant la fissuration et le froissement du bouchon en polypropylène pour insecticide. Ce bouchon est fabriqué par l'entreprise de transformation plastique « Siscoplast » de Draa-El-Mizanqui enregistre un rebus important de ce produit. Pour mener à bien cette étude nous avons élaboré par extrusion puis injection des mélanges de polypropylène homopolymère PPH et de polypropylène copolymère PPC à différents taux. La caractérisation physique nous a permis de déterminer les indices de fluidité et ainsi montrer que tous les mélanges se prêtent bien au procédé de fabrication par injection. La caractérisation mécanique a montré que le PPH a une faible résilience mais de bonnes caractéristiques mécaniques avec une très grande ductilité (grand allongement à la rupture) et que l'ajout de PPC jusqu'au taux de 60% engendre une faible variation de cet allongement. On note aussi que le PPC a de faibles caractéristiques mécaniques mais une bonne résilience. Nous avons constaté aussi que la contrainte au seuil d'écoulement diminue avec le taux de PPC dans le mélange PPH/PPC.

Concernant les mélanges nous avons montré que la résilience augmente avec le taux de PPC dans les mélanges. L'analyse des micrographies montre bien le caractère ductile de la rupture pour le PPH et le mélange 50%PPH/50%PPC et le caractère fragile de la rupture pour le PPC.

# Références bibliographiques

---

- [1] : Gohfriedw –Ehrenstein ; Fabienne Montagne ; matériau polymères (structures propriétés et applications) paris 2000.
- [2] : E. Maréchal; Polycondensation et polyaddition ; Techniques de l'ingénieur, traité Plastiques et composites ; A M 3 041.
- [3] : J-P Trotignon ;J- Verdu ;A-Doraczynski ;M-Piperaud ;Précis matières plastiques ;1996.
- [4] : C. Decker; Polymérisation sous rayonnement UV ; Techniques de l'ingénieur, traité Plastiques et composites ; A M 3 044.
- [5] : Jacques Rault ;Les polymères solides .
- [6] : J. Verdu; Polymérisation sous rayonnement principes ; Techniques de l'ingénieur, traité Plastiques et composites ; A M 3 043.
- [7] : Marc Carrega ;aide-mémoire ;matières plastiques 2° édition ;Dunod ;paris 2005-2009.
- [8] :Gérard Denis ; Extrusion –soufflage et injection-soufflage ; Techniques de l'ingénieur ; A 3700.AM 3650 ;AM 3660 ;AM 3663.
- [9] :Adolf Illig ;pratique du thermoformage ;1999.
- [10] : Ullmann, 2001, 16, Université de Stuttgart, 2000.
- [11] : G.Natta. *Stereospezifische Katalysen und isotaktische polymer*. Angewandte Chemie-International Edition, Vol.68, p. 393-403 (1956).
- [12] : C. Duval. *Polypropylène PP*. Technique de l'ingénieur, Article, AM3320 (2004).
- [13] : K. H.Nitta, M.Takayanagi. *Role of Tie molecules in the Yielding Deformation of Isotactic Polypropylene*. Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics, Vol.37, p. 357-368 (1999).
- [14] : J.M.Haudin. *Structure et morphologie des polymères semi-cristallins*. In : G'SELL, C, Introduction à la mécanique des polymères. Institut National polytechnique de Lorraine, Nancy, France, p. 97-115 (1995).
- [15] : D.C.Basset and R.H.Olley. *On the lamellar morphology of isotactic polypropylene spherulites*. Polymer, Vol.25, p. 935 (1984).
- [16] : T.Vettorel. *Etude de la cristallisation des polymères par simulation numérique*. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur – Strasbourg, (2005).

## Références bibliographiques

---

- [17] : Y. Chatani, H. Ma ruyama, T. Asanuma and T. Shiomura, *Structure of a new crystalline phase of syndiotactic polypropylene*. J Polym Sci Polym Phys, 1991.26: p. 5711-5718.
- [18] : Guidetti, G.P., Busi,P., Giulianelli, I. and Zanetti, R., Eur. Polym. J., 19, 1983, 757
- [19] : Lovinger, A.J.; Chua, J.O. and Gryte, C.C, J. Polym. Sci. Polym. Phys. Ed. 15, 1977, 641 .
- [20] : M.L. Di Lorenzo and C. Silvestre, *Non-isothermal crystallization of polymers*. Progress in Polymer Science (Oxford), 1999.24(6): p. 917-950.
- [21] : ovcheva, T. Babeva, K. Nikolova and G. Mekishev, *Refractive index of corona-treated polypropylene films*. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2008. **10(5)**.
- [22] : N.D. Wagner and J.A. Nairn, *Residual thermal stresses in three concentric transversely isotropic cylinders: Application to thermoplastic-matrix composites containing a transcrystalline interphase*. Composites Science and Technology, 1997. 57(9-10): p. 1289-1302.
- [23] : C. De Rosa and F. Auriemma, *Structure and physical properties of syndiotactic polypropylene: A highly crystalline thermoplastic elastomer*. Progress in Polymer Science (Oxford), 2006. 31(2): p. 145-237.
- [24] : R. Zheng, C. Hadinata and P.K. Kennedy. *Numerical study on the impact of additives on shrinkage of injection molded polypropylene*. in *AIP Conference Proceedings*. 2008.
- [25] : Laupretre et. al., Polym. Bull. 15, 1986, 159 .
- [26] : B. Wojtkowiak, M. Chabanel, « spectrochimie moléculaire », Technique & Documentation, Imprimerie Bayeusaine, France, (1977).
- [27] : IFIPS - Initiation aux biomatériaux – Chapitre 1 – Polymères & Sondes
- [28] : (<http://www.web-sciences.com/documents/terminale/tedo05/teco05.php>)