

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERY Tizi Ouzou
Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Mécanique



MEMOIRE

de fin d'études

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

Option Construction Mécanique

THEME

**Etude du comportement mécanique a température d'un polymère
(polypropylène)**

Proposé et dirigé par :

Mr HAMOUR Mohamed

Réalisé par :

Mme ACHILI Nora

Melle BEN HAMLAT Nora

Promotion 2015/2016

Remerciements

*Nous exprimons nos remerciements les plus sincères à notre Dieu
qui nous a donné la patience de terminer ce travail.*

*Nous tenons à remercier notre promoteur Monsieur HAMOUR
Mohamed de nous avoir proposé ce sujet, pour son aide, sa
disponibilité et les conseils qu'il n'a cessé de nous prodiguer
pour l'aboutissement de ce travail.*

*Nos vifs remerciements vont aussi à Madame MOHELLEBI,
pour sa disponibilité, ses conseils et ses encouragements.*

*Nous exprimons aussi toute notre gratitude au personnel du
laboratoire de résistance des matériaux du département de
Génie mécanique.*

*Nos remerciements vont aussi aux membres du jury qui nous ferons
l'honneur de juger notre travail.*

*Nos remerciements vont aussi à toutes et à tous ceux qui ont
contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

*Que tous les enseignants ayant contribué et participé
à notre formation trouvent ici notre profonds respect.*

Introduction Générale.....	1
Présentation de l'entreprise SISCOPLAST de DEM	3

Chapitre I : Généralités sur les polymères

Introduction	6
I.1. Historique	6
I. 2. Définition des polymères.....	7
I. 3. Origine des polymères.....	8
I. 3.1 Origine végétale.....	8
I. 3.1 Origine naturelle	8
I. 3.1 Origine animale	8
I. 4 Elaboration.....	8
I.4.1 La polycondensation.....	10
I.4.2. La polymérisation en chaîne ou polyaddition	10
I.4.3. Formulation.....	11
Les charges	10
Les stabilisants	11
Les colorants	11
Les pigments.....	11
Les adjuvants	11
I. 5 Classification des différents polymères.....	12
I. 5.1 Classification liée à la structure	12
I. 5.1.1 Structure primaire	12
I. 5.1.2 Structure bi dimensionnelle	13
I. 5.1.3 Structure tridimensionnelle	13
I. 5.2. Classification selon certaines propriétés.....	13
I. 5.2.1 Matériaux thermoplastiques	13
I. 5.2.2 Matériaux thermodurcissables	15
I. 5.2.3 Matériaux élastomères	16

I.5.3 Classification Selon la morphologie.....	17
I.5.3.1 Polymère amorphe	17.
I.5.3.2 Polymère semi – cristallins.....	17
I.6. Propriétés des polymères	18
I.6.1 Propriétés mécaniques	18
I.6.2 Propriétés physiques.....	19
I.6.2.1 Température de la transition vitreuse.....	19
I.6.2.2 Température de fusion.....	20
I.6.3 Les propriétés optiques	20
I.7.1 Thermoplastiques	20
I.7.2 Thermodurcissables.....	21
I.8 Quelques techniques de transformation des polymères	21
I.8.1 Injection.....	21
I.8.2 Injection soufflage.....	22
I.8.3 L’extrusion	23
I.8.3.1 L’extrusion soufflage.....	24
I.8.3.2 Extrusion gonflage.....	24
I.8.4 Thermoformage	25
I.8.5 Le calandrage.....	27
I.9 Application des polymères	28
Conclusion	28

Chapitre II : Propriétés du polypropylène

Introduction	30
II.1 Définition.....	30
II.2 Différents types de propylènes.....	31
II.2.1 Un homopolymère	31
II.2.2 Un copolymère.....	31
II.2.3 Les compounds.....	31
II.3 Cristallisation du Polypropylène.....	33

II.4 Structure Cristalline du Polypropylène	33
II.4.1 Structure cristalline de PPH	35
II.4.1.1 Structure cristalline du polypropylène isotactique PPI.....	35
II.4.1.1.1. Forme α	36
II.4.1.1.2 Forme β	36
II.4.1.1.3 Forme δ	37
II.4.1.1.4 Forme Smectique.....	37
II.4.1.2 Structure cristalline du polypropylène syndiotactique	37
II.4.1.3 Les différentes conformations des chaînes cristallines du PPs	37
II.4.1.4 Structure cristalline du polypropylène atactique PPa.....	38
II.4.2 Structure cristalline du polypropylène copolymère PPC.....	38
II.5 Propriétés du polypropylène	38
II.5.1 Propriétés du polypropylène homopolymère.....	39
II.5.1.1 propriété de polypropylène PPI.....	39
II.5.1.1.1 Propriétés thermiques du PPI.....	40
II.5.1.1.2 Propriétés mécaniques du PPI.....	40
II.5.1.1.3 Propriétés annexes du PPI.....	40
II.5.1.2. Propriétés du polypropylène syndiotactique.....	40
II.5.1.2.1 Propriétés thermiques du PPs	40
II.5.1.2.1 Propriétés thermiques du PPs	40
II.5.1.2.2 Propriétés mécaniques du PPs	40
II.5.1.2.3. Propriétés annexes.....	41
II.5.2 Propriété du polypropylène copolymère	41
II.5.3 Caractéristiques en traction	41
II.5.' Caractéristiques au choc	42
II.5.5 Tableau récapitulatif des propriétés du propylène	43
Conclusion.....	43

Chapitre III. Comportement mécaniques des polymères

Introduction	46
III.1 Comportement contrainte-déformation.....	46
III.2 structure et transformations structurales des polymères	48
III.3 Viscoélasticité	50
III.3.1 Effet de vitesse et équivalence Temps-Température	50
III.3.1.1 Origine moléculaire	50
III.3.1.2 Superposition temps température.....	52
III.3.2.1 Effet de la température.....	52
III.3.1.2.2 Equivalence temps température.....	53
III.3.2 Comportement en traction vitreuse.....	55
III.3.3. Effet de l'architecture des chaines.....	56
III.4.Mécanismes de déformation des polymères semi-cristallins en traction.....	57
III.4.1 Comportement élastique et anélastique.....	57
III.4.2 Ecoulement plastique	58
III.4.3 Cavitation.....	60
III.4.4 Durcissement et rupture.....	60
Conclusion.....	61

Chapitre IV : Méthodes expérimentales

Introduction.....	63
IV.1. Matières premières	63
IV.1.1.Le polypropylène.	63
IV.1.2. Injection des éprouvettes.....	63
Température de la buse d'injection	66
IV 2 : Caractérisation mécanique.....	66
IV.2.1.Essai de traction	67
IV.2.1Principe de l'Essai	67
IV.2.2Présentation des éprouvettes normalisées	67

IV..2. 3Présentation de la machine de traction	68
IV.2. 4 Etude de l'influence de la température.....	69
IV..2.5 Présentation de la cellule chauffante	70
IV..2.6 Etalonnage de la cellule chauffante	71
Conclusion.....	72

Chapitre V : Résultats et interprétations

Introduction.....	74
V.1. Essais de traction :	74
Le module d'élasticité	74
La contrainte associée d'élasticité.....	74
La contrainte associée à la résistance à la rupture	74
L'allongement a la rupture.....	75
V.1.1. Courbes Contrainte-Déformation :	75
Courbe Contrainte-Déformation du PPH a Température de 25° :	75
Courbe Contrainte-Déformation du PPH a Température de 30° :	76
Courbe Contrainte-Déformation du PPH a Température de 40° :	76
Courbe Contrainte-Déformation du PPH a Température de 50° :	77
Courbe Contrainte-Déformation du PPH a Température de 60° :	77
Courbe Contrainte-Déformation du PPH a Température de 70° :	78
Courbe Contrainte-Déformation du PPH a Température de 80° :	78
Courbe Contrainte-Déformation du PPH a Température de 90° :	79
Courbe Contrainte-Déformation du PPH a Température de 100° :	79
Courbe Contrainte-Déformation du PPH a Température de 110° :	80
Courbe Contrainte-Déformation du PPH a Température de 115° :	80
Courbe de superposition Contrainte-Déformation du PPH:.....	81
V.2.Evolution des propriétés mécaniques	
Caractéristique du PPH selon la Température :	81
V.2.1.Courbes d'évolution des propriétés mécaniques	
Caractéristiques du PPH selon la Température :	81
Courbes d'évolution du Module de Young en fonction de la Température :	82

Courbes d'évolution de la résistance à la rupture en fonction de la Température :.....	82
Courbes d'évolution de la contrainte d'écoulement en fonction de la Température :.....	83
Courbes d'évolution de l'allongement à la rupture en fonction de la Température :.....	83
V.2.2.Tableau d'évolution des propriétés mécaniques du PPH selon la Température :.....	84
V.3.Conclusion :	85
Conclusion Générale :	87

Liste des figures

CHAPITRE I : Généralités sur les polymères

Figure I.1 Exemples de chaînes polymériques associées aux copolymères de synthèse et de mélanges physiques	7
Figure I.2. Polymères linéaires a. Homopolymère b. copolymère statistique, c. copolymère alterné, d. : copolymère séquencé)	12
Figure I.3. Polymères ramifiées.....	13
Figure I.4. polymères linéaires.....	14
Figure I.5. Le polypropylène	14
Figure I.6 Réticulation des polymères thermodurcissable.....	15
Figure I.7 : Structure amorphe d'un polymère	17
Figure I.8 Représentation schématique d'un polymère semi-cristallisé	18
Figure 1.9 : Présentation de la presse à injection	22
Figure 1.10 : Principe soufflage	22
Figure 1.11. Extrudeuse	23
Figure 1.12 : procédé d'extrusion soufflage	24
Figure 1.13: procédé d'extrusion gonflage	25
Figure I.14 : Cycle de thermoformage	26
Figure I.15 : Cycle de thermoformage	26
Figure 1.16 : Schéma d'une ligne complète de calandrage.....	27

CHAPITRE II : PROPRIÉTÉ DU POLYPROPYLENE (PPH/PPC)

Figure II.1 : Unité de répétition du polypropylène.....	30
Figure II.2 : Représentation d'une chaîne d'un polypropylène isotactique	32
Figure II.3 : Représentation d'une chaîne d'un polypropylène syndiotact	32
Figure II.4: Représentation d'une chaîne d'un polypropylène atactique.....	33
Figure II.5 : Structure d'un polymère semi-cristallin	34
Figure II.6 : Illustration des différentes structures composant un cristal de polymère, a) modèle de faisceaux, b) modèle de lamelles et c) structure sphérolitique.....	35
Figure II.7 : Conformations des chaînes du polypropylène isotactique Droite (R) - et Gauche (L) - les hélices dans leur configuration Haut (up) et Bas (down).....	38
Figure II.8 : Les différentes conformations des chaînes du PPs.....	38
Figure II.9 courbe de traction du polypropylène	43
Figure II.10 Résistance à la rupture en traction des différents polypropylène en fonction de la température	43
Figure II.11 Résistance au choc de différents PP en fonction de la température.....	44

CHAPITRE III COMPORTEMENT DES POLYMERES

Figure III.1 Comportement contrainte-déformation des matériaux polymères.....	45
Figure III.2 Courbe contrainte-déformation a partir de laquelle sont déterminées la limite d'élasticité et la résistance a la traction.....	47
Figure III.3 Incidence de la température sur les caractéristiques de contrainte-déformation du poly méthacrylate de méthyle.....	48
Figure III.4 Évolutions schématiques du volume massique V_m Et du module de Young E d'un polymère en fonction de la température.....	53
Figure III 5 : Evolution schématique du module d'élasticité d'un polymère amorphe avec la température ; Transition α et passage à l'état fluide.....	53
Figure III 6 : Exemple de comportements en traction de polymères à $0,001 \text{ s}^{-1}$ en fonction de la température (donnée par rapport à leur T_g respectiv)	54
Figure III 7 : Module d'élasticité d'un HIPS (PS choc) en fonction de la fréquence et de la température	54
Figure III.8 Étapes de la déformation d'un polymère semi-cristallin.....	58
Figure III.9 Schéma de déformation dans une sphérolite des lamelles amorphes et cristallines orientées perpendiculairement,(b)et(d)obliquement , et (c) parallèlement à l'axe de traction.....	59

Chapitre IV Méthodes Expérimentales

Figure IV.1 Machine à injection et moule éprouvette	64
Figure IV.2 : Les différentes phases du cycle d'injection.....	65
Figure IV.3: Température d'injection utilisées.....	66
Figure IV.4 Géométrie de l'éprouvette de traction	68
Figure IV.5 Machine de traction	69
Figure VI.6 Dispositif de traction avec cellule chauffante	69
Figure IV.7 Image de la cellule chauffante	71
Figure IV.9 Courbe d'étalonnage de la cellule chauffante	71

Chapitre V Résultats et Interprétations

Figure V.1 : Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Températures de 25°C	75
Figure V.1 : Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Températures de 30°C	76
Figure V.1 : Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Températures de 40°C	76
Figure V.1 : Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Températures de 50°C	77
Figure V.1 : Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Températures de 60°C	77
Figure V.1 : Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Températures de 70°C	78
Figure V.1 : Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Températures de 80°C	78
Figure V.1 : Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Températures de 90°C	79
Figure V.1 : Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Températures de 100°C	79
Figure V.1 : Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Températures de 110°C	80
Figure V.1 : Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Températures de 115°C	80
Figure V.12 Superposition des Courbes contraintes-Déformation du polymère PPH a différentes Températures	81
Figure V.13 Superposition des Courbes contraintes-Déformation du polymère PPH a différentes Températures	82
Figure V.14 Courbe d'évolution du Module de Young caractéristiques du PPH selon les températures.....	83
Figure V.15 Courbe d'évolution de la résistance a la rupture du PPH en fonction de la température	83
Figure V.16 Courbe d'évolution de la contrainte d'élasticité du PPH en fonction de la température	84
Figure IV.17 Courbe d'évolution de l'allongement a la rupture du PPH en fonction de la température.....	84

Liste des Tableaux

Chapitre I Généralités sur les polymères

Tableau 1.1 Exemple de monomères et de polymères correspondants.....	8
Tableau I.2 Tableau comparatif de la polymérisation en chaîne et en étapes	10
Tableau 1. 3 Exemple des polymères Thermoplastes usuels et leurs caractéristiques.....	15
Tableau 1.4 Exemple des applications des polymères usuels	28

Chapitre II Propriétés du polypropylène

Tableau II.1. Propriétés mécaniques en traction comparées des différents polypropylènes	42
Tableau II.2 Résumé des différentes caractéristiques des polypropylènes	44

Chapitre IV Méthodes Expérimentales

Tableau IV.1 Caractéristiques du polypropylène utilisé.....	63
Tableau IV.2 : Paramètre d'injection	65
Tableau IV.3 Dimensions des éprouvettes de traction	68

Chapitre V Résultats et Interprétations

Tableau V.1 Tableau d'évolution des propriétés mécaniques caractéristiques du PPH selon la température	84
---	----

Introduction Générale

Introduction Générale

Du fait de leurs bonnes propriétés mécaniques spécifiques et de leur commodité de mise en œuvre, l'application des matériaux polymériques industriels a considérablement augmenté, et ce grâce à leur facilité de mise en œuvre, à leur faible coût de production et leur faible densité, les matériaux polymères présentent l'avantage d'être légers, facilement usinables mais surtout d'avoir des propriétés chimiques et physiques et en particulier mécaniques intéressantes.

Parmi ces polymères, le polypropylène, qui est un polymère thermoplastique le plus utilisés industriellement à l'heure actuelle. Ce matériau est facile à mettre en œuvre par différentes techniques. On peut réaliser des objets sous différentes formes : pièces de géométries et dimensions variées, on trouve beaucoup de pièces moulées en polypropylène dans la construction automobile, notamment les pare-chocs, les tableaux de bord, et les réservoirs d'essence et de liquide de frein.

Le polypropylène expansé est utilisé en aéromodélisme pour la construction de petits modèles volants (moins d'un mètre d'envergure le plus souvent). Ses propriétés mécaniques (légèreté, souplesse et mémoire de forme) permettent de créer des modèles très résistants aux chocs, et faciles à réparer (collage rapide à la colle cyanoacrylate). Ce matériau est généralement employé sous des sollicitations viscoélastiques dans des domaines variés nécessitant des conditions d'utilisations spécifiques. C'est pourquoi, il a été l'objet de nombreuses études ces dernières années afin d'acquérir une meilleure connaissance de ses propriétés et des différents mécanismes apparaissant sous sollicitations mécaniques.

De nos jours, Le polypropylène est fréquemment utilisé dans des applications industrielles, notamment dans l'automobile et l'aéronautique. Vu ses propriétés mécaniques qui en font un matériau à parts. Ce matériau est généralement sujet à de sévères chargements cycliques, mécaniques et thermiques. Tous ces effets entraînent dans certaines situations, une dégradation des performances du matériau pouvant aller jusqu'à l'apparition de fissures et finalement à la rupture de la pièce. Le problème du comportement mécanique du polypropylène en température n'est que partiellement traité dans la littérature.

Certaines industries, dont les secteurs de l'emballage, l'électroménager ou l'automobile sont particulièrement soucieuses de l'effet de la température sur les caractéristiques mécaniques du matériau.

Dans ce travail, nous nous intéresserons plus particulièrement à l'influence de la température sur la tenue mécanique du polypropylène.

Ce travail s'articule donc autour de cinq chapitres, Le premier chapitre étudie les notions fondamentales sur les polymères (définition d'un polymère, classification des polymères,... etc...), le second chapitre est consacré à la présentation du matériau objet d'étude ou le polypropylène caractéristiques physico- chimiques, le 3ème chapitre se consacre à l'étude de comportement des matériaux polymères. Dans le chapitre IV, on présentera les techniques expérimentales utilisées. Le dernier chapitre est une présentation des résultats avec leurs interprétations. Enfin une synthèse du travail sera donnée dans la conclusion générale.

Présentation de l'entreprise SISCOPLAST de Draa EL Mizan

1. Présentation

L'entreprise SISCOPLAST est une filiale du groupe ENPC (Entreprise Nationale des Plastique et des Caoutchouc), qui regroupe quatre autres unités de production et de transformation de plastique sises respectivement à : Chlef, Sétif, Médéa, Alger. L'entreprise Siscoplast (Société d'Injection Plastique et de fabrication des Articles Scolaires) de Draa EL Mizan a été créée en 1981 et est gérée par un conseil de direction. C'est une société par action. La superficie de cette entreprise s'étend sur 30 000 m². Elle a réussi à occuper une place prépondérante dans le marché locale de l'industrie de la plasturgie malgré le marché concurrentiel ouvert contre d'autres produits importés et locaux. Ses produits multiples ont été, au fil des années et grâce à l'apport considérable des compétences composées de techniciens, d'ingénieurs et de cadres dirigeants formés dans les différents instituts et universités algériennes, améliorés. Et gagnent la satisfaction du client. L'entreprise Siscoplast est certifiée ISO 9001 version 2008 depuis l'année passée. Cette norme intègre la politique de gestion de la qualité et a pour objectifs principaux de répondre aux exigences du client et apporter des améliorations sur tous les plans de la gestion de l'entreprise.

2. Gamme de produits fabriqués

L'atelier de production au sein de l'entreprise est divisé en trois secteurs, à savoir le secteur d'injection, le secteur d'extrusion et en fin le secteur de souples.

• Le secteur d'injection

Actuellement ce secteur fabrique, bouchon moubyd en polypropylène(PP), les fusettes en polyéthylène haute densité injection et bouchon Naftal en PP.

- **Le secteur d'extrusion**

Par ce procédé l'entreprise fabrique principalement, les tubes en PERD pour AEP, tubes en PEBD pour l'irrigation et des gaines électriques.

- **Le secteur de souples**

Ce dernier secteur fabrique, protèges cahiers en PVC et pochettes vignettes en PVC.

3. La matière utilisée en sein de l'entreprise

Les matières utilisées au sein de cette entreprise sont données ci – dessous :

- PE100 , PE80 , PE60 , Polychlorure de vinyle (PVC)
- Polypropylène (PP)
- Polystyrène(PS)
- PVC

Chapitre I

Généralités sur les Polymères

Chapitre I Généralités sur les polymères

Introduction

Du bois, du coton jusqu'à un univers sans limite de produits plastiques, l'homme se trouve maintenant dépendant des polymères, produit synthétique, naturels, tirés des végétaux et des animaux remplaçant les métaux, les céramiques dans certains domaines. D'où la nécessité d'inventer et de créer des nouveaux matériaux qui manquent et répondent aux besoins divers.

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

Le terme polymère est introduit en 1832 par Berzelius, les premiers polymères synthétiques identifiés sont certains polyesters (1847), le celluloïd (1869), la galalithe (1895). Le XXe siècle voit se succéder les découvertes et les commercialisations : plexiglas (1902), Bakélite (1909), buna (caoutchouc synthétique, 1911), polystyrène (PS, 1930), polychlorure de vinyle (PVC, 1931), nylon 6,6 (1938).

Depuis 1945, il ya une véritable explosion de la chimie et de la physique des Polymères, toute sorte de nouveaux polymères voyant le jour, La production mondiale a atteint les 100Mt/an en 1995 et elle double tous les cinq ans. Le père de la chimie des macromolécules est Hermann Staudinger qui a imposé ce concept en 1924 par l'étude des macromolécules naturelles (soie, cellulose, caoutchouc) et a ouvert la voie aux recherches sur les polymères synthétiques.

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.. En 2007, cette production a augmenté a 260 millions de tonnes [1]. 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 1iermoitie du 2éme siècle [2].

I.2. Définition des polymères [3]

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. [4]

La caractéristique des molécules polymères est d'être constituées d'enchaînements de groupes identiques d'atomes désignés par un symbole A. La molécule du polymère sera représentée par A_n ; n étant un nombre entier de plusieurs centaines, et même beaucoup plus si A est composé d'un petit nombre d'atomes.

Quand la molécule ne comporte que des chaînes –A- identique on dit qu'on a affaire à un homopolymère .A-A-B-A-B-B-A-A

Il arrive que des chaînons de natures différentes A, B soient présents, pour lesquels on parle de copolymères comme dans les schémas ci - dessous:



Le premier ensemble, où les chaînons se placent sans ordre, est représentatif d'un copolymère statistique, le second est un copolymère blocs figure I.1.

La longueur caractéristique d'une chaîne est d'environ 1 micron. Le squelette du polymère est stabilisé par des liaisons chimiques covalentes, il ne se dissout donc pas en solution. La cohésion entre macromolécules est assurée par liaisons physiques (Van der Waals ou hydrogènes), lesquelles se rompent si on chauffe.

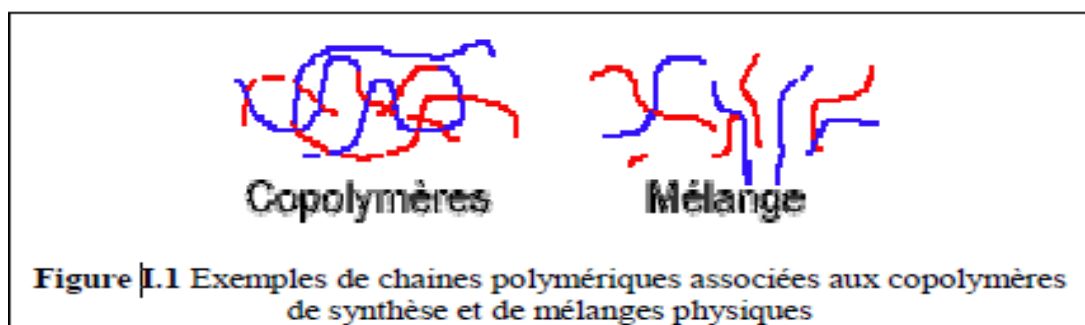


Figure I.1 Exemples de chaînes polymériques associées aux copolymères de synthèse et de mélanges physiques [5]

Dans le tableau I.1, nous donnons quelques polymères les plus usuels et les plus utilisés en Algérie.

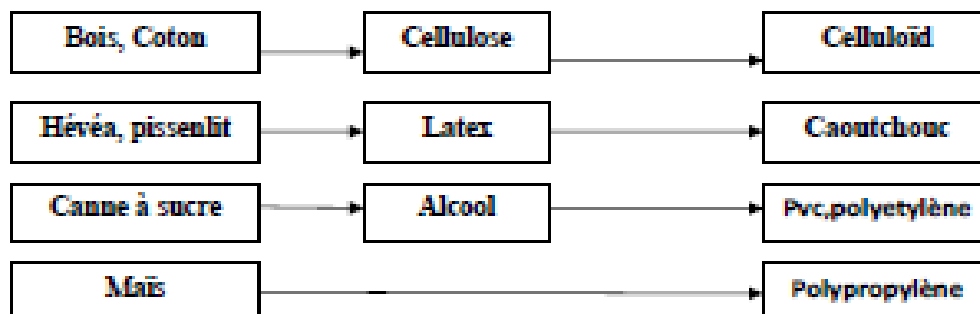
Tableau 1.1 Exemple de monomères et des polymères correspondants

éthylène	$\text{CH}_2 = \text{CH}_2$	polyéthylène (PE) $-(\text{CH}_2 - \text{CH}_2)_n-$
tétrafluoroéthylène	$\text{CF}_2 = \text{CF}_2$	polytétrafluoroéthylène (PTFE) $-(\text{CF}_2 - \text{CF}_2)_n-$
propylène	$\text{CH}_2 = \overset{\text{CH}_3}{\underset{ }{\text{CH}}}$	polypropylène (PP) $-(\text{CH}_2 - \overset{\text{CH}_3}{\underset{ }{\text{CH}}})_n-$
chlorure de vinyle	$\text{CH}_2 = \overset{\text{Cl}}{\underset{ }{\text{CH}}}$	polychlorure de vinyle (PVC) $-(\text{CH}_2 - \overset{\text{Cl}}{\underset{ }{\text{CH}}})_n-$
styrène	$\text{CH}_2 = \overset{\text{C}_6\text{H}_5}{\underset{ }{\text{CH}}}$	polystyrène (PS) $-(\text{CH}_2 - \overset{\text{C}_6\text{H}_5}{\underset{ }{\text{CH}}})_n-$
acrylonitrile	$\text{CH}_2 = \overset{\text{CN}}{\underset{ }{\text{CH}}}$	polyacrylonitrile (PAN) $-(\text{CH}_2 - \overset{\text{CN}}{\underset{ }{\text{CH}}})_n-$
méthacrylate de méthyle	$\text{CH}_2 = \overset{\text{CH}_3}{\underset{\text{O} = \text{C} - \text{O} - \text{CH}_3}{ }{\text{C}}}$	polyméthacrylate de méthyle (PMMA) $-(\text{CH}_2 - \overset{\text{CH}_3}{\underset{\text{O} = \text{C} - \text{O} - \text{CH}_3}{ }{\text{C}}})_n-$

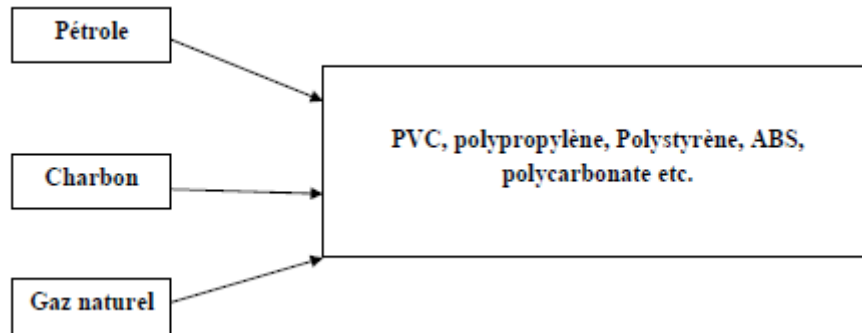
I.3 Origines des polymères

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

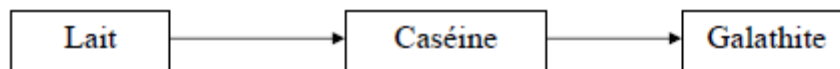
- **Origine végétale** : on trouve principalement



- **Origine naturelle** : qui contient le:



- **Origine animale** : on peut trouver :



I.4. Elaboration [2]

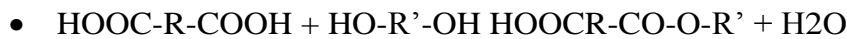
Les deux procédés de base de la polymérisation sont les réactions par condensation et par addition. La condensation produit des polymères à longueur de chaîne variable, et de petites molécules, comme l'eau, ammoniac et le glycol. La réaction par addition ne génère que des polymères de longueur spécifique, sans aucun sous-produit. Les polymères formés par condensation sont les nylons, les polyuréthanes (PU) et les polyesters. Parmi les polymères synthétisés par addition, on trouve le polyéthylène (PE), polypropène (PP), polychlorure de vinyle (PVC) et le polystyrène (PS).

La polymérisation désigne l'ensemble des procédés de formation de chaînes polymères à partir de molécules plus petites appelées monomères. Il existe deux types de polymérisation

- La polymérisation par étape ou polycondensation.
- La polymérisation en chaîne ou polyaddition

I.4.1. La polycondensation [2]

• La polymérisation par étapes est analogue à une succession de réactions chimiques organiques. L'exemple le plus souvent utilisé pour ce type de polymérisation est la polyestérification (également appelé polycondensation).



• La réaction d'estérification est équilibrée. Pour qu'elle se fasse entièrement, il faut enlever l'eau. Il existe deux types de polymérisation par étapes :



I.4.2. La polymérisation en chaîne ou polyaddition

Les monomères s'associent sans réaction d'élimination simultanée. C'est le procédé le plus utilisé en industrie : le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène, et l'alcool polyvinylique, sont des exemples de polymères obtenus par polymérisation en chaîne comme toute réaction en chaîne, cette polymérisation comporte les étapes suivantes :

- L'amorçage (formation des centres actifs à partir du monomère).
- La propagation (croissance des chaînes de polymère par addition successives).
- La terminaison (destruction du centre actif et interruption de la croissance des chaînes).

Nous allons comparer la polymérisation par étapes et la polymérisation en chaîne

Tableau I.2 tableau comparatif de la polymérisation en chaîne et en étapes

Polymérisation par étapes	Polymérisation en chaîne
Les monomères M réagissent tels quels.	M doivent d'abord être transformés en M^* (monomères activés).
On assiste à une multiplicité des espèces en présence.	$\text{M} + \text{M}^* \quad \text{MM}^* \quad \text{M} \quad \text{MMM}^* \quad \text{M}$ $\text{MMMM}^* \quad \text{M}$ <p>Le polymère en croissance ne peut réagir qu'avec le monomère.</p>
La masse du polymère évolue lentement en fonction du temps.	La masse du polymère évolue rapidement en fonction du temps.

La polymérisation peut être radicalaire, cationique ou ionique, selon la nature de l'espèce active.

I.4.3. Formulation

Les polymères ne sont jamais utilisés seul, il y'a toujours des éléments et des substances à ajouter, tel que les charges, les stabilisants, les colorants, master batch, pigments et les additifs et les adjuvants. Afin d'améliorer une caractéristique mécanique, physique et thermique donnée.

- **Les charges**

C'est une substance inerte, minérale ou végétale qui, ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques et thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, de réduire le prix de revient du matériau transformé.

- **Les stabilisants**

Pour inhiber ou retarder les réactions responsables de dégradations des polymères, on leur incorpore des additifs appelés stabilisant, classé selon leur mode d'action : antioxydants, anti UV.

- **Les colorants**

A coloration doit satisfaire à des exigences très diverses, esthétiques et techniques, amélioration de certaines caractéristiques physiques du polymère ou protection contre la lumière visible ou les radiations ultraviolettes.

- **Les pigments**

Matière colorante sous forme de poudre, insoluble dans les solvants et les substrats.

- **Les adjuvants**

On appelle adjuvants les substances mélangées physiquement aux polymères, destinées à modifier ou améliorer leur comportement rhéologique machine de transformation, ou les propriétés d'usages des matériaux finis.

I. 5. Classifications de différents polymères [1,3]

I.5.1 Classification liée à la structure

I.5.1.1 Structure primaire

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

Dans le cas où la macromolécule est composée de la répétition d'un seul motif, ce qui résulte le plus souvent de la polymérisation d'un seul type de monomère, on parle d'homopolymère. Quand plusieurs motifs différents sont répétés, on parle de copolymère.

On distingue ensuite plusieurs types de copolymères suivant l'organisation entre les différents monomères. Dans le cas le plus fréquent, on a un copolymère statistique où les différents monomères se mélangent en fonction de la réactivité et de la concentration de ceux-ci les propriétés mécaniques sont alors dans la moyenne. En revanche, dans un copolymère séquencé (anglicisme copolymère à blocs est parfois utilisé) ou copolymère alterné, il peut y avoir combinaison des propriétés mécaniques :

Copolymère statistique ...ABBAAAABBBABABAABABAB

Copolymère séquencé ...AAAAAAAAABBBBBBB

Copolymère alterné ...ABABABABAB

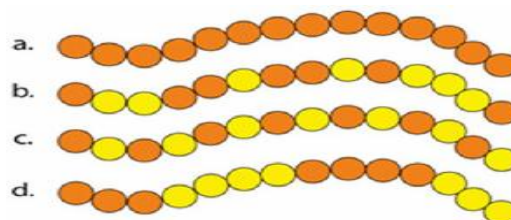


Figure I.2. polymères linéaires a. : homopolymère, b. : copolymère statistique, c. : copolymère alterné, d. : copolymère séquencé)

I.5.1.2 Structure bi dimensionnelle ou Polymères ramifiés

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

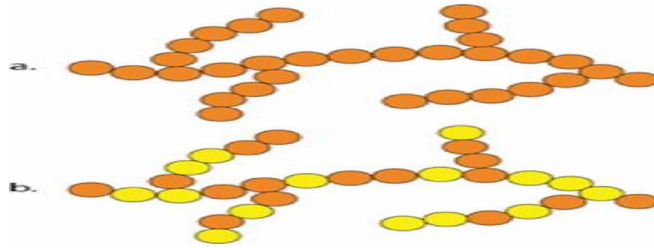


Figure I.3. Polymères ramifiées

I.5.1.3 structure tri dimensionnelle

Les monomères trifonctionnels, à trois liaisons covalentes actives, forment des réseaux tridimensionnels appelés polymères réticulés. Par ailleurs, les polymères comportant de très nombreuses liaisons transversales sont aussi des polymères réticulés. De tels matériaux possèdent des propriétés mécaniques et thermiques distinctives; les époxydes et les phénols formaldéhydes appartiennent à ce groupe.

I.5.2. Classification selon certaines propriétés

Une autre classification peut se présenter, selon leur comportement thermomécanique, et on distingue trois grandes classes :

- les thermoplastiques.
- les thermodurcissables.
- les élastomères.

I.5.2.1 Matériaux Thermoplastiques

Chaque monomère procède deux points d'accrochage. On obtient un assemblage linéaire de monomères. Dans cet exemple, le polymère est symbolisé avec 4 unités monomères

mais, en pratique, il possède un beaucoup plus grand nombre, peuvent aller de 30000 à 2500000 unités

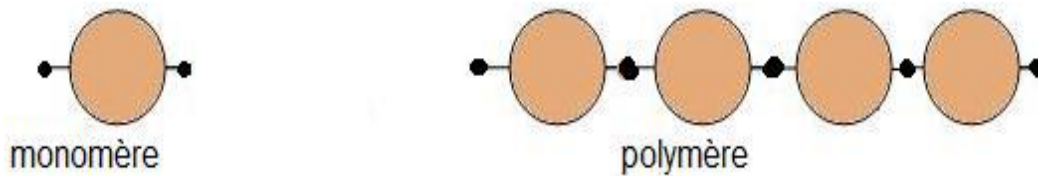


Figure I.4. Polymères linéaires

On aboutit donc à une structure où s'enchevêtrent les chaînes macromoléculaires, à l'échelle du matériau lui-même. Cette structure est peut-être compacte, car comporte beaucoup de vide, mais la cohésion est garantie grâce aux nœuds au manque de mobilité des uns par rapport aux autres.

Ce polymère a base de chaînes macromoléculaires, synthétisées à partir de monomères à deux points d'accrochage, est caractéristique de la famille des thermoplastiques.

Par exemple, on cite **Le Polypropylène**

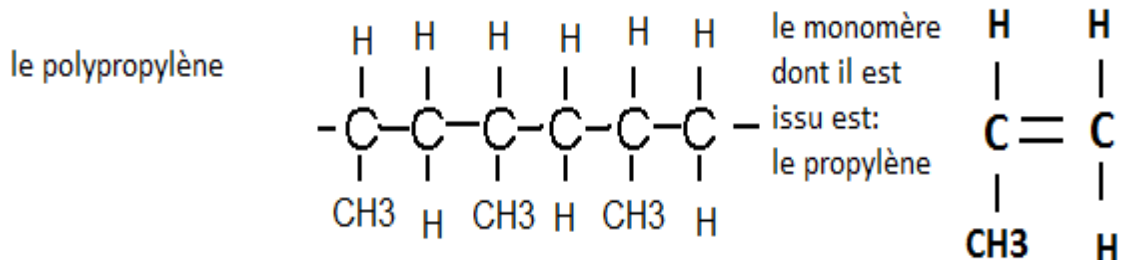


Figure I.5. Le polypropylène

En connaissant la structure des thermoplastiques, on comprend les spécificités de leur mise en œuvre :

- Par chauffage, ils se ramollissent, puis se fluidifient. En fonction du mode de mise en œuvre, il existe une température pour laquelle ils deviennent transformable, et peuvent être transférés dans l'empreinte d'un moule.
- Au refroidissement, le matériau redevient solide, on obtient un produit moulé. L'effet est réversible, c'est-à-dire que le matériau peut être à nouveau chauffé, rendu transformable, ce qui permet d'obtenir de nouvelles pièces. En pratique cela n'est pas tout

à fait vrai, car pour faciliter la mise en œuvre, ce recyclage s'accompagne généralement d'un broyage, et donc d'une dégradation de la matière d'œuvre (coupure de chaînes). Ce comportement peut s'expliquer par le fait qu'entre elles, les chaînes moléculaires sont de plus en plus souples mobile, les nœuds de plus en plus sont distendus quand la température augmente.

Tableau 1. 3 Exemple des polymères Thermoplastes usuels et leurs caractéristiques

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

I.5.2.2 Matériaux Thermodurcissables

Quand le monomère a au moins trois points d'accrochages, on obtient un réseau tridimensionnel. Dans la pratique on utilisera un mélange de deux ou trois points d'accrochages, pour agrandir les mailles et pour assouplir la structure. Néanmoins, en fonction de la taille de ces mailles, les thermodurcissables sont en générale plus rigide que les thermoplastiques.

Une part importante des thermodurcissables obtenus par réticulation. Dans ce cas, on fait réagir un polymère contenant des points d'accrochages (polymère insaturé), avec un réactif, une réaction chimique intervient avec pontage des chaînes. C'est le cas par exemple de la polymérisation du polyester insaturé.

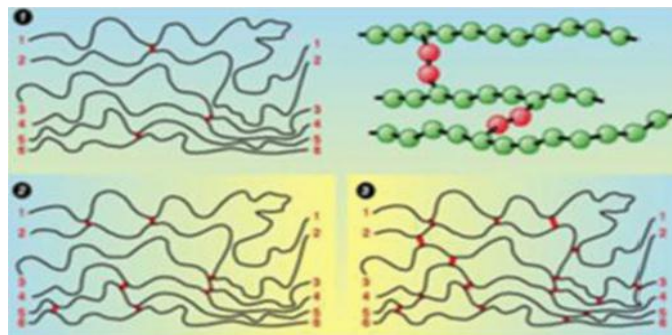


Figure I.6 Réticulation des polymères thermodurcissable

Le polyester insaturé est utilisé pour la mise en œuvre des composites. La matière d'œuvre est une résine liquide composée du styrène et du polyester insaturé. La réaction chimique intervient après mélange avec un catalyseur et un accélérateur. Ceci est typique des thermodurcissables, mais très différent de ce qui existe avec les thermoplastiques :

- on obtient une réaction chimique
- la matière d'œuvre (liquide) à une bonne coulabilité permet une transformation par moulage ;
- la réaction chimique aboutit à l'obtention d'un état solide ; Comparativement aux thermoplastiques, on peut encore assouplir le matériau par chauffage, mais on ne peut plus revenir à l'état initial, car cela reviendrait à casser le réseau. Un chauffage très élevé ne peut conduire qu'à la détérioration du matériau (combustion

I.5.2.3 Matériaux élastomères

Les élastomères sont un type particulier de matériaux polymère, qui possède l'impressionnante faculté de pouvoir de supporter de très grande déformation, il se caractérise aussi par la quasi-recouvrance de ces propriétés initiales quand la sollicitation cesse.

Composé naturel ou synthétique présentant l'élasticité du caoutchouc à sa température d'utilisation, en général proche de la température ambiante. Ce sont des polymères dont la température de transition vitreuse se situe bien en dessous de la température ambiante, possède les propriétés suivantes : souple, il s'allonge facilement sous l'effet d'une traction, et possède donc un module d'élasticité peu élevé ; il possède une résistance à la rupture importante à son allongement maximal ; il est élastique et retrouve rapidement sa longueur initiale lorsque la sollicitation mécanique cesse ; enfin, il conserve ses propriétés dans un large domaine de températures. Les élastomères sont constitués de chaînes polymères de masse moléculaire moyenne élevée de 100 000 à 500 000 unités monomères par chaînes.

On peut citer des exemples d'élastomères :

- ABS : Acrylonitrile Butadiène Styrène.
- SBR : Styrène Butadiène Rubber.
- EPDM : Ethylène Propylène Diène Monomère.

I.5.3. Classification liée à la morphologie [4]

I.5.3. 1 polymère amorphe

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



Figure I.7 : Structure amorphe d'un polymère

I.5.3. 2 polymère semi cristallin

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

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

De portion de chaînes arrangées régulièrement dans l'espace. Les chaînes peuvent être des zigzags plans régulièrement organisés comme dans le PE, ou des hélices comme dans le

PP. les chaînes moléculaires sont beaucoup trop longues pour ne pas se replier hors de la zone du cristal, mais elles y entrent à nouveau de façon adjacente, ou pénètrent dans une zone voisine.

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

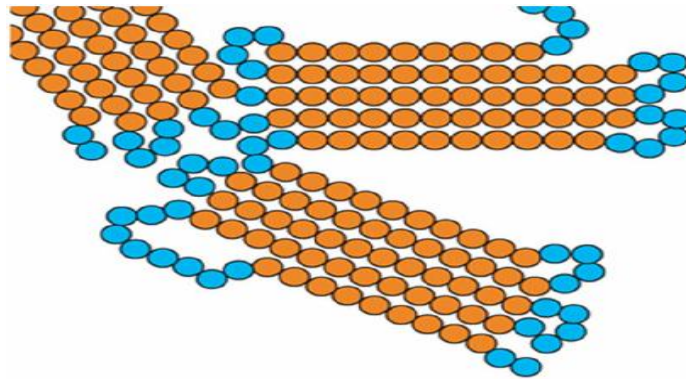


Figure I.8 Représentation schématique d'un polymère semi-cristallisé

I.6. Propriétés des polymères [5]

I.6.1. Propriétés mécaniques

Le succès des polymères est dû en partie de la facilité avec laquelle on peut leur donner des formes voulues (d'autant plus à l'état fondu). Ils sont très malléables, très plastiques, d'où leur nom en fait cette plasticité varie dans une large gamme, des plus rigides, durs et cassants, aux plus mous ou élastique.

Les propriétés mécaniques décrivent leurs comportements vis-à-vis des sollicitations mécaniques, telles que pressions, étirements, torsions, chocs.

D'autres, les élastomères seront recherchés pour leur élasticité qui leur confère une excellente capacité d'absorption des chocs, on les emploie dans les pneus, les semelles de chaussures, les matelas, les fibres de textiles, élasthanne (polyuréthane).

Thermoplastiques et thermodurcissables sont soumis au phénomène de vitrification, ou transition vitreuse, ils deviennent durs et cassants comme du verre. Au-dessus, ils sont souples, plus plastiques. A l'extrême, ils deviennent élastiques.

Les propriétés mécaniques des matériaux polymères dépendent de la position de la température expérimentale par rapport aux températures caractéristiques qui sont les températures de fusion, de transition vitreuse et de transition secondaire.

I.6.2. Propriétés physiques

I.6.2. 1 Température de la transition vitreuse

La transition vitreuse est beaucoup plus importante qu'elle ne le paraît. Il existe une certaine température (différente pour chaque polymère) appelée température de transition vitreuse, dont l'abréviation est Tg. Quand le polymère est refroidi en dessous de cette température il devient dur et fragile, comme le verre.

Certains polymères sont utilisés au-dessus de leur température de transition vitreuse, certains au-dessous. Les plastiques durs comme le polystyrène et le poly méthacrylate de méthyle sont utilisés au-dessous de leur température de transition vitreuse; ils sont à l'état vitreux. Leurs Tg sont bien au-dessus de la température ambiante, de l'ordre de 100 °C. Les caoutchoucs élastomères comme le polyisoprène et le polyisobutylène, sont utilisés au-dessus de leur température de transition vitreuse, c'est-à-dire à l'état caoutchouteux et ils sont mous et flexibles. Les plastiques souples comme le Polyéthylène et le polypropylène sont aussi utilisés au-dessus de leur température de transition vitreuse.

La transition vitreuse se produit dans les polymères amorphes, c'est-à-dire des polymères dont les chaînes ne sont pas arrangées en cristaux ordonnés, mais sont disposées au hasard, de n'importe quelle façon, même si elles sont à l'état solide.

Ce changement de mobilité avec la température se produit parce que le phénomène que nous appelons chaleur est en réalité une forme d'énergie cinétique; c'est-à-dire l'énergie des objets en mouvement. C'est en fait un effet du mouvement aléatoire des molécules, que ce soit les molécules de polymères ou les petites molécules. Les choses sont chaudes quand leurs molécules ont beaucoup d'énergie cinétique et bougent vite, et elles sont froides quand leurs molécules manquent d'énergie cinétique et bougent lentement ou pas du tout.

La température exacte à laquelle les chaînes de polymères subissent ce grand changement dans leur mobilité dépend de la structure du polymère.

I.6.2. 2 Température de fusion

Ne pas confondre la température de fusion T_f avec la température de transition vitreuse. La fusion se produit dans les polymères cristallins, contrairement à la température de transition vitreuse T_g , se produit dans les polymères amorphes. La fusion est le passage des chaînes de polymère d'un état cristallin ordonné à un état liquide désordonné.

La fusion des polymères présente plusieurs caractéristiques qui ne se retrouvent généralement pas dans les métaux et les céramiques en premier lieu, elle se produit sur une plage de températures. La tenue apparente en fusion varie selon la vitesse de chauffage, dont l'augmentation se traduit par une hausse de la température de fusion. Les polymères sont sensibles aux traitements thermiques qui provoquent une modification des structures et des propriétés. Un recuit effectué juste sous la température de fusion entraîne un épaississement des lamelles et une hausse de la température de fusion des polymères.


I.6.3. Les propriétés optiques [1]

La propriété optique d'intérêt pour la lumière visible est la transparence, c'est-à-dire l'absence de diffusion et l'absorption dans le visible seule les amorphes sans additifs de résilience élastomère ni charge minérale peuvent être transparents ; il y a quelques exceptions où la nature chimique du renforçateur de choc a le même indice de réfraction que le polymère principal. L'indice de réfraction dépend de la nature des atomes et des liaisons qui les relient comme pour tous les produits organiques, on peut calculer par addition d'incrément la réfraction moléculaire.

I.7 Applications des polymères

Les polymères constituent une des principales révolutions techniques du XX^{ème} siècle ceux-ci sont utilisés pour un nombre extraordinaires d'applications à tous les échelons de la vie. (Voir Tableau I. 4. [6])

Tableau 1.4 Exemple des applications des polymères usuels

 Domaines	Exemples
Le secteur de la construction	Les portes, conduites d'eau et l'assainissement, peinture des murs des plan chaires et des plafonds, revêtement du sol.
Industrie de l'emballage	Bouteilles, pots de yaourt, boîtes aux lettres, problème thermique, gainage films vidéo.
Médecine et santé	Poches de sang, gants, lentilles, verres de lunettes, les organes artificiels, Seringues, industrie dentaire, prothèses, outils de chirurgie
Articles ménagers	Tupperware, poubelles, seaux, vaisselle.
Matériel électrique et électronique et les communications	Tension d'isolement, isolation, laveuses, ordinateurs et les caméras, Radio et télévision, téléphone.
Industrie au Tommobile	Système vitre claire, Tapie, carrosserie, optiques, planches de bord, habillage intérieur, Façades de téléviseurs, gainage de câbles.
Industrie textile	Vêtement, fibres textiles naturelles et synthétiques, sacs, skaï, similicuir, non tissés.
Dans le domaine agricole	Colles, vernis, mousses.
Sports-loisirs	Certaines parties des bâtiments, des avions et des bateaux, DVD, bandes magnétiques, Files de pêche et les cordons utilisés, piscines, coques de bateaux.
Industrie chimique	Tuyauterie, cuves, revêtements.
Le domaine alimentaire	Procédés de fabrication d'aliments, emballages (bouteilles, pots de yaourt, briques de lait, boîtes à œufs) ou industriel (flacons de détergent, sachets et sacs, casiers)...
Le matériel de maison	Meuble, vaisselle, accessoires... ; Utilisés en industrie pour maintenir le matériel d'une violente collision.

I.8. Transformation des polymères

I.8.1. Thermoplastiques

Sont transformées couramment par les procédés suivants :

- injection, injection-soufflage
- extrusion
- calandrage
- thermoformage

I.8.2. Thermodurcissables

Les principaux procédés de transformation des thermodurcissables sont les suivants :

- compression
- pultrusion
- stratification
- chaudronnerie

I.9. Quelques techniques de transformation des polymères

Les techniques de transformation des plastiques dépendent de la nature des polymères et de la destination des produits finis. Quelques méthodes sont régulièrement utilisées pour la fabrication des pièces et des objets en polymère. Les principaux procédés de fabrication industrielle sont : l'injection par moulage, l'injection soufflage, l'extrusion, le thermoformage, le calandrage, le roto moulage [7]

1.9.1. Injection

La matière plastique sous forme de granulés, est versée dans une trémie pour alimenter une vis sans fin logée dans un tube chauffé. Elle y est comprimée, malaxée et chauffée.

Ce traitement mécanique et thermique fournit une pâte fondante et homogène sans bulle qui est poussée par la vis en rotation vers un orifice. La matière expulsée sous pression par la vis d'injection à travers ce trou vient remplir un moule fermé et refroidi.

Au contact des parois froides, elle prend la forme du moule et se solidifie. Le moule s'ouvre ensuite pour faire sortir la pièce. Pour changer la forme de la pièce, il suffit de changer de moule.

Ce procédé permet une transformation en discontinu des thermoplastiques. On obtient après démoulage des produits finis ou semi-finis de formes complexes en une seule opération. C'est une méthode de production très rapide pour produire des objets en très grande quantité. La technique de fabrication est fréquente pour fabriquer des objets moulés de qualité, parfois de forme compliquée dans le domaine de l'automobile, du jouet ou de l'électronique. On peut réaliser des objets très volumineux, par contre, il n'est pas possible de faire des parois supérieures à 6 mm. Les préformes de bouteille d'eau minérale qui ne peuvent pas être réalisées par extrusion sont fabriquées par cette technique d'injection.

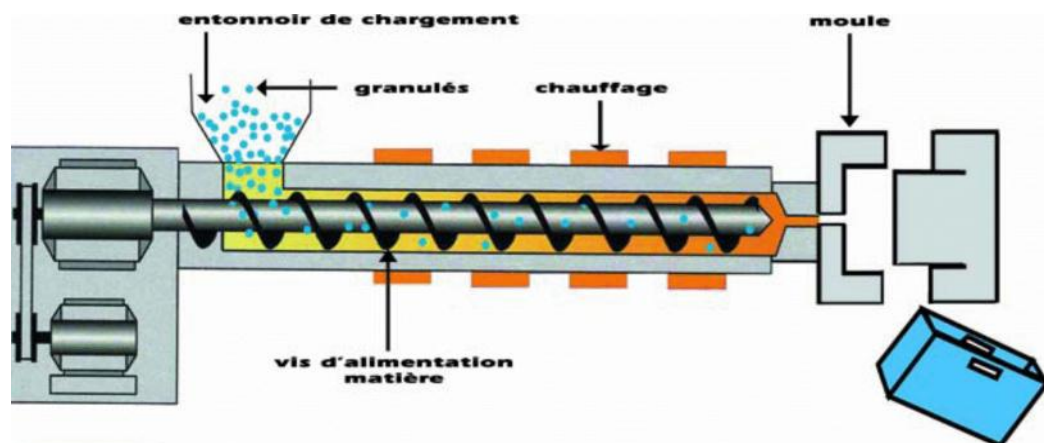


Figure 1.9 Présentation de la presse à injection. [8]

I.9.2. Injection soufflage [09]

Est un procédé utilisé pour fabriquer la plupart des bouteilles et des flacons. On utilise des pièces semi-finies obtenues par injection. Par exemple pour les bouteilles d'eaux minérales, le plastique est préformé mais le goulot est déjà entièrement formé. Le corps de la préforme est chauffé puis une tige étire la préforme jusqu'au fond du moule. Enfin, un très puissant jet d'air plaque la matière contre les parois du moule. La préforme prend alors la forme et le moule est refroidi puis ouvert pour faire sortir la bouteille. Comme pour l'injection, pour changer la forme de la bouteille, il suffit de changer de moule.

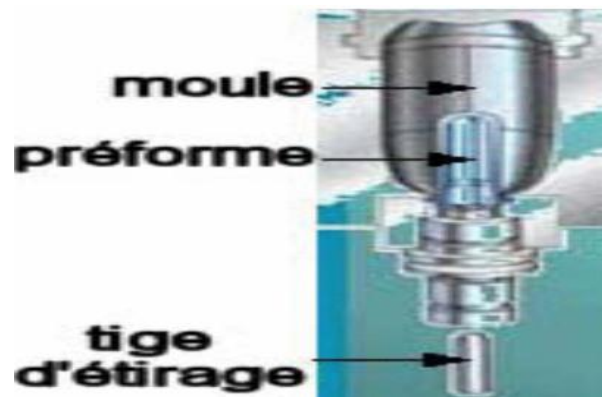


Figure 1.10 principe de soufflage

I.9.3 l'extrusion [9]

L'extrusion est un procédé de transformation en continu. Comme pour l'injection, le granulé entre dans un tube chauffé muni d'une vis sans fin. La matière molle homogénéisée est poussée, comprimée, puis passe à travers une filière pour être mise à la forme souhaitée. C'est une sorte de « machine à chichis » qui permet d'obtenir des produits semi-finis de formes diverses. On fabrique avec cette technique de transformation des produits de grande longueur comme des profilés pour les portes et les fenêtres, des canalisations, des câbles, des fibres optiques, des tubes, des grillages, des plaques et des feuilles plastique... Le tube ou le profilé sort en continu, il est refroidi pour être ensuite coupé à la longueur voulue. En additionnant plusieurs couches de matière on peut réaliser des produits ayant des propriétés combinées.

C'est une sorte de machine chichis qui permet d'obtenir des produits semi finis de forme diverses on fabrique avec cette technique de transformation des produits de grande longueurs comme des profils pour les portes et les fenêtres des canalisations, des câbles des fibres optique des tube des plaque et des feuilles plastique

Le tube ou le profiles sort en continu il est refroidi pour être ensuite coupe a la longueur voulue en additionnant plusieurs couches de matières on peut réaliser des produits ayant des propriétés combinées.



Figure 1.11.Extrudeuse.

I.9.3.1.L'extrusion soufflage [10]

Permet de fabriquer des corps creux. Cela commence par l'extrusion d'un tube plein appelé la paraison. Ce tube de plastique encore chaud sortant de la filière est coupé et un moule froid en deux parties se referme autour de lui. Ensuite, de l'air est injecté dans la matière par une canne de soufflage et le polymère vient se plaquer sur les parois intérieures du moule qui est rapidement refroidit. Le procédé se termine par le démoulage, le décarottage et l'élimination des déchets de moulage de la pièce.

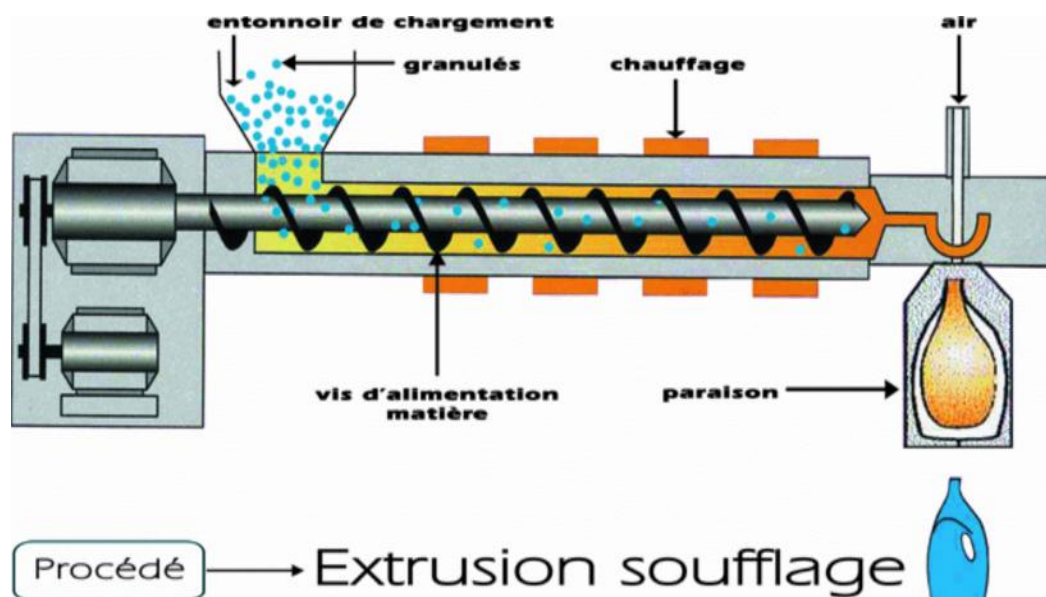


Figure 1.12procédé d'extrusion soufflage.

I.9.3.2. L'extrusion gonflage [10]

C'est une variante de l'extrusion qui permet de fabriquer des films plastiques. Ce procédé consiste en sortie de l'extrudeuse à dilater avec de l'air comprimé une gaine polymère précédemment formée. La sortie de l'extrudeuse est verticale, on insuffle de l'air comprimé dans la matière fondue qui se gonfle et s'élève verticalement en une longue bulle de film. Après refroidissement, des rouleaux aplatissent le film en une gaine plane qui s'enroule sur des bobines. On fabrique ainsi des films utilisés dans la fabrication d'emballages, de sacs-poubelles, de sacs de congélation, des poches médicales pour perfusion et des feuilles souples et fines de revêtements pour serres horticoles.

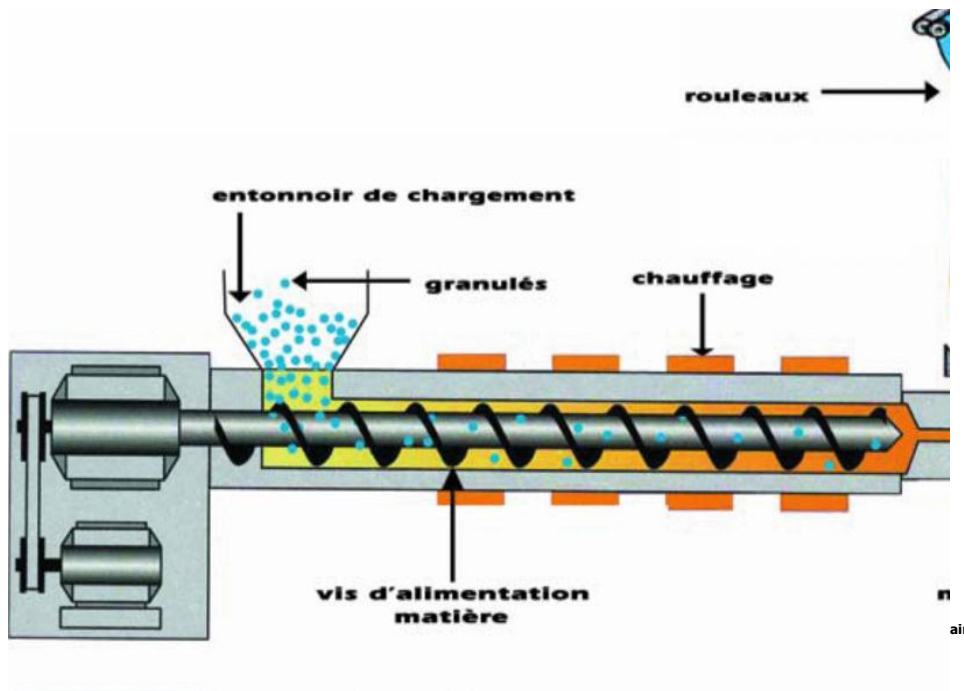


Figure 1.13: procédé d'extrusion gonflage

I.9.4. Thermoformage [10]

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

Les plaques de polystyrène ou d'ABS sont particulièrement adaptées à ce type de transformation.

Cette technique est utilisée pour produire des objets aux formes géométriques simples comme des pots de yaourts, des cabines de douche, des baignoires, des éléments de carrosserie comme des pots de yaourts, des cabines de douche, des baignoires, des éléments de carrosserie.

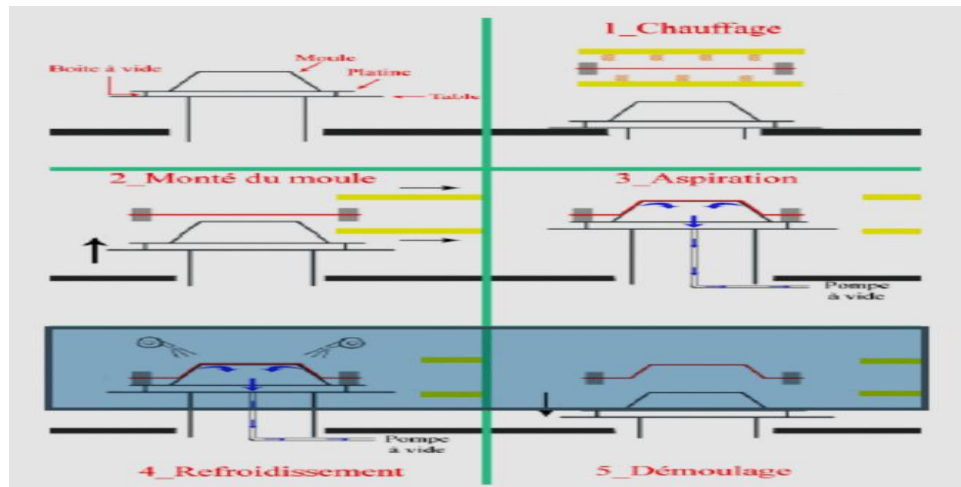


Figure I.14 Cycle de thermoformage

La technique de thermoformage sous vide consiste essentiellement à resserrer la feuille ou la mousse PE-PP-PO thermoplastique sur un cadre et à la soumettre à la chaleur. Une fois la feuille ou mousse ramollie, le moule placé en dessous s'élève vers la feuille/mousse. L'air résiduel entre le plateau porte-moule et la feuille/mousse chaude est alors évacuée par une pompe à vide et de ce fait attire la mousse/feuille vers le moule. La feuille/mousse adopte ainsi l'empreinte de ce dernier. Une fois la pièce refroidie, le plateau porte-moule se retire et la pièce est moulée.



Figure I.15 Cycle de thermoformage

1.9.5 Calandrage [11]

Le calandrage est un procédé de laminage utilisé pour la production de feuilles et de films plastiques. La résine thermoplastique chauffée et fondue est placée entre des rouleaux chauffants qui opèrent comme les anciennes essoreuses.

Les rouleaux sont de plusieurs tailles et tournent donc à des vitesses légèrement différentes pour transformer le plastique en feuilles ou en fine pellicule.

Le film est ensuite refroidi puis enroulé sur de grosses bobines. Ce procédé est souvent utilisé pour transformer le PVC en produits plats de grande largeur comme des nappes, des revêtements d'ameublement ou de maroquinerie.

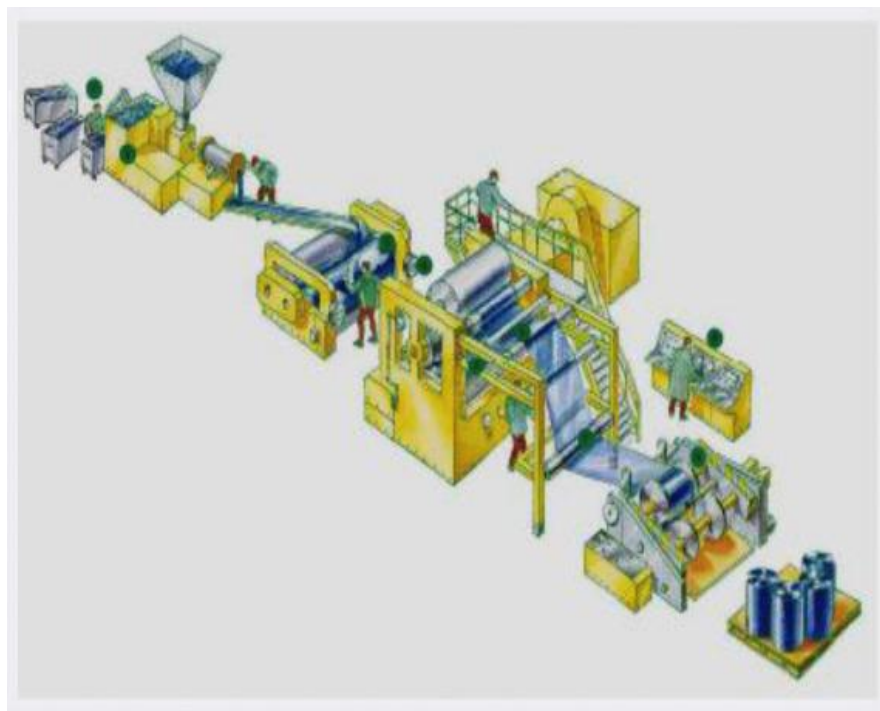


Figure 1.16 : Schéma d'une ligne complète de calandrage

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.

Chapitre II

Propriétés du polypropylène

Chapitre II Propriétés du polypropylène

Introduction

Parmi les thermoplastique de grande diffusion-polyéthylènes (PE), polystyrènes (PS), polychlorure de vinyle (PVC), c'est le polypropylène (PP) qui a connu le développement le plus important au cours des dernières années, pour les raison suivantes :

- l'amélioration considérable des performances des procédés industriels ; les propriétés intéressantes des polypropylènes, à savoir leur température de fusion (130 à 170°C et leur module d'Young (700à1600 Mpa) élevé.

- la possibilité de produire des polypropylènes résistant au choc à basses température et à l'ambiante, ainsi que des produits chargés ou renforcés de fibres de verre.

Pour ces propriétés, les polypropylènes sont utilisés dans l'emballage et dans des industries diverses : automobile, électroménager, sanitaire, textile, ameublements, etc...

Dans ce chapitre nous nous intéressant au polypropylène homopolymère(PPH), sa composition, ses caractéristiques, et ses propriétés

II.1.Définition [12]

Les polypropylènes sont des matériaux polymères thermoplastiques semi-cristallins obtenu par polymérisation du propylène.

Les polypropylènes sont obtenus par polymérisation du propylène (conduisant aux homopolymères) ou par copolymérisation du propylène avec de l'éthylène (conduisant aux copolymères), à l'aide de catalyseurs stéréospécifiques de type ziegler-natta , à une pression modérée de 1 à 5 Mpa et une température de 50 à 110 C.

Le polypropylène est formé de chaînes linéaires constituées des motifs propylène (CH₂=CH-CH₃) (le monomère) répétés par la polymérisation dont la formule générale (polymère) est représentée sur la figure II-1.

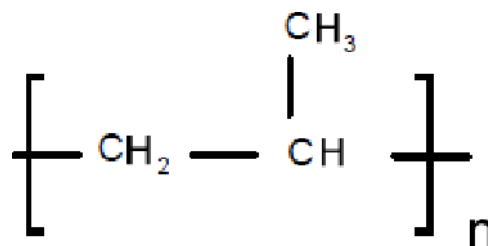


Figure II.1 Unité de répétition du polypropylène [12]

II. 2. Différents types de polypropylènes

Les catalyseurs et les procédés actuels permettent la fabrication de trois types de polypropylènes :

- Les homopolymères
- Les copolymères,
- Les compounds

II.2.1. Homopolymère

Est obtenu par polymérisation Ziegler Natta d'un seul monomère, en l'occurrence *le propylène*. Son isotacticité est maximale (92 à 99%), Il est caractérisé par un module de Young et une température de fusion élevés, mais une résistance au choc faible, Ce dernier est gazeux à température ambiante, très soluble dans l'acide acétique et insoluble dans l'eau.

II.2.2. 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 produits commerciaux contiennent 1,5 à 7% en masse d'éthylène polymérisé ; ils sont plus transparents, plus facilement thermoscellables, ils sont plus souples, ont de bonnes propriétés optiques en film et plus résistants aux chocs que les homopolymères. Par contre leur module de Young, leur température de fusion et leur densité sont plus faibles.

II.2.3. 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 à 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 a température ambiante et jusqu'a des températures allant jusque -40°C . Par contre, leur rigidité et leur tenue thermique sont plus faibles que celles des PP non modifie.

Il existe sous trois formes suivantes qui dépendent du mode d'organisation des groupes méthyle par rapport au plan de la chaîne :

Propylène isotactique PPI

Les groupes de méthyle sont disposés du même chaine macromoléculaire.

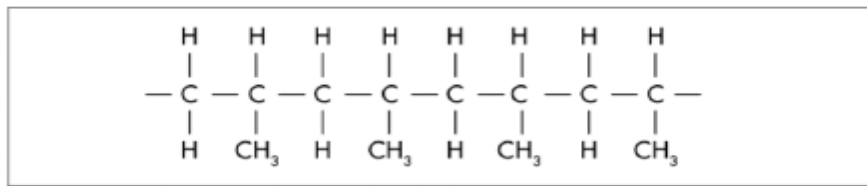


Figure II.2 Représentation d'une chaîne d'un polypropylène isotactique [13]

- **Propylène syndiotactique PPs**

Les groupes de méthyle sont disposés alternativement de part et d'autre de la chaîne macromoléculaire.

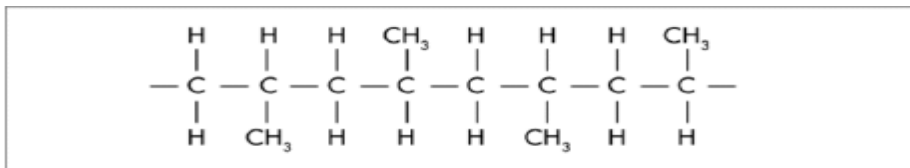


Figure II.3 Représentation d'une chaîne d'un polypropylène Syndiotactique [13]

- **Propylène atactique PPa**

Dans ce cas, la répartition des groupes de méthyle est aléatoire ;

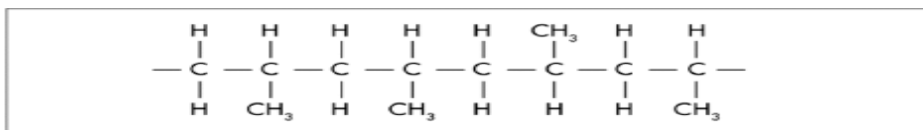


Figure II.4 Représentation d'une chaîne d'un polypropylène atactique [13]

Le propylène n'est intéressant industriellement que sous sa forme isotactique dont le taux d'isotacticité se situe entre 90 et 98%. Le propylène atactique a des applications industrielles limitées.

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.3 Cristallisation du Polypropylène

Les polypropylènes isotactique et syndiotactique sont des polymères semi-cristallin cela est montré sur la figure II.5.

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.

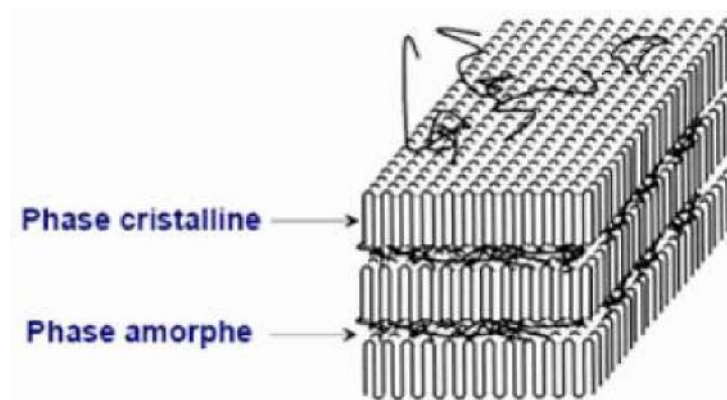


Figure II.5 Structure d'un polymère semi-cristallin [14]

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.

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.6 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 [16].

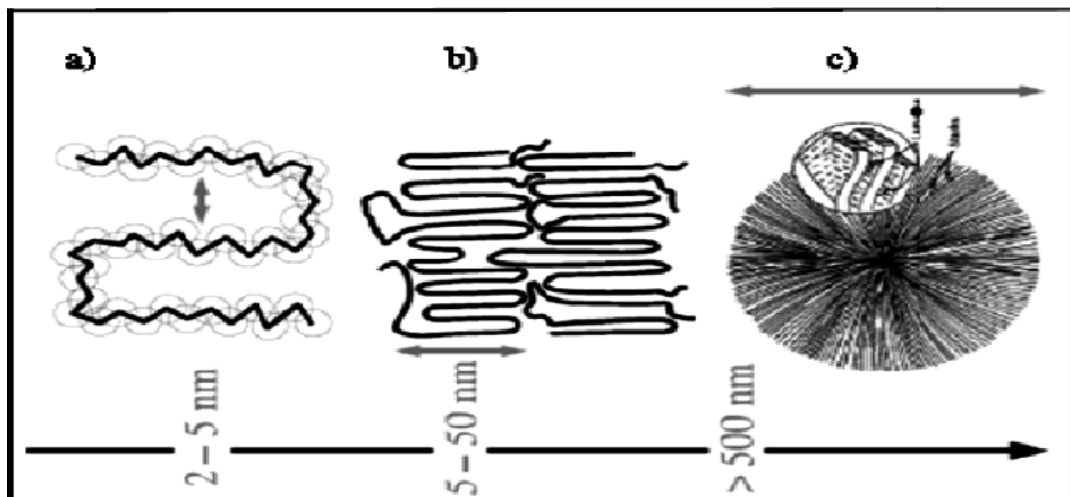


Figure II.6 Illustration des différentes structures composant un cristal de polymère, a) modèle de faisceaux, b) modèle de lamelles et c) structure sphéroïdique [16]

II.4 Structure Cristalline du Polypropylène

II.4.1 Structure cristalline de PPH

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

II.4.1.1 Structure cristalline du polypropylène isostatique PPI

Le polypropylène isostatique 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.

II.4.1.1.1 Forme α

La forme α 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 surtout la gamme de température et ce pour tout type de PPI. La forme α est caractérisée par des chaînes arrangées selon une maille de type monoclinique [13], Les différentes conformations de chaînes possibles de Polypropylène Isostatique PPI sont représentées forme α la figure II.5.

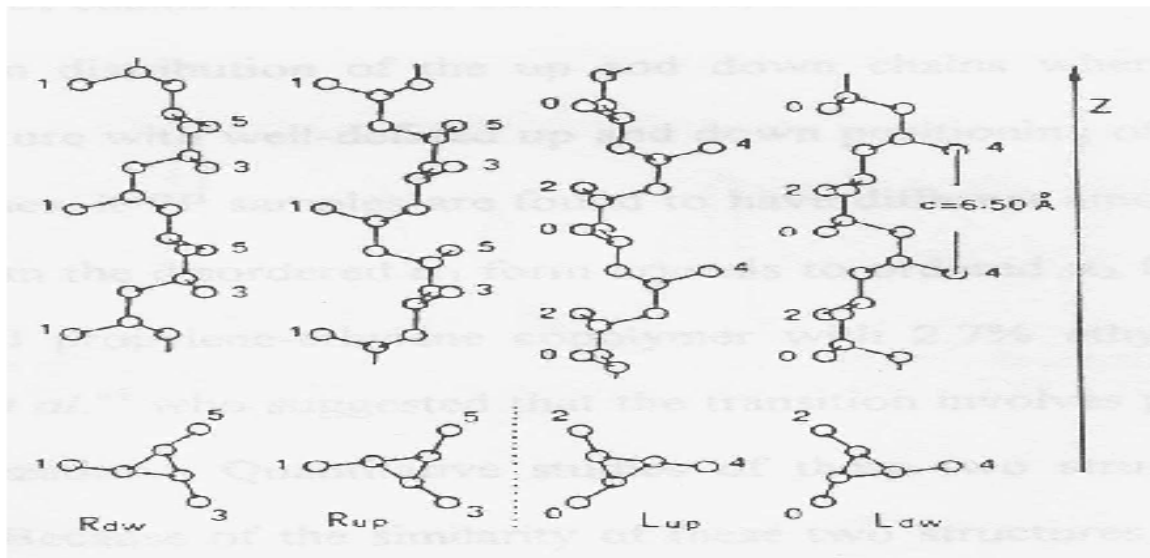


Figure II.7 : conformations des chaînes du polypropylène isostatique Droite (R) - et Gauche (L) - les hélices dans leur configuration Haut (up) et Bas (down) [14]

$$a = 6.65\text{Å}, b = 20.96\text{Å}, c = 6.5\text{Å} \text{ et } \beta = 99^\circ$$

II.4.1.1. 2 Forme β

La forme β est une forme cristalline relativement courante au sein d'échantillons de PPI. La forme β est caractérisée par un arrangement des chaînes selon une maille hexagonale [14]. La forme β est obtenue en parallèle à la production de cristaux α sous certaines conditions particulières de cristallisation (hautes vitesses de refroidissement et dans une gamme de température particulière). Des cristaux de forme β 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 β sous des conditions de cristallisation classiques suite à l'incorporation dans le polymère d'agents nucléons β , par exemple dans le but d'optimiser certaines propriétés mécaniques et l'allongement à la rupture.

II.4.1.1.3 Forme δ

La forme δ est une forme cristalline rencontrée beaucoup plus rarement que les Formes α et β . Elle est obtenue pour des polypropylènes de faibles poids moléculaires ou lors de cristallisation effectuées sous haute pression. Il est d'ailleurs assez difficile d'obtenir la forme δ pure. Au sein de cette forme cristalline, les chaînes sont arrangées dans une maille de type triclinique [15].

II.4.1.1.4 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 isostatique fondu. Il est intéressant de noter que cette forme cristalline particulière est stable à la température ambiante mais qu'elle se transforme en forme α à partir de 60°C [16].

II.4.1.2 Structure cristalline du polypropylène syndiotactique

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

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

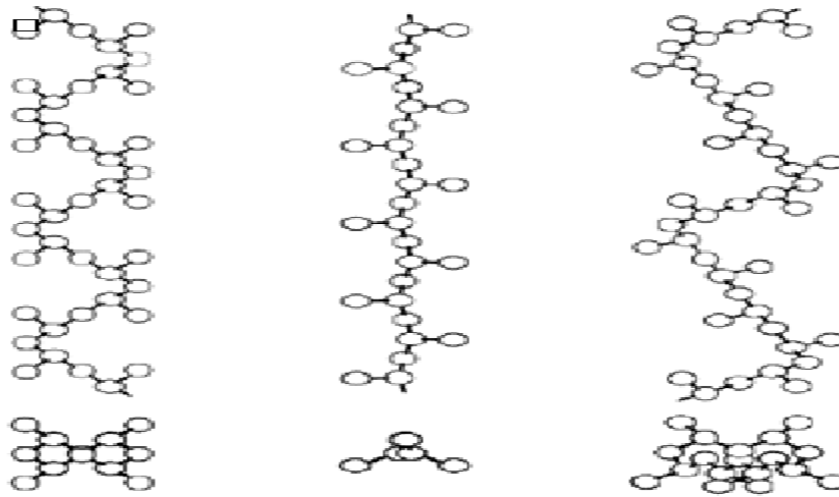


Figure II.8 les différentes conformations des chaînes du PPs

II.4.1.3 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.4.2 Structure cristalline du polypropylène copolymère PPC

Le propylène peut former des copolymères avec les oléfines différentes: l'éthylène, 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 co-monomère [18].

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 co-monomère d'éthylène dans la chaîne de

Polypropylène peut avoir une influence sur la régularité de la structure moléculaire [19].

II.5 Propriétés du polypropylène

II.5.1 Propriétés du polypropylène homopolymère

II.5.1.1 propriété de polypropylène PPI

Le polypropylène isotatique est encore aujourd'hui la forme isomère la plus intéressante en particulier grâce à son taux de cristallinité relativement élevé 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.

II.5.1.1.1 Propriétés thermiques du PPI

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

II.5.1.1.2 Propriétés mécaniques du PPI

De part son taux de cristallinité élevé, 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.

II.5.1.1.3 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.5.1.2 Propriétés du polypropylène syndiotactique

II.5.1.2.1 Propriétés thermiques du PPs

Comme indiqué 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

II.5.1.2.2 Propriétés mécaniques du PPs

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

II.5.1.2.3 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 (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].

II.5.2 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 co-monomère [25].

II.5.3 Caractéristiques en traction

La cristallinité élevée du polypropylène lui confère de bonnes propriétés en traction, le comportement du polypropylène en traction est fortement influencé par la vitesse d'étirage, de la façon suivante :

-si elle est faible, après déformation élastique, l'étirement a lieu jusqu'à la rupture après un allongement de 800 à 1200%. pendant cette deuxième étape, la résistance augmente du fait de l'orientation parallèle des chaînes.

-si elle est élevée, la déformation a lieu dans une zone de striction dans la zone de déformation élastique.

Tableau III.1. Propriétés mécaniques en traction comparées des différents polypropylènes

	Homopolymère	Copolymères	
		séquenté	statistique
Contrainte en traction au seuil d'écoulement (MPa)	33	25	27
Résistance à la rupture en traction (MPa)	41	30	38
Allongement à la rupture en traction (%)	800	900	900

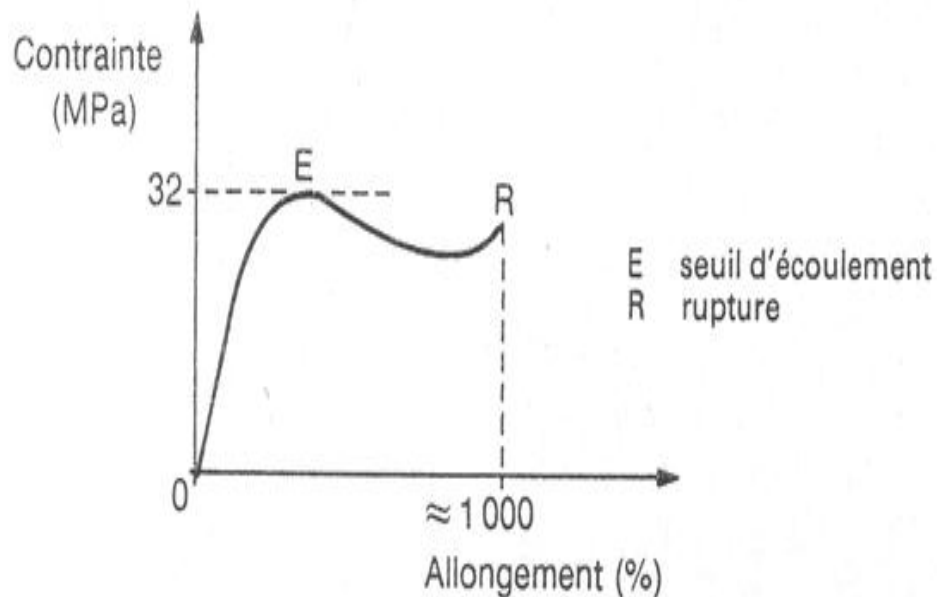


Figure II.9 courbe de traction du polypropylène

La figure II.10 montre que la résistance à la rupture des PP diminue fortement avec l'augmentation de la température.

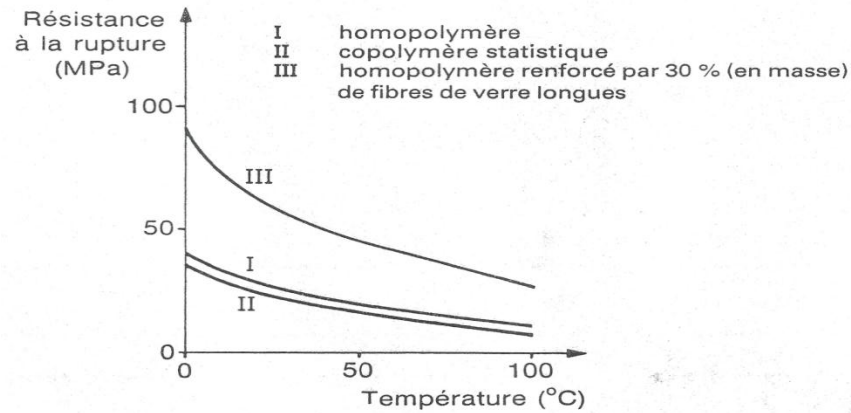


Figure II.10 Résistance à la rupture en traction des différents polypropylènes en fonction de la température

II.5.4 Résistance au choc

La résistance au choc du PP dépend de la cristallinité, de la masse moléculaire, la figure II.8 présente la résistance au choc de différents PP en fonction de la température

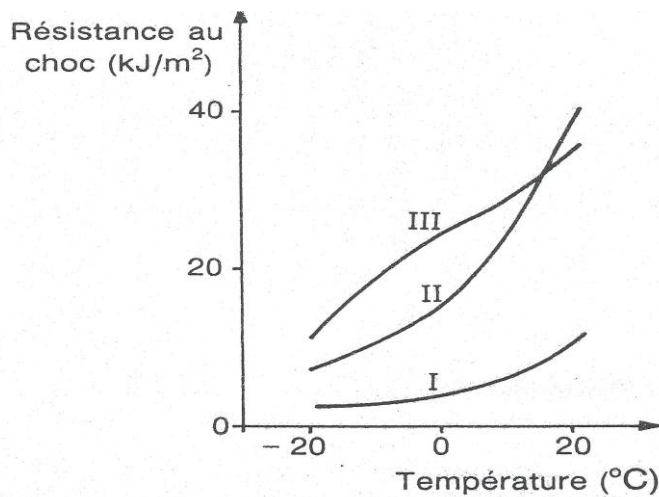


Figure II.11 Résistance au choc de différents PP en fonction de la température

I PP homopolymère

II Copolymère séquencée

III homopolymère modifié

II.5.5 Tableau récapitulatif des Propriétés du polypropylène

Le tableau II.2 résume les caractéristiques des différents polypropylènes

tableau II.2 Résumé des caractéristiques des différents polypropylènes

Propriété	Unité	Norme (1)	Homopolymères non chargés	Copolymères séquencés	Copolymères statistiques
Propriétés physiques					
Masse volumique	g/cm ³	NF T 51-063	0,900 à 0,910	0,890 à 0,905	0,890 à 0,900
Indice de fluidité à chaud à 230 °C sous 2,16 kg	g/10 min	NF T 51-620	0,3 à 40	0,25 à 35	4 à 14
Absorption d'eau	%	NF T 51-166	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Perméabilité aux gaz	m ² . Pa ⁻¹ . s ⁻¹				
- hydrogène				0,49 × 10 ⁻¹⁶	
- oxygène				0,75 × 10 ⁻¹⁶	
- azote				0,37 × 10 ⁻¹⁷	
- vapeur d'eau				0,37 × 10 ⁻¹⁷	
Propriétés thermiques					
Température de fusion	°C	NF T 51-621	160 à 170	160 à 168	130 à 164
Température de ramollissement Vicat, sous 1 kg	°C	NF T 51-021	150 à 155	140 à 147	120 à 145
Température maximale d'utilisation (2) ..	°C		100	100	100
Conductivité thermique	W . m ⁻¹ . K ⁻¹	NF X 10-021	0,22	0,22	0,22
Capacité thermique massique	J . kg ⁻¹ . K ⁻¹		1 700	1 700	1 700
Coefficient de dilatation linéique	K ⁻¹	ASTM D 696-70	1,1 × 10 ⁻⁴	1,1 × 10 ⁻⁴	1,1 × 10 ⁻⁴
Propriétés mécaniques					
Contrainte au seuil d'écoulement en traction	MPa	NF T 51-034	32 à 38	17 à 33	27 à 30
Résistance à la rupture	MPa	NF T 51-034	31 à 42	28 à 38	28 à 38
Allongement à la rupture	%	NF T 51-034	100 à 600	800 à 900	450 à 900
Résistance en flexion	MPa	NF T 51-001	42 à 56	35 à 49	40 à 45
Module d'Young en traction	MPa	NF T 51-034	1 100 à 1 600	700 à 1 300	1 000 à 1 400
Résistance au choc (Charpy) à 23 °C (3) ..	kJ/m ²	NF T 51-035	4 à 10	10 à 40	10 à 20
Dureté Shore D		NF T 51-109	72 à 74	67 à 73	68 à 73
Propriétés électriques					
Permittivité relative à 10 ⁶ Hz		NF C 26-230	2,2 à 2,3	2,1 à 2,2	2,2 à 2,3
Facteur de dissipation diélectrique (tan δ) à 10 ⁶ Hz		NF C 26-230	3 × 10 ⁻⁴	3 × 10 ⁻⁴	3 × 10 ⁻⁴
Rigidité diélectrique	MV/m	NF C 26-225	40	40	40
Résistivité transversale	Ω . cm	NF C 26-215	> 10 ¹⁶	> 10 ¹⁶	> 10 ¹⁶

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu sur le polypropylène, sa diversité dû soit à la position du groupement méthyle sur la macro chaîne du polymère, ou à l'existence d'un autre monomère dans la chaîne principale, ceci qui confère des caractéristiques différentes pour chaque polypropylène ainsi élaboré. Dans le chapitre suivant nous allons utiliser l'homopolymère polypropylène PPH ainsi étudié l'effet de la température sur ses caractéristiques mécaniques qu'on analysera dans la suite du travail.

Chapitre III

Comportement mécaniques des polymères

Chapitre III Comportement mécaniques des polymères

Introduction

Le comportement mécanique des matériaux polymères dépend de la vitesse de sollicitation et de la position de la température expérimentale par rapport aux températures caractéristiques qui sont les températures de fusion, de transition vitreuse et de transition secondaire.

Dans ce chapitre nous allons essayer de résumer les différents comportements des polymères

III.1 Comportement contrainte-déformation

Un grand nombre des paramètres utilisées pour caractériser les métaux, telle que le module d'élasticité, la résistance à la traction, la résistance aux chocs et la limite de fatigue, servent également à décrire les propriétés mécaniques des polymères.

Un simple essai de traction permet de faire ressortir certains des paramètres mécaniques de nombreux polymères.

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

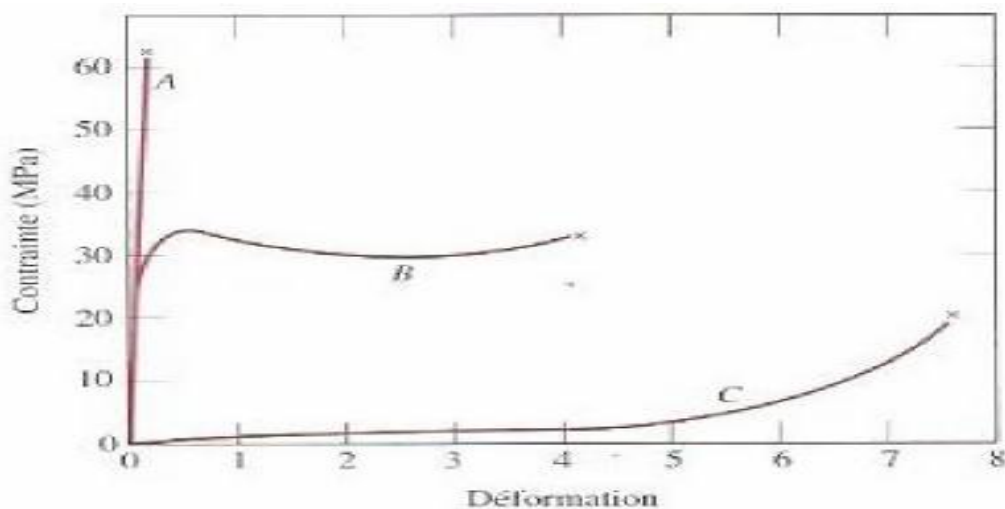


Figure III.1 Comportement contrainte-déformation des matériaux polymères [1]

La figure III.1 présente trois types de comportement contrainte – déformation des matériaux polymères.

- La courbe A illustre le caractère en contrainte – déformation d'un polymère fragile dont la rupture s'accompagne d'une déformation élastique.

- La courbe B montre que le comportement des matériaux plastiques est semblable a celui de nombreux matériaux métalliques: la déformation élastique initiale est suivie d'une déformation plastique.

- La courbe C correspond a une déformation entièrement élastique, analogue a celle des caoutchoucs (déformation réversible prononcées résultant d'une contrainte faible), que manifeste une classe de polymères appelés thermodurcissable.

La limite d'élasticité R_e des polymères plastiques (courbe B) équivaut à la valeur maximale de la courbe, qui se situe à la toute fin de la région d'élasticité linéaire figure III.2. De plus, la résistance à la traction R_m correspond à la contrainte entraînant une rupture figure III.2.

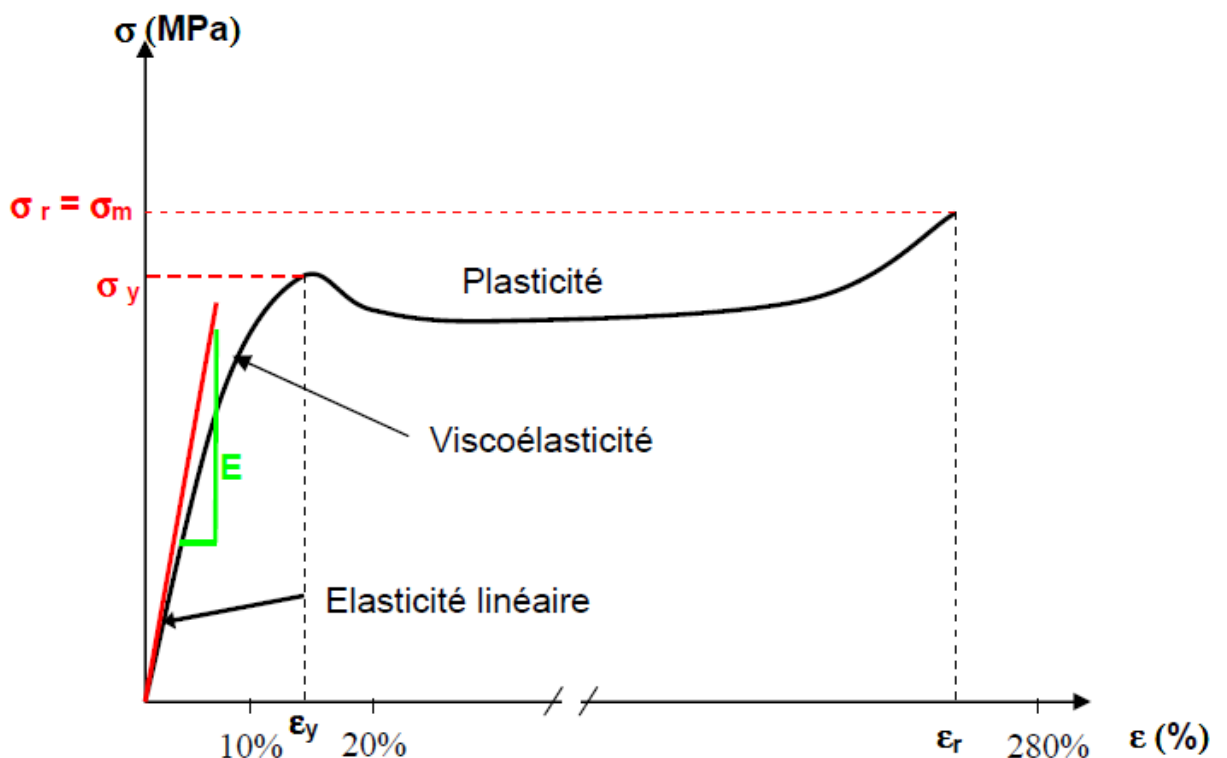


Figure III.2 Courbe contrainte-déformation d'un polymère plastique a partir de laquelle sont déterminées le module d'élasticité, la limite d'élasticité et la résistance a la traction. [1]

Il faut également souligner que les caractéristiques mécaniques des polymères se modifient sensiblement en fonction des variations de température. La figure III.3 illustre le comportement contrainte-déformation du poly méthacrylate de méthyle (plexiglas) à différentes températures comprise entre 4°C et 60°C.

Cette figure révèle qu'une augmentation de la température entraîne:

- une diminution du module d'élasticité
- une baisse de la résistance à la traction
- une hausse de la ductilité, et que si le matériau est entièrement fragile à 4°C, une importante déformation plastique se produit toutefois à 50°C et à 60°C.

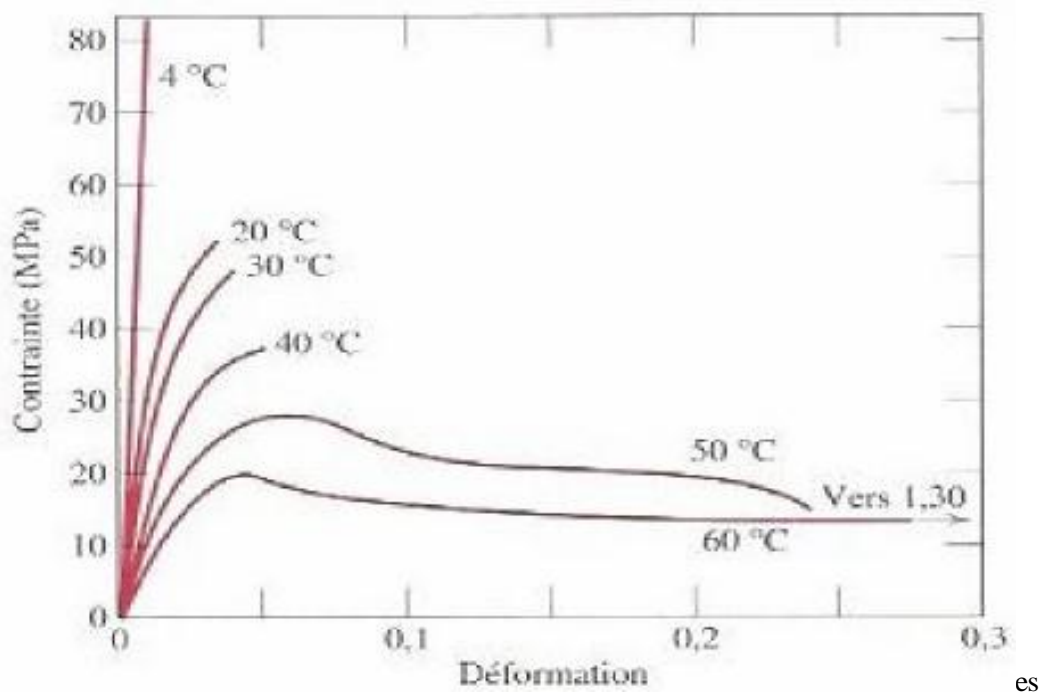


Figure III.3 Incidence de la température sur les caractéristiques de contrainte-déformation du polyméthacrylate de méthyle. [1]

La vitesse de déformation peut également exercer une influence importante sur le comportement mécanique. En générale, toute réduction de la vitesse de déformation à la même Influence qu'une augmentation de température. [1]

III.2 Structure et transformations structurales des polymères

À l'état solide, la structure de la plupart des polymères est amorphe. Certains facteurs favorables rendent cependant possible une cristallisation partielle. La cristallisation s'accompagne d'une densification sensible du matériau au passage de la température de fusion θ_f (figure III.4). Dans le cas où le polymère demeure à l'état amorphe, le refroidissement s'accompagne d'une densification progressive assez rapide, grâce au mouvement relatif des chaînes qui facilite le raccourcissement des distances d'équilibre. Ceci est possible jusqu'à la température de transition vitreuse θ_v (parfois notée $T_g = \text{glass transition temperature}$), en dessous de laquelle les liaisons faibles sont assez intenses pour empêcher toute mobilité des chaînes : la densification se fait alors au même rythme que pour le matériau cristallin correspondant. La figure III.4 met en regard les conséquences très sensibles de cette évolution sur le comportement mécanique du polymère, qui passe de l'état de fluide visqueux à l'état solide, en passant éventuellement par un état pâteux dit **caoutchoutique** entre θ_f et θ_v . Comme cette transition peut se faire sur un intervalle réduit de température (de l'ordre de quelques dizaines de degrés Celsius) souvent situé au voisinage de l'ambiante, ces particularités de comportement doivent impérativement être prises en compte pour l'utilisation des polymères. [2]

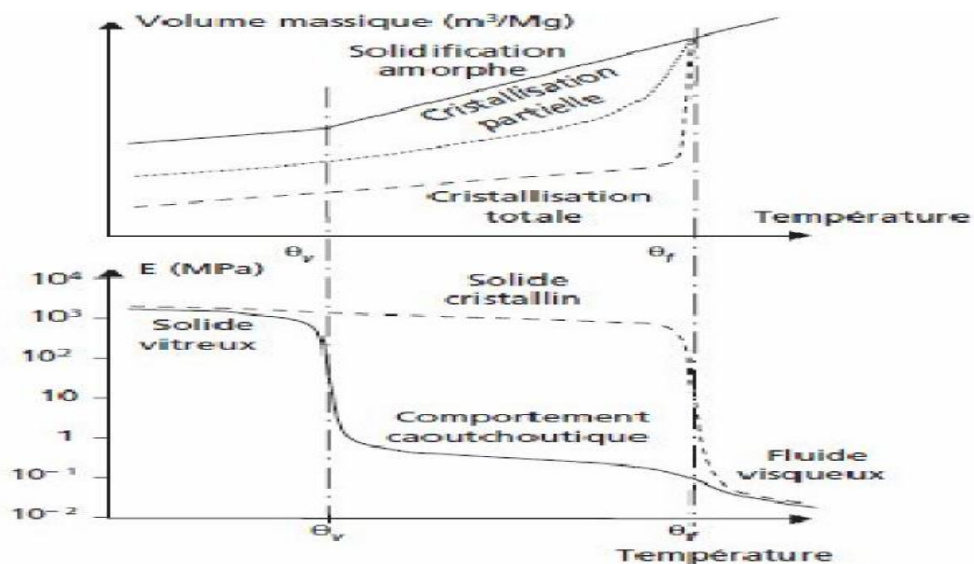


Figure III.4 Évolutions schématiques du volume massique V_m Et du module de Young E d'un polymère en fonction de la température. [2]

III.3 Viscoélasticité

Les polymères solides sont formés d'unités structurales liées entre elles par des liaisons intra- et intermoléculaires. Un tel agrégat montre nécessairement un comportement à la fois élastique (qui est dominant aux basses températures et aux vitesses de sollicitation élevées) et visqueux (qui devient dominant dans les conditions inverses). Toutefois, dans une vaste gamme de températures, les matériaux polymères combinent ces deux aspects. Cette dualité du comportement nommée **viscoélasticité** constitue l'un des avantages fondamentaux des matériaux polymères. En revanche, elle demande aussi une attention particulière étant donné la sensibilité du comportement des polymères à la température et à la vitesse de sollicitation. [6]

III.3.1 Effet de vitesse et équivalence Temps-Température

III.3.1.1 Origine moléculaire. [12]

Déformer le polymère signifie, en effet, à un niveau local, déformer et/ou déplacer ses éléments constitutifs, c'est-à-dire ses chaînes.

Les macromolécules ne sont pas des objets indéformables. Une fois leur configuration fixée par la chimie, elles peuvent adopter différentes conformations: arrangement spatial de tous les groupements d'atomes étant donnés les degrés de liberté laissés par la chimie (énergie de torsion sur les cônes de valence).

On distingue deux niveaux de conformation :

- La conformation locale, qui définit l'arrangement spatial local des groupements autour de la chaîne ou localement sur son squelette ;
- La conformation globale qui résulte de l'arrangement de tous les segments du squelette et qui est caractérisée, en première approche, par l'écart bout à bout quadratique moyen et le rayon de giration de la chaîne.

Une sollicitation externe peut faciliter le basculement de l'un ou l'autre des groupements sur son cône de valence et, donc, modifier la conformation de la chaîne.

Déformer un polymère revient donc à provoquer des changements de conformations locales, qui, en étant plus ou moins coopératifs, induiront des changements de conformation globale et/ou une modification des arrangements inter chaîne.

Ces changements de conformations locales sont pilotés par des termes énergétiques d'interaction entre atomes non liés (**Van der Waals**) et par les potentiels de torsion sur les cônes de valence pour les atomes liés. Seuls ces derniers, autour d'un nombre discret de positions, conduisent à des énergies de l'ordre de kT (k : constante de Boltzmann ; T : température absolue).

Sans rentrer dans les détails, retenons ici que les processus élémentaires de déformation des chaînes mettent en jeu des énergies d'activation et des sauts d'une position stable à une autre. Le mouvement de base qui autorise la déformation macroscopique du polymère est donc, a priori, thermo activé et sensible à la vitesse. La réponse du polymère dépend donc de la chaîne elle-même (configuration) par les conformères (isomères conformationnels) qu'elle autorise, de l'organisation des chaînes par les changements de conformation qu'elle privilégie et/ou annihile.

Les phénomènes viscoélastiques trouveraient donc leur origine dans la possibilité de mouvements intra ou intermoléculaires des chaînes par rapport à une position d'équilibre statistique. Cette explication permet de rendre compte des observations expérimentales en relaxation par exemple. À température donnée, pour des temps de sollicitation courts, aucun mouvement n'est possible au sein du matériau, le module est élevé.

Lorsque le temps de sollicitation est plus long, des mouvements locaux de la chaîne deviennent possibles (zone de transition) ; le temps de relaxation reflète le temps nécessaire à ces mouvements ou, en d'autres termes, le temps pour qu'un segment de longueur donnée renouvelle entièrement sa configuration.

- Dans la zone d'écoulement, aux temps très longs, les mouvements mis en cause sont des déplacements de la chaîne entière dans son environnement avec un temps de relaxation évidemment plus grand.
- Dans la zone de plateau caoutchoutique, les mouvements locaux de la chaîne restent possibles mais, par contre, si les chaînes sont assez longues, les mouvements de plus grande amplitude sont alors limités par la présence d'interactions inter chaînes localisées en des points nommés enchevêtrements.[12]

III.3.1.2 Superposition temps température

III.3.1.2 1 Effet de la température

Le comportement des polymères dépend fortement de la température. Ils sont le siège de transitions de comportement qui peuvent être associées aux différentes relaxations moléculaires.

Du point de vue macroscopique cela se traduit par des évolutions de comportement plus brutales pour certaines gammes de température.

La plus importante de ces relaxations est la relaxation, associée à la transition vitreuse, qui se traduit par une grande évolution du comportement. Elle correspond au moment où la chaîne polymère amorphe acquiert assez de mobilité pour être le siège de changements de conformation globale, du fait de la coopérativité de mouvements locaux.

Elle se traduit, en particulier, par une diminution brutale des modules d'élasticité (Figure 4) qui peuvent être divisés par 100 ou 1000 sur un intervalle de 5 à 10 °C.

En fait, l'ensemble du comportement évolue fortement dans cet intervalle.

Cette transition délimite le passage de l'état vitreux, à basse température, à l'état caoutchoutique, à température intermédiaire, en passant par l'état que l'on appelle quelquefois viscoélastique.

Le plateau caoutchoutique prend fin lors de l'écoulement du polymère, c'est-à-dire lorsqu'il entre dans son état fluide.

En fait, un polymère à faible déformation est toujours viscoélastique à des degrés divers et passe progressivement d'un solide viscoélastique vitreux à un fluide viscoélastique.

La transition n'affecte que le polymère amorphe et est, de ce fait, moins importante pour les polymères semi-cristallins, quoique sensible.

La température de cette transition dépend du polymère et dans une moindre mesure de sa formulation.

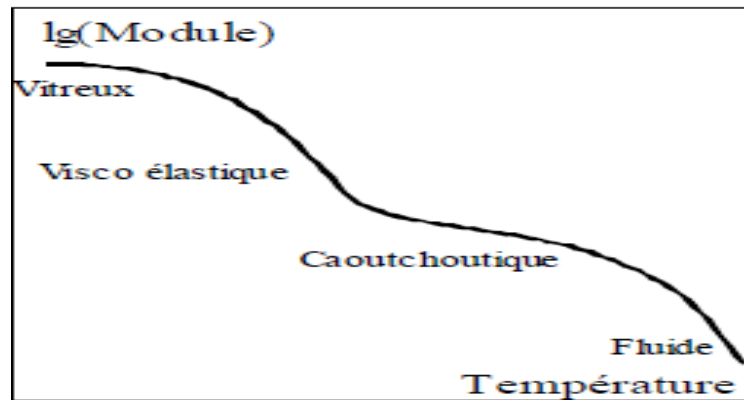


Figure III 5 : Evolution schématique du module d'élasticité d'un polymère amorphe avec la température ; Transition à et passage à l'état fluide

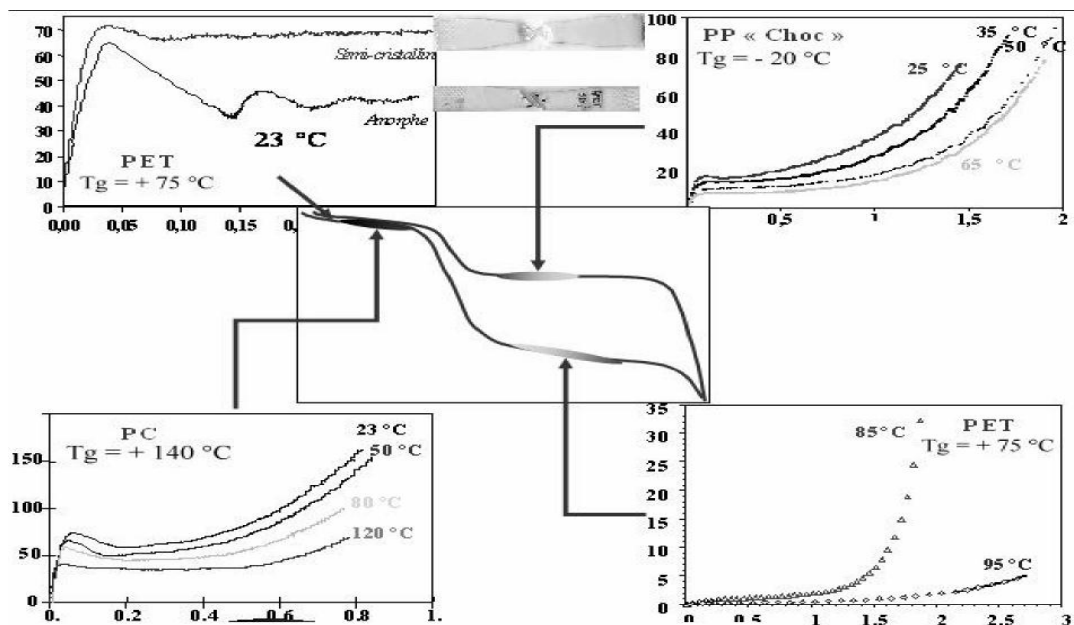


Figure III 6 : Exemple de comportements en traction de polymères à $0,001 \text{ s}^{-1}$ en fonction de la température (donnée par rapport à leur T_g respective)

III.3.1.2.2 Equivalence temps température

L'importance du temps ou des paramètres qui y sont reliés (vitesse de sollicitation, fréquence) sur les propriétés viscoélastiques est mise en évidence par la notion de temps de relaxation. L'explication physique de cette notion conduit à considérer l'existence de mouvements moléculaires se produisant dans des temps finis et qui sont à l'origine de la viscoélasticité. Toutefois, on peut facilement concevoir qu'à plus haute température ces

mouvements soient favorisés par l'agitation thermique et que les échelles de temps auxquelles ils se produisent soient modifiées. Cela induit à prendre en compte les effets thermiques sur le comportement viscoélastique du matériau. L'expérience de relaxation permet d'obtenir la courbe de variation du module de relaxation en fonction de la température (**figure III.7**).

Cette variation présente la même allure que celle obtenue dans une expérience à température fixe en faisant varier le temps. Ainsi, cette similitude de comportement amène à postuler une équivalence du temps et de la température.

En fait l'interprétation de processus de relaxation en termes de possibilités de mouvements moléculaires conduit naturellement à envisager cette équivalence. En effet, on conçoit aisément que ces mouvements seront facilités par un apport d'énergie supplémentaire sous forme thermique.

Dans ces conditions, un phénomène se produisant en un temps donné à une température donnée se produira nécessairement en un temps plus court à une température plus élevée : les temps de relaxation (ou de retardation) diminuent lorsque la température augmente. Ainsi, la donnée d'une caractéristique viscoélastique d'un polymère nécessite l'indication des paramètres temps et température, par exemple $G(t, T)$, $J'(\omega, T)$...

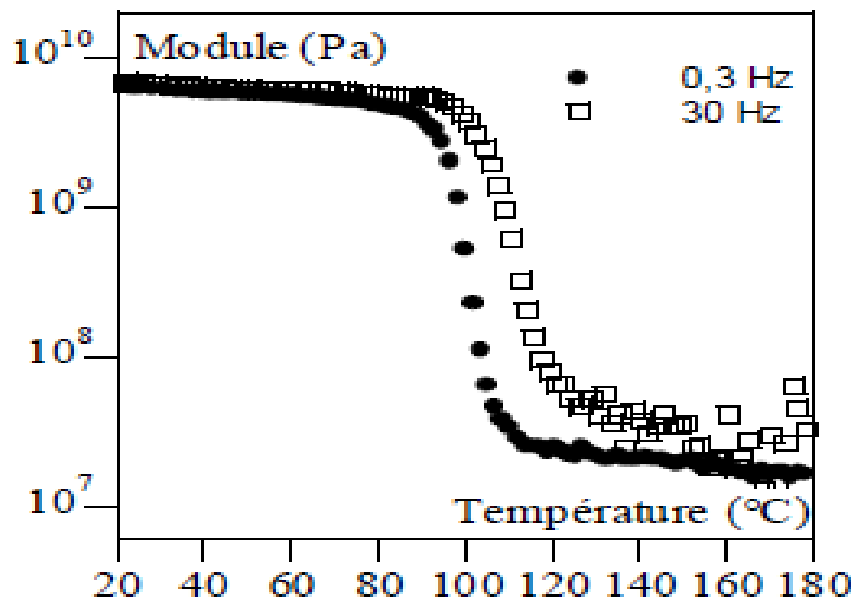


Figure III 7 Module d'élasticité d'un HIPS (PS choc) en fonction de la fréquence et de la température

III.3.2 Comportement et transition vitreuse

- **Etat vitreux**

A l'état vitreux (basses températures ou hautes vitesses) les mouvements moléculaires accessibles au polymère ne peuvent pas amorcer de mouvements coopératifs le long du squelette de la chaîne. Les déformations accessibles sont donc faibles et les modules élevés. La déformation élastique est contrôlée par le terme enthalpique de son énergie interne, comme pour les métaux. Pour vitreux qu'il soit, le polymère n'est pas figé. Il existe toujours des fluctuations temporelles et spatiales de conformation, contrôlées par la température : d'autant plus rapides et nombreuses que la température augmente. Il devient donc plus « facile » de déformer le matériau lorsque sa température augmente. Le module reste donc thermodépendant et décroissant. De même, le matériau reste viscoélastique.

A forte contrainte les processus de déformation plastique peuvent être activés à température et vitesse moyennes et sont inopérants à faibles températures ou hautes vitesses. Ceci se traduit par l'existence d'une température (et/ou d'une vitesse) de transition ductile / fragile, inférieure à la température de transition vitreuse. Disons que le comportement apparent du polymère lorsqu'il est vitreux est viscoélastique, visco plastique, avec une ductilité macroscopique plus ou moins développée en fonction de la température et de la vitesse.

- **Zone de transition**

La zone de transition D, associée à la relaxation vitreuse, ou zone viscoélastique marque le moment où des changements de conformation globale, c'est-à-dire des mouvements coopératifs le long du squelette de la chaîne, deviennent possibles. Le module décroît donc rapidement et le comportement est très évolutif.

- **Zone caoutchoutique**

Sur la zone caoutchoutique la température est suffisante pour que la chaîne balaie spontanément toutes ses conformations possibles en un temps très court devant le temps représentatif de la sollicitation. Par contre, la température est trop faible pour autoriser le dés enchevêtrement des chaînes à grande échelle.

Macroscopiquement, les chaînes apparaissent donc souples, mais l'écoulement est interdit.

Le matériau devient progressivement hyper élastique, en fait visco-hyperélastique, s'il n'est pas réticulé. Les processus plastiques cèdent le pas à l'élasticité entropique aux grandes déformations.

L'existence de cristal pallie en partie la perte de module et de cohésion du polymère amorphe. Ainsi, le plateau caoutchoutique d'un semi-cristallin est non seulement plus haut mais aussi plus long que celui d'un amorphe. Ces deux points expliquent qu'un semi-cristallin, tel le PP ou le PE, peut être utilisé au-dessus de sa transition T_g , tandis qu'un amorphe, tel le PS, sera limité à son plateau vitreux. Pour utiliser un amorphe au-delà de sa transition vitreuse il faut le réticuler, ce sont les élastomères.

En parallèle, le cristal est toujours le siège d'une élasticité enthalpique et de processus de plasticité. Un polymère semi-cristallin reste donc viscoplastique, avec durcissement structural et/ou endommagement, sur son plateau caoutchoutique (Figure 3).

Il est aussi important de noter sur la Figure 3 que PC et PP ont des comportements macroscopiques très similaires, alors qu'ils sont le sièges de processus très différents : amorphe vitreux pour l'un, semi-cristallin caoutchoutique pour l'autre.

- **Zone fluide**

La zone fluide apparaît quand les désenchevêtrements deviennent probables. Les chaînes apparaissent statistiquement indépendantes les unes des autres. La sollicitation pourra donc très facilement les déplacer les unes par rapport aux autres. Le comportement devient majoritairement visqueux, mais reste viscoélastique.

III.3.2 Effet de l'architecture des chaînes

Bien sûr la nature et le nombre de Co-monomères sont les premiers points à prendre en compte; En effet, c'est le choix des monomères qui conditionne la souplesse des enchaînements covalents du squelette des chaînes et en partie leur cohésion, par les interactions physico chimiques inter chaînes que les substituant autorisent.

Mais il faut aussi prendre en compte la nature des chaînes ; leur tacticité, leur linéarité, le taux et les longueurs de branchements, la nature des enchaînements des monomères (statistique, bloc, alterné) dans le cas des copolymères, la réticulation. Enfin la longueur des chaînes conditionne leur capacité à développer des

interactions « physiques », par exemple les enchevêtrements, qui interviennent dans la tenue mécanique du matériau final. [2]

III.4. Mécanismes de déformation des polymères semi-cristallins en traction

À l'état non déformé, les polymères semi-cristallins possèdent des propriétés élastiques isotropes. Le comportement macroscopique en traction uniaxiale de plusieurs polymères semi-cristallins. La courbe mécanique contrainte-déformation présente trois domaines de déformation avant la rupture du matériau :

- domaine élastique et anélastique : phase initiale de déformation homogène qui s'étend jusqu'au seuil de plasticité;
- plateau d'écoulement plastique : phase apparaissant après le seuil de plasticité, au cours de laquelle la déformation est hétérogène. Une striction peut apparaître et se propager le long de l'éprouvette lors de cette phase de déformation;
- durcissement : phase dont la déformation est de nouveau homogène, débutant après que la striction se soit propagée sur l'ensemble de la zone utile de l'éprouvette. Cette phase précède souvent la rupture correspondant à la ruine du matériau.

III.4.1. Comportement élastique et anélastique

Au cours du stade de déformation élastique, la courbe mécanique présente un comportement linéaire ainsi la contrainte σ et la déformation e sont reliées par le module d'Young (ou d'élasticité), noté E , du matériau conformément à la loi de Hooke

Au-dessus de la température de transition vitreuse, la phase amorphe présente un comportement caoutchoutique et possède un module de Young très faible par rapport à celui de la phase cristalline.

Par conséquent, lorsqu'un faible taux de déformation est imposé au matériau, la phase amorphe est la première à se mouvoir et participe essentiellement à la déformation élastique.

Deux modes de déformation de la phase amorphe peuvent être cités : la séparation et le glissement interlamellaire.

- le glissement interlamellaire résulte du cisaillement des lamelles cristallines, parallèles entre-elles, sous l'effet d'une contrainte de cisaillement, comme le montre la

Figure.III.7.b. Ce mode de déformation concerne principalement les lamelles orientées obliquement par rapport à l'axe de traction;

- la séparation interlamellaire entraîne une augmentation de la distance entre les lamelles cristallines dont la normale est orientée dans la direction de traction. Ce mode de déformation intervient uniquement pour les lamelles cristallines dont la normale est parallèle à l'axe de sollicitation (Figure.III.7.c).

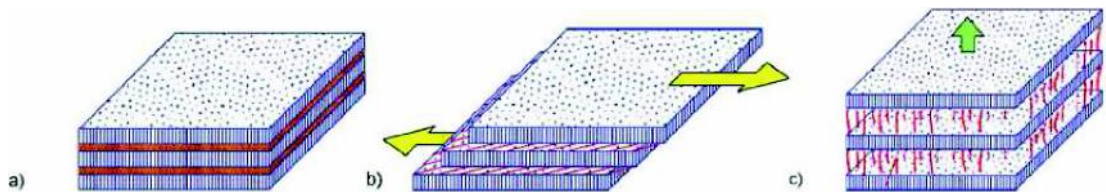


Figure.III.8. Déformation des empilements lamellaires (a) état non déformé, (b) glissement interlamellaire, (c) séparation interlamellaire. [30].

Au-delà d'une certaine contrainte appliquée au matériau, la dépendance contrainte-déformation devient non-linéaire, ce qui indique l'apparition d'une déformation anélastique. Il est communément entendu que la déformation plastique des lamelles cristallines s'initie au seuil de plasticité. Cependant, des auteurs rendent état de l'apparition de micro-mécanismes de plasticité et d'endommagement avant le seuil [30].

1.4.2. Écoulement plastique

Au cours de l'écoulement plastique, de nombreux mécanismes de déformation apparaissent. En effet, la microstructure du matériau se trouve fortement modifiée et la structure sphérolitique initiale se transforme progressivement en une structure fibrillaire. Les lamelles se fragmentent en blocs cristallins liés entre eux par des chaînes amorphes dépliées et orientées dans le sens de traction.

Les propriétés élastiques et mécaniques du matériau se trouvent ainsi fortement altérées. Au cours de ce stade de déformation, les différents mécanismes de plasticité et d'endommagement (cisaillement des cristallites, cavitation, transformation martensitique.) peuvent apparaître simultanément. Dans les polymères semi-cristallins, la déformation plastique du cristal s'effectue par des glissements cristallographiques qui entraînent la fragmentation des lamelles cristallines et la formation d'une nouvelle structure sans lien avec la structure initiale.

Ces glissements de plans cristallographiques, ou mouvements de dislocations, sont responsables de la déformation des lamelles cristallines. Deux types de mécanismes de cisaillements ont été identifiés : glissement homogène et glissement hétérogène [31].

- Le glissement homogène des plans cristallins entraîne une rotation des lamelles cristallines dans la direction des chaînes macromoléculaires.
- Dans le cas du glissement hétérogène, les lamelles cristallines ne subissent pas de réorientations, ce qui engendre la fragmentation des lamelles en petits blocs cristallins.

Les sphérolites subissent une déformation hétérogène selon les différentes régions les caractérisant. Trois types de régions peuvent être distingués selon leur orientation par rapport à la direction de traction [29] :

- Régions équatoriales : la normale des lamelles est perpendiculaire à l'axe de traction et le mécanisme de séparation interlamellaire est donc prédominant (Figure.III.9.c);
- Régions diagonales : les lamelles sont orientées obliquement par rapport à la direction de traction. Les lamelles subissent à la fois du glissement et de la séparation interlamellaire, et tendent à s'orienter dans l'axe de traction (Figure.III.9.b et d);
- Régions polaires : la normale des lamelles est parallèle à l'axe de traction. Le mécanisme de glissement interlamellaire est donc prédominant et les chaînes vont s'orienter dans l'axe de traction (Figure.III.9.a).

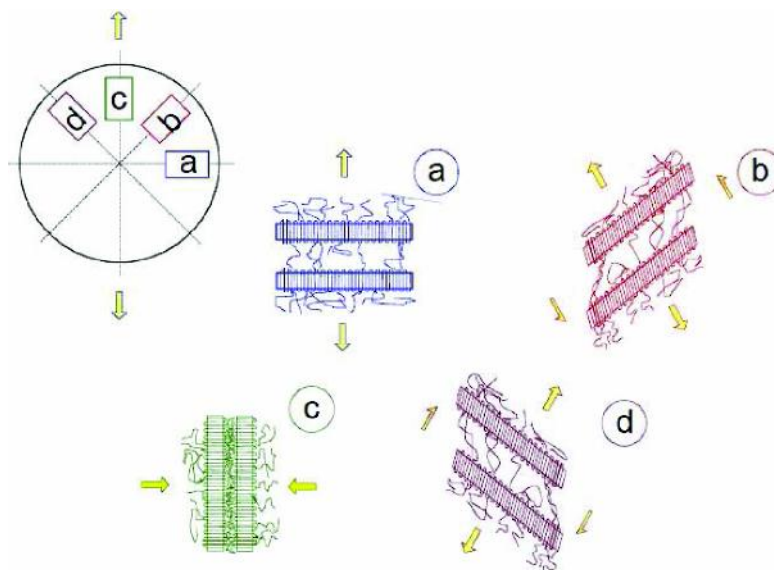


Figure.III.9. Schéma de déformation dans une sphérolite des lamelles amorphes et cristallines orientées (a) perpendiculairement, (b) et (d) obliquement, et (c) parallèlement à l'axe de traction [29]

La déformation des sphérolites entraîne une évolution de leur forme initiale quasi-sphérique vers une forme ellipsoïdale qui se trouve entièrement détruite lors de la formation de la structure fibrillaire. En plus de la déformation des sphérolites, Flory *et al.* [33] ont suggéré qu'un processus de fusion/recristallisation accompagne la transformation fibrillaire.

1.4.3. Cavitation

La formation de cavités (trous) au cours de la déformation plastique de polymères semi-cristallins est appelée « cavitation ». Ce mécanisme est couramment observé aux basses températures et est lié à l'endommagement du matériau. Lors de leur formation, ces cavités ont une taille de l'ordre du nanomètre et peuvent atteindre plusieurs dizaines de micromètres au cours de leur étirement dans l'axe de traction. La cavitation apparaît uniquement sous des sollicitations en traction, jamais en compression ou en cisaillement [33]. Très souvent, la détection des cavités est réalisée par des techniques de microscopies (MEB, TEM ou AFM) ou de diffusion des rayons X. Des mesures de densité permettent aussi de les détecter, car celles-ci diminuent la densité moyenne du matériau. Il est également possible d'observer leur formation à l'œil nu via le blanchissement du matériau, qui se produit généralement autour du seuil de plasticité

III.4.4. Durcissement et rupture

Aux grandes déformations, la striction se propage sur l'ensemble de la zone utile de l'éprouvette, montrant que toute la structure sphérolitique initiale du matériau s'est transformée en structure fibrillaire, cette phase est appelée durcissement. Cette structure fibrillaire est donc composée par des petits blocs cristallins liés entre-eux par des chaînes amorphes fortement orientées dans l'axe de traction. Ces fibrilles ont une dizaine de nanomètres de diamètre et quelques centaines de nanomètres de longueur [33]. Les fibrilles continuent à s'orienter dans l'axe de traction jusqu'à la rupture du matériau qui fait intervenir des mécanismes de formation et de croissance de fractures, de cavitation et de cisaillement.

Les modes de rupture des polymères semi-cristallins sont de plusieurs natures : ductile, fragile ou une combinaison des deux. Le type de rupture est influencé par de nombreux paramètres comme par exemple la masse moléculaire des chaînes, le taux

d'imperfections, l'histoire thermique du matériau, la vitesse de sollicitation ou encore la température.

Il s'avère ainsi qu'une déformation de traction notable de polymères semi-cristallins engendre une structure fortement Orientée. Au cours de la déformation, les sphérolites prennent une autre forme lorsque l'allongement est d'ampleur moyenne.

Par contre, une déformation prononcée provoque la destruction de la structure sphéroïdique. Il faut également souligner que la plupart des processus présentés à la figure III.7 sont réversibles, c'est-à-dire que si, à un moment ou à un autre, la déformation est interrompue et que l'éprouvette est chauffée à une température proche de son point de fusion (processus de recuit), le matériau reprend alors la structure sphéroïdique qu'il avait avant la déformation et tend à se contracter pour retrouver la forme qu'il avait avant d'être déformé. L'ampleur du retour à la forme et à la structure initiale varie en fonction de la température de recuit et de l'importance de l'allongement. [1,4]

CONCLUSION

En conclusion, dans la famille des polymères on peut trouver une multitude de comportements différents. On ne devrait pas parler du comportement des polymères mais DES comportements des polymères.

Il est difficile de classer les polymères selon leur état, amorphe, élastomère, semi-cristallin, car les propriétés des polymères dépendent du temps et de la température, cette complexité explique certaines difficultés de dimensionnement de structures polymères.

Chapitre IV

Méthodes Expérimentales

Chapitre IV Méthodes Expérimentales

Introduction

Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'influence de la température sur les caractéristiques mécanique du PPH.

Nous présenterons la matière choisie pour notre étude, un thermoplastique qui est le PPH, Pour caractérisé ce matériau et évaluer son comportements mécaniques, nous allons utiliser une techniques de caractérisation, l'essai de traction combiné a la cellule chauffante ; pour la détermination des propriétés usuelles telles que le module de Young (E), la contrainte au seuil d'écoulement (σ_{max}), ainsi que les taux de déformations ϵ_{max} du PPH les éprouvettes sont soumises à des tests de tractions à différentes les températures.

IV.1.Matière premières

IV.1.1.Le polypropylène

Les polypropylènes (PP) sont des thermoplastiques semi cristallins obtenus par la polymérisation du propylène.

Polymère	Fournisseur	Référence	MFI(g /10mm) ASTM D1238	Densité (g/cm ³) ASTMD792
PPH	Sumitomo	Y101	15	0,900

Tableau IV.1 Caractéristiques du polypropylène utilisé

IV.1.2. Réalisation des éprouvettes

L'injection d'éprouvettes s'effectue au niveau de l'entreprise SISCOPLASTE de Draa El Mizan, sur une machine à injection ARBOURG qui est illustrée sur la figure IV.1 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 barre 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 IV.1).



Figure IV.1 Machine à injection et moule éprouvette

Les différentes phases du cycle d'injection sont décrites à la Figure III.2, 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 est 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 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.

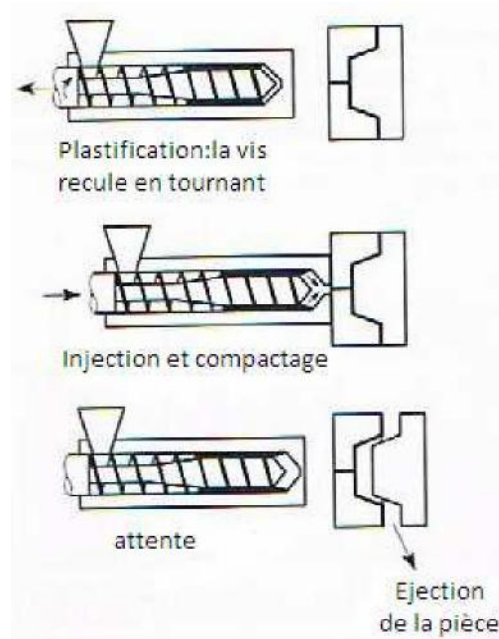


Figure IV.2 Les différentes phases du cycle d'injection

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 IV.2 : Paramètre d'injection

Paramètre	valeur
Temps du cycle	28.05 s
Retrait / avance du chariot	5.8 s
Temps d'injection	2.2 s
Temps de maintien	2 s
Temps de refroidissement	16 s
Temps de pose	1s
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	30 bars

Pression de maintien	110 bars
Contre pression	70 bars
Vitesse de rechargement de la vis	3 trs/min
Vitesse d'ouverture de moule	2 trs/min
Vitesse de fermeture de moule	2 trs/min
Vitesse d'injection	3 tr/min
Vitesse d'éjecteur	2.5 trs/min
Vitesse retour d'éjecteur	5 trs/min

Température de la buse d'injection

T1=220° C

T2= 210 °C

T3= 200 °C

T4= 180 °C

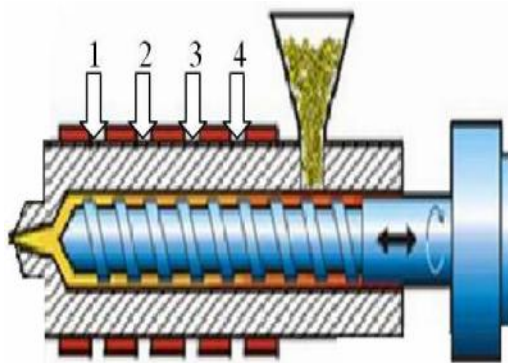


Figure IV.3 : températures d'injection utilisées

IV.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.

IV.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 l'évolution des 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 sous l'effet de la température.

IV.2.1.1 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.

IV.2.1.2 Présentation des éprouvettes normalisées

L'éprouvette d'essai est prélevée dans le matériau à caractériser et obtenu par injection 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 IV.4) la géométrie des éprouvettes normalisées utilisées dans notre travail.

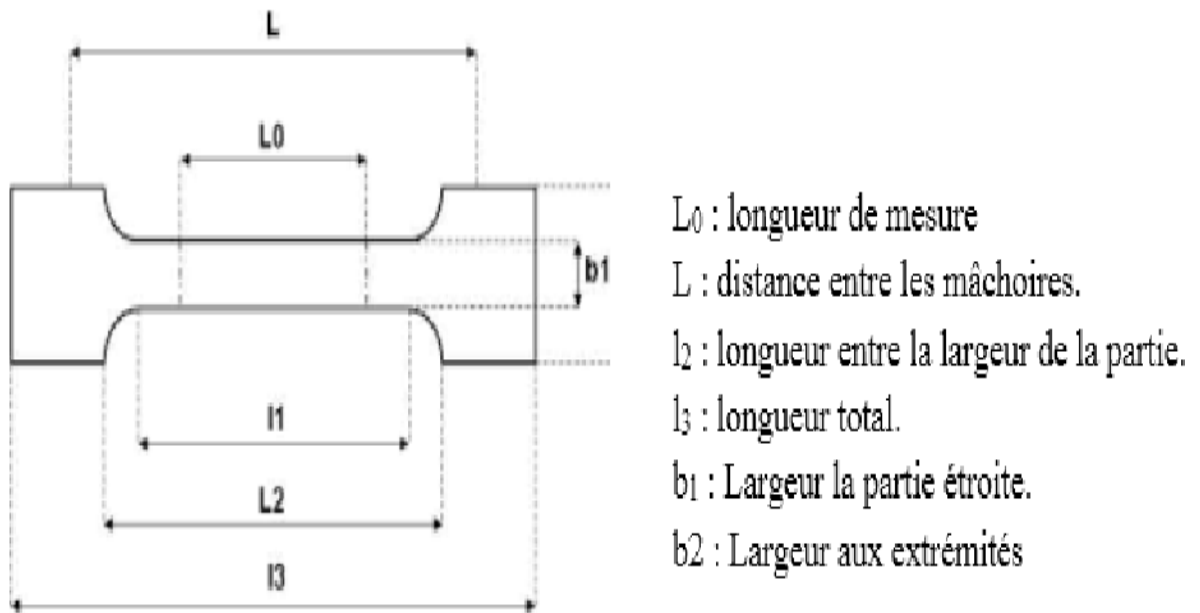


Figure IV.4 : Géométrie de l'éprouvette de traction

Les dimensions des éprouvettes sont représentées dans le tableau IV.4

Tableau IV.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 ²

IV.2.1.5 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 IV.5).



Figure IV.5. Machine de la traction

IV.2.1.6. Etude de l'influence de la température

Nous avons pour cela équipé la machine de traction d'une cellule chauffante comme l'illustre la figure ci-contre

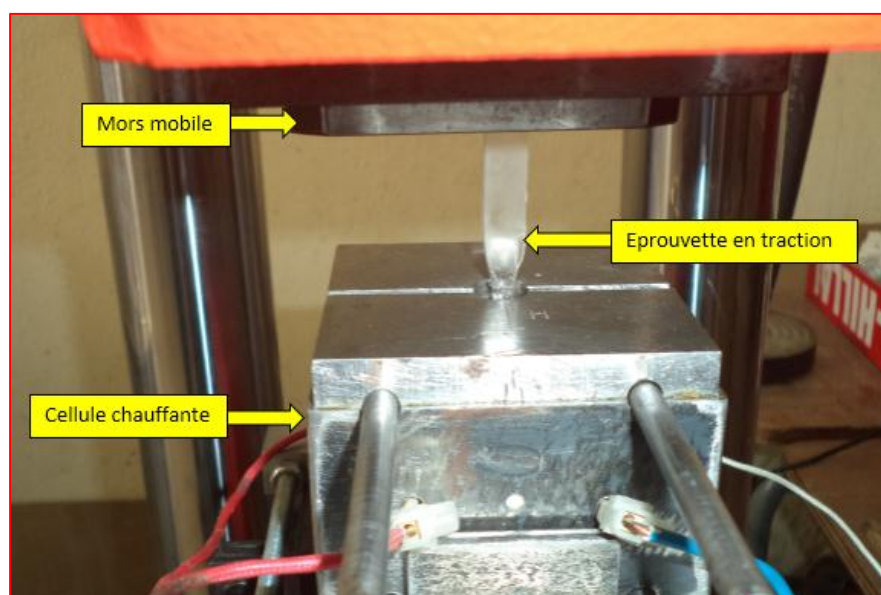


Figure .IV.6 Dispositif de traction avec cellule chauffante

IV.2.1.5. Présentation de la Cellule chauffante

Conçue et mise au point par le laboratoire de mécanique de l'université Mouloud MAMMARI de Tizi Ouzou, elle est composée d'une résistance chauffante qui produit de la chaleur, de brique réfractaire et fibres d'alumines qui assure une diffusion homogène de la chaleur le long de la partie utile des éprouvettes de traction, un corps métallique, un thermocouple intégré et relié à un capteur et un régulateur de température, d'un transformateur, écran d'affichage et boutons de réglage.

La cellule chauffante peut permettre le chauffage de l'éprouvette, du moins sa partie utile, à une température donnée et de la maintenir à cette température pendant un temps suffisant pour l'homogénéisation du champ thermique et de réaliser l'essai de traction.

La cellule est adaptable sur la machine de traction, est facile à monter et à démonter, à ouvrir et à fermer avant et après chaque essai et le système de régulation de la température facile à manipuler.

-Elle a une bonne isolation thermique et une bonne fermeture pour éviter les déperditions de chaleur.

- il présente une bonne stabilité et bon maintien pour minimiser les vibrations et éviter que le dispositif ne perde son équilibre mécanique et n'endommage la machine de traction ou son propre four.

-fait chauffer que la partie utile de l'éprouvette tout en homogénéisant le champ de température.

-elle a une partie mobile et une partie fixe, le déplacement de la partie mobile servant essentiellement à la mise en place des éprouvettes

-elle est conçue avec des matériaux qui résistent à la chaleur.

-elle assure une bonne régulation de la température en minimisant l'écart entre la température de consigne et la température réelle du four.

- Est alimenté par l'énergie électrique du réseau 220V-50Hz, que ce soit pour le régulateur électrique, le capteur de température et la source d'énergie pour les éléments chauffants

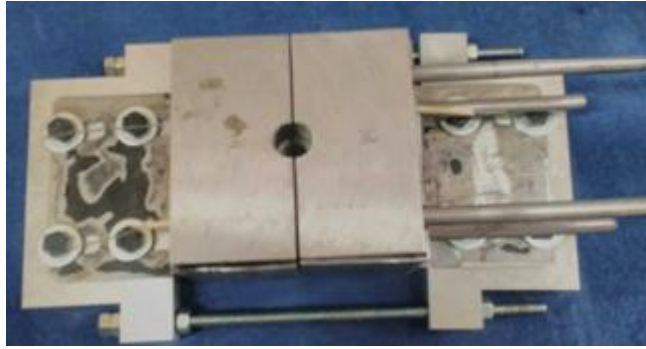


Figure IV.7 Image de la cellule chauffante

IV.2.1.6 Etalonnage de la cellule chauffante

Toutes les sources de température présentent des instabilités et des gradients. Ceux-ci se traduisent par des erreurs d'étalonnage et des incertitudes. Pour minimiser ces effets, la cellule a dû être étalonnée plusieurs fois.

le montage, utiliser pour cela est un multimètre muni d'un thermocouple qui à été positionné au cœur de la cellule, dans le but de reproduire les conditions d'essai final. La manipulation s'est faite sur une plage allant de la température 60 à 200°, à travers des paliers de température de 5°.

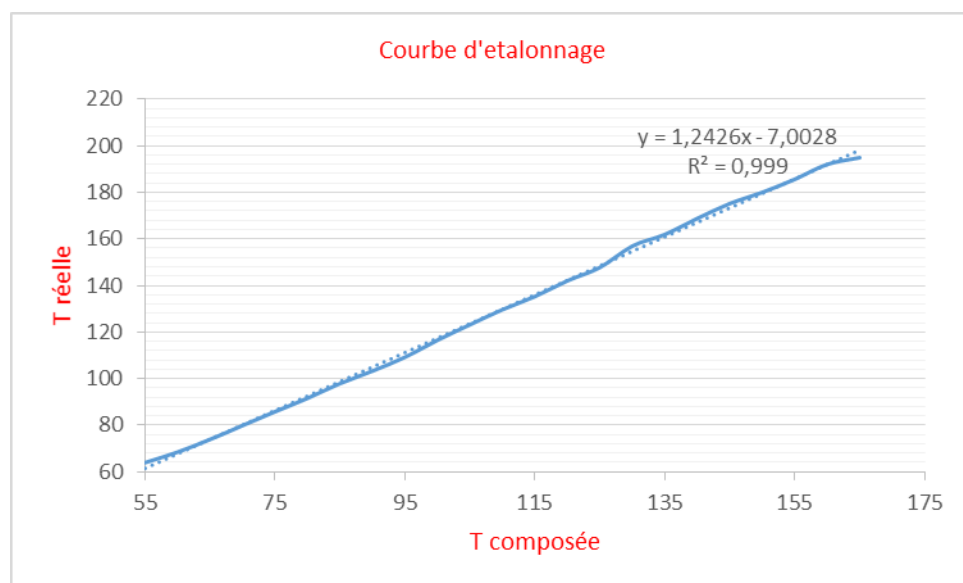


Figure IV.8 Courbe d'étalonnage de la cellule chauffante.

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 à différentes températures et d'obtenir des résultats à analyser

Chapitre V

Résultats et interprétation

Chapitre V Résultats et Interprétations

Introduction

L'objectif de notre travail consiste à étudier l'influence de la température, sur les propriétés mécaniques, Caractérisé par l'essai de traction,.

Dans ce chapitre, on s'intéresse à la détermination des propriétés mécaniques usuelles telles que le module de Young (E), la contrainte élastique (σ_e), la contrainte à rupture (σ_r), ainsi que l'allongement à la rupture (A).

Il reste entendu que les propriétés mécaniques caractéristiques usuelles sont déterminées via la caractérisation mécanique uniaxiale en utilisant un appareil de traction de type Ibertes.

V.1 Essais de traction

La machine de traction, nous donne des résultats, de la force (KN) en fonction de l'allongement ΔL (mm), nous allons transformer ces résultats de la machine, en divisant la force (F) sur la surface initiale (S_0) pour obtenir de la contrainte σ (MPa) et en divisant l'allongement (ΔL) par la longueur initiale (L_0) pour avoir la déformation ($\epsilon\%$). Toutes ces opérations effectuées à l'aide de Microsoft office Excel 2013. On déduit à partir de la courbe contrainte-déformation les caractéristiques mécaniques suivantes :

- **Le module d'Elasticité E (MPa)**

C'est le module tangent déterminé, à partir de la tangente à l'origine de la courbe contrainte-déformation, c'est-à-dire la pente de la tangente ($E = d\sigma/d\epsilon$).

- **La contrainte associée d'élasticité (σ_e)**

C'est le rapport de la force appliquée début de la striction par la section initiale. On se sert généralement de cette contrainte comme limite d'Elasticité.

- **La contrainte associée à la résistance à la rupture (σ_r)**

C'est le quotient de la force appliquée au moment de la rupture par la section initiale.

- **L'allongement à la rupture (A%)**

C'est la capacité d'un matériau à s'allonger sous charge avant sa rupture.

V.1.1. Courbes contrainte-déformation

Tout d'abord, nous allons présenter les courbes contrainte -déformation du PPH associées a différentes températures. Puis, nous superposons les courbe de traction du PPH a différentes températures.

La figure V. 1 montre que le PPH présente un comportement ductile à température ambiante, sa déformation atteint 350% et une contrainte maximale conforme à la bibliographie.

- **Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la température ambiante**

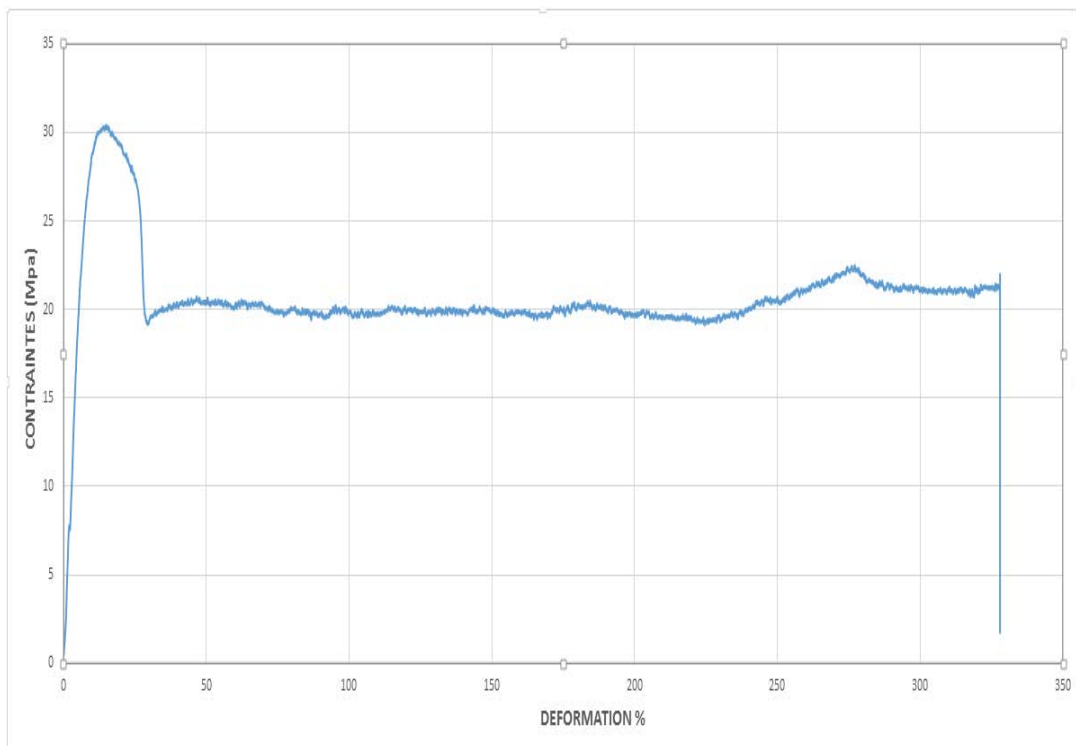


Figure V.1 Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Températures ambiante

- **Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Températures de 30°C**

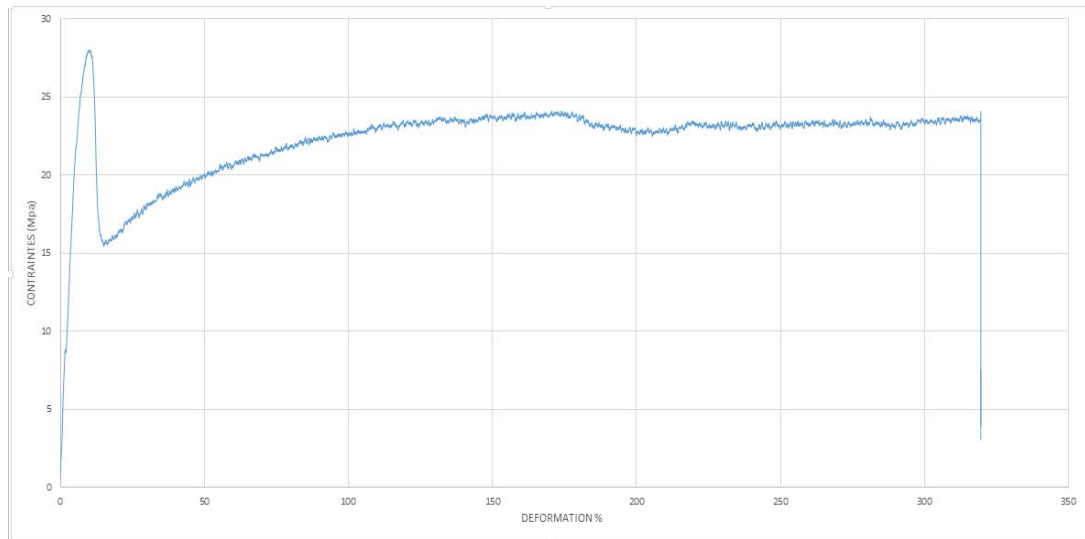


Figure V.2 Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Température de 30°C

La figure V. 2 montre que le PPH conserve son comportement ductile à la température de 30°C, sa déformation baisse légèrement ainsi que son module d'élasticité.

- **Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Températures de 40°C**

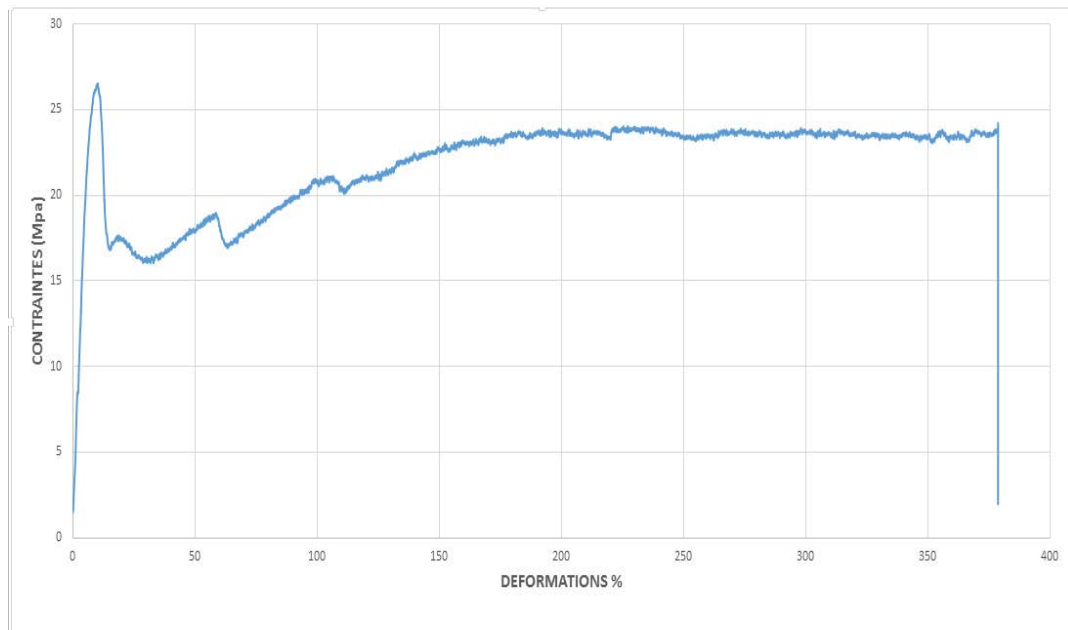


Figure V.3 Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Températures de 40°C.

La figure V. 3 montre que le PPH conserve un ductile a la température de 40°C, sa déformation augmente et atteint 370%, le module d'élasticité baisse légèrement ainsi que la résistance a la rupture, apparitions de phénomène de dent de scie dans le palier d'écoulement plastique

- **Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Températures de 50°C**

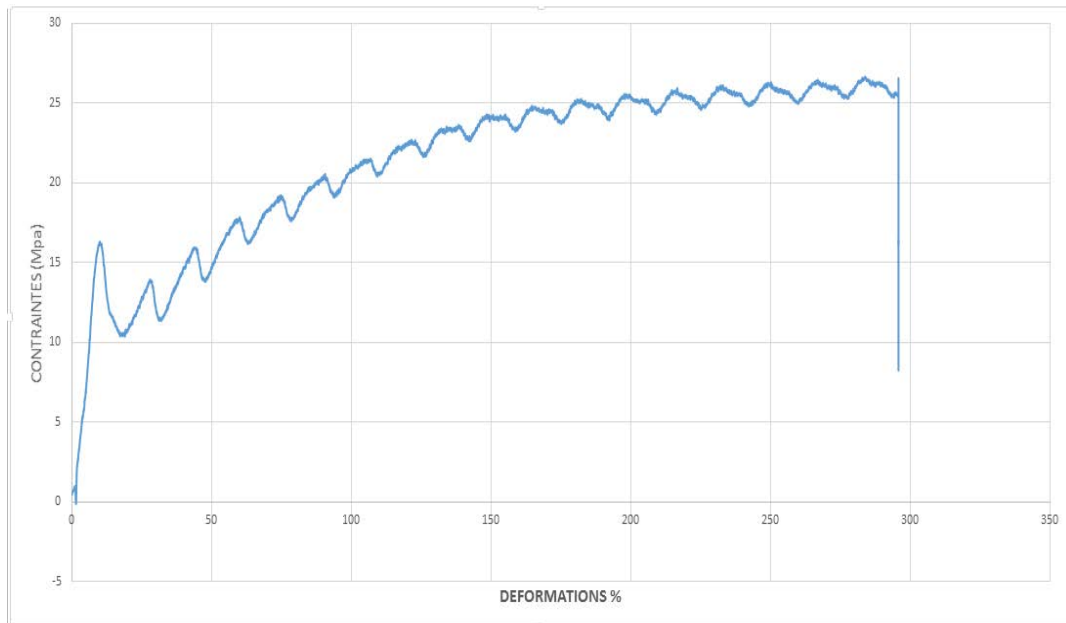


Figure V.4 Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Températures de 50°C.

La figure V. 4 montre une baisse importante du module d'élasticité du PPH à la température de 50°C, apparition d'un durcissement important dans la phase plastique et le phénomène de dent de scie prend plus d'ampleur, la déformation baisse et atteint 290 %.

- **Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Températures de 60°C**

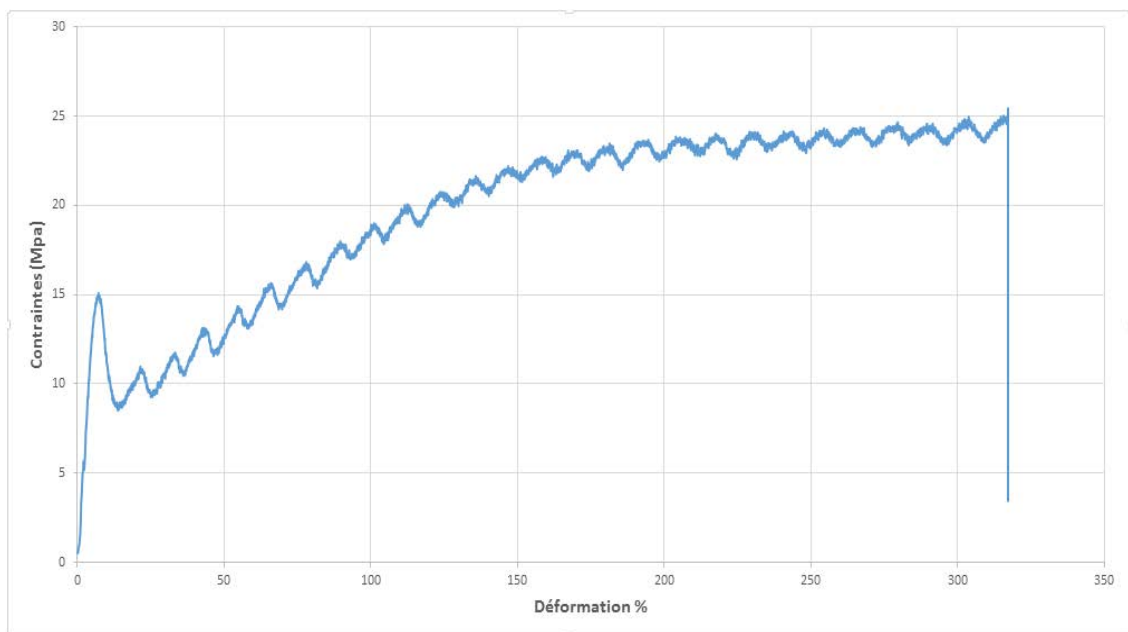


Figure V.5 Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Températures de 60°C.

La figure V. 5 montre que le module d'élasticité et la résistance a la rupture du PPH baissent légèrement à la température de 60°C, sa déformation remonte un peu et atteint 330 %.

- **Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Températures de 70°C**

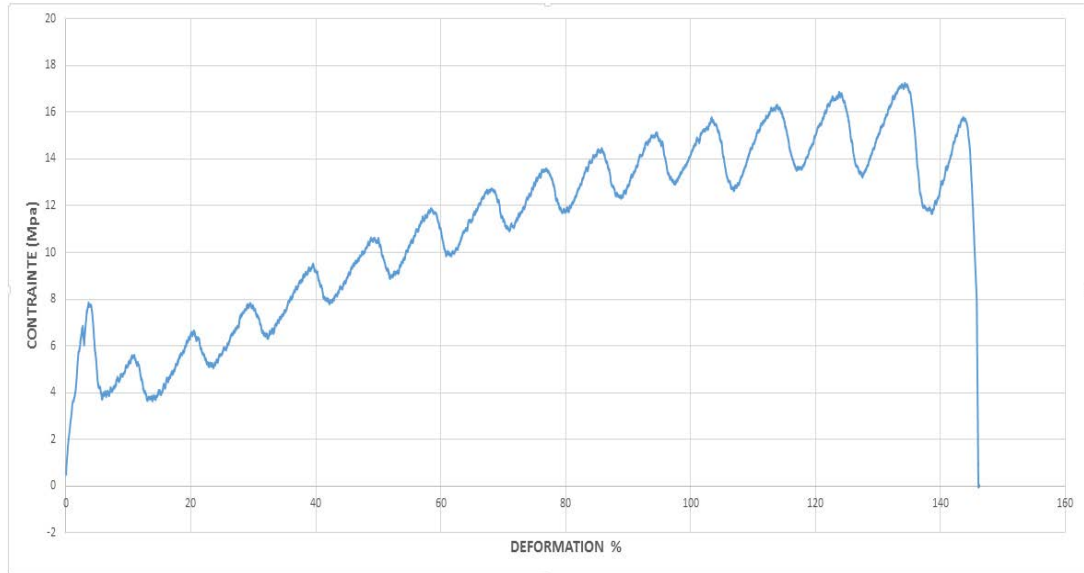


Figure V.6 Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Températures de 70°C

La figure V. 6 montre une baisse importante (presque la moitié) de ladéformation du PPH à la température de 70°C, qui atteint 145% ainsi que son module d'élasticité, on remarque aussi un durcissent important lors de la déformation plastique.

- **Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Températures de 80°C**

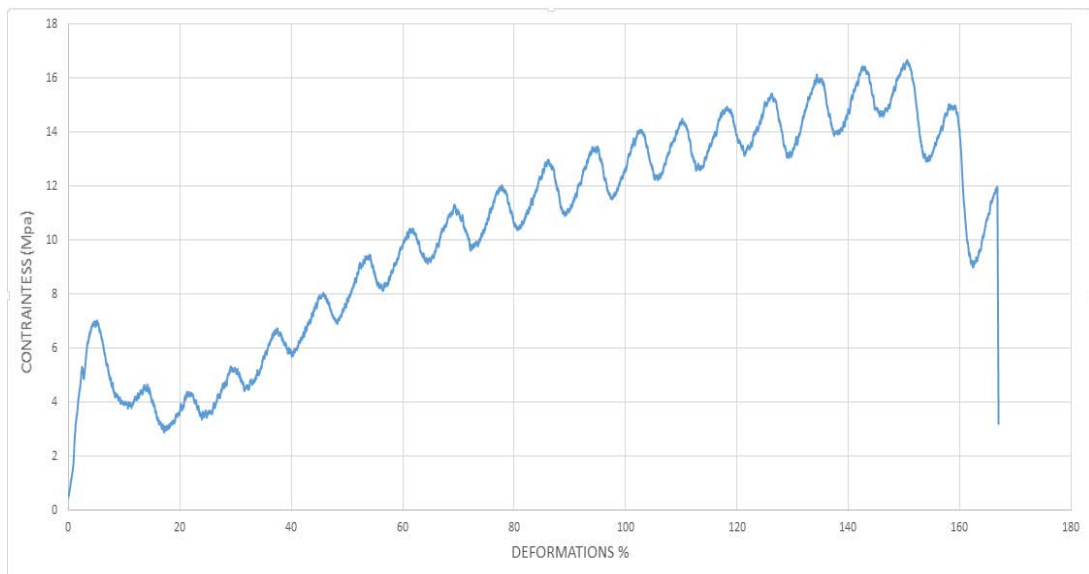


Figure V.7 Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Température de 80°C.

La figure V. 6 montre la résistance du PPH à la température de 80°C continue de baissé, sa déformation remonte un peu et atteint 170 % son module d'élasticité continue de baisser, on remarque aussi un durcissement important lors de la déformation plastique.

- **Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Températures de 90°C :**

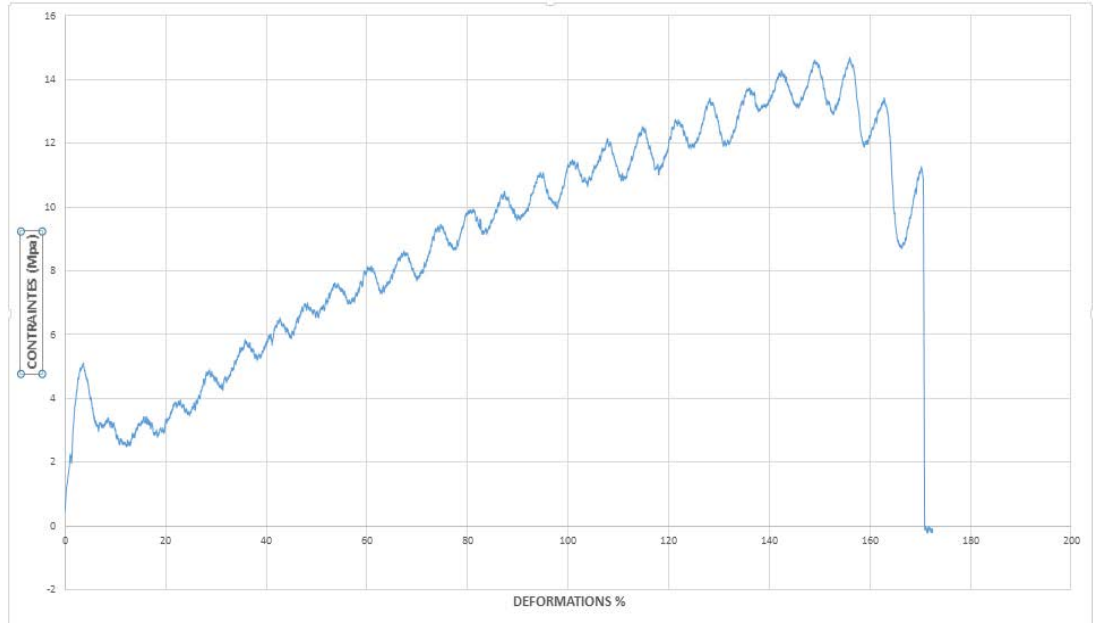


Figure V.8 courbe de traction du PPH. à la température de 90°C.

La figure V.8 montre que le PPH est toujours très ductile à la température de 90°C, sa déformation remonte un peu et atteint 180 %, son module d'élasticité continue de baisser. , on remarque aussi un durcissement important lors de la déformation plastique.

- **Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Températures de 100°C**

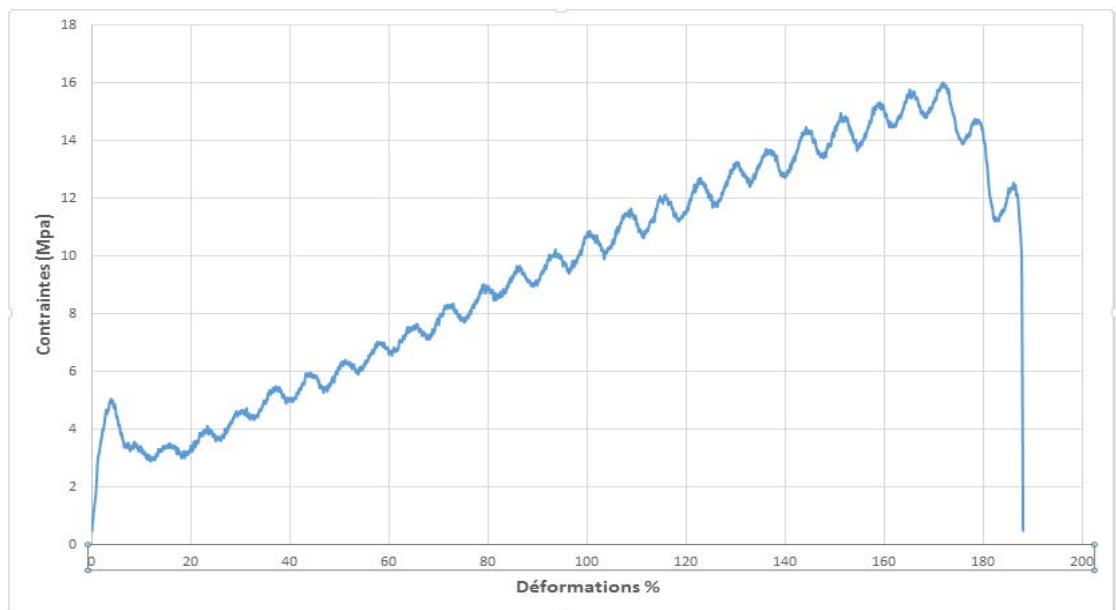


Figure V.9 Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Température de 100°C.

La figure V.9 montre que le PPH est toujours très ductile à la température de 100°C, sa déformation remonte un peu et atteint 190 %, son module d'élasticité continue de baisser. , on remarque aussi un durcissement important lors de la déformation plastique.

- **Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Températures de 110°C**

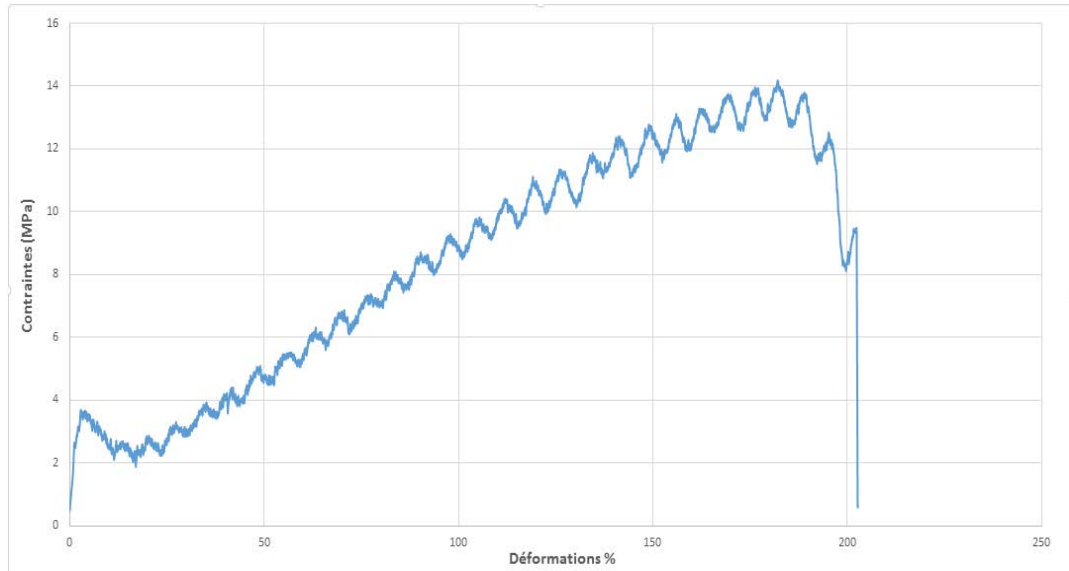


Figure V.10 courbe de traction du PPH. à la température de 110°C.

La figure V.10 montre que le PPH est toujours très ductile à la température de 110°C, sa déformation remonte un peu et atteint 210 %, son module d'élasticité continue de baisser légèrement , on remarque aussi un durcissement important lors de la déformation plastique.

- **Courbe contraintes-Déformation du polymère PPH a la Températures de 115°C**

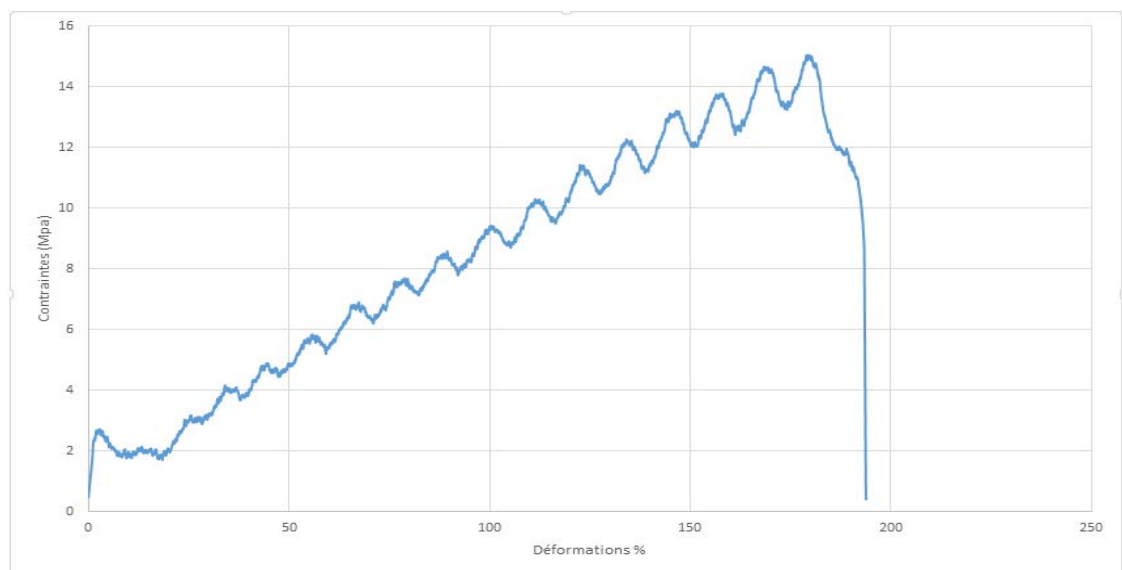


Figure V.11 courbe de traction du PPH. à la température de 115°C.

La figure V.11 montre que le PPH est toujours très ductile à la température de 115°C, sa déformation rebaisse un peu et atteint 190 %, son module d'élasticité continue de baisser. , on remarque aussi un durcissement important lors de la déformation plastique.

- **Superposition des Courbes contraintes-Déformation du polymère PPH a différentes Températures**

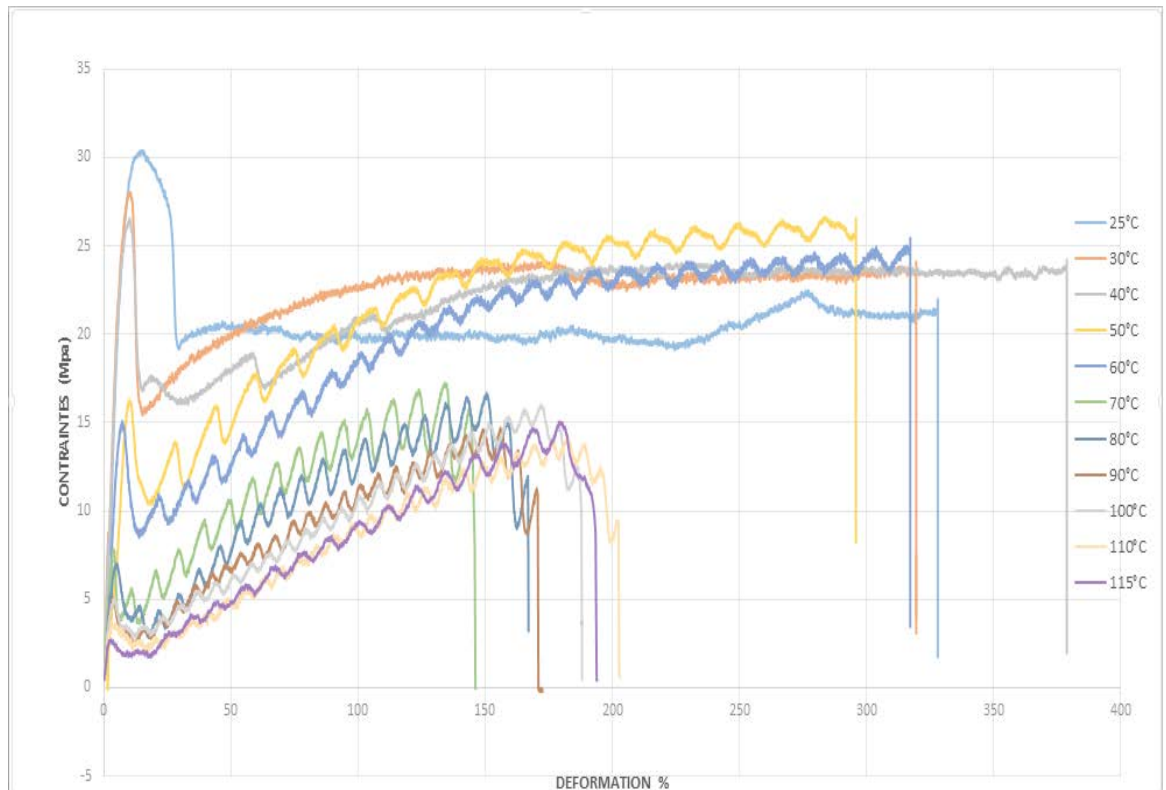


Figure V.12 Superposition des Courbes contraintes-Déformation du polymère PPH a différentes Températures

La figure V.12 montre la superposition des différents comportent du PPH en fonction de la température, le PPH garde ses propriétés mécanique (baisse légère) jusqu'à la température de 60°C , au delà de cette température, on remarque une baisse très importante des caractéristiques mécaniques notamment le module d'élasticité ainsi que la déformation a la rupture a la température de 70°C. Cette baisse on la voit de façon très nette, dans la figure V13 qui représente la superposition des courbes contrainte-déformation aux températures de 25, 60,70 et 115°C

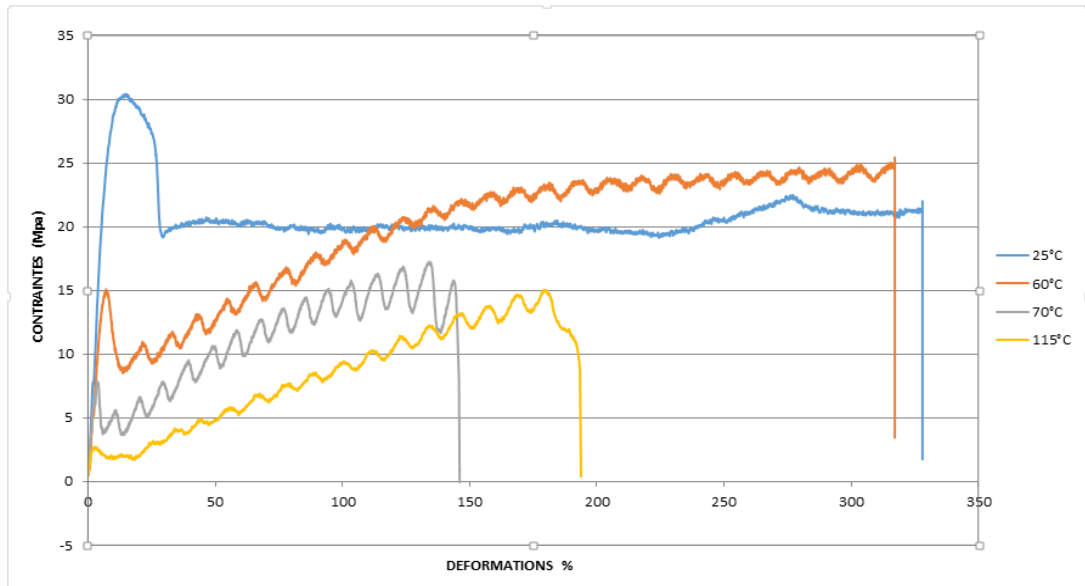


Figure V.13 Superposition des Courbes contraintes-Déformation du polymère PPH a différentes Températures

V .2 Evolution des propriétés mécaniques caractéristiques du PPH selon la température

V.2 .1 Courbe d'évolution des propriétés mécaniques caractéristiques du PPH selon la température

On présente aux figure ci-dessous l'évolution des propriétés mécaniques usuelles telles que le module de Young E, la contrainte au seuil d'écoulement (σ_e), la contrainte à la rupture (σ_r) ainsi que La déformation a la rupture (A)associés. Il reste entendu que la vitesse de sollicitation a été fixée à 10mm/mn.

- **Courbe d'évolution du Module de Young du PPH en fonction de la température**

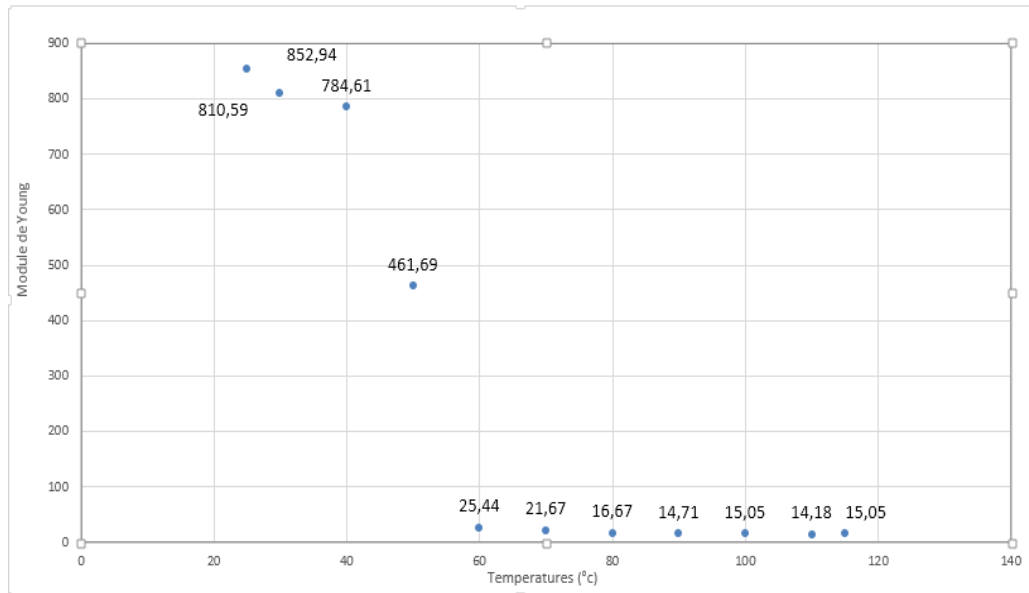


Figure V.14 Courbe d'évolution du Module de Young caractéristiques du PPH selon les températures.

Nous constatons sur le graphe que le Module d'élasticité diminue avec l'augmentation de la température. Cette diminution est très importante pour les températures comprises entre 40 et 60°C puis se stabilise au-delà de 60°C.

- **Courbe d'évolution de la résistance à la rupture du PPH en fonction de la température:**

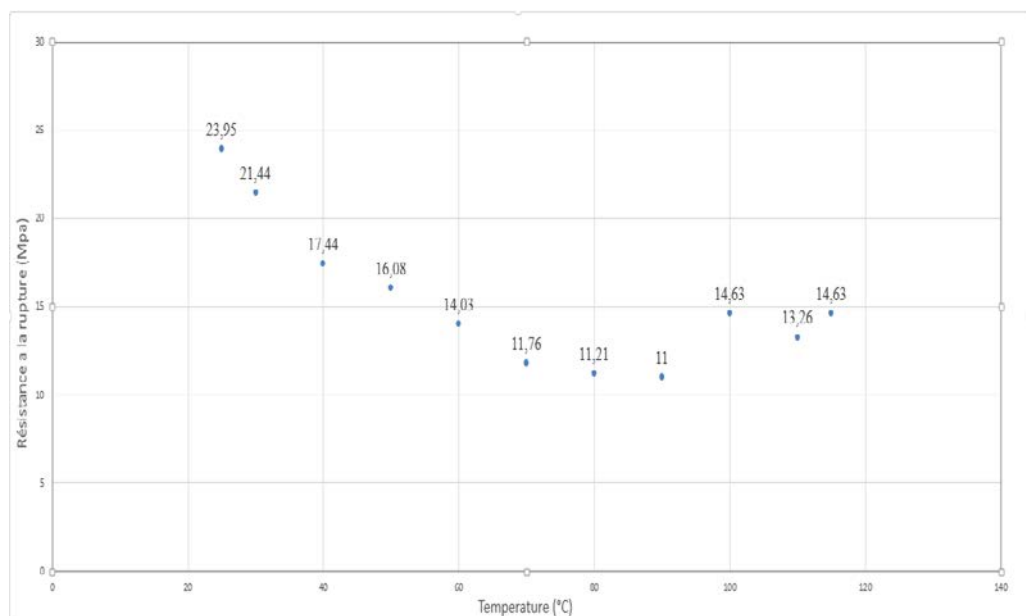


Figure V.15 Evolution de la résistance à la rupture du PPH en fonction de la température

Nous constatons sur le graphe que la résistance a la rupture diminue avec l'augmentation de la température.

- **Courbe d'évolution de la contrainte d'écoulement du PPH en fonction de la température :**

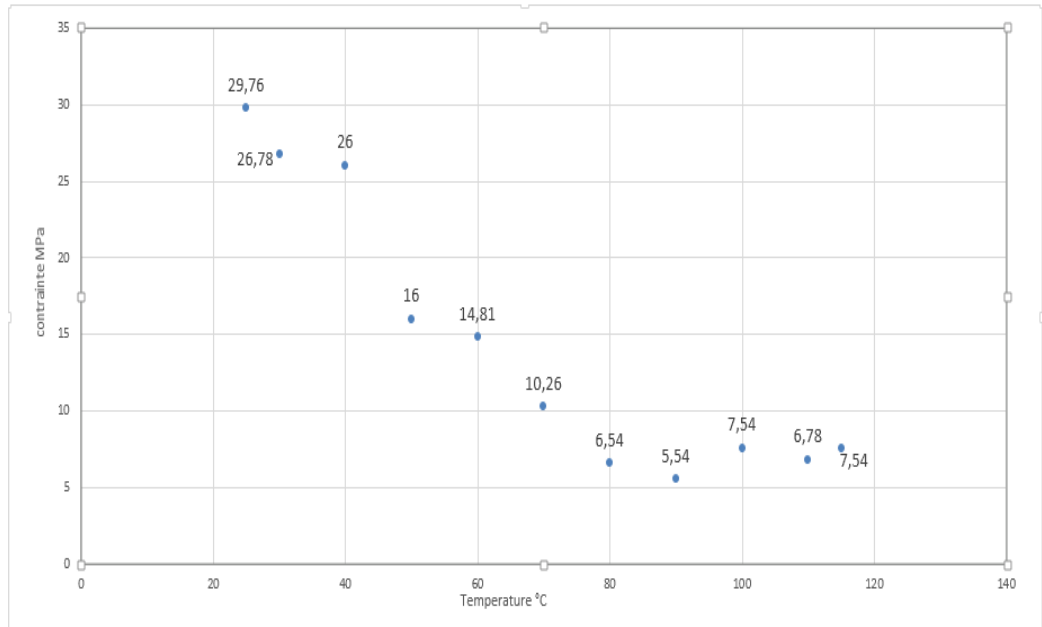


Figure V.16 Evolution de la contrainte d'élasticité du PPH en fonction de la température

Nous constatons sur le graphe que la contrainte d'élasticité diminue avec l'augmentation de la température.

- **Evolution de l'allongement a la ruptures du PPH en fonction de la température**

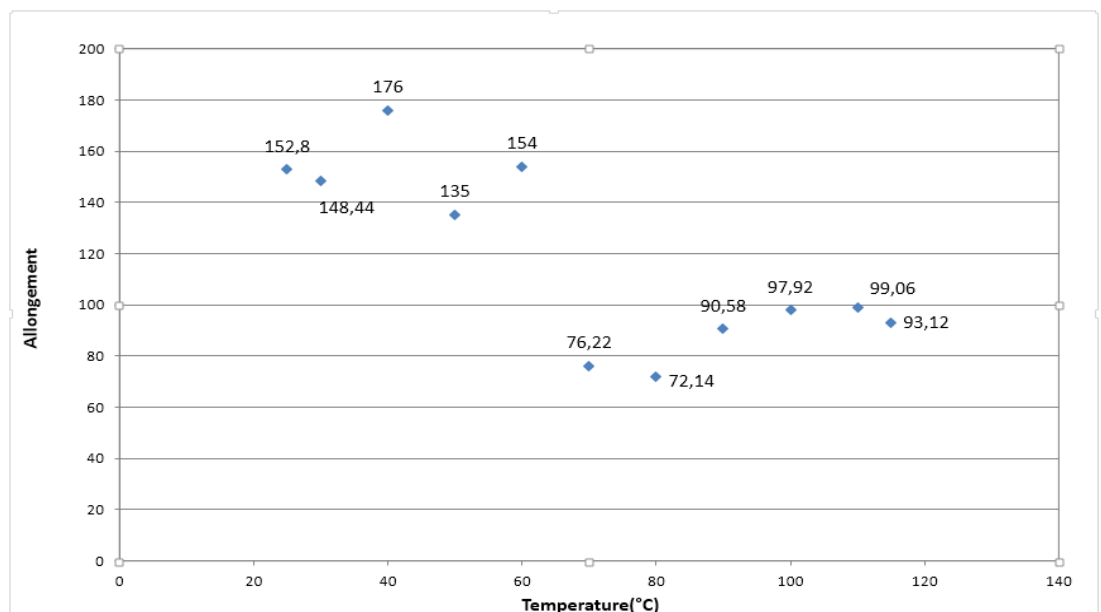


Figure V.1 Evolution de l'allongement a la ruptures du PPH en fonction de la température

Nous constatons sur le graphe que l'allongement à la rupture est diminué avec l'augmentation de la température et très sensiblement aux températures comprises entre 60 et 70°C, puis remonte légèrement au-delà de ces températures.

V.2.2 Tableau d'évolution des propriétés mécaniques du PPH selon la température

L'évolution des Propriétés mécaniques caractéristiques du PPH en fonction de la température, sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau V.1 Tableau d'évolution des propriétés mécaniques c du PPH selon la température

Températures	E(Mpa)	σ_e (Mpa)	σ_r (Mpa)	A(%)
25°C	852,94	29,76	23,95	152,8
30°C	810,59	26,78	21,44	148,44
40°C	784,61	26	17,44	176,68
50°C	461,69	16	16,08	135,52
60°C	25,44	14,81	14,03	154,14
70°C	21,67	10,26	11,76	76,22
80°C	16,67	6,54	11,21	72,14
90°C	14,71	5,54	11	90,58
100°C	15,05	7,54	14,63	97,92
110°C	14,18	6,78	13,26	99,06
115°C	15,05	7,54	14,63	93,12

Sur Les graphes ci-contre, nous pouvons distinguer l'influence de la température sur les caractéristiques intrinsèques du PPH :

- La température à une influence directe sur la limite d'élasticité du PPH, cette dernière diminue avec l'élévation de température.
- La température à une influence directe sur la contrainte limite de rupture du PPH, elle diminue également avec l'élévation de la température.
- Le module de Young décroît aussi avec l'élévation de la température.
- L'allongement à la rupture diminue au fur et à mesure que la température augmente puis remonte légèrement.

Donc l'évolution des propriétés mécaniques caractéristiques usuelles en fonction de la variation de la température telles que représentées aux figures ci-dessus sont dépendantes de la température. En effet, les propriétés mécaniques sont drastiquement affectées par la l'augmentation de la température. Plus la température augmente, plus les propriétés mécaniques diminuent graduellement

L'élévation de la température du PPH, provoque une augmentation de la mobilité des chaînes macromoléculaire au sein de celui-ci. Les liaisons faibles reliant les chaînes entre elles ont alors assez d'énergie pour se briser et laisser les chaînes se déplacer facilement les unes par rapport aux autres. Les propriétés mécaniques sont ainsi affectées par l'élévation de température. En effet, il perd en rigidité et devient plus plastique (diminution de la contrainte maximale et de l'allongement à la rupture).

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons eu à étudiés le comportement du PPH sous l'effet de la température, les résultats d'essai était très concluent quant à l'influence que peut avoir la température sur ses caractéristique intrinsèque.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le principal objectif de ce travail été de mieux connaître le comportement du polypropylène PPH face aux différentes sollicitations essentiellement la température, de comprendre les mécanismes responsables de la dégradation thermique, et par conséquence, pousser ce matériau aux propriétés exceptionnelles aux conditions limites de l'utilisation.

Dans cette étude que nous avons menée, nous avons caractérisés le PPH sous différentes températures supérieure à la Tg, à travers des essais de tractions, les courbes qui en résultent permettent d'effectuer une série d'observation sur le comportement mécanique du PPH. Nous constatons un comportement classique d'un polymère semi cristallin à savoir une réponse viscoélastique de plus en plus non linéaire au fur et à mesure que la déformation augmente.

Le PPH à l'origine ductile présente un comportement ductile et résistant au voisinage de 60°C, puis sa ductilité et sa résistance diminue au delà de cette température. Le module de Young, la limite d'élasticité, la contrainte au seuil d'écoulement et la contrainte de rupture diminuent au fur et à mesure que la température augmente, ceci dit ; le comportement du PPH dépend fortement de la température. Cette chute des caractéristiques s'explique par la propagation de l'instabilité.

Références Bibliographiques

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. *Stereospécifique 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 sphérolites*. 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).
- [17] *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. Auremma, *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>)
- [29] : Haudin, J.M.; G'Sell, C. Mécanismes microscopiques de déformation des polymères semicristallins. Introduction à la mécanique des polymères. Institut National polytechnique de Lorraine, Nancy, 1995, 251-273.
- [30] : Humbert, S.; Lame, O.; Chenal, J.M.; Rochas, C.; Vigier, G. New insight on initiation of cavitation in semicrystalline polymers: In-situ SAXS measurements. *Macromolecules*, 43, 2010, 7212-7221
- [31] : Pawlak, A.; Galeski, A. Rozanski, A. Cavitation during deformation of semicrystalline polymers. *Progress in Polymer Science*, 39, 2014, 921-958.
- [32] : Flory, P.J.; Yoon, D.Y. Molecular morphology in semicrystalline polymers. *Nature*, 272, 1978, 226-229.
- [33] : Galeski, A. Strength and toughness of crystalline polymer systems. *Progress in Polymer Science*, 28, 2003, 1643-1699.
- [34] : Butler, M.F.; Donald, A.M.; Ryan, A.J. Time resolved simultaneous small- and wideangle X-ray scattering during Polyethylene deformation: I. Cold drawing of ethylene-[alpha]-olefin copolymers. *Polymer*, 38, (22), 1997, 5521-5538.