

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou
Faculté Du Génie De La Construction
Département De Génie Mécanique

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

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

Option : Science des Matériaux

THEME

**Influence de la charge sur le
comportement mécanique du
polypropylène**

Proposé et dirigé par :

Mme. MOHELLEBI

Étudié par:

Mr. FEIDYoughourta

Année: 2015/2016

Soutenu le : 04/07/2016

Chapitre I : Généralité sur les polymères

Chapitre II : comportement mécanique des polymères

Chapitre III : matériels et essais

Chapitre IV : Résultats et interprétation

Conclusion Générale

REMERCIEMENTS

Je remercie en premier lieu le Bon Dieu de m'avoir donné le courage d'aller au bout de mon objectif.

Je remercie ma promotrice Madame MOHELLEBI et Co promoteur Monsieur MOHELLEBI d'avoir accepté de diriger mon travail, par leurs soutien et leur conseils pertinents qui m'ont permis de travailler tranquillement.

Je remercie les membres du jury qui me font l'honneur d'examiner mon travail.

Je remercie l'ensemble du personnel de l'entreprise SISCOPLAST de Draa el mizan, en particulier M_r TAKILT et M^{eme} BOUAZIZ pour leur disponibilité et leur aide précieuse ainsi tous les

*travailleurs qui se sont donnés à fond
dans l'élaboration.*

*Je remercie les membres de laboratoire
« Matériaux » de la société EI
d'Azazga.*

*Je remercie les Ingénieurs de
laboratoire « RDM, SDM et LEMSE ».*

Je remercie les responsables de MEB.

*Je remercie mes camarades de
promotion pour leur soutien.*

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

- ❖ *Mes très chers parents pour leurs encouragements ;*
- ❖ *Mes grands-parents pour leurs soutien;*
- ❖ *Mes frères et sœurs surtout, en particulier mon petit frère Amine ;*
- ❖ *Toute ma famille ;*
- ❖ *Ma fiancé et tous mes amis surtout Sofiane, Mohamed, Saïd, Lyes, Ahmed, Ferhat, Fateh, Khaled.....*
- ❖ *Tous les étudiants (es) de Génie Mécanique surtout option SDM.*

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES POLYMERES

Figure I.1 :Distribution des masses molaires dans un polymère.....	4
Figure I.2 :Schémas d'une structure moléculaire.....	6
Figure I.3 :Polymères d'enchevêtrement (nœud physique) ,(pelote macromoléculaire).....	7
Figure I.4 :Polymère réticulé (liaison covalente aux croisillons " noeud chimique ").....	7
Figure I.5 :Ligne d'extrusion.....	11
Figure I.6 :Procédé de soufflage de gaine.....	11
Figure I.7 :Machine d'injection(a) schéma de la machine, b) photo d'une machine d'injection)	12
Figure I.8 :Pièce finale a partir d'un thermoplastique.....	13
Figure I.9 :Machine à calandrage : a)Schéma représente le principe de calandrage, b) Schéma d'une ligne complète de calandrage photos internet.....	13
Figure I.10 :Cycle de thermoformage.....	14
Figure I.11 :Formule générale du Polypropylène (PP).....	19
Figure I.12 :Polypropylène isotactique.....	19
Figure I.13 :Polypropylène syndiotactique.....	20
Figure I.14 :Polypropylène atactique.....	20
Figure I.15 :Les étapes de fabriquer le PP à partir D'un monomère.....	20

CHAPITRE II : COMPORTEMENT MECANIQUE DES POLYMERES

Figure II.1 :machine de traction.....	23
Figure II.2 :.Eprouvette de traction.....	23
Figure II.3 :Comportement contrainte-déformation des matériaux polymères.....	24
Figure II.4 :Courbe contrainte-déformation d'un polymère plastique à partir de laquelle sont Déterminées la limite d'élasticité et la résistance à la traction.....	25
Figure II.5 : Incidence de la température sur les caractéristiques de contrainte-déformation du polyméthacrylate de méthyle.....	26
Figure II.6 :Réponse des matériaux à une expérience de fluage-recouvrance.....	27
Figure II.7 : Module de relaxation d'un matériau viscoélastique à température.....	28
Figure II.8 : Eprouvette Charpy U.....	29
Figure II.9 : Eprouvette Charpy V.....	29

CHAPITRE III: MATERIELS ET PROTOCOLE EXPERIMENTALE

Figure III.1 : la fibre de verre coupé.....	31
Figure III.2 : La chaux	31
Figure III.3 : La poudre de verre.....	31
Figure III.4 :Les différents mélanges	32
Figure III.5 :Matières broyés.....	33
Figure III.6 :a) Machine à injection, b) moule éprouvette	34
Figure III.7 :Les différentes phases du cycle d'injection	35
Figure III.8 :Microscope électronique à Balayage	36
Figure III.9 :Machine de traction	38
Figure III.10 :Machine Charpy.....	38
Figure III.11 : Mouton Charpy.....	39

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Figure IV.1 : courbe de traction de mélange 100%PP.....	41
Figure IV.2 :courbe de traction de mélange (95%PP+5%FV).....	41
Figure IV.3 :courbes de traction des mélanges (95%PP+5%FV)+100%PP.....	41
Figure IV.4 :courbe de traction de mélange (95%PP+10%FV).....	42
Figure IV.5 :Superposition des Courbes de traction des mélanges (90%PP/10%FV) et 100%PP.....	42
Figure IV.6 :Courbe de traction du mélange (90%PP+5%PV).....	43
Figure IV.7 :courbe de traction du mélange (95%PP+5%PV) avec 100%PP.....	43
Figure IV.8 :courbe de traction du mélange (95%PP+10%PV).....	44
Figure IV.9 :courbe de traction du mélange (90%PP+10%PV) avec 100%PP.....	44
Figure IV.10 :courbe de traction du mélange (95%PP+5%CH)	45
Figure IV.11 :courbe de traction du mélange (95%PP+5%CH) avec 100%PP.....	45
Figure IV.12 :courbe de traction du mélange (95%PP+10%CH).....	46
Figure IV.13 :courbe de traction du mélange (90%PP/10% Chaux) avec 100%PP.....	46
Figure IV.14 :Variation de module d'élasticité en fonction de la concentration en FV.....	47
Figure IV.15 :Variation de la contrainte maximale en fonction de la concentration en FV.....	48
Figure IV.16 :Variation de l'allongement en fonction de la concentration en fibre de verre.....	48

Figure IV.17 :Variation du module d'élasticité en fonction de la concentration en chaux.....	49
Figure IV.18 :Variation de la contrainte maximale en fonction de la concentration en chaux.....	50
Figure IV.19 :Variation de l'allongement à la rupture en fonction de la concentration en chaux.....	50
Figure IV.20 :Variation du module d'élasticité en fonction de la concentration en poudre de verre.....	51
Figure IV.21 :Variation de la contrainte maximale en fonction de la concentration en poudre de verre.....	51
Figure IV.22 :Variation de l'allongement en fonction de la concentration en poudre de verre	52
Figure IV.23 :Courbe de la résilience de mélange PP/FV en fonction du taux de FV dans la matrice PPH.....	53
Figure IV.24 :Courbe de la résilience de mélange PV/PP en fonction du taux de PV dans la matrice PP.....	53
Figure IV.25 :Courbe de la résilience de mélange PP/CH en fonction du taux de CH dans la matrice PP.....	54
Figure IV.26 :Observation au MEB des faciès de rupture du mélange 100%PP.....	55
Figure IV.27 . Observation au MEB des faciès de rupture du mélange 95%PP+5%FV.....	55
Figure IV.28 Observation au MEB des faciès de rupture du mélange 90%PP+10%FV.....	56
Figure IV.29 . Observation au MEB des faciès de rupture du mélange 90%PP+10%CH.....	56
Figure IV.30 . Observation au MEB des faciès de rupture du mélange 95%PP+5%PV.....	57

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES POLYMERES

Tableau I.1: Structure de quatre polymères courants et leurs usages.

Tableau I.2 : Classification des charges

Tableau I.3 : Charges les plus utilisées

Tableau I.4:Caracterstiques du polypropylène

Tableau I.5 : Influence des paramètres structuraux sur les principales propriétés du polypropylène

CHAPITRE II : COMPORTEMENT MECANIQUE DS POLYMERS

CHAPITRE III : MATERIELS ET ESSAIS

Tableau III.1 : Caractéristiques du polypropylène utilisé

Tableau III.2 : Nomenclature des mélanges élaborés

Tableau III.3: Paramètre de la machine d'extrusion

Tableau III.4: Paramètre de la machine d'injection

CHAPITRE V : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Tableau IV.1 :propriétés mécaniques du mélange (PP/FV), mesurées en traction uniaxiale

Tableau IV.2 : propriétés mécaniques du mélange (PP/CH), mesurées en traction uniaxiale

Tableau IV. 3 : propriétés mécaniques du mélange (PP/PV), mesurées en traction uniaxiale

Tableau IV.4 :Résultats des essais de résilience des mélanges (PP/CH), (PP/PV) et (PP/FV)

Sommaire

Introduction générale.....1

Partie I : Analyse bibliographique

Chapitre I : Généralités sur les polymères

I.1.Introduction.....2

I.2.Définition des polymères.....2

I.3.Degré de polymérisation (DPn) des polymères.....3

I.4.La masse molaire des polymères.....3

I.5. Classification des polymères.....4

I.5.1 Selon l'origine des polymères.....4

I.5.2- Selon la structure des polymères5

I.5.3- Selon les propriétés thermiques et mécaniques des polymères.....6

I.6. Mode d'élaboration des polymères.....8

I.7.Mode de transformation des polymères thermoplastiques.....10

I.7.1 Extrusion des thermoplastiques.....10

I.7.2.Injection des thermoplastiques.....12

I.7.3 Calandrage des thermoplastes.....13

I.7.4 Le thermoformage des thermoplastiques.....13

I.8. Les renforts (charges) des polymères.....14

I.8.1.Polymère renforcé en verre.....16

I.8.2. Polymère renforcé en carbone16

I.8.3 Les polymères renforcés en carbone de calcium(CaCO_3).....17

I.8.4. Les polymères renforcés en talc.....17

I.8.5. Les polymères renforcés en mica.....	17
I.9.Utilisation des matières plastiques	18
I.9.1 Vêtements et textiles.....	18
I.9.2 Ameublement.....	18
I.9.3Articles ménagers.....	18
I.9.4 Emballages.....	18
I.9.5 Transports	18
I.9.6 Industrie chimie.....	18
I.9.7 Hygiène.....	19
I.9.8 Agriculture.....	19
I.10. Le polypropylène	19
I.11. le monomère.....	20
I.12.Les propriétés des polypropylènes	22
I.13.CONCLUSION.....	22

Chapitre II Comportement mécanique des polymères

Introduction.....	23
II.1.Essai de traction.....	23
II.1.1. Eprouvettes de traction.....	23
II.1.2. Principe de fonctionnement et de mesure d la machine de traction.....	24
II.1.3. Comportement contrainte-déformation.....	24
II.1.4.Effet de vitesse et équivalence Temps-Température.....	26
II.1.4.1. Expériences de fluage et de relaxation.....	26
II.2.L'essai de résilience.....	28
II.2.1 Définition du principe de l'essai.....	28
II.2.2. Les éprouvettes pour la résilience.....	28
II.2.2-1 Eprouvettes CHARPY U.....	28
II.2.2-2 Eprouvettes CHARPY entaille en V.....	29
II.3. Conclusion.....	29

Partie II : Etude expérimentale

Chapitre III Matériels et protocole expérimentales

Introduction.....	30
III.1. Matières premières.....	30
III.1.1. Le polypropylène.....	30
III.1.2. La fibre de verre.....	30
III.1.2.1.Les fibres d'isolation	30
III.1.3. La chaux.....	31
III.1.3.La poudre de verre.....	31
III.2.Procédés de mise en œuvre des mélanges de polymères.....	32
III.2.1 Préparation des mélanges.....	32
III.2.3 Injection des éprouvettes.....	33
III.3.Outils de caractérisation des formulations.....	36
III.3.1 Microscopie à balayage électronique	36
III.3.2 Essai de traction.....	37
III.3.3 Mesure de la résistance à l'impact.....	38
III.4 Conclusion.....	39

Chapitre IV Résultats et Interprétation

Introduction.....	40
IV.1 Essais de traction.....	40
IV.1.1 Courbes contrainte-déformation.....	41
IV.1.2 Propriétés mécaniques caractéristiques usuelles.....	47
IV.1.2.1 Propriétés mécaniques caractéristiques du mélange (PP/FV)	47
IV.1.2.2 Propriétés mécaniques caractéristiques du mélange (PP/CH).....	48

IV.1.2.3 Propriétés mécaniques caractéristiques du mélange (PP/PV).....	50
IV.2 Résultats de l'essai Charpy.....	52
IV.3 Résultats de micro dureté.....	54
IV.4 Résultats de l'observation au microscope électronique à balayage.....	55
IV.5.Conclusion	57
CONCLUSION GENERALE.....	58

Introduction générale

Depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, l'avènement des polymères synthétiques a révolutionné le domaine des matériaux. En raison de leur coût de production modique et de leurs propriétés exceptionnelles, un grand nombre d'entre eux sont maintenant plus répandus que leurs homologues naturels. Dans certains usages, le métal ou le bois ont été remplacés par des plastiques aux propriétés satisfaisantes et moins coûteux.

Les polymères sont de plus en plus présents dans la vie quotidienne. De tout temps l'homme a cherché à les exploiter pour construire, améliorer et agrémenter son habitat, pour se protéger et se vêtir, pour se déplacer et transporter, mais aussi pour décorer.

Les mélanges de polymères constituent un point fort de l'innovation et du développement dans les domaines des matériaux plastiques. En effet, les polymères conventionnels ne suffisent souvent pas à répondre aux exigences des utilisateurs. Les chercheurs ont développés toute une gamme de charges de polymères.

. Les polymères forment en général des mélanges immiscibles, caractérisés par l'existence d'une tension à l'interface entre les phases limitant les propriétés mécaniques de ces matériaux.

Le but de notre travail est de l'étude du changement du comportement mécanique d'un polymère thermoplastique après l'ajout de différentes charges. Le polymère choisit est le polypropylène, les charges sont au nombre de trois ; la fibre de verre, la poudre de verre et la chaux qu'on trouve dans le commerce, utilisée en maçonnerie. Ce travail s'articule donc autour de quatre chapitres. Les deux premiers chapitres sont des résumés des éléments bibliographiques pertinents pour cette étude. Le premier chapitre étudie les notions fondamentales sur les polymères (définition d'un polymère, classification des polymères,...etc...), le second chapitre portera sur le comportement mécanique des polymères, le troisième chapitre sera consacré à l'étude des différentes 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.

Chapitre I : Généralités sur les polymères

I.1.Introduction

On utilise les polymères naturels, tirés des végétaux et des animaux, depuis des siècles. Ces matériaux comprennent le bois, le caoutchouc, le coton, la laine, le cuir et la soie. D'autres polymères naturels, tels que les protéines, les enzymes, les amidons et la cellulose, jouent un rôle important dans les processus biologiques et physiologiques des végétaux et des animaux. Les outils de la recherche scientifique moderne ont permis de déterminer la structure moléculaire de ce groupe de matériaux. Dans certains usages, le métal ou le bois ont été remplacés par des plastiques aux propriétés satisfaisantes et moins coûteux. [1]

Les matériaux polymères sont généralement utilisés pour leurs propriétés mécaniques particulières et leur aptitude à être aisément mis en forme (processabilité).

I.2.Définition des polymères

Un polymère est une macromolécule formée par l'enchaînement covalent d'un très grand nombre d'unités répétitives, dénommées monomères. Leur masse molaire est très élevée et souvent supérieure à 10 000 g/mol, Le terme polymère est pour la première fois utilisé en 1966 par Berthelot lors d'une de ses observations, il désigne ainsi probablement le premier polymère synthétique reconnu, le polystyrène[2].

On appelle aussi le polymère une grande molécule constituée d'unités fondamentales appelées monomères (ou motifs monomères) reliées par des liaisons covalentes.

Exemple de monomère PE (Polyéthylène)

$\text{CH}_2=\text{CH}_2$: éthène ou éthylène

Sa représentation : $-(\text{CH}_2-\text{CH}_2)_n-$

Utilisation :

- Sac plastique Sac poubelle

-Bouteille de produit d'entretien [4]

Chapitre I : Généralités sur les polymères

Le Tableau I.1 montre quelques exemples de polymères, leurs structures et leurs usages

Tableau I.1 : Structure de quatre polymères courants et leurs usages.

Monomère	Polymère	Quelques usages
Ethylène $\text{CH}_2 = \text{CH}_2$	Polyéthylène ..- $\text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2$ -..	Emballages, sacs poubelle, bouteilles, bassine
Styrène $\text{CH} = \text{CH}_2$	Polystyrène ..- $\text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH} - \text{CH}_2$ -..	Emballages, plaques isolantes
Chlorure de vinyle $\text{CH}_2 = \text{CHCl}$	Polychlorure de vinyle (P.V.C.) $\text{CH}_2 - \text{CHCl} - \text{CH}_2 - \text{CHCl} - \text{CH}_2 - \text{CHCl}$	Tuyaux, disques, bouteilles d'eau
Propylène $\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{CH}_3$	Polypropylène ..- $\text{CH}_2 - \underset{\text{CH}_3}{\text{CH}} - \text{CH}_2 - \underset{\text{CH}_3}{\text{CH}} -$..	Habillement, tapis, tissus industriels, cordages

I.3.Degré de polymérisation(DP_n) des polymères

La polymérisation des monomères ne conduit pas forcément à un produit unique, c'est-à-dire que la valeur de « n » n'est pas connue a priori. Ainsi la masse molaire d'un polymère n'est pas unique et elle dépend de la valeur de « n ». Pour rendre compte de cette dispersion de masse molaire moléculaire, on définit le nombre moyen de motifs par chaîne qu'on appelle degré de polymérisation : soit M la masse molaire du polymère et M₀ la masse molaire du monomère, alors le degré de polymérisation est :

$$\text{DP}_n = \frac{M}{M_0} \quad [4].$$

I.4.La masse molaire des polymères

Les polymères à très longue chaînes ont une masse molaire extrême élevée durant la polymérisation, les macromolécules synthétisées à partir de molécules plus petites forment des chaînes dont la longueur et la masse molaire sont variables. C'est pourquoi on donne généralement la masse molaire moyenne que l'on détermine en mesurant diverses propriétés physiques telles que la viscosité et la pression osmotique.

On définit la masse molaire moyenne de plusieurs façons. Pour obtenir la masse molaire moyenne en nombre M_n, on répartit les chaînes en une série de plages de masses molaires, puis on détermine la proportion numérique des chaînes faisant partie de chaque plage. l'expression mathématique de la masse molaire moyenne en nombre est de :

Chapitre I : Généralités sur les polymères

$$M_n = \sum x_i M_i$$

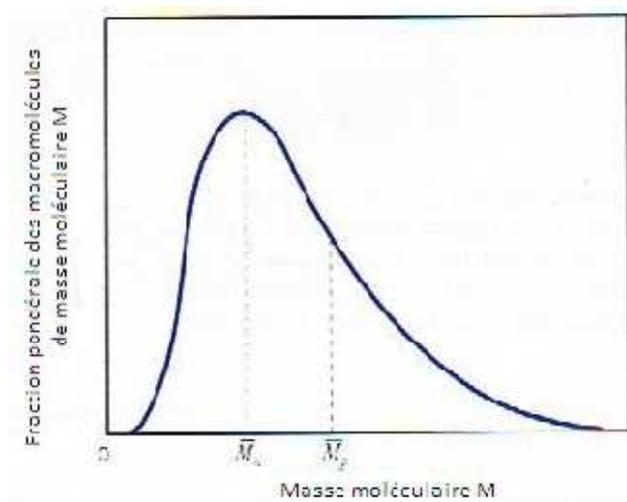
dans laquelle M_i représente la masse molaire moyenne de la plage de masses molaires n_i , et x_i proportion des chaînes faisant partie de cette plage.

La masse molaire moyenne en masse M_m repose sur la proportion massique des molécules faisant partie de diverses plages de masses molaires, on la calcule à l'aide de l'équation suivante :

$$M_m = \sum f_i M_i$$

Où ici aussi, M_i est la masse molaire moyenne d'une plage de masses molaires, alors que f_i représente la proportion massique de molécules faisant partie de cette plage. [1]

La figure I.1. ci-dessous représente la distribution des masses molaires dans un polymère



La Figure I.1. Distribution des masses molaires dans un polymère [5]

I.5. Classification des polymères

On classe les polymères de différentes façons :

I.5.1 Selon l'origine des polymères

Il existe deux polymères :

- Des polymères naturels : cellulose, caoutchouc, protéine, laine.
- Des polymères synthétiques : polyéthylène (PE), polychlorure de vinyle (PVC), polystyrène (PS), polyéthylène téréphtalate (PET) [4].

I.5.2- Selon la structure des polymères

Chapitre I : Généralités sur les polymères

On distingue :

- a) **Les homopolymères:** homopolymère est un polymère qui comporte des motifs monomères tous identiques.[3]. Aussi sont formés à partir d'un unique monomère. Exemple : PS [4]
- b) **Les copolymères :** est un polymère qui comporte des motifs monomères de deux ou plus sortes différentes.[3]. Aussi sont formés à partir de monomères différents. Exemple : PET [4]

On distingue les polymères : Linéaires, Ramifiés, Réticulés. [3]

c) Polymères linéaires

Les polymères linéaires sont constitués de grandes chaînes de monomères reliés entre eux par des liaisons covalentes. Ces macromolécules sont liées entre elles par des liaisons secondaires qui assurent la stabilité du polymère. Ces liaisons secondaires sont des liaisons ou ponts hydrogène ou des liaisons de Van der Waals. Lorsque ces liaisons existent, le matériau devient rigide et présente un comportement de solide, la température à laquelle se produit cette évolution s'appelle la température de transition vitreuse. [3]

d) Polymères ramifiés

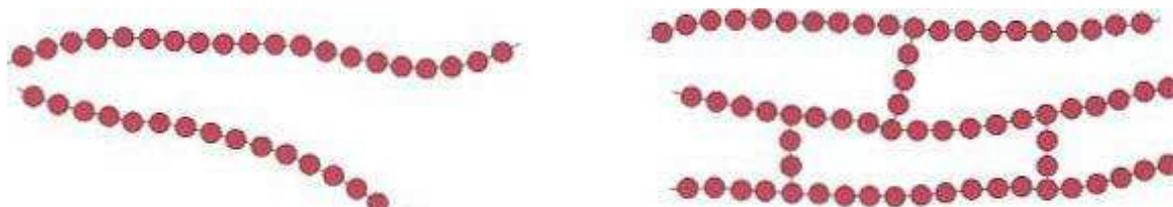
Des chaînes homopolymériques ou copolymériques peuvent se greffer sur d'autres chaînes au cours de la polymérisation. Au-dessus de la température de transition vitreuse, ces matériaux présenteront un comportement visqueux plus marqué que les polymères linéaires. [3]

e) Polymères réticulés

La réticulation correspond à la formation de liaisons chimiques suivant les différentes directions de l'espace au cours d'une polymérisation, d'une polycondensation ou d'une polyaddition, et qui conduit à la formation d'un réseau.[3]

La figure I.2 représente les schémas d'une structure moléculaire : a) linéaire, b) ramifiée, c) a liaisons transversales, d) réticulée (tridimensionnelle). Chaque cercle représente un monomère.

a)c)



b)d)

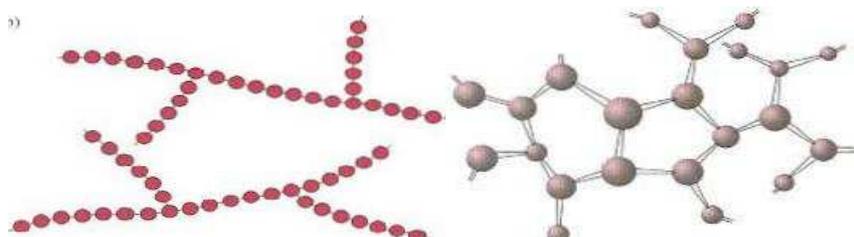


Figure I.2 Schémas d'une structure moléculaire [1].

I.5.3- Selon les propriétés thermiques et mécaniques des polymères

Il existe deux grandes familles de polymères, les thermoplastiques et les thermodurcissables. Mais on retrouve aussi des élastomères qui sont des polymères présentant des propriétés élastiques, obtenues après réticulation. Ils supportent de très grandes déformations avant rupture et sont déformables de manière réversible[2].

a) . Les polymères thermoplastiques

Le polymère thermoplastique est constitué de chaînes linéaires ou ramifiées à liaisons covalentes. Ces chaînes sont liées entre elles par des liaisons faibles de type Van der Waals et hydrogène par exemple. Les thermoplastiques peuvent être dissous dans certains solvants et se ramollissent à la chaleur d'où le terme (thermoplastique)[3].

Sous l'effet de la chaleur, il se ramollit et devient malléable, en se refroidissant, il se durcit en conservant la forme donnée à chaud. Ex : PE, PS, Polyamide.

Explication : Les polymères thermoplastiques sont linéaires ou ramifiés.

- ✓ Polymères froids et durs : les chaînes sont proches grâce aux interactions intermoléculaires (Van der Waals ou liaisons H).
- ✓ Polymères chauds et malléables : les chaînes sont éloignées : les interactions intermoléculaires se sont rompues sous l'effet de la chaleur. On donne une nouvelle forme au polymère.

Chapitre I : Généralités sur les polymères

- ✓ Polymères froids et durs : les interactions intermoléculaires se reforment, en conservant la forme donnée à chaud[4].



Figure I.3. Polymères d'enchevêtrement (nœud physique) ,(pelote macromoléculaire)

b) Les polymères thermodurcissables

Le polymère thermodurcissable est constitué de chaînes linéaires réticulées entre elles. Les chaînes sont liées dans l'espace par des liaisons fortes de type covalent. Nous sommes donc en présence d'un réseau tridimensionnel insoluble et infusible [3].

Sous l'effet de la chaleur, il devient dur et ne peut plus fondre. Une nouvelle hausse de température mènerait à une destruction du polymère.

Explication : les polymères thermodurcissables sont réticulés: ils sont obtenus par réaction chimique : les réticulations (liaisons covalentes) sont formées au cours du chauffage et ne peuvent ensuite plus être rompues :

- ✓ Avant chauffage les chaînes ne sont pas reliées entre elles.
- ✓ Au cours du chauffage, des liaisons covalentes se forment par réaction chimique : les chaînes sont alors reliées entre elles [4].

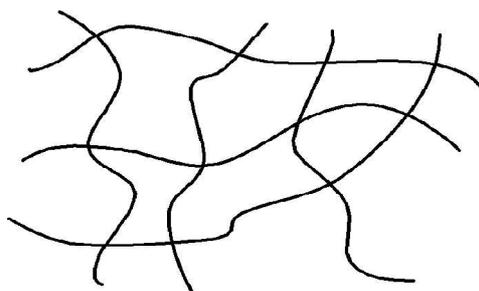


Figure I.4 Polymère réticulé (liaison covalente aux croisillons " noeud chimique ")

c) Les élastomères

Ils s'étirent sous l'effet d'une action mécanique et reviennent à leur forme initiale lorsque l'action mécanique cesse. Ex : caoutchouc, polyester.

Explication :

Chapitre I : Généralités sur les polymères

- ✓ Sans action mécanique : les chaînes sont reliées entre elles par des liaisons covalentes incassables a priori.
- ✓ Avec action mécanique : les chaînes s'étirent mais sont toujours reliées entre elles grâce aux liaisons covalentes[4].

I.6. Mode d'élaboration des polymères

La chimie des polymères se base essentiellement sur trois procédés d'élaboration qui sont :

➤ . La Polymérisation

On appelle polymérisation la réaction chimique qui permet d'assembler entre eux les différents monomères par le biais de liaisons covalentes (mise en commun d'électrons des atomes constitutifs de la molécule) et transformer les bases liquides ou gazeuses des matières premières en plastomères. Il en existe deux types principaux : la polymérisation par étapes, et la polymérisation en chaîne.

Le premier type de réaction est appelé polymérisation par étape où la croissance des macromolécules est le résultat de réactions chimiques classiques entre les groupements fonctionnels réactifs des monomères.

Une réaction de polycondensation avec libération d'un sous-produit de la réaction (souvent de l'eau...) est une réaction de polymérisation par étape [3].

➤ La Polycondensation

La structure de certains monomères peut présenter ce qu'on appelle en chimie des groupes fonctionnels, c'est-à-dire un atome, ou un groupe d'atomes, dont les propriétés chimiques restent similaires au sein de composés différents, et peuvent réagir ensemble.

Au cours d'une opération de polycondensation, les monomères présentant des groupes fonctionnels réagissent entre eux de manière aléatoire, à l'aide d'un catalyseur chimique (un acide, par exemple) et d'une série d'étapes de condensation, qui se chargent d'éliminer les molécules indésirables, comme celles de l'eau. Les monomères forment alors de petites sections de chaînes qui vont progressivement s'associer, tronçon par tronçon, se transformer en dimères (une molécule ne comportant que deux sous-unités), en trimères, en oligomères, et enfin en polymères artificiels à chaîne longue (ou polymères séquencés). La masse molaire (ou quantité de matière) augmente donc au cours du temps de réaction, et réduit par capillarité la concentration en monomères. Les polycondensats (polymères obtenus par polycondensation) ne représentent aujourd'hui que 10% de la production mondiale de matières plastiques, mais le cumul de de leurs qualités (polyvalence, haute-résistance thermique ou chimique, haute ténacité de la fibre etc.) font d'eux des polymères

Chapitre I : Généralités sur les polymères

particulièrement nobles, qui figurent après utilisation parmi les déchets recyclables. Sont ainsi synthétisées par ce type de réaction - également utilisée en fin de cycle pour la valorisation des déchets plastiques - les familles de matériaux solides suivantes : les fibres polyamides (comme le nylon ou le kevlar), les polyesters (comme le tergal), les polyuréthanes (utilisés pour faire de la mousse isolante) ou certaines résines, comme celles qui composent le formica [9].

Le deuxième type de réaction est appelé **polymérisation en chaîne** et résulte de la formation d'un centre actif A^* qui fixe de façon successive de nombreuses molécules de monomère :



Le polymère obtenu présente un degré de polymérisation $n+1$.

Une **réaction de polyaddition** sans libération de sous-produit est une réaction de Polymérisation en chaîne. Dans ce cas, le mécanisme implique généralement l'ouverture D'une double liaison ($C=C$, par exemple) ou l'ouverture d'un cycle[3].

➤ La polyaddition

La polyaddition est une réaction qui permet de relier consécutivement les monomères, par additions successives et contrôlées, sur une extrémité de la chaîne macromoléculaire. La nature du monomère situé à cette extrémité détermine également le nom de la réaction. S'il s'agit d'un radical chimique (c'est-à-dire avec un ou plusieurs électrons non reliés sur sa couche externe), la polyaddition est aussi appelée polymérisation radicalaire. A contrario, si cette extrémité est ionique, on parle de polymérisation anionique ou cationique.

La polyaddition se divise en trois phases majeures :

- La phase d'amorçage, au cours de laquelle un activateur chimique se lie à un monomère, et forme un centre actif qui définit le point de départ de la polymérisation.
- La phase de propagation, qui voit le monomère activé se mettre en relation avec le dernier monomère récupéré en fin de chaîne, et augmenter progressivement la masse du polymère en formation (qui possède ici la même structure que les monomères, puisqu'aucune molécule n'est éliminée durant le processus).
- La phase de terminaison, durant laquelle un agent chimique permet au polymère de désactiver le monomère situé à l'extrémité de la chaîne moléculaire.
- Plus de 90% de la production mondiale de matières plastiques s'effectue avec des composés issus d'une polyaddition. Au sein de cette vaste famille de polymères, on distingue notamment le polyéthylène (que l'on retrouve dans les matériaux recyclables comme les films protecteurs, les emballages alimentaires ou certains isolants.), le polystyrène (bien connu, il est semi-rigide, peut servir à fabriquer par exemple des

jouets ou des pots de yaourts, et figure parmi les déchets recyclables traités par Paprec group), le polychlorure de vinyle (bouteilles, encadrements de portes ou de fenêtres), le poly-acétate de vinyle, qui peut servir à fabriquer du vernis ou de la peinture, et le polypropylène (produit en film ou en pièces, on le trouve dans l'habitacle de nos automobiles, mais aussi dans les emballages alimentaires. Il existe d'ailleurs plusieurs grades de polypropylène, comme le PP « injection », qui figure parmi les plastiques recyclables facilement, ou le PP « film », qui intègre plus difficilement le cycle de recyclage des plastiques [9].

I.7.Mode de transformation des polymères thermoplastiques

Les matières plastiques thermoplastiques se ramollissent au chauffage : elles sont utilisées sous forme de poudre ou de granulés que l'on fond. On ajoute souvent des agents de moulage, des stabilisants, des colorants, des plastifiants...La répartition homogène de ces additifs se fait par des mélangeurs (à cylindre par exemple). La mise en œuvre pour obtenir les formes désirées est réalisée par extrusion en suite en injection.

I.7.1 Extrusion des thermoplastiques:

C'est une technique de transformation continue, rapide et peu coûteuse ; elle est très répandue. Elle permet à partir de granulés ou de poudre de polymère, la fabrication de tubes et autres profilés, de feuilles, de rubans, de tiges, de plaques, de gaines etc...Des granulés de polymère sont chauffés et comprimés par une vis sans fin qui tourne dans un fût chauffé et qui pousse le plastique vers un outillage appelé filière. La visse tasse et mélange le polymère qui se fluidifie à l'approche de l'extrémité chaude du fût. Là, il est poussé à travers la filière puis refroidi pour garder la forme transformée. Il existe différents types d'extrudeuses, dont les double vis ou bi-vis qui permettent d'augmenter les contraintes de cisaillement exercées sur le matériau. Elles sont équipées de deux vis à filets interpénétrant tournant dans un fourreau bicylindrique. Les deux vis peuvent tourner dans le même sens (vis corotatives), ou en sens contraire (vis contrarotatives) [11]



Figure I.5 Ligne d'extrusion (photo internet)

-l'extrémité de la ligne d'extrusion comporte une filière qui peut être de différentes formes selon le produit finale extrudé :

a) **Extrusion de tubes, de profilés creux, de profilés pleins, de joncs...**

La filière est adaptée à la forme de l'extrudât, la technique permet la fabrication de produits semi-ouvrés en continu ayant un profil déterminé. Pour éviter que le profil ne se déforme en sortie de filière, on le soumet au tirage ; il peut être refroidit dans un bac d'eau. .

b) **Extrusion-gonflage ou soufflage de gaine**

Le polymère fondu passe d'abord dans une filière de tube. A la sortie de la filière, il est étiré longitudinalement par un système de rouleaux pinceurs. Une certaine quantité d'air emprisonnée à l'intérieur de la gaine assure son gonflage, c'est-à-dire son étirage transversal.

La gaine est refroidie par un jet d'air comprimé appliqué en sortie de filière par un anneau de refroidissement. A partir d'une certaine ligne, appelée ligne de figeage, elle est entièrement solidifiée et ne se déforme plus [11].

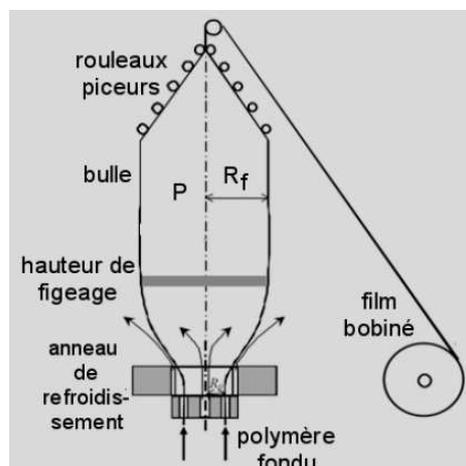


Figure I.6 Procédé de soufflage de gaine

I.7.2. Injection des thermoplastiques

Le procédé consiste à ramollir la matière plastique pour l'amener en phase plastique, à l'injecter dans un moule pour le mettre en forme et à la refroidir.

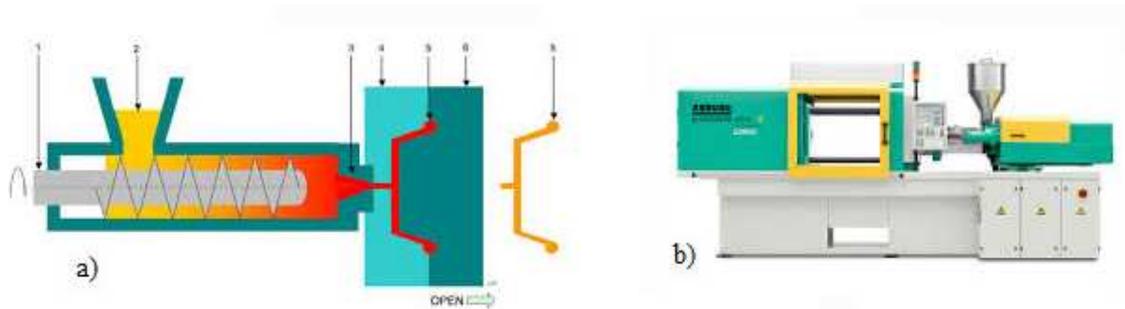


Figure I.7 Machine d'injection(a) schéma de la machine, b) photo d'une machine d'injection)

On peut distinguer 3 phases pendant l'injection :

- le remplissage (ou injection) : le polymère remplit l'enceinte et occupe le volume de la cavité. On se sert de la vis comme un piston
- le maintien (bourrage ou compactage): le polymère est compacté dans l'empreinte (car il est compressible) pendant le refroidissement
- le refroidissement: le polymère est figé et la pièce est éjectée quand sa rigidité est suffisante

.On dose une nouvelle quantité de matière pour la pièce suivante pendant le refroidissement de la pièce, par rotation de la vis qui amène de la matière en bout de vis (buse) [11].

➤ **Injection soufflage**

Elle permet de fabriquer des corps creux qui présentent de bonnes propriétés mécaniques. Technique essentiellement réservée aux thermoplastiques. Le cycle de fabrication se compose d'étapes:

- 1) Réalisation d'une préforme par injection.
- 2) Transfert de la préforme dans une station de réchauffage.
- 3) Transfert de la paraison chaude dans un moule et soufflage pour que le polymère entre en contact avec les parois du moule.
- 4) Refroidissement et éjection de la pièce.



Figure I.8. Pièce finale à partir d'un thermoplastique

I.7.3 Calandrage des thermoplastes

Équivalent du laminage pour les matières plastiques, est une opération qui consiste à faire passer un matériau entre deux cylindres pour le lisser ou le lustrer (le rendre brillant), ou pour produire un film ou une feuille. Des matériaux de plus faible épaisseur (produits semi-finis, feuilles, plaques, films, crêpes) peuvent être obtenus par calandrage d'un système thermoplastique ou élastomère entre des cylindres éventuellement chauffants.

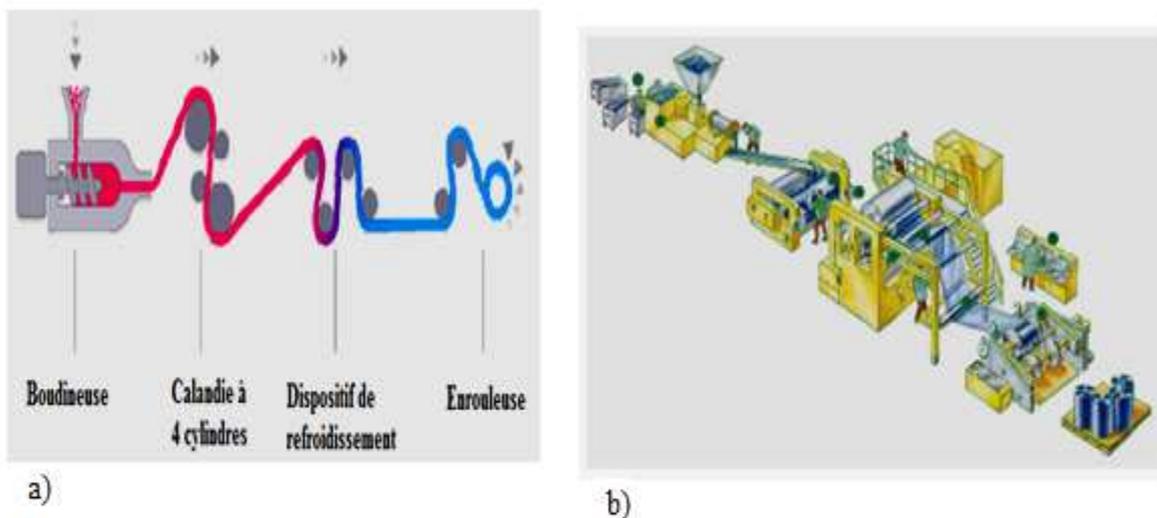


Figure I.9 Machine à calandrage : a) Schéma représentant le principe de calandrage, b) Schéma d'une ligne complète de calandrage photos internet

I.7.4 Le thermoformage des thermoplastiques

C'est un procédé de seconde transformation (sous vide le plus souvent, ou sous pression); La matière arrive sous forme de plaques, feuilles, tubes ou profilés, puis est ramollie par chauffage avant d'être mise en forme par application sur un moule géométrique simple (à profiter de cette ductilité pour le mettre en forme avec un moule). Cette technique est utilisée pour produire toutes sortes d'objets aux formes creuses, comme les pots de yaourts ou le nez du TGV.

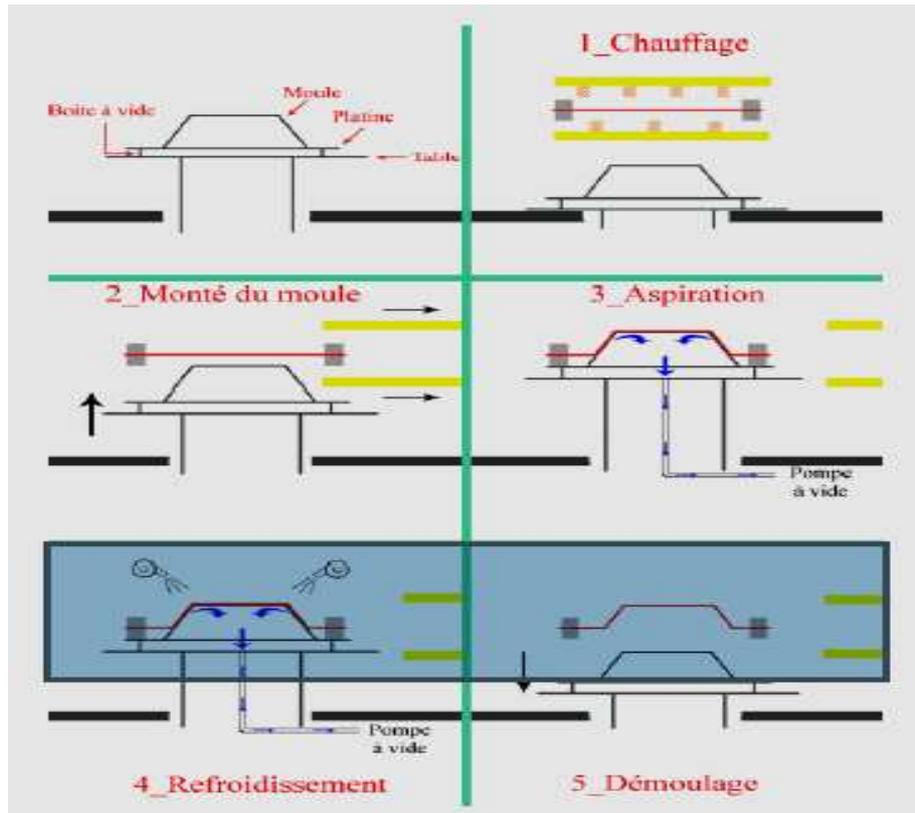


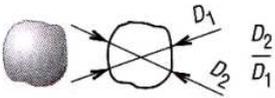
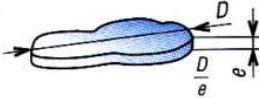
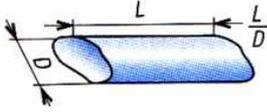
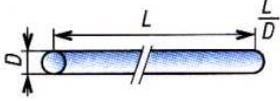
Figure I.10: Cycle de thermoformage

I.8. Les renforts (charges) des polymères

On distingue par renfort tout produit ni soluble ni miscible qui, mélangé à un polymère, permet d'améliorer une ou plusieurs propriétés ou caractéristiques (propriétés électriques, mécaniques, chimiques, coût de production) du mélange final.

les renforts sont classés suivant leur nature chimique (organique, minérale) et leur géométrie au travers de leur rapport de forme (quotient de la plus grande et de la petite dimension d'une particule).

Tableau I.2. Classification des charges

nature	géométrie	rapport de forme	exemples
granulaire ou sphérique		1	billes de verre, CaCO ₃ noir de carbone
lamellaire		10 30-40	talc mica
aciculaire (aiguilles)		10-20 10-100	wollastonite fibres courtes (L < 2 mm)
fibrillaires		100-infini	fibres longues (L ≥ 2 mm) verre, carbone, Kevlar

Le tableau I.3 nous donne quelques propriétés des charges les plus couramment utilisées

Tableau I.3 Charges les plus utilisées

Renforts	Masse volumique g/cm ³	Résistance traction N/mm ²	Allongement traction A%	Module traction N/mm ²	Indice de couts en masse
-Kevlar 29	1,44	2 700	4	60 000	-
-Kevlar 49	1,45	2 700	2,1	130 000	12
-Verre E	2,60	3 400	2,6	73 000	1
-Verre R	2,53	4 400	4	96 000	4
-Carbone haut module	1,95	2 200	0,6	400 000	100
-Carbone haut résistance	1,90	2 900	1,2	250 000	65
-Bore	2,6	3 200	0,9	400 000	500
-Acier	7,9	2 900	1,9	200 000	-
-Mica (paillettes)	2,9	300	-	172 000	-

Chapitre I : Généralités sur les polymères

Les différentes charges utilisées sont donnés dans ce qui suit :

I.8.1. Polymère renforcé en verre

Le verre sous forme filée présente une excellente résistance mécanique ainsi qu'une remarquable inertie chimique, tenue thermique et isolation électrique. Les fils de verre sont désignés comme suit (NF ISO 6355)

Le verre se représente sous forme de :

- billes améliorant la coulabilité de résines et la résistance en compression.
- fibres broyées sous forme de nodules ou poudres fines pour le renforcement de polymère injectable, de résine de coulée, de prémix (longueur inférieure à 300 µm).
- mat : produit constitué de filaments, de fibre discontinue ou de file de base, coupée ou non, L'épaisseur est toujours faible, à la mise en œuvre de libérer les fibres pour une mise en forme. Ces mats permettent un renforcement multidirectionnel et un bon aspect de surface [10]

I.8.2. Polymère renforcé en carbone

Le carbone est utilisé dans les polymères sous trois formes très différentes :

- les fibres de carbone
- le noir de carbone <carbon black>
- le graphite

a) .Les fibres de carbone

Les fibres sont obtenues par pyrolyse en atmosphère non oxydant de matière organique (orienté et réticulé) :

- -fibres cellulosique qui ont constitué la matière pour la première génération de fibres de carbone.
- -fibres poly acrylonitrile réticulée. Les remarquables propriétés de ces fibres font qu'elles trouvent des applications dans des pièces qui seront hautement sollicitées. La densité est de 1.75 à 1.95. Le module d'élasticité et la résistance en traction sont voisines de ceux de l'acier pour une densité 4 fois inférieure, c'est-à-dire l'intérêt de ce renfort le fluage est réduit et les propriétés en fatigue excellent.

Les fibres de carbone s'utiliseront en :

- fibres broyées (longueur de 30 µm à 3mm)
- fibres courtes (longueur 5 mm)
- fibres longues (longueur de 5 à 20 mm) pour préimprégnés.
- tissu pour moulage de haute qualité.

Chapitre I : Généralités sur les polymères

-tissage tridimensionnel, fabrication récent. Le tissage a la forme de la pièce, il est rempli en suite de résine (pour une pièce haute performance).[10]

a) .Le noire de carbone

Historiquement utiliser dans les caoutchoucs naturels pour leur apporter une résistance au vieillissement ultraviolet, les « carbon black » sont aujourd'hui les stabilisant d'usage courant dans bon nombre de polymères noire de carbone servent aussi de colorant noir et plus récemment, de charge conductrices dans la fabrication des plastiques conducteurs.[10]

b) Le graphite

Pour des applications réclamant un bon frottement et une usure limitée (palier, coussinet...), on utilise le graphite comme renfort des polymères possédant déjà de bonnes propriétés (polyamide, polyoxyméthylène) NF T 51-143. On réalise ainsi des pièces autolubrifiantes.

I.8.3 Les polymères renforcés en carbone de calcium(CaCO_3)

Le carbonate de calcium (craie) est le plus utilisé(en tonnage) des minéraux dans l'industrie plastique. Il permet de réduire les couts en réduisant le contenu en polymère par piece.de forme granulaire il permet aussi de réduire les retraits et le vieillissement UV ; par contre, la sensibilité à la rayure des pièces est visiblement accentuée. On l'utilise dans les polyoléfines pour la fabrication de mobilier de jardin .[10]

I.8.4. Les polymères renforcés en talc

De forme lamellaire, le talc représente un renfort très populaire dans les plastiques.il permet de réduire les anisotropies de retraits, d'augmenter la résistance thermique, la rigidité et d'obtenir une coloration en blanc.sa faible dureté, sur l'échelle des minéraux, n'entraîne pas d'usure des outillages.[10]

I.8.5. Les polymères renforcés en mica

Les propriétés du mica en font aujourd'hui un agent de renforcement très économiques ;

- structure lamellaire (renforcement bidirectionnel)
- excellente isolation électrique
- grande rigidité mécanique
- excellente tenu thermique
- propriétés anti ultraviolets

Déjà utilisé dans des résines thermodurcissable pour assurer une tenue en température et une meilleure stabilité dimensionnelle, les micas (granulométrie de 20 à 450 μm) trouvent des applications dans les thermoplastiques injectés :

- polypropylène (pièces automobiles, électroménager)

-polyamides

-polyesters thermoplastiques.

Le mica muscovite français présenté l'avantage d'être blanc et de permettre des tons pastels pour les pièces, alors que la suzorite brune (Amérique du nord) ne permet que les teintes foncées. [10]

I.9.Utilisation des matières plastiques

Il est juste de dire que nous vivons, à l'heure actuelle dans un environnement de matières plastiques puisque nous les trouvons, sous formes de biens de consommation, dans tous les domaines :

I.9.1 Vêtements et textiles

-Sous-vêtements en nylon

-Survêtements : pulls en acrylique

-blousons et manteaux en similicuir

I.9.2 Ameublement

-Métal en mousse polyptère.

-Tapis, cuisine double de mousse

I.9.3Articles ménagers

-Article pour camping.

-poubelles en PE ou PVC.

-Vaisselle incassable.

I.9.4 Emballages

-Alimentaire : pots de yaourt.

-Industriel : sacs poubelle

I.9.5 Transports

-Citerne routières

- Tapis de voiture

-Feux de position

I.9.6 Industrie chimie

-Revêtement de cuves

-Cuves de stockage

I.9.7 Hygiène

- Biberons incassable
- Tubes pour transfusion sanguine
- Seringues stériles a jeter

I.9.8 Agriculture

- Tubes d'irrigation et drainage
- Bancs de jardin

I.10. Le polypropylène :

Les polypropylènes (PP), sujet de notre étude, sont des thermoplastiques semi cristallins obtenus par la polymérisation du propylène ($\text{CH}_3\text{CH}=\text{CH}_2$).

Le polypropylène est ductile dans les conditions usuelles de traction à température ambiante. Sa température de fusion est comprise entre 130 à 170 °C, son module d'Young est compris entre 600 à 1600 MPa. Il est recyclable facilement. Le polypropylène peut être représenté par la formule générale suivante :

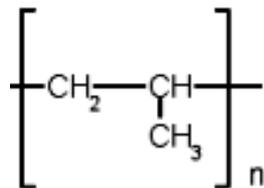


Figure I.11 : Formule générale du Polypropylène (PP)

Ils existent sous les trois formes suivantes qui dépendent de la position des groupes méthyle par rapport au plan contenant la chaîne carboné principale :

- Polypropylène isotactique : Les groupes méthyles sont répartis du même côté de la chaîne moléculaire

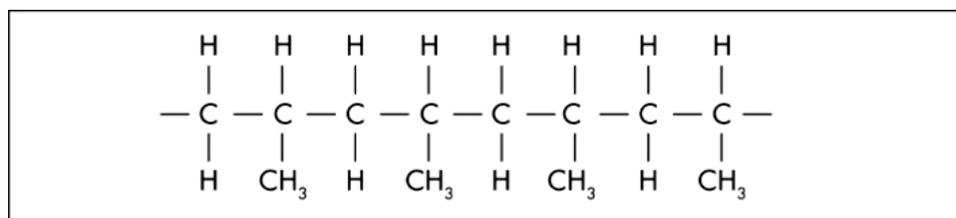


Figure I.12 : Polypropylène isotactique

- , Lepolypropylène syndiotactique: Les groupes méthyles sont disposés alternativement de part et d'autre de la chaîne moléculaire

Chapitre I : Généralités sur les polymères

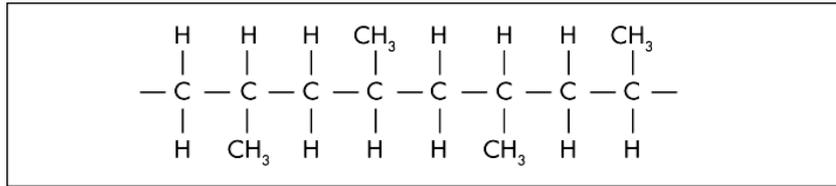


Figure I.13 : Polypropylène syndiotactique

- polypropylène atactique. Dans ce cas la répartition des groupes méthyle est aléatoire

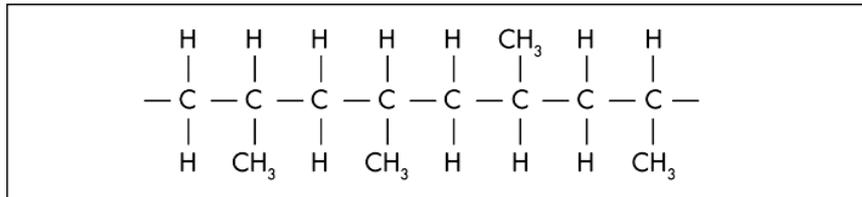


Figure I.14 : Polypropylène atactique

I.11.le monomère

Un monomère est un composé constitué de molécules simples pouvant réagir avec d'autres monomères pour donner un polymère. Contrairement au polymère, un monomère a une faible masse moléculaire [3].

Le polypropylène peut être fabriqué à partir du monomère propylène par polymérisation Ziegler-Natta et par polymérisation par catalyse par un métallocène.

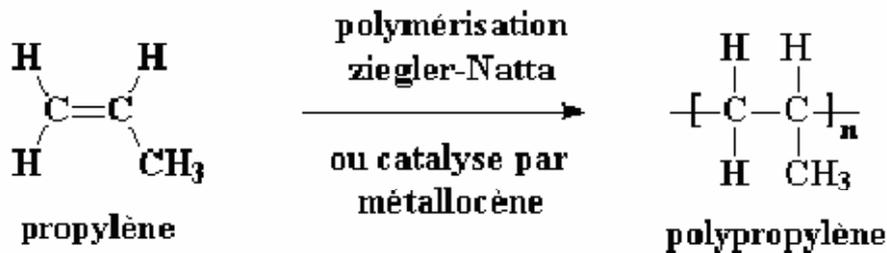


Figure I.15. Les étapes de fabriquer le PP à partir D4un monomère

La polymérisation par catalyse par un métallocène peut faire des choses étonnantes pour le polypropylène. Le polypropylène peut être fait avec des tacticités différentes. Le PP le plus souvent utilisé est isostatique. Ceci signifie que les groupes méthyle sont tous du même côté de la chaîne comme ceci :

Mais quelques fois on utilise du polypropylène atactique. Atactique veut dire que les groupes méthyles sont placés au hasard de part et d'autre de la chaîne comme ceci:

Les polypropylènes varient par leurs modes d'élaboration qui conduit à son tour à une grande variation dans les propriétés mécaniques et physiques de ces polymères

Chapitre I : Généralités sur les polymères

➤ Les différents types de Polypropylènes

Les catalyseurs et les procédés actuels permettent la fabrication de trois types de polypropylènes (polypropylène isotactique) :

- **les homopolymères** : ce sont des polymères obtenus par la polymérisation d'un seul monomère (propylène). [4]
- **les copolymères statistiques** : ce sont des polymères obtenus par la copolymérisation de propylène et d'éthylène. [4]
- **Les copolymères séquencés ou à blocs** : ce sont des polymères obtenus par copolymérisation en plusieurs étapes de séquence macromoléculaires de structures différents (homopolymère ou copolymère), le comonomère étant généralement de l'éthylène. [4]

I.12. Les propriétés des polypropylènes

Les propriétés des polypropylènes en général, qu'ils soient des homopolymères ou des copolymères, dépendent de leur cristallinité, de leurs masse moléculaire, de leurs distribution moléculaire, ainsi que de leur composition chimique.

On résume les différentes propriétés physiques et mécaniques dans le tableau qui suit ;

Tableau IV.4 : caractéristiques des polypropylènes

	Propriétés	Unité	Homopolymères non chargés	Copolymères séquencés	Copolymères statistiques
Propriétés physiques	Masse volumique	g/cm ³	0.900 à 0.910	0.890 à 0.905	0.890 à 0.900
	Indice de fluidité à chaud à 230°C sous 2.16Kg	g/10min	0.3 à 40	0.25 à 35	4 à 14
	Absorption d'eau	%	≈ 0.05	≈ 0.05	≈ 0.05
	Perméabilité aux gaz - hydrogène - oxygène - azote - vapeur d'eau	m ² *Pa ⁻¹ *s ⁻¹	0.49*10 ⁻¹⁶ 0.75*10 ⁻¹⁶ 0.37*10 ⁻¹⁷ 0.37*10 ⁻¹⁷		
Propriétés mécaniques	Température de fusion	°C	160 à 170	160 à 168	130 à 164
	Température de ramollissement Vicat, sous 1Kg	°C	150 à 155	140 à 147	120 à 145
	Température maximale d'utilisation	°C	100	100	100

Chapitre I : Généralités sur les polymères

	Conductivité thermique	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0.22	0.22	0.22
	Capacité thermique massique	$J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$	1700	1700	1700
	Coefficient de dilatation linéique	K^{-1}	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$
Propriétés mécaniques	Contrainte au seuil d'écoulement en traction	MPa	32 à 38	17 à 33	27 à 30
	Résistance à la rupture	MPa	31 à 42	28 à 38	28 à 38
	Allongement à la rupture	%	100 à 600	800 à 900	450 à 900
	Résistance en flexion	MPa	42 à 56	35 à 49	40 à 45
	Module d'Young en traction	MPa	1100 à 1600	700 à 1300	1000 à 1400
	Résistance au choc (Charpy) à 23°C	KJ/m^2	4 à 10	10 à 40	10 à 20
	Dureté Shore D		72 à 74	67 à 73	68 à 73

Le tableau IV.5 nous renseigne sur la variation de certaines propriétés physiques et mécaniques avec l'augmentation de la cristallinité ainsi que de la masse moléculaire.

Tableau IV.5 : Influence des paramètres structuraux sur les principales propriétés des polypropylènes

Propriétés	Variation des propriétés en fonction de l'augmentation	
	De la cristallinité	De la masse moléculaire
Température de fusion	↗	→
Température de ramollissement Vicat	↗	→
Résistance en traction	↗	↗
Module d'Young	↗	↘
Résistance au choc	↘	↗
Perméabilité aux gaz	↘	→
Indice de fluidité à chaud (IF)	→	↘
Viscosité à l'état fondu	→	↗

I.13. Conclusion partiel

Dans ce chapitre, nous avons fait une synthèse bibliographique associée aux généralités sur les polymères naturels et synthétiques ainsi que les modes d'élaboration et de transformation.

Nous avons détaillé le cas du polypropylène, étant le polymère choisi pour notre étude, nous avons aussi considéré les différentes charges trouvées en bibliographie.

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 que sont les températures de fusion, de transition vitreuse. Dans ce chapitre nous passeront en revue les différentes étapes des essais de traction et de résilience.

II.1.Essai de traction

L'essai de traction est la méthode expérimentale utilisée couramment pour la détermination des comportements mécaniques des matériaux. Ces comportements sont décrits par un ensemble de relations entre les contraintes, les déformations et leur évolution au cours du temps. Dans cet essai, on exerce une force de traction sur une éprouvette normalisée jusqu'à sa rupture. En enregistrant la force F appliquée à l'éprouvette par la machine de traction et son allongement progressif, on remarque que l'effort fourni augmente avec l'allongement puis atteint un maximum et commence à décroître.



Figure. II.1 machine de traction

II.1.1. Eprouvettes de traction

Nous avons utilisé des éprouvettes normalisées (figure II-2) de type altère ayant une section $S_0=21 \text{ mm}^2$ et une longueur $L_0=70 \text{ mm}$. La figure II.2 illustre la géométrie de ces éprouvettes qui présente les deux caractéristiques définies précédemment.

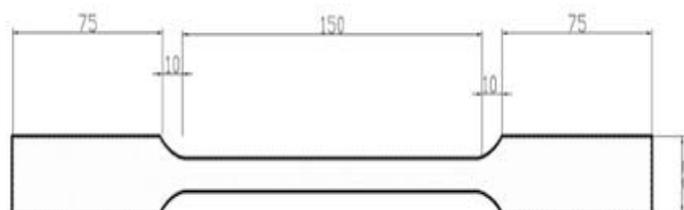


Figure II.2.Eprouvette de traction

II.1.2. Principe de fonctionnement et de mesure d la machine de traction :

Après avoir mesuré les dimensions caractéristiques des éprouvettes normalisées, ces spécimens étaient placés entre les mâchoires de l'appareil de traction.

Comme nous avons à manipuler des mélanges binaires de polymères PP/FV, PP/CH et PP/PV, dont la concentration de PP varie de 100% jusqu'à 90% en poids.

Cette machine, 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 (S0) pour obtenir de la contrainte σ (MPa) et en divisant l'allongement (ΔL) par la longueur initiale (L0) pour avoir la déformation ($\epsilon\%$). En déduit à partir de la courbe

II.1.3. Comportement contrainte-déformation

Un grand nombre de paramètres utilisés 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

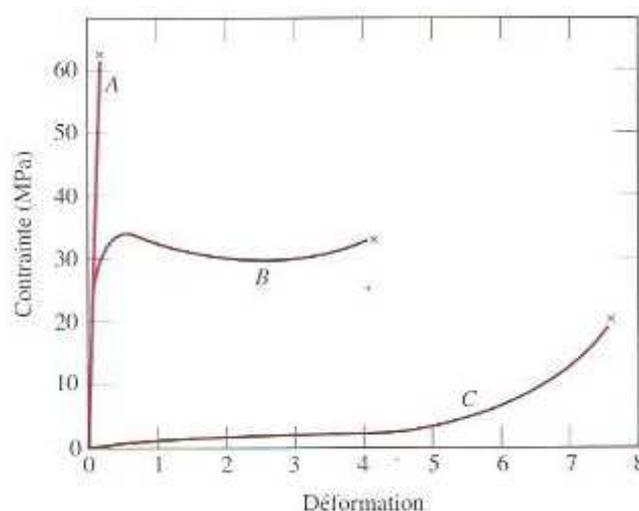


Figure II.3. Comportement contrainte-déformation des matériaux polymères [1]

La figure II.3 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 à celui de nombreux matériaux

Chapitre II. Comportement mécanique des polymères

métalliques : la déformation élastique initiale est suivie d'une déformation plastique. Pour sa part, la courbe **C** correspond a une déformation entièrement élastique, analogue à celle des Caoutchoucs (déformation réversible prononcées résultant d'une contrainte faible), que manifeste une classe de polymères appelés élastomères.

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 ($E=d\sigma/d\varepsilon$).
- **La contrainte associée au seuil d'écoulement (σ_y)** :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 au plateau de plasticité (σ_p)** : C'est le rapport de la force appliquée après la zone de plasticité localisée.
- **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.
- **La déformation à la rupture (ε_r)** : c'est le rapport de la force appliquée aumoment de la rupture par la section initiale.

La limite d'élasticité R_e des Polymères plastiques (courbe B de la figure II.3) équivaut à la valeur maximale de la courbe, qui se situe à la toute fin de la région d'élasticité linéaire figure II.4. De plus, la résistance à la traction R_m correspond à la contrainte entrainant une rupture figure II.4.

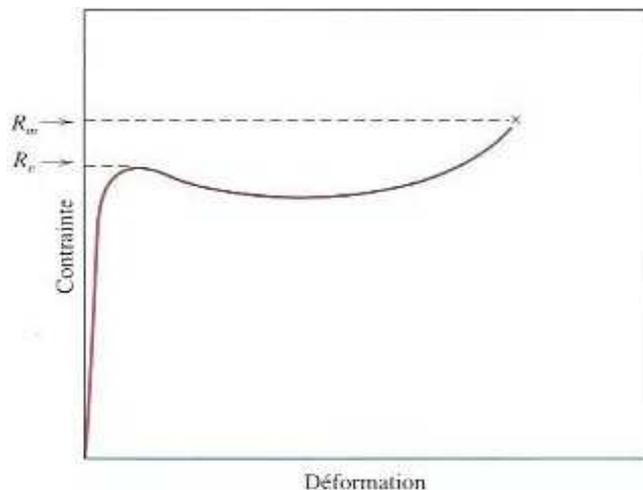


Figure II.4 Courbe contrainte-déformation d'un polymère plastique à partir de laquelle sont

Chapitre II. Comportement mécanique des polymères

Déterminées la limite d'élasticité et la résistance à la traction. [1]

Il faut également souligner que les caractéristiques mécaniques des polymères se modifient sensiblement en fonction des variations de température. La figure II.5 illustre le comportement contrainte-déformation du poly méthacrylate de méthyle (plexiglas) à différentes températures. 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.

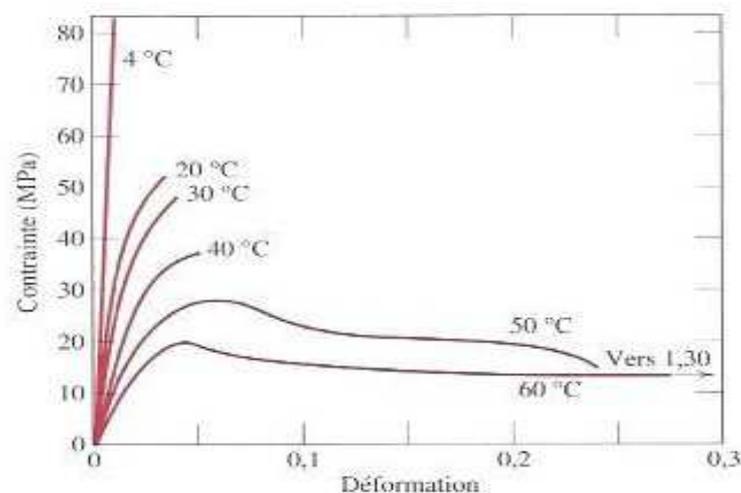


Figure II.5 Incidence de la température sur les caractéristiques de contrainte-déformation du polyméthacrylate de méthyle. [1]

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]

II.1.4. Effet de vitesse et équivalence Temps-Température

II.1.4.1. Expériences de fluage et de relaxation

a) Fluage - Recouvrance – Complaisance

L'expérience de fluage consiste à appliquer une contrainte constante au matériau et à suivre l'évolution de la déformation en fonction du temps. L'expérience de fluage peut être suivie d'une expérience de recouvrance au cours de laquelle on suit l'évolution de la déformation après suppression de la contrainte. La **figure II.6** montre la réponse obtenue, à température constante, dans le cas d'un matériau viscoélastique, en comparaison avec celles obtenues pour

un matériau élastique et un matériau visqueux, pour une sollicitation de cisaillement simple en fluage sous une contrainte t_0 suivi d'une recouvrance après suppression de la contrainte.

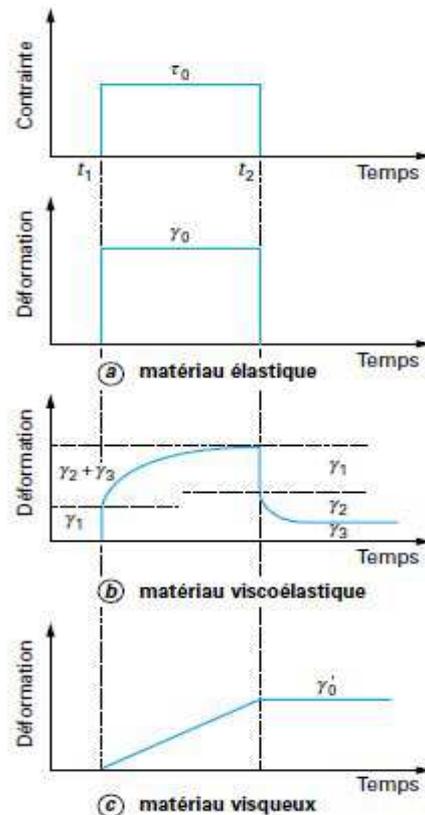


Figure II.6. Réponse des matériaux à une expérience de fluage-recouvrance. [11]

b) Relaxation - Module de relaxation

L'expérience de relaxation consiste à appliquer une déformation constante au matériau et à suivre l'évolution de la contrainte en fonction du temps. On définit un module de relaxation, rapport de la contrainte à la déformation imposée. Ce module est une fonction du temps.

La **figure II.7** montre la variation du module de relaxation en fonction du temps en échelles logarithmiques au cours d'une expérience de relaxation à température fixe. Les quatre régions décrites précédemment sont également présentes. Il convient de noter que, pour un comportement élastique, la complaisance est l'inverse du module, mais cela n'est pas nécessairement le cas pour un matériau viscoélastique où les fonctions de relaxation et de fluage, bien que liées, représentent la réponse du matériau dans deux expériences différentes. [11]

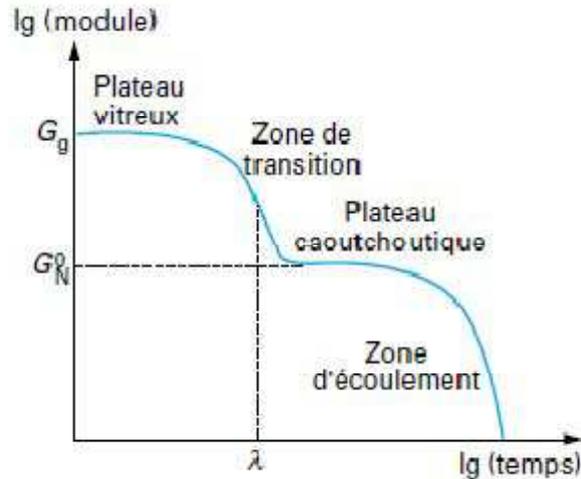


Figure II.7 Module de relaxation d'un matériau viscoélastique à température

c) Temps de relaxation

Dans la zone de transition ou dans la zone terminale, le comportement dépend de temps propres au polymère appelés **temps de relaxation**. Ces temps varient selon la température d'étude et peuvent être définis approximativement par les points d'inflexion de la courbe logarithmique $G(t)$. [11]

II.2.L'essai de résilience

II.2.1 Définition du principe de l'essai

L'essai de résilience (essai au choc) consiste à rompre, par un seul choc, une éprouvette préalablement entaillée en son milieu et à mesurer l'énergie W (en joules) absorbée par la rupture. La résilience est définie par la lettre K (Joules/cm²). L'essai se réalise sur une machine appelée mouton pendule rotatif. On mesure la résistance au choc du matériau.

II.2.2. Les éprouvettes pour la résilience

II.2.2-1 Eprouvettes CHARPY U

Une éprouvette est un barreau usiné de section carrée de 10 mm de côté et dont la longueur est 55 mm. L'entaille de 2 mm de largeur et de 5 mm de profondeur se termine par un fond cylindrique de 1 mm de rayon. La résilience est alors mesurée et précisée selon le symbole K_{cu} .

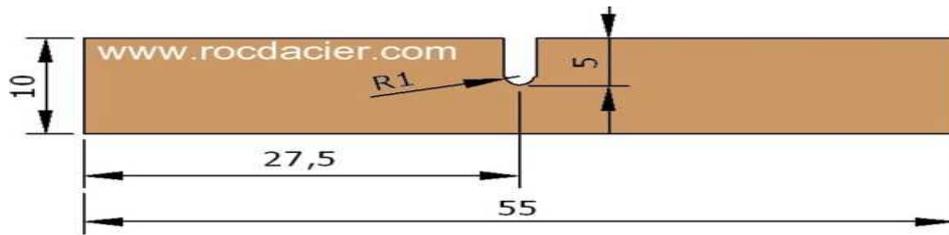


Figure II.8.Eprouvette Charpy U

II.2.2-2 Eprouvettes CHARPY entaille en V

Pour un essai avec une éprouvette Charpy V, l'éprouvette sera entaillée en V de 2 mm de profondeur et avec un angle de 45° dont les dimensions sont les mêmes que pour les éprouvettes Charpy U. On précise par le symbole Kcv l'essai de résilience en V.

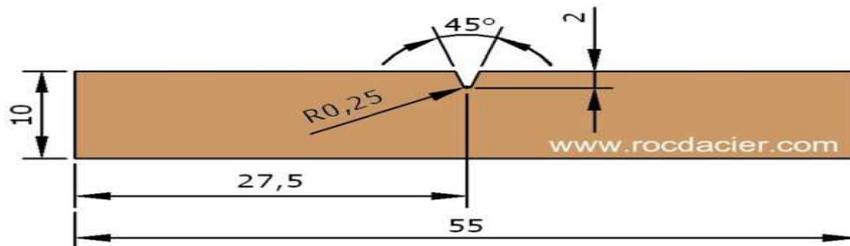


Figure II.9. Eprouvette Charpy V

II.3. Conclusion Partielle

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les différents essais mécaniques qui permettent de caractériser nos matériaux polymériques. A l'aide de l'essai de traction nous pouvons déterminer les différentes caractéristiques mécaniques tel que le module de Young(E), la limite élastique, la résistance à la rupture ainsi sa déformation. Par contre la résilience qui nous renseigne sur le caractère fragile ou ductile de matériaux, on donne l'énergie ou emmagasinée (ou dissipée) par les matériaux lorsque on le percute par le mouton Charpy.

Introduction

Nous présenterons les matières choisies pour notre étude, un thermoplastique qui est le PP chargé en fibre de verre (FV), poudre de verre (PV) et la chaux (CH). Ces mélanges (PP/FV), (PP/PV) et (PP/CH) sont élaborés par le procédé de l'extrusion pour le mélangeage à chaud et d'injection pour l'élaboration des éprouvettes. Pour caractériser ces mélanges et évaluer leurs comportements, nous allons utiliser différentes techniques de caractérisation. L'essai de traction pour la détermination des relations contraintes-déformations, des modules d'élasticité des contraintes maximales et des allongements à la rupture. L'essai de résilience permettra d'évaluer la résistance aux chocs des différents mélanges. L'observation au microscope électronique à balayage (MEB) nous permettra d'observer les faciès de rupture

III.1. Matières premières

III.1.1. Le polypropylène

Le polypropylène (PPH) utilisé est un thermoplastique semi cristallins obtenus par la polymérisation du propylène. Les caractéristique données par le fournisseur sont résumés dans la tableau III.1.

Tableau III.1 Caractéristiques du polypropylène utilisé

polymère	fournisseur	référence	MFI (g/10mn) ASTM D1238	Densité (g/cm ³) ASTM D792-A
PP	Sumitomo	Y101	15	0.900

III.1.2. La fibre de verre

Les fibres de verre sont produites essentiellement sous deux formes: les fibres d'isolation et les fibres textiles. Elles sont destinées à des usages très différents.

III.1.2.1. Les fibres d'isolation :

- **.Composition**

La fibre de verre utilisée est de la fibre textile sous forme de mats que nous avons découpé en petites fibres.



Figure III.1. la fibre de verre coupé

III.1.3. La chaux

La chaux utilisée est la chaux du commerce qui est abondante dans la nature et très bon marché sa formule chimique est $\text{Ca}(\text{OH})_2$...

Figure III.2. Chaux

III.1.3. La poudre de verre

La poudre de verre que nous avons utilisée provient de la récupération des verres de lampes à néon usagés que nous avons broyé et mis sous forme pulvérulente.

Figure III.3. la poudre de verre

III.2.Procédés de mise en œuvre des mélanges de polymères

Pour obtenir notre polypropylène chargé avec les différentes charges à savoir la fibre de verre, la chaux et la poudre de verre nous avons procéder comme suit :

III.2.1 Préparation des mélanges

Dans cette étape tout d'abord on doit mélanger le polymère polypropylène avec les charges suivantes : la fibre de verre, la poudre de verre et la chaux à des fractions massiques différentes, (Tableau III.2). la figure III.4 montre les deux élément du mélange, le mélangeage s'est effectué manuellement après la pesée des différents constituants.

Tableau III.2: Nomenclature des mélanges élaborés

Les mélanges	PP(%)	FV(%)	PV(%)	CH(%)
1	100	0%	0%	0%
2	95	5%	0%	0%
3	95	0%	5	0%
4	95	0%	0%	5
5	90	10%	0%	0%
6	90	0%	10	0%
7	90	0%	0%	10

Figure III.4 les différentes mélanges

Chapitre III : Matériels et protocole expérimentaux

Le mélangeage à chaud par extrusion permettra de mieux disperser et enchevêtrer les différents composants des mélanges. Les températures du fourreau de la machine à extrusion sont fixées comme suit :

Tableau III.3. Températures de la vis de machine d'extrusion

Paramètres	Valeurs
Alimentation	150°
Plastification	180°
Pompage	200°
Filière	300°

Cette étape nous permet d'obtenir des joncs qui seront à nouveau broyés comme le montre la figure ci-dessous. Le polypropylène chargé ainsi obtenu supposé chargé uniformément se injecté dans une presse à injection à fin d'obtenir nos éprouvettes normalisées (figure III.5).

Figure III.5. La matière broyée

III.2.3 Injection des éprouvettes

Après l'extrusion des mélanges et après le broyage une étape d'injection est nécessaire pour obtenir des éprouvettes. L'injection d'éprouvettes s'effectue sur une machine à injection ARBOURG qui est montrée sur la (figure III.6.a) 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

Chapitre III : Matériels et protocole expérimentaux

barreau de dimensions 120 x 12 x 6 mm³, Une éprouvette de type haltère, et un disque d'épaisseur 3mm et de diamètre égal à 50mm (figure III.6 b).

a)

b)

Figure III.6. Machine à injection et moule éprouvette

Les différentes phases du cycle d'injection, décrites à la Figure III.8, se déroulent de la manière suivante :

- ✓ Le polymère est fondu dans un dispositif vis four.
- ✓ Dans un premier temps, la buse à l'extrémité du fourreau étant obturée, la vis tourne en reculant et le polymère fondu s'accumule en tête de vis.
- ✓ Une fois que la quantité de polymère nécessaire à la fabrication de la pièce a été Fondue, la buse s'ouvre et la vis se transforme en piston qui injecte à grande vitesse le polymère chaud dans un moule fermé et froid : c'est la phase de remplissage durant laquelle les pressions engendrées sont considérables du fait de la forte viscosité du polymère mais également des grandes vitesses d'injection.
- ✓ Le refroidissement du polymère est lent du fait de sa faible conductivité thermique. . Il est donc possible de compenser en partie la variation de volume spécifique du polymère en continuant à injecter du polymère liquide sous forte pression : c'est la phase de compactage.
- ✓ Une fois que le canal reliant la buse de la presse à injecter au moule est solidifié, il n'y a plus de compactage possible. La pièce continue à se refroidir dans le moule puis, après éjection, à l'extérieur du moule.

Figure III.7: 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 ci-après

Tableau III.4. Paramètres de la machine à injection

Paramètres	Valeur
Température des zones	240°-280°-290°-300°
Dosage	76 mm
Pression de projection	30 bars
Pression de maintien	80 bars
Contre pression	24 bars
Vitesse d'ouverture	20 bars
Vitesse de fermeture	20 bars
Vitesse d'injection	20 bars
Vitesse de rechargement vis	40 bars
Temps d'injection	1,5s
Temps martien d'injection	3,6s
Temps refroidissement	18s
Temps ouverture + fermeture	1s

III.3. Outils de caractérisation des formulations

Divers outils ont été utilisés dans le but de caractériser les propriétés morphologiques et mécaniques des mélanges après leur mise en œuvre. Ces divers outils sont résumés dessous, ainsi que les paramètres d'utilisation.

III.3.1 Microscopie électronique à balayage:

Les caractérisations morphologiques des différents faciès de rupture, ont été réalisées grâce au Microscope Électronique à Balayage (MEB) au niveau du laboratoire de chimie de Hassnaoua.

- **principe**

Le principe de fonctionnement du MEB est le suivant : un faisceau d'électrons balaie la surface de l'échantillon réfléchis (ou rétrodiffusés) sont collectés par un détecteur ; le signal ainsi obtenu est transformé en un point lumineux sur l'écran de ce tube à rayons cathodique ; la brillance de ce point dépend de l'intensité du signal détecté, et sa position sur l'écran correspond à celle du point frappé par le faisceau d'électron : l'image résultante permet d'étudier les caractéristiques de la surface de l'échantillon et elle peut être photographiée .

Figure III.8: Microscope électronique à Balayage

III.3.2 Essai de traction

- **Introduction**

Parmi tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement l'essai le plus fondamental. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques usuelles telles que le module d'élasticité, la contrainte au seuil d'écoulement, la contrainte au plateau de plasticité, la contrainte et l'allongement à la rupture. Ainsi, dans ce qui suit nous présenterons les résultats associés à cette technique expérimentale.

- **Principe de l'essai**

Dans cet essai nous appliquant destructif un effort de traction sur une éprouvette, jusqu'à 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 mors est mobile et relié à un système d'entraînement à vitesse de déplacement imposé

L'éprouvette au repos présente une longueur initiale L_0 et une largeur initiale l_0 . Lorsque les efforts sont appliqués axialement, un allongement est constaté suivant la longueur L , tandis que sa largeur l , diminue.

La contrainte nominale $\sigma = F / S_0$ (I.1)

F est la force appliquée et S_0 est la section initiale de l'éprouvette.

La déformation nominale mesure l'allongement relatif, $\varepsilon = \Delta l / l_0$ (I.2)

- **Machine de traction**

Les propriétés mécaniques des différents mélanges mis en œuvre, ont été caractérisées grâce à une machine de traction du laboratoire de Génie Mécanique de capacité 100KN de marque IBERTEST.

Pour chaque lot, Cinq éprouvettes ont été testées a fin de vérifier la reproductibilité des expériences. Ainsi grâce à ces tests, le module d'Young, la contrainte au seuil d'écoulement ainsi que l'élongation à la rupture ont été déterminés.

Figure III.9. Machine de traction

III.3.3 Mesure de la résistance à l'impact

Les essais sont réalisés à l'entreprise Electro-industries de Fréha sur la machine ZWICK 5102 illustré a sur la figure III.10.

Figure III.10. Machine Charpy

- **Principe**

Le barreau carré de dimension (60 x 12 x 6 mm³) est posé horizontalement entre deux enclumes, il est frappé par un impacteur sa capacité de travail est de 0,5j animé d'un mouvement de pendule avec une énergie connue (figure III.10). La remontée de l'impacteur après la rupture correspond à l'énergie non utilisée dans la rupture. On en déduit l'énergie utilisée, qui est rapportée à l'aire de la section du barreau. Le résultat s'exprime en kJ/m². la figure III.11 montre le dispositif Charpy ainsi que l'éprouvette de résilience.

Figure III.11. Mouton Charpy

III.4 Conclusion Partielle

Après le choix de la matière première, qui est le polypropylène qu'on a chargé avec différentes charges tel que la fibre de verre la poudre de verre et la chaux, l'extrusion puis l'injection des mélanges nous a permis d'avoir des éprouvettes normalisées que nous avons soumis à la caractérisation par les différentes techniques, nous permuterons d'analyser le comportement mécanique du polypropylène après les différentes charges que nous lui avons introduit, de cette caractérisation découlera un nombre de résultat à analyser.

Chapitre IV : Résultats et interprétations

Introduction

L'objectif de notre travail consiste à charger un thermoplastiques, qui le polypropylène, avec trois charges à savoir la fibre de verre (FV), la chaux (CH) et la poudre de verre (PV) dans un premier temps, puis étudier l'influence du taux de ces charges sur les propriétés mécaniques du polypropylène ainsi obtenu. L'élaboration se fait par procédé d'extrusion suivi d'injection puis une caractérisation par l'essai de traction, la résilience, la micro dureté et le MEB nous permettra d'analyser les résultats..

IV.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 2007. 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 au seuil d'écoulement (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.

IV.1.1 Courbes contrainte-déformation

Tout d'abord, nous allons présenter les courbes contraintes-déformations associées à chaque mélange. A chaque fois dans ce qui suit une superposition de la courbe de traction des différents mélanges avec la courbe de traction du 100%PP se représentée à fin de faciliter la comparaison

Chapitre IV : Résultats et interprétations

La figure IV.1 représente la courbe de traction de 100%PP. Dans cette figure le PP vierge est très ductile, sa déformation est de l'ordre de 350% , sa contrainte maximale est de 32 MPa.

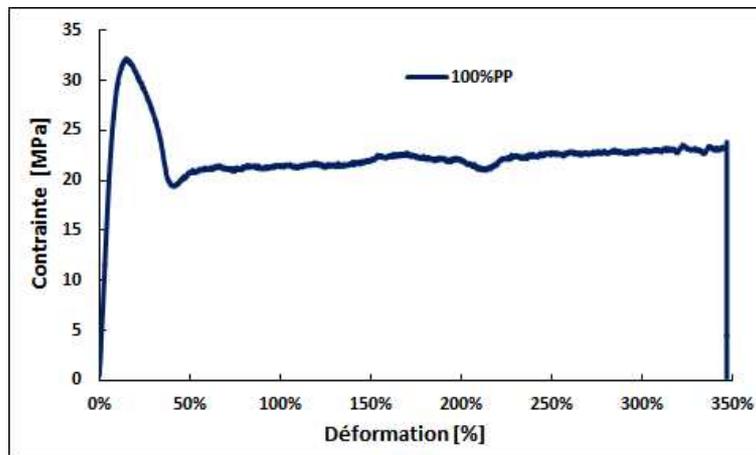


Figure IV.1 : Courbe de traction du mélange 100%PP

La figure IV.2 représente la courbe de traction du mélange (95%PP+5%FV).

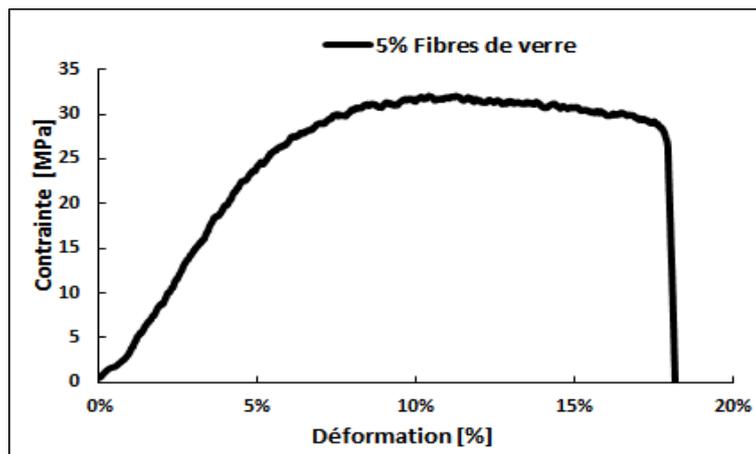
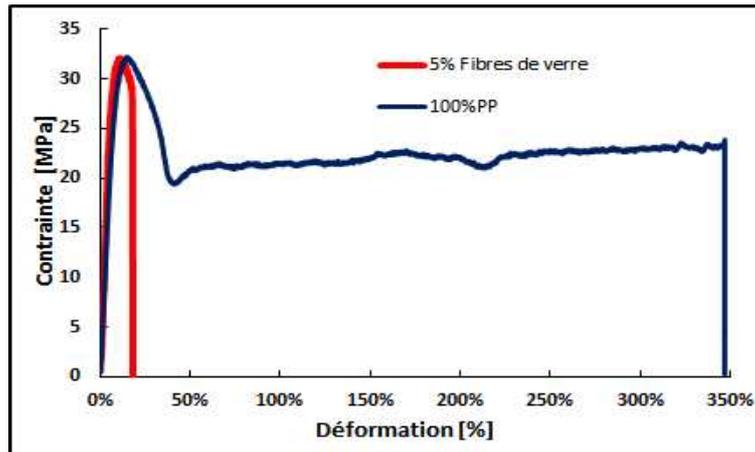


Figure IV.2 : Courbe de traction du mélange (95%PP+5%FV)

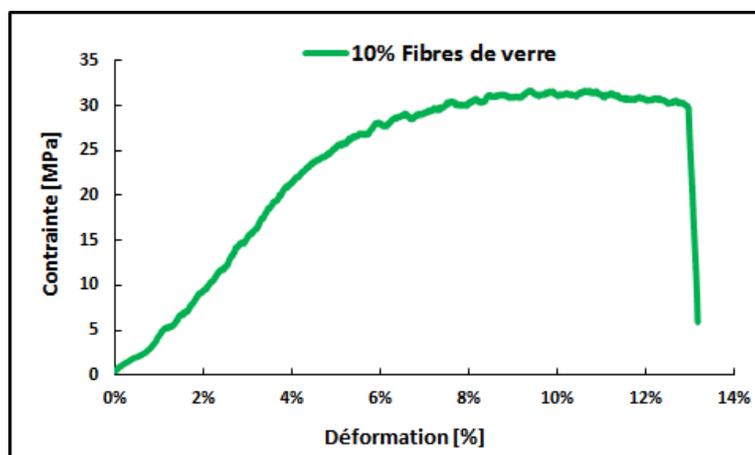
La figure IV.3. Représente la superposition des courbes de traction des mélanges (95%PP+10%FV) +100%PP



La figure IV.3 : Courbes de traction des mélanges (95% PP/5% FV)+100% PP

La figure IV.3 montre que l'ajout de 5% de Fibres de Verre au polypropylène PP engendre une diminution importante de l'allongement à la rupture. La contrainte maximale n'est pas affectée. On constate aussi le raidissement de la tangente à la partie élastique qui laisse prévoir une augmentation du module d'élasticité, le caractère ductile du PP a complètement disparu.

Nous représentons ci-dessous la courbe de traction du mélange (90% PP /10% FV) donnée par la figure IV.4.



La figure IV.4 représente la courbe de traction de mélange (95% PP+10% FV)

La figure IV.5 représente la superposition des courbes de traction de mélange (95% PP/10% FV) et courbe de 100% PP. Nous constatons que l'augmentation de la concentration de fibre de verre dans la matrice PP engendre une diminution de la ductilité avec une augmentation de la rigidité. On constate aussi de petites variations de la contrainte maximale.

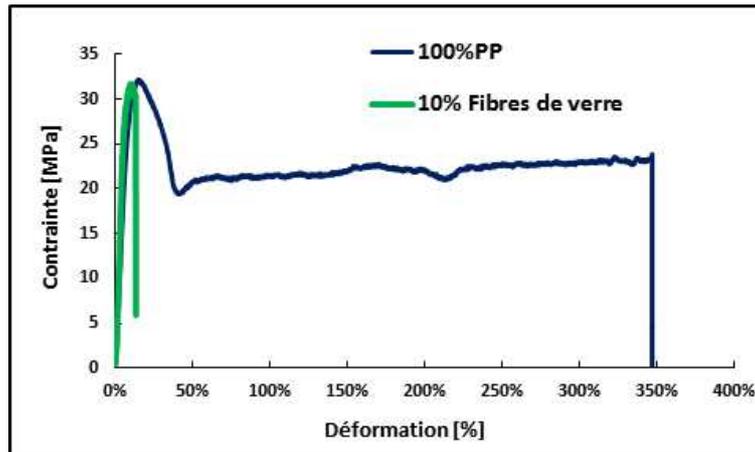


Figure IV.5 : Superposition des Courbes de traction des mélanges (90%PP/10%FV) et 100%PP

La seconde charge utilisée dans ce travail est la poudre de verre que nous avons récupérée des lampes à néon usagées et que nous avons broyé et mis sous forme pulvérulente, (dans le but d'envisager le recyclage et la réutilisation de cette poudre) .

La figure IV.6 représente la courbe de traction de mélange (90%PP/5%PV)

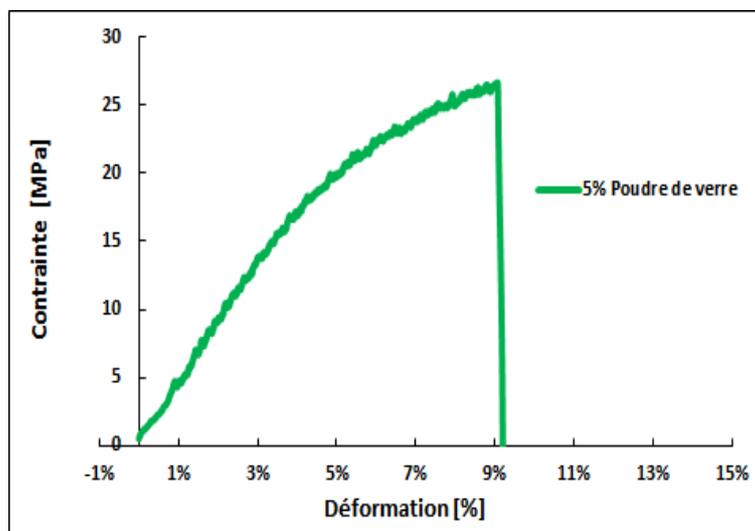


Figure IV.6 : Courbe de traction du mélange (90%PP+5%PV)

La figure IV.7 représente la superposition des courbe de traction du mélange (90%PP/5%PV) et la courbe de 100%PP. Nous constatons que la poudre de verre à la concentration de 5% une dégradation de la ductilité avec une diminution de la contrainte maximale.

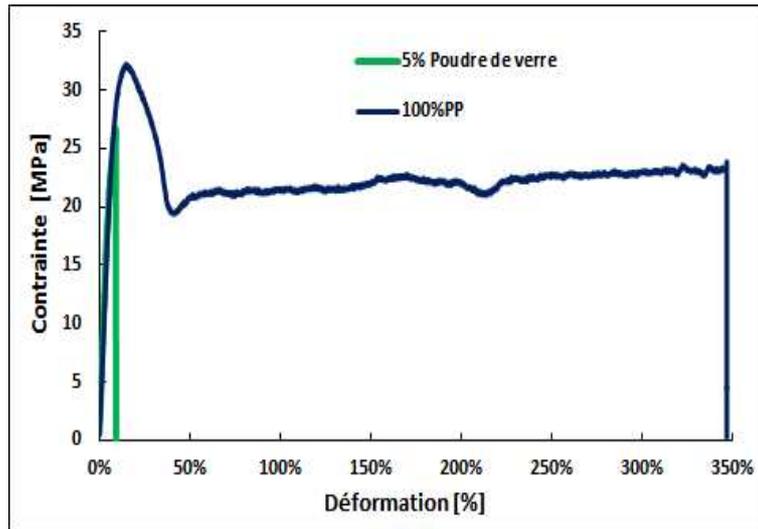


Figure IV.7 : courbe de traction du mélange (95% PP+5% PV) avec 100% PP

Nous procédons maintenant au rajout de 10% de poudre de verre à la matrice PP pour obtenir le mélange (90% PP/10% PV) dont nous représentons la courbe de traction sur la figure IV.8.

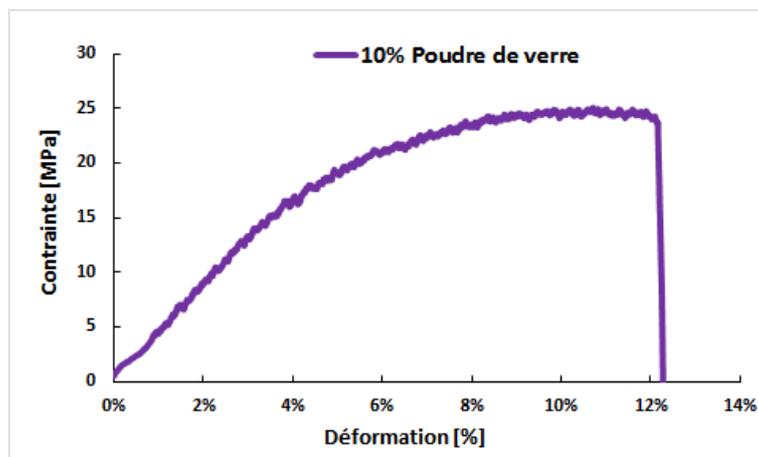


Figure IV.8: Courbe de traction du mélange (95% PP+10% PV)

Sur la figure IV.9, nous représentons la superposition des courbes de traction du mélange (90% PP/10% PV) avec 100% PP. Nous constatons que pour une concentration de 10% en poudre de verre, on enregistre une petite amélioration de la ductilité par rapport à 5%, avec toujours une diminution de la contrainte maximale.

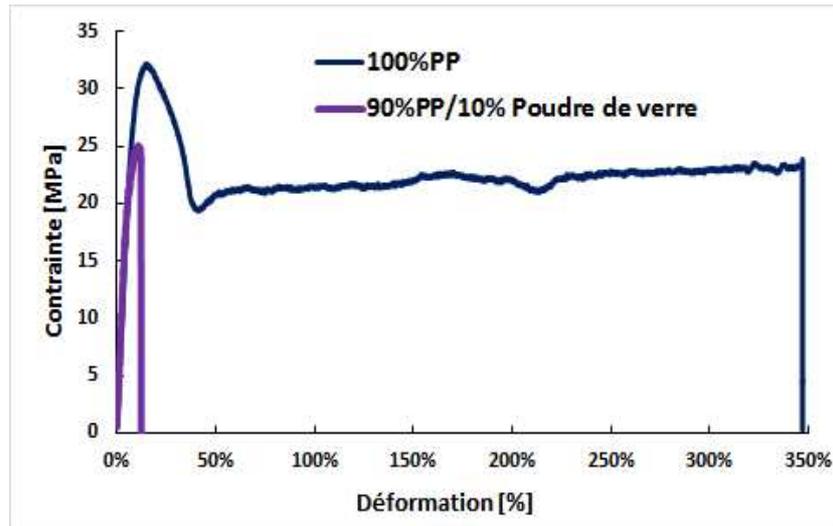


Figure IV.9 : Courbe de traction du mélange (90%PP+10%PV) avec 100%PP

La troisième charge utilisée est la chaux du commerce et qui est très bon marché.

La figure IV.10 représente la courbe de traction du mélange (95%PP/5%CH)

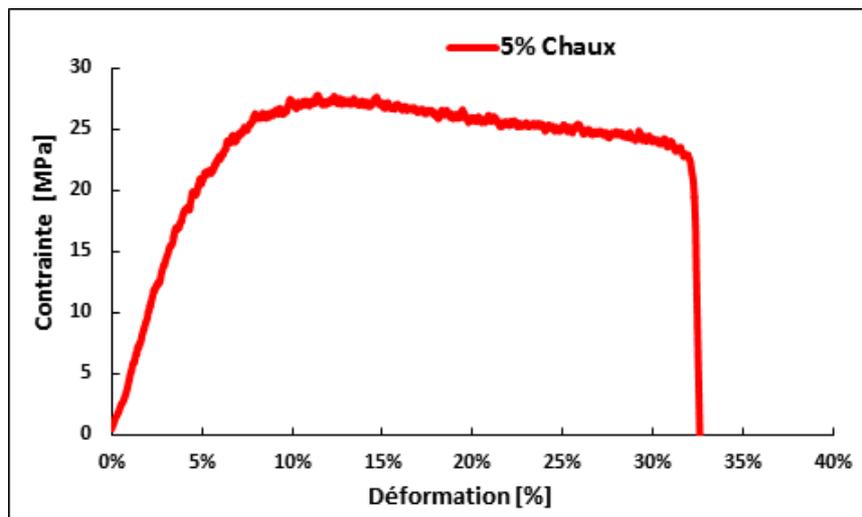


Figure IV.10 : courbe de traction du mélange (95%PP+5%CH)

Sur la figure IV.11 nous superposons la courbe de traction du mélange (95%PP/5%CH) avec celle du 100%PP. Nous constatons aussi que l'ajout de 5 % de Chaux engendre une diminution de l'allongement à la rupture ainsi que de la contrainte maximale.

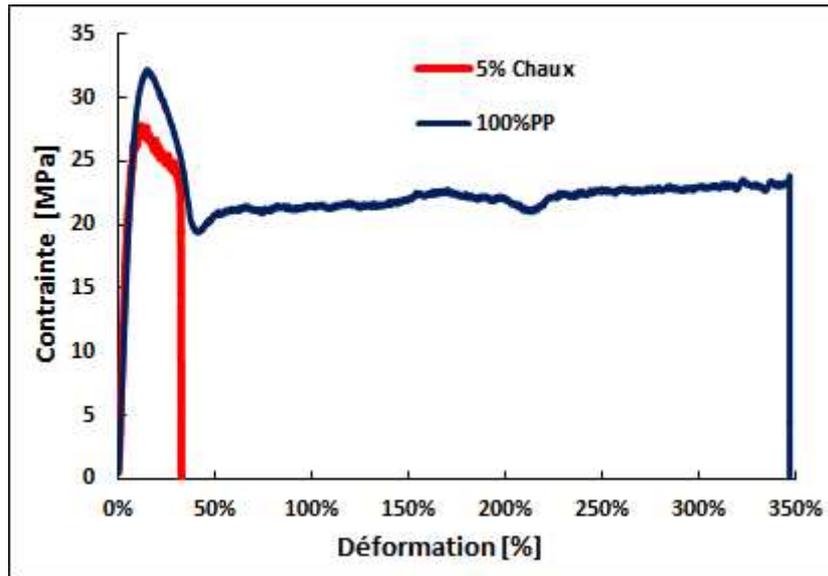


Figure IV.11 : courbe de traction du mélange (95%PP+5%CH) avec 100%PP

Nous procédons maintenant au rajout de 10% de chaux à la matrice PP pour obtenir le mélange (90%PP/10% Chaux) dont nous représentons la courbe de traction sur la figure IV.12.

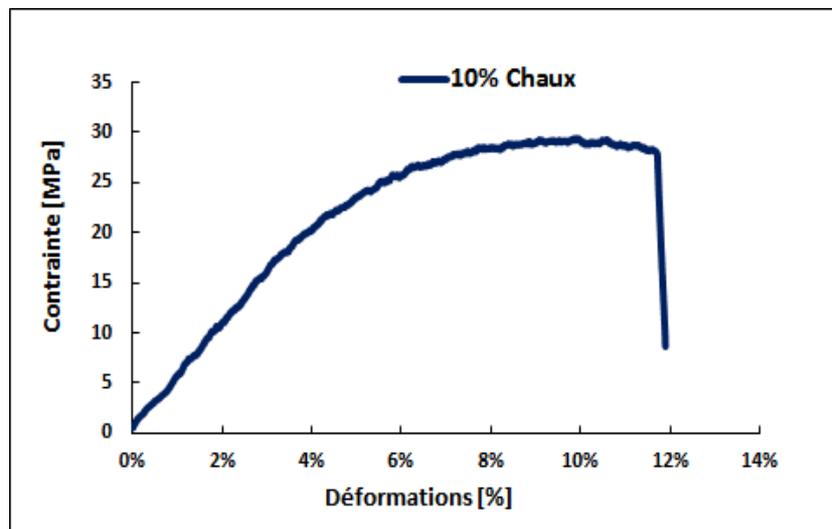


Figure IV.12 : courbe de traction du mélange (90%PP+10%CH)

Sur la figure IV.13 nous superposons la courbe de traction du mélange (90%PP/10% Chaux) avec celle du 100%PP. Nous constatons aussi que l'ajout de 10% de Chaux engendre une diminution de l'allongement à la rupture ainsi que de la contrainte maximale.

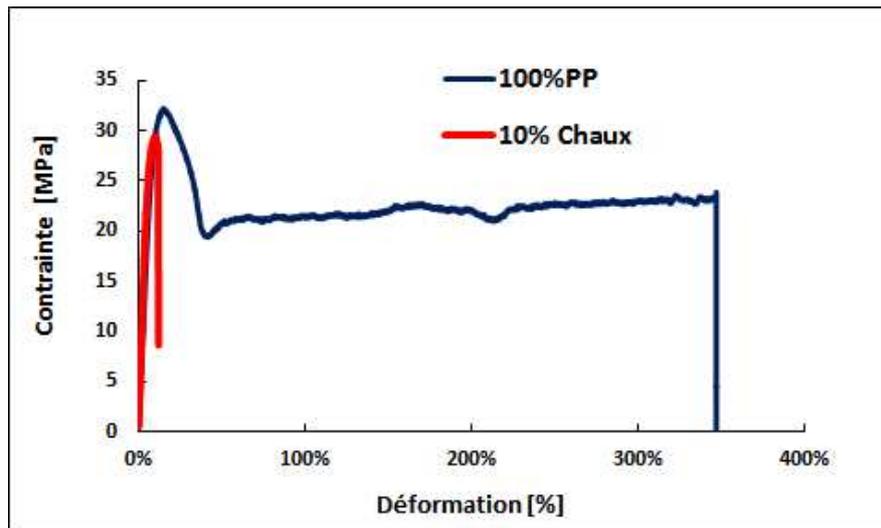


Figure IV.13 : courbe de traction du mélange (90%PP/10% Chaux) avec 100%PP

L'introduction des différentes charges a fragiliser notre PP d'une manière considérable, c'est un résultat expérimental loin des but recherchés dans notre étude.

IV.1.2 Propriétés mécaniques caractéristiques usuelles :

A partir des courbes contrainte-déformation des différents mélanges étudiés, plusieurs paramètres peuvent être relevés. Le module de Young, la limite élastique, la contrainte à la rupture, et l'allongement à la rupture.

IV.1.2.1 Propriétés mécaniques caractéristiques du mélange (PP/FV)

Les propriétés mécaniques des mélanges (PP/FV), sont résumées dans le tableau IV.1 ci-dessous:

Tableau IV.1 propriétés mécaniques du mélange (PP/FV), mesurées en traction uniaxiale :

Les mélanges	E (MPa)	σ_{\max} (MPa)	A (%)
(100% PP)	997	31.4	340%
(95%PP+5%FV)	1320	32.3	9.01%
(90%PP+10%FV)	1458	31.5	6.2%

Chapitre IV : Résultats et interprétations

A partir du tableau IV.1 nous traçons la variation du module d'élasticité des mélanges en fonction de la concentration en Fibre de verre et donnée par la figure IV.14

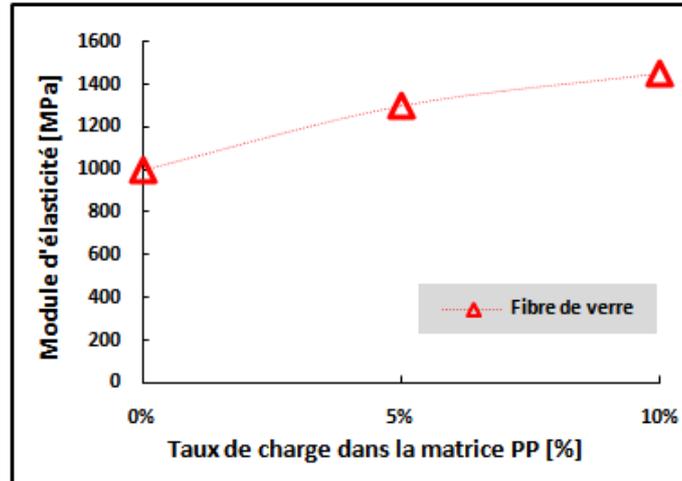


Fig. IV.14 : Variation de module d'élasticité en fonction de la concentration en fibre de verre

Nous constatons que la fibre de verre engendre une amélioration du module d'élasticité aux concentrations de 5 et 10%.

De même la figure IV.15 nous donne la variation de la contrainte maximale où on constate qu'elle est faiblement affectée par la présence de la fibre de verre dans la matrice PP.

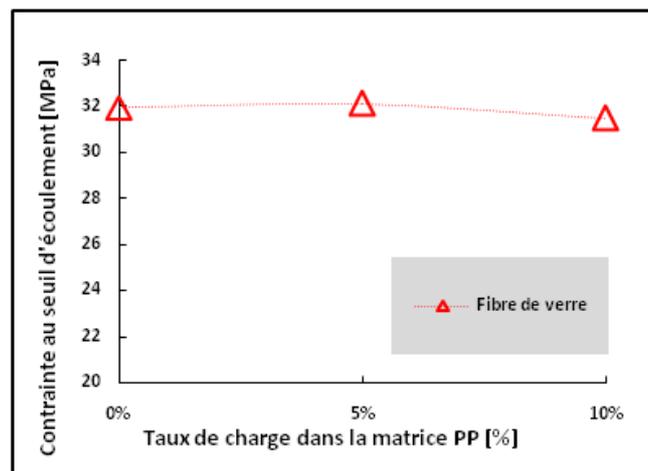


Fig. IV.15: Variation de la contrainte maximale en fonction de la concentration en fibre de verre

La figure IV.16 tracée à partir du tableau IV.1 montre bien la dégradation de la ductilité causée par la charge en fibre de verre.

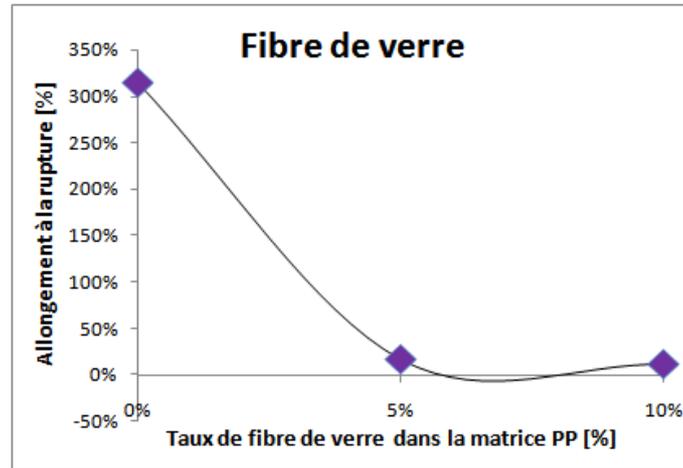


Fig. IV.16 : Variation de l'allongement en fonction de la concentration en fibre de verre

Les résultats présentés montrent que seulement une caractéristique mécanique qui est améliorée par l'introduction de la charge fibre de verre, cette caractéristique est la résistance mécanique, représentée par le module de Young.

IV.1.2.2 Propriétés mécaniques caractéristiques du mélange (PP/CH)

Les propriétés mécaniques des mélanges (PP/CH), sont résumées dans le tableau IV.2 ci-dessous :

Tableau IV.2 propriétés mécaniques du mélange (PP/CH), mesurées en traction uniaxiale :

Les mélanges	E (MPa)	σ_e (MPa)	A (%)
(100%PP)	997	31.4	340%
(95%PP+5%CH)	894.	27.5	10.94%
(90%PP+10%CH)	1112.52	29.4	4.82%

A partir du tableau IV.2, nous traçons la variation du module d'élasticité des mélanges en fonction de la concentration en chaux et donnée par la figure IV.17

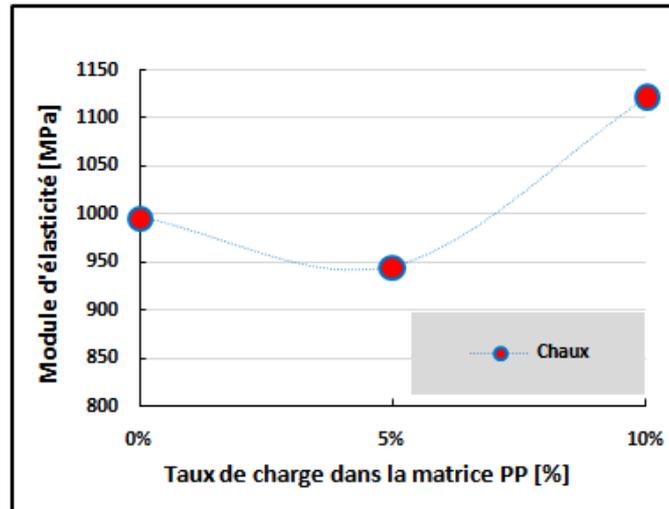


Fig. IV.17 : Variation du module d'élasticité en fonction de la concentration en chaux

Nous constatons que la chaux engendre une diminution du module d'élasticité pour une concentration de 5% en chaux puis une augmentation pour 10%.

De même la figure IV.18 nous donne la variation de la contrainte maximale où on constate qu'elle est faiblement affectée par la présence de la chaux dans la matrice PPH.

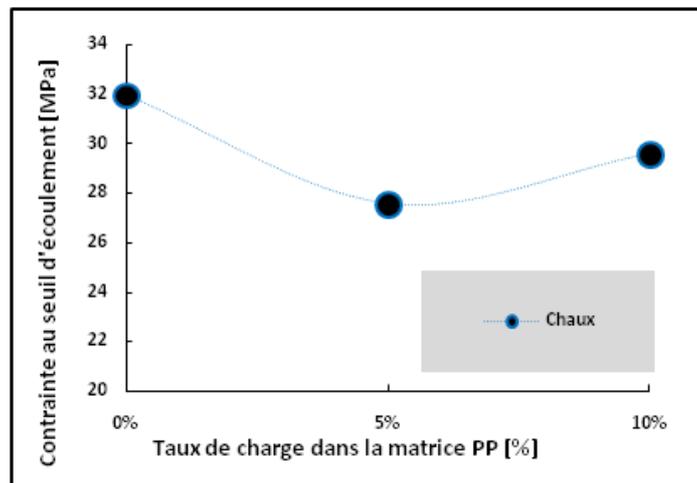


Fig. IV.18 : Variation de la contrainte maximale en fonction de la concentration en chaux

La figure IV.19 tracée à partir du tableau IV.2 montre aussi la dégradation de la ductilité causée par la présence de la chaux dans la matrice PPH.

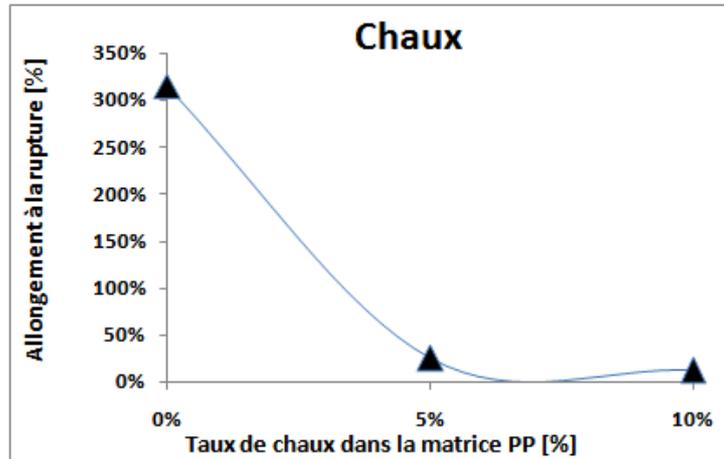


Fig. IV.19: Variation de l'allongement à la rupture en fonction de la concentration en chaux

L'introduction de la chaux comme charge n'est d'aucun bénéfice pour le PP, sauf le module de Young qui voit une petite amélioration pour le mélange (90%PP+10%CH).

IV.1.2.3 Propriétés mécaniques caractéristiques du mélange (PP/PV)

Les propriétés mécaniques des mélanges (PP/PV), sont résumées dans le tableau IV.3 ci-dessous :

Tableau IV.3 propriétés mécaniques du mélange (PP/PV), mesurées en traction uniaxiale :

Les mélanges	E (MPa)	σ_e (MPa)	A (%)
(100%PP)	997	31.4	350%
(95%PP+5%PV)	903.83	26.3	4.44%
(90%PP+10%PV)	911.41	25.1	5.91%

Du tableau IV.3, nous traçons la variation du module d'élasticité des mélanges en fonction de la concentration en poudre de verre et donnée par la figure IV.20

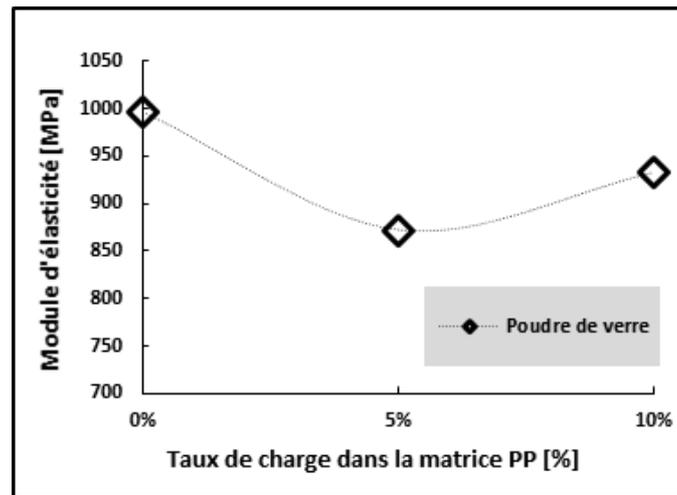


Fig. IV.20 : Variation du module d'élasticité en fonction de la concentration en poudre de verre

Nous constatons que la poudre de verre engendre une diminution du module d'élasticité pour les concentrations de 5 et 10% de poudre de verre

La figure IV.21 montre que la présence de la poudre de verre dans la matrice PPH engendre une diminution de la contrainte maximale.

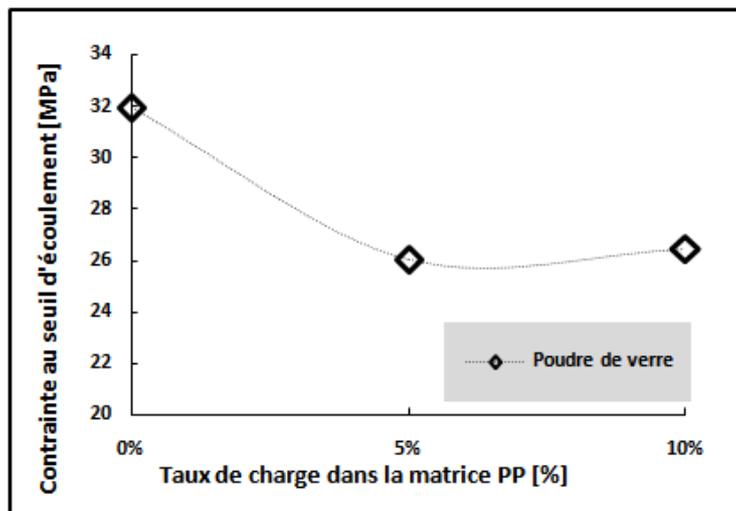


Fig. IV.21 : Variation de la contrainte maximale en fonction de la concentration en poudre de verre

La figure IV.22 montre aussi que la présence de la poudre de verre dans la matrice PPH engendre la dégradation de la ductilité.

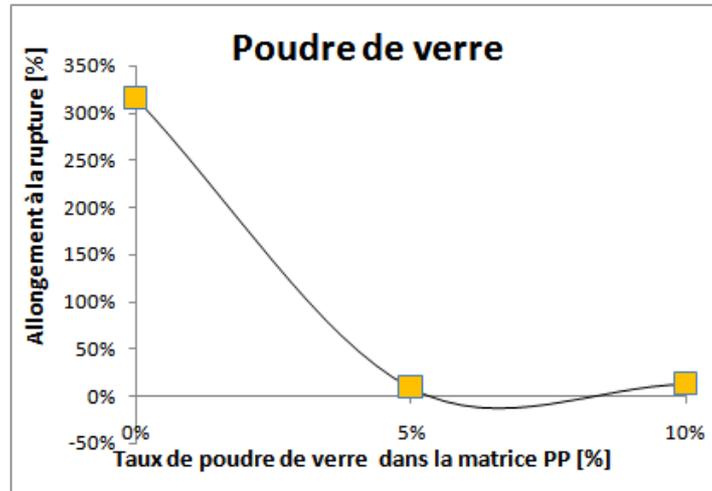


Fig. IV.22 : Variation de l'allongement en fonction de la concentration en poudre de verre

IV.2 Résultats de l'essai Charpy

La machine Charpy permet d'obtenir directement une valeur en joule, cette dernière on la convertir en valeur de résistance au choc avec la formule suivante :

$$\text{Résistance au choc} = \text{énergie (KJ)} / \text{surface de rupture (m}^2\text{)}$$

Avec: Surface de rupture =42 (mm²).

Alors d'après l'essai Charpy on a obtenu des résultats pour les différentes taux de mélanges dans la matrice PP, en suite pour chaque mélange on faite la moyenne et on va calculer sa résilience, les résultats sont regroupés dans le tableau si dessous :

Tableau IV.4 : Résultats des essais de résilience des mélanges (PP/CH), (PP/PV) et (PP/FV)

Les mélanges	Résistance au choc (KJ /m ²)
100%PP	1.9
(95%PP+5%PV)	1.71
(90%PP+10%PV)	1.94
(95%PP+5%FV)	2.3
(90%PP+10%FV)	2.7
(95%PP+5%CH)	1.6904
(90%PP+10%CH)	1.6952

Chapitre IV : Résultats et interprétations

La figure IV.23 représente la variation de la résilience en fonction du taux de fibre de verre dans la matrice PP. Nous constatons une augmentation de la résistance aux chocs avec l'augmentation de la concentration en fibre de verre. Elle passe de $1,9 \text{ KJ/m}^2$ pour le PPH vierge à $2,7 \text{ KJ/m}^2$ pour une concentration de 10% en fibre de verre, soit une amélioration de 42%.

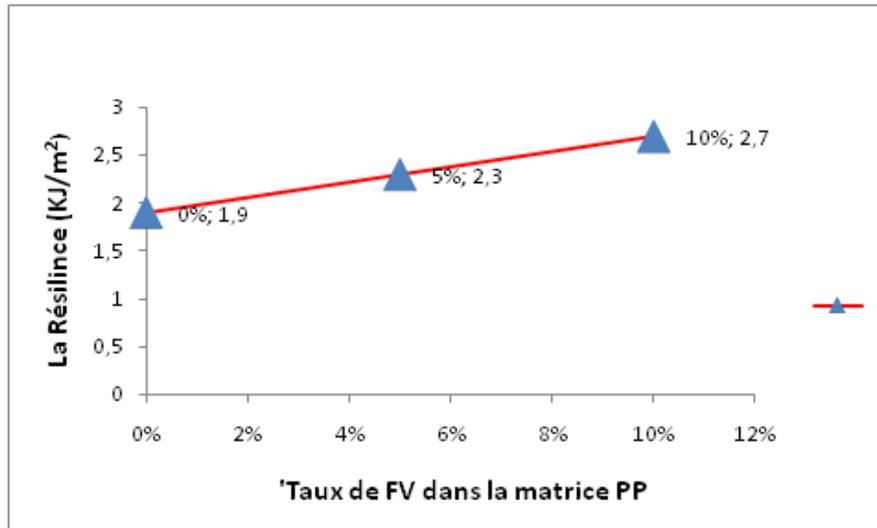


Figure IV.23. Courbe de la résilience de mélange PP/FV en fonction du taux de FV dans la matrice PPH

La figure IV.24 représente la variation de la résilience en fonction du taux de poudre de verre dans la matrice PPH. Nous constatons une augmentation une diminution de la résistance aux chocs pour 5% de poudre de verre puis une faible augmentation par rapport au PPH pour une concentration de 10% en poudre de verre.

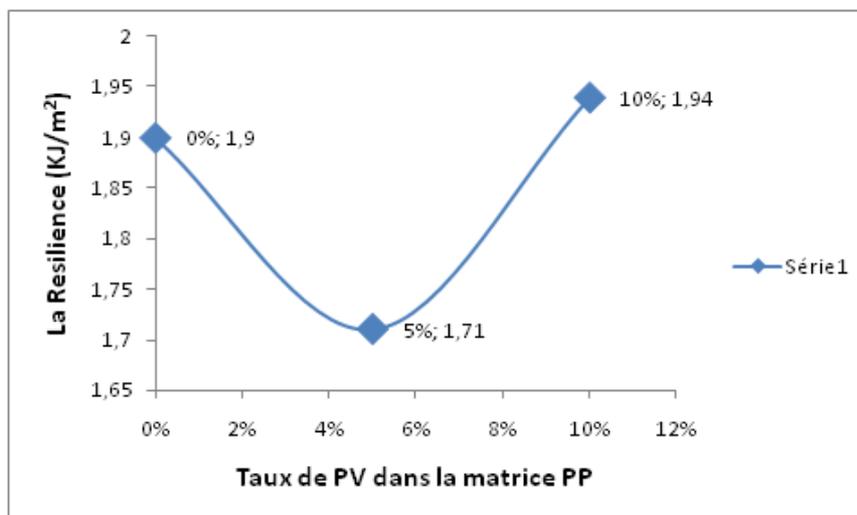


Figure IV.24. Courbe de la résilience de mélange PV/PP en fonction du taux de PV dans la matrice PP

Chapitre IV : Résultats et interprétations

La figure IV.25 représente la variation de la résilience en fonction du taux de chaux dans la matrice PPH. Nous constatons une diminution de la résilience en fonction pour 5 et 10% de concentration en chaux.

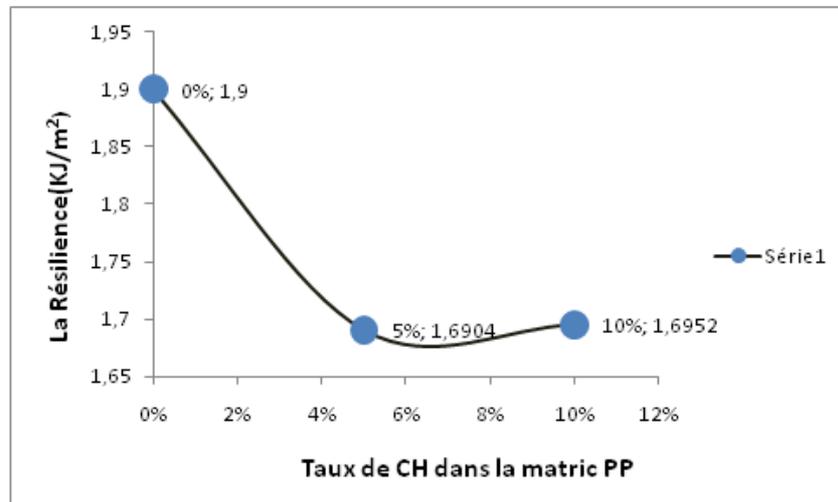


Figure IV.25 Courbe de la résilience de mélange PP/CH en fonction du taux de CH dans la matrice PP

IV.3 Résultats de micro dureté

Le tableau suivant regroupe les résultats de micro dureté Knoup obtenus avec une charge de 10gf appliquée pendant 20s, pour les mélanges (PP/PV) et (PP/FV) et (PP/CH)

<i>Les mélanges</i>	<i>Duretés HK des différents essais</i>
<i>100%PP</i>	<i>21-23-20-21</i>
<i>(95%PP+5%CH)</i>	<i>19-22-23-23-21</i>
<i>(95%PP+10%CH)</i>	<i>18-21-26-24-19</i>
<i>(95%PP+5%FV)</i>	<i>19-20-23-19-19</i>
<i>(95%PP+10%FV)</i>	<i>16-20-25-22-17</i>
<i>(95%PP+5%PV)</i>	<i>24-30-42-27-16</i>
<i>(95%PP+10%PV)</i>	<i>19-23-26-21-15</i>

On observant les valeurs de la micro dureté knoup de l'échantillon 100% PP, nous remarquons que les valeurs de micro dureté sont très voisines, preuve qu'il s'agit d'un matériau homogène, formé par une même phase. Les valeurs de micro dureté des autres mélanges que le 100% pp, sont différentes d'une région à une autre en balayant la surface des

Chapitre IV : Résultats et interprétations

échantillons par exemple pour le mélange (95%PP+5%PV), on note une valeur de micro dureté de 42 HK, dans cette zone le pénétrateur du micro duromètre a surement touché le grain de poudre de verre.

IV.4 Résultats de l'observation au microscope électronique à balayage

L'observation des faciès de rupture des différents mélanges au microscope électronique à balayage nous donne les différentes figures :

La figure IV.26 représente le faciès de rupture du 100%PP, en analysant l'agrandissement à 50 μ m on remarque une homogénéité de la matrice PP, le faciès montre aussi une rupture ductile représentée par des surfaces de rupture non franches.

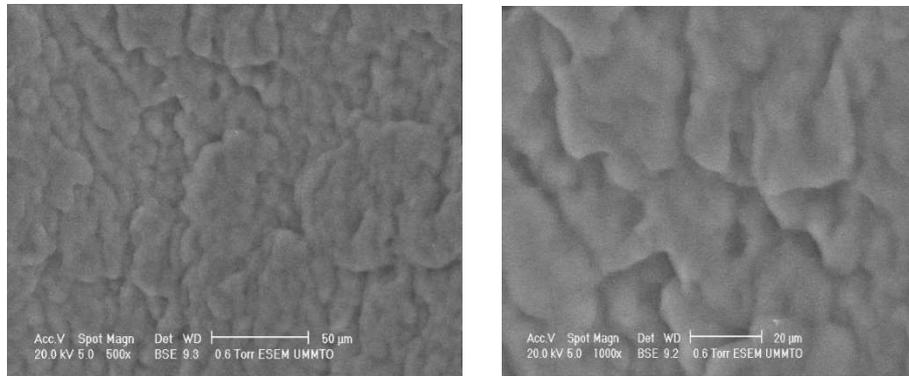


Figure IV.26. Observation au MEB des faciès de rupture du mélange 100%PP

La figure IV.27 représente le faciès de rupture du mélange PP à 5% FV. Nous remarquons les différentes dimensions des fibres de verre ainsi que leur orientation tridimensionnelle.

Figure IV.27. Observation au MEB des faciès de rupture du mélange 95%PP+5%FV

Chapitre IV : Résultats et interprétations

La fibre de verre orienté aléatoirement a disséqué la matrice du pp pour en faire un matériau filamenteux sans aucune cohésion de sa matrice, se ci a causé le changement du comportement mécanique du PP et une transformation d'un matériau ductile à un matériau fragile.

La figure IV.28 représente le faciès de rupture du mélange PP/10% FV. Des pores laissés par les fibres de verre arrachées sont très visibles. Ce qui peut expliquer le gain en module d'élasticité. La surface de rupture franche est la conséquence d'une rupture fragile

Figure IV.28 Observation au MEB des faciès de rupture du mélange 90%PP+10%FV

L'adhérence de la fibre à la matrice est très faible, ce qui a donné une structure fibre –matrice non solidaire et un comportement mécanique fragile.

La figure IV.29 représente le faciès de rupture du mélange PP/10% Chaux. Nous remarquons la répartition inhomogène de la chaux dans la matrice qui aura constitué des inclusions fragilisant la structure, la granulométrie de la chaux est irrégulière aussi, même si la matrice PP tend à former une rupture ductile, la présence de la chaux l'en a empêcher.

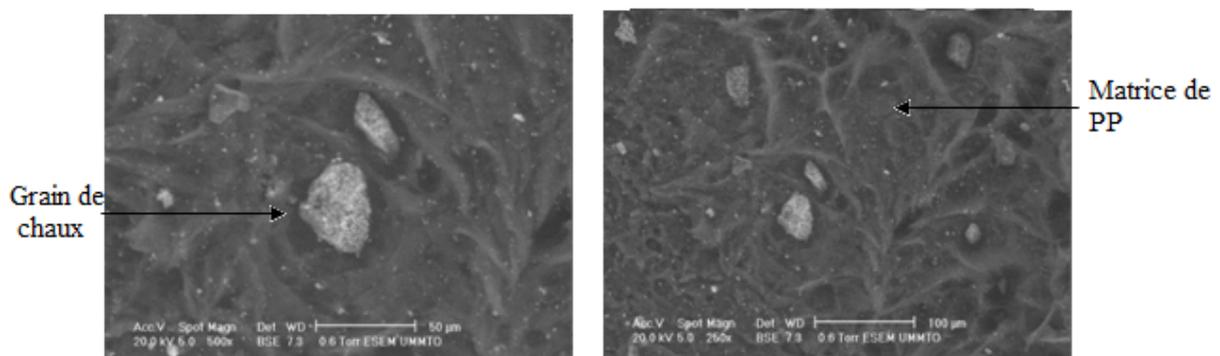


Figure IV.29. Observation au MEB des faciès de rupture du mélange 90%PP+10%CH

La figure IV.30 représente le faciès de rupture du mélange PPH/5% PV. Nous remarquons la répartition inhomogène de la poudre de verre dans la matrice PPH avec une structure très fragile, les grains de poudre de verre se s'en assemblé en agrégats, zone de fragilisation du mélange

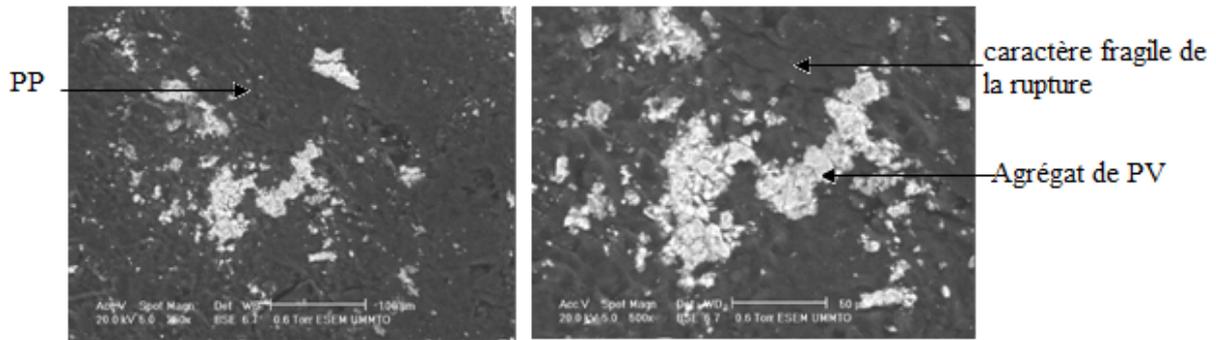


Figure IV.30. Observation au MEB des faciès de rupture du mélange 95%PP+5%PV

IV.5.Conclusion Partielle

Après élaboration des mélanges par extrusion suivit d'injection, nous avons analysé les éprouvettes ainsi obtenues par les différentes méthodes de caractérisation. Nous avons constaté que le la fibre de verre apporte une nette amélioration au module d'élasticité et à la résilience du PP, elle engendre une diminution significative de la ductilité. Par contre la poudre de verre récupérée engendre une diminution de toutes les propriétés mécaniques. Quant à la chaux c'est à la concentration de 10% en masse qu'elle engendre l'amélioration du module d'élasticité l'observation au microscope électronique à balayage des différents faciès de rupture montre clairement le caractère fragile de la rupture ainsi que l'inhomogénéité des mélanges ainsi élaborés.

Conclusion générale :

Dans le cadre de ce travail, nous avons procédé à l'étude de l'effet des charges minérales sur le comportement du polypropylène. Nous avons ainsi procédé au rajout de la fibre de verre, de la poudre de verre et de la chaux aux concentrations de 5% et 10% à la matrice PP. Les mélanges sont réalisés à froid manuellement puis à chaud par extrusion pour former des joncs qui ont été broyés puis injecter pour avoir des éprouvettes normalisées. Les éprouvettes ainsi réalisées, sont ensuite caractérisées mécaniquement via l'essai de traction et de résilience et une caractérisation morphologique par observation au MEB des faciès de rupture.

La caractérisation mécanique des échantillons a montré que toutes les charges (fibre de verre, poudre de verre et chaux) engendrent une diminution importante de la ductilité. Nous avons aussi montré que la fibre de verre engendre l'augmentation du module d'élasticité de la contrainte maximale ainsi que de la résilience. La chaux apporte une petite amélioration du module d'élasticité avec une diminution de la contrainte maximale. Par contre la poudre de verre engendre la dégradation de toutes les caractéristiques mécaniques. L'analyse des faciès de rupture a révélé le caractère fragile des échantillons.

En perspective, nous attirons l'attention des futures étudiants de fin cycles à utiliser d'autres renforts tel que le talc la craie et le mica, et varier les températures d'injection et d'extrusion à fin de ne pas dégrader les propriétés de ductilité du PP.

Partie bibliographique

- [1] : William D .Callister, Jr. science et génie des matériaux, John Wiley et Sons, Inc. [2007]
- [2] : Coppens Thomas, de Decker Jonathan, Debruycker Vincent, Guissart Céline, Lavendomme Roy, Ozkan Alp, Van Overmeir Laureline, Verhaegen François .Service de Sciences des Polymères «Printemps des Sciences 2010 –Bruxelles
- [3] : Société Francophone de Biomatériaux Dentaires P. WEISS.Université Médicale Virtuelle Francophone .date de création 2009-2010
- [4] : carowillay@aol.com Matériaux polymères. Willay Caroline
- [5] : Jean - Paul Bailon, Jean – Marie Dorlot, : Des matériaux. ISBN 2-553-00770-1
- [6] Premphet K. and Horanont P. Influence of stearic acid treatment of filler particles on the structure and properties of ternary-phase propylene composites. J Appl Polym Sci, 1999, Vol 74, p 3445-3454
- [7] Tsagaropoulos G., Eisenberg A. Dynamic Mechanical Study of the factors affecting the two glass transition behavior of filled polymers. Similarities and differences with random ionomers. Macromolecules, 1995, vol 28, p 6067-6077
- [8] Jaziri M. Etude du greffage à l'état fondu de l'anhydride maléique sur l'ABS Influence du composé obtenu sur l'élaboration et les propriétés des mélanges PC/ABS. Thèse Université Jean Monnet - Saint Etienne, 1992, p. 5-6.
- [9]: R. Panico et al., Nomenclature et terminologie en chimie organique - Classes fonctionnelles. Stéréochimie, [Techniques de l'ingénieur](#), 1996, p. 66 (ISBN [2-85-059-001-0](#)).
- [11] IMP - Ingénierie des Matériaux Polymères - Site INSA Lyon
- [10] J.P.trotignon, J.Verdo. A.Dubraczynski. M.Piperaud. Matieresplastique ,Edition Nathan,2006 pour la présente Edition, ISBN Nathan :978-2-09-179581-2,ISBN AFNOR.978-2-12-425031-8.