

Remerciements

Nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidés à réaliser ce mémoire:

En premier lieu, mon encadreur Dr. Menail Pour leurs conseils, leurs patients et aidés.

Nous remercions également tous les enseignants du département de Génie Mécanique et notre responsable du Master Mécanique des matériaux Mr.H.Hammadache Pour son soutien.

En fin tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail.

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail à :

*Mes très cher parents Monsieur et Madame BOUCHARÈB
qui ont aidés et soutenue beaucoup pendant toute mon vie.*

*A mon très chers sœurs (AMAL, MOUNA, FAHIMA,
KELTHOUME, AICHA, FOUZIA) et mon frères adorés
(NADIR, ATTEF MOUHAMED, BOUDJEMA, RIDA.) et
les petits de la famille SAIF EDINE, IYADE ET ANAS.*

*Et toutes mon amies et camarades de la promotion 2016 surtout
mon amis ALOUI.*

*Et enfin à tous ceux que nous aimons et tous ceux qui nous
aiment.*

Merci à tous

Table des matières

Remerciement.....	I
Dédicace.....	II
Table des illustrations.....	III
Résumé.....	IV
Introduction générale.....	X

Chapitre I : L'entreprise

I.1 Historique.....	12
I.2 Présentation de l'entreprise.....	12
I.3 Domaines d'activités.....	13
I.4 L'entreprise aujourd'hui.....	13
I.5 Les appareillages utilisés par l'entreprise.....	14
• I.5.1 Les prothèses.....	14
• I.5.2 Les orthèses.....	14
I.5.2.1 Orthèse des membres inférieurs.....	14
I.5.2.2 Orthèses des membres supérieurs.....	15
I.5.2.3 Orthèse de tronc.....	17
• I.5.3 Les attelles.....	18
I.6 Principes généraux de l'appareillage orthétique.....	19
• I.6.1 Objectifs thérapeutiques.....	19
• I.6.2 Principes mécaniques.....	19
I.7 Réalisation des orthèses.....	20
• I.7.1 Matériaux utilisée pour les orthèses.....	20
• I.7.2 Technique de thermoformage :.....	21
• I.7.3 Etapes de fabrication des orthèses et des attelles.....	21

Chapitre II : Etude bibliographique du polymère et les matériaux étudiant

II.1 Introduction.....	24
II.2 Définition.....	25
II.3 Origine des polymères.....	26
II.4 Classification des polymères.....	26
II.4.1 Selon leur nature chimique.....	26
II.4.2 Selon leur domaine d'application.....	26
II.4.3 Selon les usages technologiques.....	26
II.4.4 Selon l'importance économique.....	27
II.5 Types de polymère.....	27
II.6 Structure des polymères.....	27
II.6.1 Polymères linéaires.....	28
II.6.2 Polymères ramifiés.....	28
II.6.3 Polymères réticulés.....	28
II.6.4 Polymères amorphes et polymères cristallisés.....	28

II.7 Familles de plastiques.....	29
II.7.1 Les thermodurcissables.....	29
II.7.2 Les élastomères.....	30
II.7.3 Les thermoplastiques.....	30
II.8 Applications.....	31
II.9 Propriétés des polymères.....	31
II.9.1 Propriétés physiques des polymères.....	32
II.9.2 Propriétés thermiques.....	32
II.10 Mise en forme des thermoplastique.....	32
II.11 Les matériaux étudiés.....	34
II.11.1 Le polyéthylène.....	34
II.11.1.1 Historique.....	34
II.11.1.2 Présentation de PE.....	34
II.11.1.3 Propriétés du PE.....	36
II.11.1.4 Domaine d'application du PE.....	38
II.11.2 Le polypropylène.....	39
II.11.2.1 Historique.....	39
II.11.2.2 Présentation de PP.....	39
II.11.2.3 La structure du polypropylène.....	40
II.11.2.4 Propriétés du PP.....	40
II.11.2.5 Applications du PP.....	41
II.11.2.6 Procédé de fabrication du PP.....	42

Chapitre III : Matériels et expérimentales

III.1 Introduction.....	44
III.2 Notions sur l'essai.....	44
• III.2.1 Essais Mécaniques.....	44
• Essai de traction.....	44
• Essai de choc.....	48
• Essai de dureté.....	50
III.3 Partie expérimentale.....	51
III.3.1 Choix du matériau.....	51
III.3.2 Préparation et géométrie des éprouvettes.....	51
III.3.3 Techniques expérimentales.....	54
a. Résultats du PE.....	56
b. Comparaison des courbes de traction.....	58
• Analyse Microscopique.....	65
1. Cas de l'essai de choc pour le PE.....	65
2. Cas de l'essai de traction pour le PE.....	65
• Application au modèle numérique.....	68
➤ Comparaison entre les résultats de l'expérimentale et numérique.....	72

Conclusion générale

Bibliographique

Table des illustrations

Figures

Figure I.1: orthèse **bottes de nuit**

Figure I.2 : orthèse cruro-pédieuses nocturne

Figure I.3: prothèse posture de main

Figure I.4 : Orthèse poignet-pouce

Figure I.5 : Orthèse de main

Figure I.6 : Principes généraux de l'appareillage orthétique

Figure I.9 : différentes types d'orthèses

Figure I.10 : Différentes types d'attelles

Figure I.11 : différents matériaux thermoplastiques

Figure I.12 : Moule en plâtre

Figure I.13 : plaque thermoplastique

Figure I.14 : Plaque chaud sur le four positionné sur le moule plâtré

Figure I.15 : soudure de la plaque

Figure I.16 : Couper l'excédent de la plaque

Figure I.17 : L'outil à ponce

Figure I.18 : fixation des rivets

Figure I.19 : Les matériaux thermoplastiques sur le four

Figure II.1: Les différents types d'homopolymère

Figure II.2 : polymères linéaires

Figure II.3 : Homopolymère ramifié (a) et copolymère ramifié (b)

Figure II.4: Polymère réticulé avec ponts di-sulfure reliant deux chaînes

Figure II.5 : Principe de thermoformage

Figure II.6 : Molécules de polyéthylène

Figure II.7 : structure moléculaire d'un : (a) PEBD, (b) PEHD

Figure II.8 : Unité de base du polypropylène

Figure II.9: Structures moléculaires du polypropylène

Figure II.10 : Polypropylène isotactique

Figure III.1 : Machine de traction.

Figure III.2 : Exemple de courbe de traction

Figure III.3 : Zone de striction

Figure III.4 : éprouvette

Figure III.5: Schématisation de l'essai de résilience

Figure III.6 : essai de dureté Brinell

Figure III.7 : essai de Rockwell type B

Figure III.8: Machines de CEAST ASTM D-1922 et machine d'entailleuse ASTM D-256 avec le moule de l'éprouvette

Figure III.9 : Géométrie de l'éprouvette de traction

Figure III.10 : Géométrie de l'éprouvette de choc

Figure III.11 : machine de choc Charpy Zwick/Roell 5113

Figure III.12 : Représentation du mouton-pendule et des hauteurs à prendre en compte pour le calcul de l'énergie absorbée

Figure III.13 : L'éprouvette avant et après l'essai de choc

Figure III.14 : Courbe de choc pour le PE

Figure III.15: machine de traction

Figure III.16 : les éprouvettes pour l'essai de traction Zwick/Roell Z050 pilotées par ordinateur

Figure III.17: Courbe contrainte-allongement d'éprouvette de PE d'épaisseur 4mm

Figure III.18: Courbe contrainte-allongement d'éprouvette de PE d'épaisseur 5mm

Figure III.19 : Courbe contrainte-allongement d'éprouvette de PE d'épaisseur 6mm

Figure III.20 : Courbe contrainte-allongement d'éprouvette de PE d'épaisseur 4mm et vitesse 2mm/s

Figure III.21 : Courbe contrainte-allongement d'éprouvette de PE d'épaisseur 6mm et vitesse 2mm/s

Figure III.22 : Courbe contrainte-allongement d'éprouvette de PE d'épaisseur 5mm et vitesse 2mm/s

Figure III.23 : Courbe contrainte-allongement d'éprouvette de PE d'épaisseur 4mm et vitesse 1mm/s

Figure III.24 : Courbe contrainte-allongement d'éprouvette de PE d'épaisseur 5mm et vitesse 1mm/s

Figure III.25 : Courbe contrainte-allongement d'éprouvette de PE d'épaisseur 6mm et vitesse 1mm/s

Figure III.26 : Courbe contrainte-allongement d'éprouvette de PE d'épaisseur 4mm et vitesse 0,5mm/s

Figure III.27 : Courbe contrainte-allongement d'éprouvette de PP d'épaisseur 4mm et vitesse 3mm/s

Figure III.28 : Courbe contrainte-allongement d'éprouvette de PP d'épaisseur 4mm et vitesse 2mm/s

Figure III.29 : Courbe contrainte-allongement d'éprouvette de PE d'épaisseur 4mm et vitesse 1mm/s

Figure III.30 : zone de striction pendant l'essai de traction

Figure III.31 : Eprouvettes testées pour différentes vitesses.

Figure III.32: Courbe de contrainte-allongement pour du PE d'épaisseur 4mm à vitesse 150mm/mn

Figure III.33: Comparaison des courbes contrainte-déformation des deux matériaux PP et PE

Figure III.34: courbes contrainte-allongement pour éprouvette de PE d'épaisseur 4mm et à différents vitesses

Figure III.35 : courbes contrainte-allongement pour éprouvette de PE d'épaisseur 6mm et à différents vitesses

Figure III.36: courbes contrainte-allongement pour éprouvette de PE d'épaisseur 5mm et à différents vitesses

Figure III.37 : courbes contrainte-allongement pour éprouvette de PP d'épaisseur 4mm et à différents vitesses

Figure III.38 : Surface de PE d'épaisseur 4mm (x100)

Figure III.39 : Surface de rupture PE d'épaisseur 4mm (x50)

Figure III.40 : Surface de rupture PE d'épaisseur 4mm (x100)

Figure III.41 : Surface de PE d'épaisseur 4mm (x50)

Figure III.42 : Surface de PE d'épaisseur 5mm (x50)

Figure III.43 : Surface de rupture d'épaisseur 5mm (x50)

Figure III.44 : Surface du point de rupture PE d'épaisseur 5mm (x50)

Figure III.45 : Surface de rupture PE d'épaisseur 5mm avec des impuretés et des instruisis (x100).

Figure III.46 : Surface du point de rupture PE d'épaisseur 6mm (x50)

Figure III.47 : Surface de PP d'épaisseur 4mm (x100)

Figure III.48 : Surface de PP d'épaisseur 4mm (x100 après l'essai (x100).)

Figure III.49 : Les instruisis dans le PE d'épaisseur 5mm

Figure III.50 : les impuretés sur la surface de PP d'épaisseur 5mm (x100)

Figure III.51 : les impuretés sur la surface de PE

Figure III.52: Machine de dureté Rockwell Zwick 5113

Figure III.53 : Géométrie de l'éprouvette sur la simulation

Figure III.54 : Contrainte d'éprouvette de PE par simulation d'Abaqus

Figure III.55 : Déformation d'éprouvette de PE par simulation d'Abaqus

Figure III.56 : Courbe contrainte-déformation de l'éprouvette de PE par simulation d'Abaqus

Figure III.57: Contrainte d'éprouvette de PP par simulation d'Abaqus

Figure III.58 : Contrainte d'éprouvette de PP par simulation d'Abaqus

Figure III.59 : Contrainte d'éprouvette de PE par simulation d'Abaqus

Figure III.60 : Courbe contrainte-déformation d'éprouvette de PE numérique et expérimentale

Figure III.61 : Courbe contrainte-déformation d'éprouvette de PP numérique et expérimentale

Tableaux :

Tableau I.1 : Evolution de la consommation de polyéthylène

Tableau II.2: Caractéristiques du polypropylène

Tableau II.3: Production du polypropylène en Europe occidentale de 2000 à 2002

Tableau III.1: dimension des éprouvettes d'essai selon la norme ASTM D-1922

Tableau III.2 : Essai de choc pour le PE

Tableau III.3 : Les moyens d'énergie de choc

Tableau III.4: la résilience des éprouvettes de PE

Tableau III.5 : Les dimensions des éprouvettes des essais

Tableau III.6: Les propriétés mécaniques des PE

Tableau III.7: Les propriétés mécaniques des PP

Tableau III.8 : La dureté de l'essai de traction pour PE d'épaisseur 4mm

Tableau III.9: La dureté de l'essai de traction pour PE d'épaisseur 4mm

Tableau III.10: La dureté de l'essai de traction pour PE d'épaisseur 6mm

Tableau III.11: La dureté de l'essai de traction pour PE d'épaisseur 5mm

Tableau III.12: La dureté de l'essai de traction pour PP d'épaisseur 4mm

Résumé :

Le travail présenté dans ce document a été entrepris dans le cadre d'un projet de recherche industriel visant à modéliser le comportement mécanique en traction, au choc et la dureté ont été menés sur des polymères thermoplastiques à usage orthopédique fabriqué par ONAAPH Annaba à base de PE et PP.

Les éprouvettes sont selon la norme ASTM D-1922 découpées sur des plaques des PE et PP de différentes épaisseurs. Ces plaques proviennent de l'entreprise ONAAPH. Elles ont été découpées au sein des entreprises Polymed skikda et Alpha pipe Annaba. Les essais en traction, de résilience et de dureté ont été menés au département de métallurgie de l'université d'Annaba. La microscopie a été menée au sein de l'école de mines. Afin d'obtenir les données nécessaires à la modélisation par éléments finis à logiciel Abaqus des essais visant à mesurer les propriétés mécaniques et comparer par l'essai expérimentale.

Les résultats obtenus à la suite de cette étude préliminaire ont été jugés sur les deux matériaux, compte tenu de la rigidité ainsi que l'épaisseur de PE les plus fiables parmi les trois épaisseurs utilisée par ONAAPH.

Mots clé : Polyéthylène, Polypropylène, essai de traction, essai de choc, dureté, vitesse, l'épaisseur.

Introduction générale

Les matériaux thermoplastiques suscitent un vif intérêt grâce à leurs importantes applications industrielles. Cet attrait est concrétisé par de nombreux travaux concernant leurs réponses mécaniques. En effet, leurs lois de comportement présentent un intérêt fondamental et contrôlent les procédés de mise en forme.

Parmi ces polymères, le polyéthylène et le polypropylène. Ces matériaux sont encore aujourd'hui, l'objet de nombreuses recherches tant sur le plan fondamental qu'au niveau de leurs applications potentielles. Pour cela on a utilisé ces matériaux pour la réalisation des orthèses et des prothèses provisoires pour personnes handicapées.

Les essais mécaniques sont l'étape indispensable pour accéder aux grandeurs caractéristiques des matériaux, du module d'Young à la limite d'élasticité, en passant par la résistance à la rupture, et ce dans des conditions variables, par exemple la vitesse de sollicitation. Le propos de cette étude est de présenter les techniques expérimentales les plus couramment utilisées, aussi bien dans les laboratoires universitaires qu'industriels, pour caractériser le comportement mécanique des matériaux qui utilisent pour la fabrication des appareillages orthopédiques pour personnes handicapées et plus précisément la fabrication des orthèses et des prothèses provisoires.

Cependant notre travail consiste à étudier le comportement mécanique de PE et PP soumis à une traction, au choc et la dureté des matériaux sous l'effet de la vitesse d'étirage et analyser l'évolution de la géométrie des courbes contrainte déformation obtenue.

Ce travail se compose de cinq chapitres :

- ❖ Le premier chapitre comporte une présentation de l'entreprise et leurs travaux avec la réalisation des orthèses.
- ❖ Le deuxième chapitre comporte une étude bibliographique sur la généralité des polymères et les matériaux qui ont été étudiés (PE et PP). Dans laquelle nous présentons leurs propriétés principales et leurs caractéristiques diverses.
- ❖ Dans le troisième chapitre nous présentons l'essai mécanique de traction, l'essai de choc, de dureté ainsi que l'exposition de l'éprouvette utilisée. Et nous présentons une étude expérimentale sur les éprouvettes lors des essais sous l'influence des différentes vitesses, et par la suite on va étudier la simulation des éprouvettes par un logiciel de simulation qui est Abaqus. Nous avons aussi utilisé la microscopie optique, pour mieux visualiser les défauts engendrés au sein du matériau. A la fin de ce chapitre qui est le dernier consacré à la présentation des résultats obtenus et leur interprétation.

Chapitre I : L'entreprise

I.1 Historique :

Répondant aux exigences de la modernisation, cette "industrie" destinée, au lendemain de l'indépendance du pays, à alléger les souffrances des victimes de guerre de libération nationale, contribue aujourd'hui à l'insertion des personnes et couvre les besoins spécifiques de malades de façon globale.

Les appareillages orthopédiques, étaient destinés dès l'indépendance de l'Algérie en 1962, à la prise en charge des victimes de la guerre de libération nationale au moyen d'ateliers mobiles (camions aménagés). Quant à la fabrication de ces appareillages, elle était à cette époque assurée par les établissements étrangers "Lebret", situés jadis à la place des martyrs (Alger).

Après l'indépendance, le souci consistait à assurer la disponibilité des produits essentiels, notamment les prothèses destinées aux amputés et les orthèses aux patients présentant des déformations orthopédiques au niveau des membres.

Auparavant, fabriqués en bois et moins souples, ces appareillages (prothèses) pesaient environ 15 kg, alors que le corset qui est un organe de correction des déformations de la colonne vertébrale, était à cette époque fabriqué en plâtre. Par la suite, les efforts étaient orientés vers des améliorations progressives du produit dans le but d'assurer la promotion et le développement de ce secteur. En effet, en 1972, la Caisse nationale de la sécurité sociale avait repris les établissements "Lebret" et créé par la suite le Centre national d'appareillages orthopédiques (CNAO).

Durant les années 1980, le même produit (prothèses) qui était fabriqué en acier et cuir et pesait environ 8 kg, a été développé durant la période 1990-2010 en utilisant le plastique et le poids avait reculé pour atteindre 6 à 4 kg. L'évolution de la fabrication des prothèses est donc passée de l'utilisation du bois, de l'acier, du cuir puis du plastique, à l'emboîture sous forme de quillon à un pied dynamique.

Après 50 ans d'indépendance, la prise en charge en appareillages profite actuellement à 250.000 patients, dont les bénéficiaires des appareillages orthopédiques et des aides techniques à la marche. Il s'agit notamment des personnes handicapées de naissance, les personnes atteints de la scoliose, les diabétiques, les victimes d'accidents de la circulation et de travail.

Les appareillages destinés à l'ensemble des patients sont pris en charge par l'Office national de l'Appareillages et Accessoires pour personnes handicapées (ONAAPH) créé par décret n°88-27 du 09 février 1988 en Alger (Ben aknoun), avec un statut juridique d'entreprise publique à caractère industriel et commercial "EPIC".

I.2 Présentation de l'entreprise :

L'ONAAPH est un établissement public à caractère industriel et commercial disposant de plusieurs unités de fabrication et antennes polyvalentes implantées à travers le territoire national.

L'office national d'appareillages et d'accessoires pour personnes handicapées est une entreprise spécialisée dans la fabrication, le développement, la promotion et la distribution des produits et moyens techniques et aides sanitaires sur mesure et de série relative aux affections de l'appareil locomoteur auditive, acuité visuelle et autres pathologies telles que les incontinences unitaires, colostomies et autres.

L'ONAAPH possède un réseau important de fabrication, d'accueil, de prestation et de distribution des moyens techniques et sanitaires implanté à travers le territoire national, un savoir-faire et une maîtrise de la technologie au service de la personne handicapée. :

04 agences

11 centres de fabrication.

14 unités de production.

32 antennes.

07 centres de lunetterie.

05 centres d'audio-prothèse.

I.3 Domaines d'activités :

La mission de l'office, est la réalisation des objectifs ayant pour sujet, la rééducation, la réadaptation et la réinsertion des personnes handicapées. "Assurer la réalisation des appareillages et aides techniques à la marche pour personnes handicapées, organiser et assurer la maintenance des produits d'appareillage, aides techniques à la marches et accessoires et de participer à l'élaboration des normes en matière d'appareillages", figurent également parmi les missions de l'Office.

Trois domaines d'activités stratégiques sont inscrits dans le cadre de la prise en charge gérée par l'ONAAPH, dont les appareillages orthopédiques qui sont fabriqués localement dans les unités de production de l'office (prothèses, orthèses, des attelles), alors que la matière première est importée de l'Europe.

La deuxième activité stratégique de l'office porte sur la prise en charge en matière d'aides techniques à la marche, notamment les fauteuils roulants dont la production est 100% locale, en plus des voiturettes et des poussettes pour les enfants ayant une insuffisance motrice cérébrale (IMC). L'évolution de la voiturette est passée du démarrage à tirette durant les années 1990 au démarrage à moteur complètement rénové en 2012.

I.4 L'entreprise aujourd'hui :

L'ONAAPH améliore sans cesse le développement de l'appareillage orthopédique et les accessoires pour personnes handicapées :

- Par l'introduction dans le processus de fabrication de nouveaux produits de haute technologie.
- Par la formation continue de son personnel technique tant au plan national et étranger.
- Par l'acquisition de nouveaux équipements de production et d'outillages spécifiques.

L'industrie orthopédique aujourd'hui nous offre une gamme très large de composants mécaniques, organes ainsi que des matières premières plastiques de haute technologie en différents matériaux, titane, carbone, alliage léger, silicone, kevlar, ct. Le choix de composants et matériaux doivent obéir à ces paramètres de prescription suivants :

- l'état de santé du patient et son poids.
- l'activité du patient
- l'environnement du patient.
- Et enfin son degré d'acceptations.

C'est pour cela qu'une politique médicale de l'appareillage orthopédique est menée au sein de l'entreprise par la présence d'un médecin spécialiste au sein des structures de l'ONAAPH.

L'ONAAPH assure également une prise en charge dans le domaine de l'audiologie, par l'importation de l'appareillage audio logique, pour la disponibilité de produits couvrant tous les types de surdités. Par ailleurs, des négociations sont en cours entre l'ONAAPH et la sécurité sociale pour assurer des produits modernes beaucoup plus légers et souple qui pèseront entre 800 g à 2 kg. En utilisant de nouveaux matériaux notamment la fibre en carbone, selon des responsables à l'Office.

Assurer la "disponibilité" du produit pour une "prise en charge immédiate" et "plus correcte" des personnes handicapées, représentait également parmi les objectifs.

L'intégration de nouvelles technologies dans la conception, la fabrication et le réglage des appareillages orthopédiques a été un défi relevé pour une meilleure insertion des assurés sociaux particulièrement les personnes handicapées, dans la vie sociale.

La production de ces nouveaux moyens s'inscrit dans le cadre du développement des capacités de production de l'ONAAPH et de l'intégration de nouvelles techniques de fabrication dans le processus d'appareillage conformément aux orientations stratégiques de l'Etat pour faire face à la mondialisation".

I.5 Les appareillages utilisés par l'entreprise :

L'appareillage orthopédique est un ensemble de moyens techniques de compensation des déficits moteurs. Il comprend l'appareillage de série et celui réalisé sur mesure. Ils diffèrent par leur qualité, leur mise en œuvre, les mécanismes d'attribution et la prise en charge. Les différents domaines de l'appareillage sont :

I.5.1 Les prothèses :

Permettent la reprise de la marche et la station debout les personnes amputées d'un membre inférieur. Il existe également des prothèses pour les membres supérieurs, dont le rôle est plus esthétique que fonctionnel ; des recherches sont actuellement menées sur des prothèses permettant la préhension des objets.

a. - Prothèses de membre supérieur :

Il peut s'agir d'amputations congénitales (agénésies) ou acquises. Unilatérales, elles sont assez bien compensées par l'agilité du membre controlatéral. Bilatérales, elles entraînent une détresse fonctionnelle majeure. L'enfant qui naît avec un membre absent s'adapte à cette situation. L'adulte, victime d'un accident de la route ou du travail, réalise une adaptation plus difficile, surtout s'il a perdu son membre dominant (main, avant-bras, bras droit chez un droitier) et si son métier est manuel.

b. - Prothèses de membre inférieur :

L'amputation concerne à l'heure actuelle en majorité des personnes âgées, artéritiques, dont l'état général et en particulier cardio-vasculaire justifie une prise en charge adaptée. Les amputations chez les adultes jeunes (traumatologie de la route, accidents de travail) sont moins fréquentes. Les prothèses doivent répondre à deux exigences principales : permettre l'appui et la propulsion, être solidaire du corps.

I.5.2 Les orthèses :

Les orthèses sont des appareils visant à corriger une fonction déficiente, à compenser une incapacité ou à accroître le rendement physiologique d'un membre. Les orthèses sont personnalisées et existent sous de nombreuses formes tant le choix en terme d'articulations et de combinaisons des matériaux est large. Les orthèses sont réalisées spécifiquement en fonction de l'effet désiré (correction, maintien besoins du patient...) en recherchant une fonctionnalité maximale pour un encombrement minimum (Ces appareils suppléent à des fonctions motrices défaillantes au niveau des membres et du rachis).

I.5.2.1 Orthèse des membres inférieurs : Appareillage de nuit

Les orthèses nocturnes peuvent intervenir en complément de l'appareillage diurne pour obtenir ou conserver un gain d'amplitude articulaire. Ces orthèses personnalisées existent sous de nombreuses versions afin d'obtenir une correction immédiate ou progressive suivant les pathologies à traiter. Elles peuvent être cruro-pédieuses ou suro-pédieuses, articulées ou non, toutes les combinaisons étant possibles du fait du grand choix en matière d'articulations et de matériaux. Elles sont destinées à maintenir ou réduire les malformations et enraidissements en évitant les malpositions nocturnes grâce à un maintien contrôlé du genou, de la cheville et du pied.

Les bottes de nuit :

Permettent un maintien contrôlé de la cheville et du pied pour éviter les malpositions nocturnes lors de rétractation musculaire et obtenir ou conserver un gain d'amplitude articulaire. Elles sont préconisées dans le cas de pathologies principalement d'origine neurologique ou congénitale entraînant des troubles orthopédiques et statiques du pied. Ces orthèses (figure I.1)

personnalisées existent sous de nombreuses formes, articulées ou non, tant le choix en termes d'articulations et de combinaisons des matériaux est large.

Les orthèses cruro-pédieuses nocturne :

Cette orthèse est destinée à traiter les défaillances du membre inférieur. Les orthèses cruro-pédieuse nocturnes (figure I.2) sont destinées à maintenir ou réduire les malformations et enraidissements des articulations du genou et de la cheville. Ces orthèses personnalisées existent sous de nombreuses versions afin d'obtenir une correction immédiate ou progressive suivant les pathologies à traiter, et peut être classée en deux fonctions :

- Soit en orthèse de posture rigide ou articulée verrouillable, elle est réalisée sur moulage pour un maintien optimal dans la position prescrite.

- Soit en orthèse de marche, elle est alors articulée au genou et dans certains cas à la cheville, prenant tout ou partie du pied.

Les orthèses cruro-pédieuses de marche sont destinées à compenser les atteintes du genou d'origine neurologique, musculaire, ligamentaire ou osseuse. Ces atteintes peuvent être associées ou non à des déficiences de la hanche et de la cheville.



Fig I.1: orthèse bottes de nuit



Fig I.2 : orthèse cruro-pédieuses nocturne

I.5.2.2 Orthèses des membres supérieurs :

Il existe 3 orthèses a fabriqué : orthèse bras et avant-bras et main, orthèse bras et avant-bras, orthèse avant-bras et main.

Ces orthèses permettant l'immobilisation du poignet dans la position demandée. Cette immobilisation permet de prévenir, corriger ou diriger une déformation, de traiter une inflammation ou un traumatisme. Orthèse réalisée sur le patient ou à la suite d'un moulage selon la morphologie et la position d'immobilisation nécessaire. Possibilité d'utiliser des couleurs et des matériaux personnalisés.

I.5.2.2.1 Orthèse avant-bras-main :

a. Les orthèses pour la main :

La main est impliquée dans la plupart des activités de la vie quotidienne : outil de préhension, organe du toucher et de relation. Dans de nombreuses situations, maladies ou traumatismes, les fonctions de la main sont atteintes. L'appareillage est proposé pour aider à les récupérer. Les orthèses de la main (figure I.5) sont de posture, de fonction ou dynamiques. Le choix, la fabrication et l'adaptation de telles orthèses sont complexes. Cela relève de services spécialisés et de personnes entraînées.

Les orthèses de postures : (figure I.3) servent à placer la main dans une position précise, fonction de l'affection qui la touche et du but recherché : posture antalgique, prévention de déformations, gain d'amplitude articulaire. Dans ces indications, les orthèses de série peuvent être en compétition avec les orthèses sur mesure, selon la gravité et la complexité de la situation.

Les orthèses de la main (doigt, pouce, poignet, palmaire...) peuvent être de série ou réalisées sur mesure en fonction des indications et des objectifs poursuivis.

Les orthèses sur mesure :

Les orthèses de main dites sur mesure sont soit thermoformées directement sur le membre du patient, soit réalisées à partir d'un positif en plâtre dont les empreintes ont été prises sur la main du patient. Elles permettent une adaptation fine et un positionnement précis, adapté à la morphologie du patient.

Les orthèses de série :

Les orthèses de main pré-fabriquées sont dites de série. Elles permettent une immobilisation simple sans positionnement particulier. Elles existent en plusieurs tailles et allient efficacité et esthétique.

b. Les orthèses de bras et d'avant-bras:

Les orthèses de bras et d'avant-bras existent en modèles préfabriqués pour les cas simples, ou sont réalisées sur mesure pour les pathologies complexes nécessitant une utilisation sur le long terme et devant répondre à des critères de solidité, résistance et durabilité.

Il existe deux catégories d'orthèses : Les orthèses d'immobilisation et les orthèses dynamiques.

- **Les orthèses d'immobilisation (ou statiques) :** Elles permettent de mettre au repos une chaîne articulaire en l'immobilisant. Elles sont destinées à prévenir, corriger ou diriger une déformation, ou à traiter une inflammation ou un traumatisme.
- **Les orthèses dynamiques :** Elles permettent de récupérer, suppléer ou remplacer une fonction manquante ou déficitaire, en exerçant une tension sur un ou plusieurs segments.

c. Orthèse poignet-pouce :

L'orthèse de poignet-pouce (figure I.4) sur mesure est thermoformée. Elle peut être réalisée sur moulage ou en application directe sur le patient. Elle permet le positionnement et l'immobilisation totale du poignet et de la colonne du doigt. Cette orthèse est préconisée pour un traitement temporaire en cas d'entorse du poignet, de tendinite de Quervain, de fracture du premier métacarpe, de séquelles de fracture du scaphoïde ou toutes autres pathologies nécessitant une immobilisation.

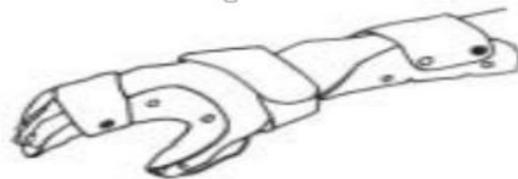


Fig I.3: prothèse posture de main



Fig I.4 : Orthèse poignet-pouce

d. Orthèse palmaire :

L'orthèse palmaire de repos est thermoformée et est réalisée sur moulage ou en application directe sur le patient. Elle permet l'immobilisation et le positionnement de la main et du poignet. Cette orthèse palmaire est préconisée en cas de polyarthrite, d'arthrose, d'hémiplégie ou de toute autre pathologie nécessitant une immobilisation.



Fig I.5 : Orthèse de main

I.5.2.3 Orthèse de tronc : Conçus pour maintenir ou redresser des segments vertébraux, nos corsets présentent de nombreuses possibilités de formes, de fonctions et de matériaux permettant de s'adapter aux objectifs définis par le prescripteur. L'appareillage du tronc regroupe :

1. Les corsets : appareillage intervenant en post-opératoire, traitement ou prévention du rachis, réalisé à la morphologie du patient, et pour une durée provisoire ou définitive, quelque soit la durée du port.

Corset de maintien :

Les corsets de maintien sont des appareils de tronc, simples, dont le but est de maintenir le rachis, dans une position bien définie, pour un traitement rumathologique, un traumatisme ou en post-opératoire.

Ce corset réalisé sur moulage plâtré et prise de mesures offre un confort optimal tout en respectant l'efficacité thérapeutique requise. Le corset est aussi une solution à la douleur et est utilisé à titre antalgique.

Leur durée de port est majoritairement provisoire, et toujours à la décision du médecin prescripteur.

Sa taille et sa forme varient en fonction de l'atteinte sur la colonne vertébrale, mais englobe toujours le bassin.

Les matériaux utilisés pour sa conception sont de densité et d'épaisseur variables, en adéquation avec la pathologie et le morphotype du patient, mais restent des plastiques et mousses thermoformables (polyoléfinés) à usage médical. Le corset peut être monovalve pour une mise en place facile tout en restant discret.

- **Corset de maintien monovalve :** (figure I.7) est destiné pour le maintien sèvre des déformations irréductibles, est également prescrit pour les traumatismes du rachis lombaire. Les matériaux utilisés pour sa fabrication sont : polypropylène, intérieur PE lite, et fermeture antérieure.
- **Corsets spéciaux sur mesure :** (figure I.8) Mis à part les corsets pour troubles dégénératifs vertébraux ou pour les fractures vertébrales, nous avons aussi la possibilité de réaliser des corsets sur mesure pour les troubles statiques rachidiens afin de corriger les cyphoses ainsi que les scolioses chez l'enfant et l'adolescent en profitant de leur croissance. Chez l'adulte, certains troubles statiques douloureux peuvent également être traités par ces orthèses, à visée surtout antalgique.



Fig I.7 : corset de maintien monovalve



Fig I.8 : corset spéciaux sur mesure

2. Les types de corset :

- Le corset de type 1 immobilise le rachis lombaire. Il est constitué de deux valves latérales réunies postérieurement par une plaque équipée d'un coussin lombaire gonflable à effet proprioceptif. L'action d'élongation du corset a un effet antalgique et anti-inflammatoire. Il est préconisé dans le cas de sciatique, de lombalgie aigüe d'origine discale, de lombalgie post-traumatique et de lombalgie sur spondylolisthésis. (figure I.9.1)

- Le corset de type 2 est préconisé pour une immobilisation stricte du rachis lombaire bas. Il peut être :
 - bivalve pour une facilité de mise en place en décubitus
 - monovalve à ouverture antérieure

Le corset lombaire (figure I.9.2), réalisé sur mesure personnalisé et adapté à chaque patient. Sa structure en matériau thermoformable rigide ou semi-rigide permet une adaptation aisée. Il est indiqué en post-opératoire, de le cas de lombalgie chronique et/ou aiguë, de discopathie, d'hyperlordose, de spondylolisthésis...

- Le corset de type 3 est préconisé pour une immobilisation stricte du rachis thoracique et lombaire. Il peut être :
 - bivalve pour une meilleure stabilisation antéro-postérieure et une facilité de mise en place en décubitus
 - monovalve à ouverture antérieure pour les patients autorisés à mettre leur corset debout

Ce corset (figure I.9.3), réalisé sur mesure personnalisé et adapté à chaque patient avec différentes variantes

- appui sous-claviculaire
- appui sternal central fixe ou réglable en hauteur

Il est indiqué en post-opératoire, en cas de fractures et tassements vertébraux, de cyphose et scoliose adulte douloureuses, de lésions vertébrales étagées, de spondylarthrite ankylosante.

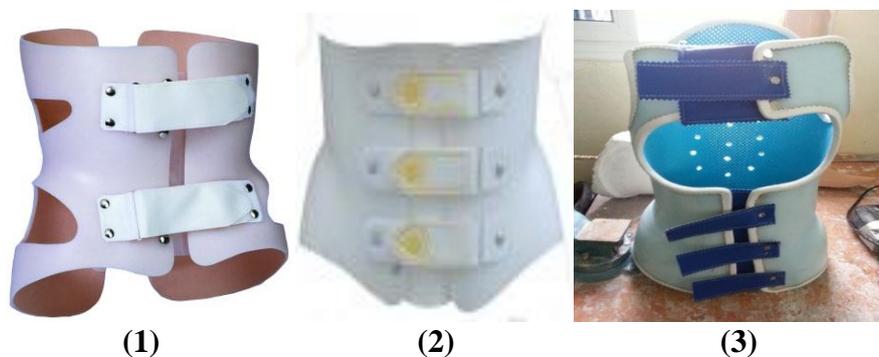


Fig I.9 : différentes types d'orthèses

Pour les corsets de type 2 et 3 le port d'un t-shirt sans couture sur les côtés est recommandé. Ce t-shirt protégera la peau du patient contre toute irritation due au frottement du corset.

I.5.3 Les attelles :

L'attelle est presque comme l'orthèse. Ces attelles (figure I.10) sont préconisées dans le cas de pathologies principalement d'origine neurologique entraînant des troubles orthopédiques et statiques du pied, telles que des séquelles d'hémiplégie ou paralysie de la sciatique poplitée externe. Il existe différentes attelles telles que :

1. Attelle cruro pédieuse : elle est destinée aux patients présentant des déformations au niveau des articulations du genou et tibio-tarsienne. Ces attelles de posture sont portées le soir et le jour et peuvent être utilisées pour guider une fracture en cours de consolidation. Elles sont également utilisées dans les centres de rééducation pour les paraplégiques. Les matériaux utilisés pour la conception sont : polyéthylène, plastazote, fermeture velcro, lavage à froid.

2. Attelle palmaire : elle est destinée aux patients présentant une déficience musculaire d'ordre neurologique, traumatique et déformation rhumatismale. Les matériaux utilisés pour la conception sont : polysar ou polyéthylène, fermeture velcro, lavage à froid.

Attelle en plastique malléable recouverte d'une mousse souple perméable à l'air, munie de fermetures velcro pour une immobilisation simple mais efficace.



Attelle de bras



Attelle cruro-pédieuse



Attelle palmaire

Fig I.10 : Différents types d'attelles

I.6 Principes généraux de l'appareillage orthétique :

D'une manière générale, grâce à l'association de divers principes mécaniques, les orthèses permettent d'atteindre de nombreux objectifs thérapeutiques et sont donc indiquées dans de nombreux cas.

I.6.1 Objectifs thérapeutiques :

- ✓ Immobiliser ou stabiliser une articulation ou un segment anatomique douloureux ou instable ou en cours de cicatrisation,
- ✓ Corriger un déficit d'amplitude articulaire ou la déformation d'une structure anatomique,
- ✓ Suppléer un déficit moteur,
- ✓ Favoriser la résorption d'une expansion liquidienne sous cutanée non infectieuse et non tumorale,
- ✓ Guider la cicatrisation cutanée afin de prévenir la rétraction et l'hypertrophie cutanées.

I.6.2 Principes mécaniques : Une même orthèse peut faire appel à un ou plusieurs principes mécaniques, (voir figure I.6) :

- **Stabilisation** : Les contraintes exercées sur les segments sont faibles.

Immobilisé Les segments sont immobilisés dans une position de repos.

Mobile L'orthèse guide les segments dans leurs mouvements.

Libre Les mouvements des segments peuvent s'effectuer dans toute leur amplitude.

Amplitude articulaire limitée Les mouvements des segments sont limités à des amplitudes articulaires maximales et minimales précises.

- **Posture** : Une force directionnelle constante est appliquée aux segments

a- Statique et statique en série :

Les segments sont immobilisés dans une position contrainte, la correction étant obtenue par la mise en place de plusieurs orthèses (ou la modification d'une même orthèse) amenant progressivement les segments dans la position désirée.

b- Statique progressive

Les segments sont immobilisés dans une position contrainte, la correction étant obtenue à l'aide d'un moteur non élastique réglable.

c- Dynamique :

À traction continue La force est exercée par un moteur élastique ou ressort, elle est constante quelle que soit la position des segments.

Dynastatique La force s'annule lorsque le segment atteint la position désirée.

d- Compressive

Rigide : La force est continue et s'exerce à travers une surface rigide

Elastique : L'orthèse exerce une contrainte élastique s'adaptant aux modifications de volume des segments mais s'opposant aux augmentations de volume.

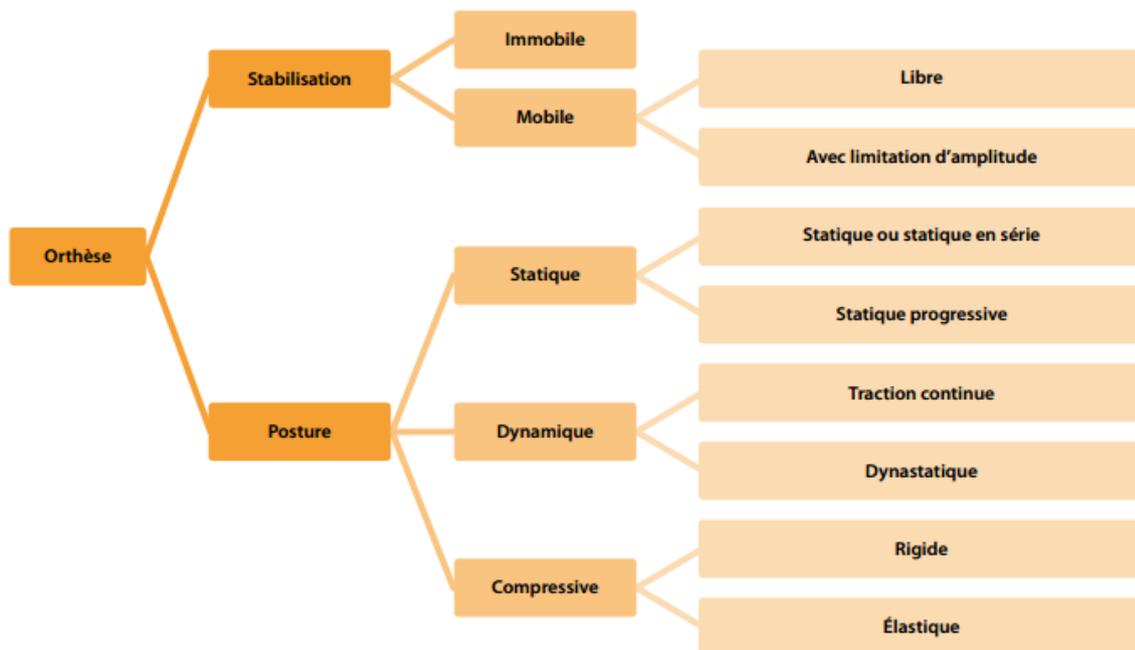


Fig I.6 : Principes généraux de l'appareillage orthétique

I.7 Réalisation des orthèses :

La réalisation d'orthèse de membre inférieur et supérieur nécessite une bonne maîtrise pour éviter des moments de forces qui augmentent l'usure des pièces, ainsi qu'une bonne connaissance des propriétés des matériaux utilisés pour éviter une déformation qui engendrera une mauvaise correction ou une rupture. Leurs propriétés ont une influence sur la flexibilité, le poids, le confort ou bien encore l'esthétisme de l'appareil. Comme les thermoplastiques qui nécessite la conditionnement sous forme de plaques de différentes épaisseurs, la Légers, résistants et esthétique personnalisable par l'emploi de papiers transferts et mise en œuvre rapide et retouches possibles. Autrefois fabriquées, lourd et peu fiable, nous réalisons désormais les attelles une méthode en fonction des indications médico-techniques et des exigences du patient.

I.7.1 Matériaux utilisée pour les orthèses : Tous les matériaux entrant dans la fabrication des appareils d'orthèse sont des matériaux thermoplastiques divers et variés. L'utilisation des matériaux doit faire l'objet d'un agrément préalable.

Les thermoplastiques : hautes températures appelée polyoléfines (figureI.11) (polyéthylène, polypropylène...), sont mis en œuvre de 150 à 200° sur des positifs. Les plastiques basse température type Polysar sont formés à 45-50° directement sur le patient. Le plastique offre des avantages par rapport à l'acier, au dural et au cuir : facilité et rapidité de mise en œuvre, moindre poids, rigidité ou souplesse en fonction de l'épaisseur et de la forme, adaptabilité ultérieure, diversité esthétique, entretien facile. Mais il est moins confortable et favorise la transpiration.



Fig I.11 : différents matériaux thermoplastiques

I.7.2 Technique de thermoformage :

Nous utilisons un matériau thermoplastique de différentes épaisseur (4, 5, 6mm...) que l'on thermoforme sur l'armature de l'orthèse en dural ; elle-même ajustée sur le positif plâtré. Ceci nous permet d'obtenir une inclusion des pièces métalliques pour augmenter la rigidité et la solidité de l'appareil. Les orthèses réalisées selon cette méthode sont relativement légères et leur finition s'apparente à celles des appareils classiques (garniture cousue en totalité sur le polypropylène). Réalisation d'après un moulage plâtré et prise de mesures : Il faut posséder des radios récentes du rachis de face et de profil en entier, c'est indispensable. Pour la réalisation parfaite d'une orthèse de tronc.

I.7.3 Etapes de fabrication des orthèses et des attelles :

- On réalise un moule en plâtre (fig I.12).
- Couper une plaque de thermoplastique en fonction des mesures (Circonférence supérieure, Longueur totale, Circonférence du cou-de-pied, main...) et nettoyer la avec un chiffon doux et propre.
- Chauffer la plaque de thermoplastique à 180° C pendant 20 à 25 minutes (figure I.13), selon les performances du four et l'épaisseur de la plaque.



Fig I.12 : Moule en plâtre



Fig I.13 : plaque thermoplastique sur le four



Fig I.14 : Plaque chaude positionnée sur le moule plâtré

- Positionner ensuite le thermoplastique sur le positif plâtré (figure I.14) sans étirement et faire la soudure (figure I.15) sur la face antérieure du bas vers le haut et serrer le autour du cône d'aspiration au moyen d'une sangle afin d'assurer un vide parfait.
- Faire ensuite le vide en ouvrant la vanne, la pompe à vide (dépression) ayant été mise en route préalablement.
- Couper l'excédent de thermoplastique lorsqu'il est encore chaud à l'aide d'une paire de ciseaux (figure I.16), puis poncer les bords. Assembler ensuite temporairement les montants sur le thermoplastique.
- Poncer les bords (figure I.17) de l'orthèse et fixer les montants sur le thermoplastique par des rivets en cuivre et fixer les sangles sur le thermoplastique par des rivets tubulaires (figure I.18)



Fig I.15 : soudure de la plaque



Fig I.16 : Couper l'excédent de la plaque



Fig I.17 : L'outil à ponce



Fig I.18 : fixation des rivets

Pour l'utilisation du plastazote on a chauffé le plastazote puis positionner sur le positif plâtré, ensuite on a chauffé le plaque du thermoplastique et positionner au-dessous de plastazote. Pour les enfants les couleurs et les dessins on met avec la plaque thermoplastique chauffer, quand le thermoplastique prend la couleur et les dessins des papiers on lève le papier de transfert de filature comme illustrés dans la figure I.19 suivant.



Fig I.19 : Les matériaux thermoplastiques sur le four

Chapitre II : Etude bibliographique du polymère et les matériaux étudiés

II.1 Introduction :

Les polymères, appelés communément "matières plastiques", sont indissociables de notre environnement et de notre vie pratique. Ils se sont imposés dans tous les domaines de nos activités: des objets les plus banals jusqu'à des applications techniques sophistiquées, en passant par leur utilisation dans les produits d'hygiène ou alimentaires.

Le plus souvent synthétiques, quelquefois naturels, ils doivent cet essor à leur large gamme de caractéristiques, durs, mous ou élastiques, transparents ou opaques, isolants et quelquefois conducteurs, plus ou moins résistants aux conditions agressives de leur usage, toujours légers. C'est la nature particulière de leurs molécules en forme de chaîne, ainsi que la variété des modes d'assemblage qu'elles adoptent, qui est à l'origine de cette diversité.

Bien que l'homme ait depuis longtemps utilisé des polymères naturels, comme les fibres textiles par exemple, il faut attendre 1830 pour que la science s'y intéresse. Au départ, on a transformé chimiquement des polymères naturels pour générer des polymères artificiels. La vulcanisation du caoutchouc en 1844 par Goodyear et la production de nitrocellulose pour remplacer la soie en sont les deux grands exemples.

Le terme polymère est pour la première fois utilisé en 1866 par Berthelot lors d'une de ses observations, il désigne ainsi probablement le premier polymère synthétique reconnu, le polystyrène. Une étape importante est franchie avec la production industrielle de polymères synthétiques, comme la bakélite en 1910. Même si la notion de macromolécule est présagée au début du XIXe siècle, de nombreux chercheurs ne voient là que des agrégats ou micelles. Cette notion n'apparaît que tardivement dans l'histoire de la chimie, dans les années 1920, avec les travaux d'Hermann Staudinger qui constituent la base de la science des polymères (Nobel en 1953) ou macromolécules. Flory énoncera plus tard les principes fondamentaux sur les polymères (Nobel 1974).

De 1920 à 1940 se développent les résines « phénol/formol » ; l'acétate de cellulose remplace le celluloid trop inflammable dans des applications type films photo ou cinématographique. Les premières matières thermoplastiques sont produites en grande quantité. Les polymères appartiennent à une science qui a pris son essor dans les années 40, car pendant la guerre, il est apparu nécessaire de fabriquer certains matériaux qui manquaient alors.

Avant 1940, il y avait déjà eu des sursauts. Les premiers soubresauts de la chimie des polymères sont apparus dès les années 1900. A cette époque, on distinguait les molécules organiques en deux catégories:

- Les cristalloïdes sont des composés organiques cristallisables, de température de fusion et de masses molaires définies.
- Les colloïdes sont des molécules visqueuses, ne cristallisant pas et ayant des températures de fusion mal définies. Lorsque l'on mesurait leur masse molaire, on la trouvait supérieure à 100 000. Cela renforçait l'idée que ces molécules étaient des agrégats. Les chimistes allemands appelaient cette chimie la chimie des saletés (« Schmutzen Chemie »).

En 1925, Staudinger déclare que les colloïdes sont une association de plus de 100 000 atomes de carbones reliés entre eux par des liaisons covalentes. A l'époque, c'est une hérésie. (Théorie de la chimie moléculaire).

Dans le début des années 1950, Carothers et Flory admettent et montrent que des édifices covalents de masse molaire supérieure à 100 000 existent. C'est le fondement de la théorie des polymères. Dès cette époque, on a établi la notion de polymères.

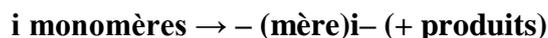
II.2 Définition :

Le mot polymère vient du grec « polus » plusieurs, et « meros » partie. Un polymère est une macromolécule, organique ou inorganique, constituée de l'enchaînement répété d'un même motif, le monomère (du grec monos: un seul ou une seule, et meros ; partie), reliés les uns aux autres par des liaisons covalentes.

Un polymère est une macromolécule de masse molaire très élevée ($> 25\,000\text{ g.mol}^{-1}$ jusqu'à 106g.mol^{-1}); elle est engendrée par la répétition d'une unité structurale appelée motif unitaire. La molécule simple de départ est appelée monomère donc on appelle polymère une grande molécule constituée d'unités fondamentales appelées monomères (ou motifs monomères) reliées par des liaisons covalentes. La macromolécule peut atteindre des masses molaires très élevées (plus de 10 millions g.mol^{-1}).

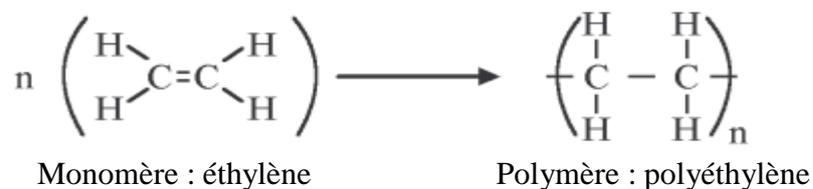
La macromolécule peut comporter jusqu'à 50 000 atomes de carbone, et pour de nombreux polymères commerciaux la masse molaire peut atteindre $1000000\text{ g.mol}^{-1}$. Certaines macromolécules deviennent ainsi visibles à l'œil nu (matériaux réticulés par exemple). La synthèse d'un polymère peut être assimilée à un jeu de construction dans lequel on dispose de pièces élémentaires mono, difonctionnelles ou de fonctionnalité strictement supérieure à 2. On appelle fonctionnalité le nombre de liaisons que la pièce est capable d'établir avec une autre pièce. Quand les motifs associés sont identiques, on parle d'homopolymère. Sinon, ce sont des copolymères : bipolymères, terpolymères sont les plus communs.

Les polymères sont des molécules organiques géantes avec haut poids moléculaire composé d'unités moléculaires répétitives appelés « mères » reliées par des liaisons covalentes. La structure moléculaire est créé par une réaction chimique appelée polymérisation (La polymérisation est un processus de transformation d'un monomère, ou d'un mélange de monomères, en polymère.) dans laquelle les monomères sont reliés entre eux par des liaisons covalentes pour former une chaîne moléculaire.



L'indice i indique le degré de polymérisation du polymère. Le nombre moyen de ces unités de base (monomères) dans les molécules finales (polymères) est le degré de polymérisation. Si ce degré de polymérisation est élevé, on parle de hauts polymères, lorsqu'il est faible, le composé est une oligomère.

Les polymères sont synthétisés en reliant des molécules de monomère entre elles par des liaisons chimiques covalentes: ce sont les réactions de polymérisation (réaction qui assemble les monomères en macromolécules), par exemple :



Il dérive de la polymérisation de l'éthène ou éthylène : $\text{CH}_2=\text{CH}_2$, monomère du polyéthylène. On écrit plus simplement le PE : $-(\text{CH}_2-\text{CH}_2)_n-$ avec n un entier. L'unité de répétition est $(\text{CH}_2-\text{CH}_2)$.

Le nombre n de motifs est appelé degré de polymérisation. Il s'agit d'une valeur moyenne sur un échantillon donné. La masse molaire est alors $M_n = n M_0$ où M_0 est la masse molaire du monomère.

II.3 Origine des polymères :

Polymères naturels : Issus des règnes végétal, animal ou minéral leur économique et le rôle qu'ils jouent dans les mécanismes vitaux leur à assurer une place de premier choix depuis une trentaine d'années. Cellulose, caoutchouc naturel (poly isoprène – vulcanisation du latex de l'hévéa), silicates, protéines, ...

Polymères artificiels : Sont obtenue par modification chimique de polymères naturels de façon à transformer certaines de leurs propriétés. Les esters cellulose (nitrocellulose, acétate de cellulose ...etc.), ébonite (caoutchouc fortement réticulé par le soufre).

Polymères synthétiques : Les molécules monomères qui permettent de les obtenir n'existent pas dans la nature. Cependant, on peut remarquer que les structures réalisées par synthèse sont souvent proches de celles des polymères naturels, issus de la chimie macromoléculaire, polychlorure de vinyle (PVC), polypropylène (PP), polyéthylène (PE), polyéthylène à basse densité (PE-BD), polyéthylène à haute densité (PE-HD), polyamide (PA), polytetrafluoréthylène (PTFE, " téflon "), polyéthylène téréphtalate (PET), polyméthacrylate de méthyle (PMMA), polycarbonate (PC), polystyrène (PS), polyuréthane (PU), polydiméthylsiloxane (silicone), ...

II.4 Classification des polymères : Il existe plusieurs modes de classification des polymères que peuvent être classés selon divers critères :

II.4.1 Selon leur nature chimique : On distingue :

- **Polymères minéraux** : Ils sont constitués soit de chaînes renfermant un seul corps simple: diamant, graphite, phosphore, soufre...Ou de chaînes renfermant plusieurs hétéroatomes : (silicates acides polyphosphoriques, chlorure de polyphosphonitrile).
- **Polymères organiques** : C'est la classe la plus riche comme : les polydiène, les polyacryliques, les polyamides, les polyvinyliques.
- **Polymères mixtes** : Doués de propriétés intéressantes dont une bonne résistance thermique (~300°C – 350°C) comme les silicones.

II.4.2 Selon leur domaine d'application: On le regroupe les polymères en 3 grandes catégories:

- **Les polymères de grande diffusion** : Encore appelés polymères de commodité, dont la production annuelle s'évalue par millions de tonnes, sont devenus d'un emploi quotidien pour tous. Le polyéthylène, le polystyrène, le poly (chlorure de vinyle) et quelques autres sont à classer dans cette catégorie d'une importance économique considérable.
- **Les polymères techniques** : Ont des caractéristique qui leur permettent de se substituer, de plus en plus aux matériaux traditionnels (métaux, céramiques...) pour nombreuses application ; les polyamides, les polyacétales...fond partie de cette famille.
- **Les polymères spéciaux** : Ou polymères de fonction Présentent généralement une propriété qui induit leur utilisation pour une application particulière. C'est dans cette catégorie que se trouvent les polymères conducteurs, photo actifs, thermostables, adhésifs.

II.4.3 Selon les usages technologiques : On peut distinguer :

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

II.4.4 Selon l'importance économique :

Pour les polymères, comme pour tous produits industriels, il existe une corrélation entre le tonnage et le prix, ceci permet de distinguer trois grandes catégories de polymères commerciaux

- Les polymères de grande diffusion : dont le volume des ventes et de production est élevé et dont le prix est faible. Comme : PE, PP, PS, PVC.
- Les polymères à hautes performances : dont le volume des ventes est le plus faible et les prix les plus élevés.
- Les polymères techniques : dont le volume et le prix sont intermédiaires entre les deux catégories précédentes, comme : polyamides, Polyéthylène.

II.5 Types de polymère :

Les polymères peuvent être constitués d'un seul motif (homopolymères) ou, plus fréquemment, de deux motifs M et M' différents (copolymères).

- **Les homopolymères** : sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité. Parmi les homopolymères, on peut citer le polyéthylène. Il existe, au sein des homopolymères, différentes familles (figure II.1). Parmi les différents types d'homopolymères, nous trouvons :

- 1- Les homopolymères linéaires. A-A-A-A-A-A-A-A
- 2- Les homopolymères branchés.
- 3- Les homopolymères étoilés (tridimensionnels).

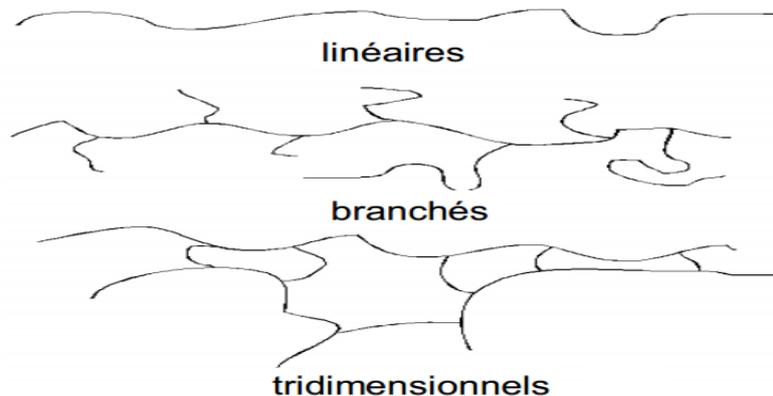


Fig II.1 : Les différents types d'homopolymère

- **Les copolymères** : Les copolymères sont des polymères qui possèdent plusieurs unités formés à partir de monomères différents. Comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se classer dans différentes familles. On parle alors de modes de copolymères. Parmi les différents modes de copolymères, nous trouvons :

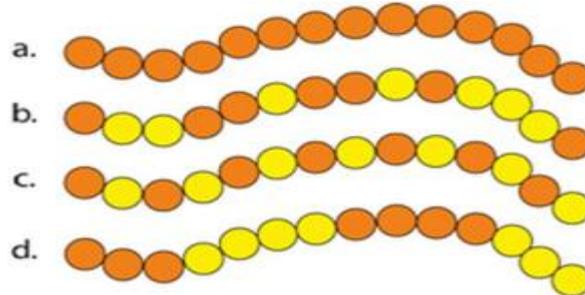
1. le mode statistique. A-A-B-A-B-B-B-B-A-A-B
2. le mode alterné. A-B-A-B-A-B-A-B-A-B-A
3. le mode séquencé. A-A-A-A-A-B-B-B-B-B
4. le mode greffé.

II.6 Structure des polymères :

Les polymères peuvent présenter des architectures extrêmement variables. Ils peuvent être linéaires, ramifiés ou réticulés. Le plus souvent, ils sont amorphes, parfois ils peuvent être, au moins partiellement, cristallisés.

II.6.1 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 figure II.2 suivante donne différents exemples de polymères linéaires.



(a: homopolymère, b: copolymère statistique, c: copolymère alterné, d: copolymère séquencé)

Fig II.2 : polymères linéaires

II.6.2 Polymères ramifiés :

Des chaînes homopolymériques ou copolymériques peuvent se greffer (figure II.3) 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.

II.6.3 Polymères réticulés :

Les polymères, qu'ils soient homo ou copolymères, peuvent être réticulés. Un polymère réticulé est un polymère dont certaines de ses chaînes sont reliées entre elles par des ponts chimiques covalents. La plupart des polymères doivent être réticulés avant leur utilisation. En effet, un polymère est un liquide et pour le maintenir en place, il faut le réticuler. La réticulation correspond à la formation de liaisons chimiques (figure II.4) 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.

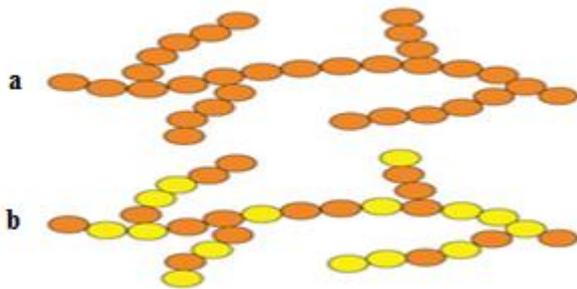


Fig II.3 : Homopolymère ramifié (a) et copolymère ramifié (b)

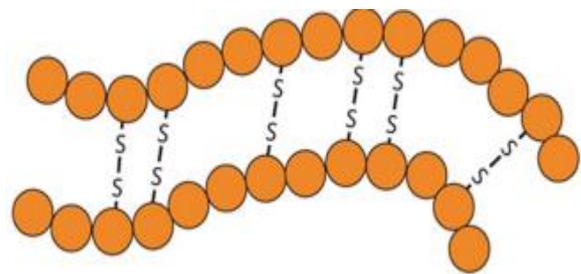


Fig II.4: Polymère réticulé avec ponts di-sulfure reliant deux chaînes.

II.6.4 Polymères amorphes et polymères cristallisés:

Les chaînes macromoléculaires peuvent être organisées de façon aléatoire dans l'espace et constituer ainsi une phase amorphe. La phase amorphe est, en théorie équivalente à un liquide « figé », sans ordre moléculaire à grande distance. Il existe néanmoins des orientations macromoléculaires préférentielles. Dans les polymères amorphes, les macromolécules adoptent une conformation de type « pelote statistique » à l'état liquide, mais aussi après refroidissement jusqu'à l'état vitreux. La taille des pelotes est quasi identique, que le matériau soit à l'état liquide ou à l'état vitreux, ou que les macromolécules soient dissoutes dans un solvant chimiquement inerte.

Les structures des polymères thermoplastiques varient de l'amorphe au semi cristallin, c'est en fonction de la nature de la molécule et du traitement qu'ils ont subi pour leur mise en forme. Beaucoup de polymères thermoplastiques ont une structure amorphe, par exemples, polystyrène (PS), le chlorure de polyvinyle (PVC), le méthacrylate de méthyle (PMMA).

Les polymères amorphes : ils sont transparents. En dessous de leur température de transition vitreuse (ramollissement) ils sont à l'état vitreux et l'on parle de verres organiques. Ils sont généralement peu résistant à la rupture. L'adjonction de particules d'élastomère permet de les rendre plus ductiles. Les chaînes macromoléculaires peuvent être orientées au cours de la mise en œuvre, ce qui leur confère des propriétés anisotropes. Elles peuvent être rangées régulièrement avec la constitution d'un ordre responsable d'une propriété caractéristique de l'état cristallin : Cette cristallisation est régie par les conditions thermocinétiques (température et vitesse de refroidissement). L'aptitude du matériau à diffracter les rayons X selon des angles définis. La structure cristalline des polymères est constituée par l'assemblage périodique de chaînes ayant une conformation régulière, liées entre elles par des liaisons de van der Waals ou des ponts hydrogène. Ces structures peuvent aussi être objectivables en lumière polarisée.

Les polymères ne sont jamais totalement cristallins et doivent en effet être considérés comme des mélanges de phase cristalline et de phase amorphe, d'où le nom de polymères semi cristallins qui leur est classiquement attribué.

Les polymères semi-cristallins : ils sont constitués de phases cristallines et de phases amorphes du même polymère. Leur microstructure est souvent complexe et, en conséquence, la description de leurs propriétés aussi. Leurs propriétés mécaniques sont généralement bonnes.

Du point de vue thermodynamique, un thermoplastique semi-cristallin est considéré comme un système ouvert, c'est-à-dire où un échange d'énergie avec l'extérieur est possible. L'état de ce système peut être défini par son enthalpie libre. Plus la valeur de l'enthalpie libre est faible, plus l'état du système est stable. Un changement d'état, par exemple une transition de l'état fondu amorphe à l'état solide cristallin ou une post cristallisation, peut être décrit par la variation de l'enthalpie ΔH et de celle de l'entropie ΔS d'après l'équation suivante, qui fait aussi intervenir la température T : $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$

Dans un polymère, les deux états ordonnés et désordonnés peuvent exister dans un même matériau qui est alors de nature semi-cristalline.

Quelques polymères semi cristallins :

Les polymères semi cristallins ont une importance économique considérable, les chiffres ont donnés que le polyéthylène, le polypropylène représentent à eux seuls la moitié de la production mondiale des polymères synthétiques.

II.7 Familles de plastiques :

Les plastiques sont des matériaux déformables : ils peuvent être moulés ou modelés facilement, en général à chaud et sous pression. Leur facilité de mise en forme, résistance aux chocs, aux variations de température, à l'humidité, aux détergents,... les rendent utiles dans tous les domaines : emballage, bâtiment, automobile, électricité, etc. Il existe un grand nombre de plastiques aux propriétés différentes, on les classe en trois grandes catégories: les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères.

Les thermodurcissables :

Ces plastiques prennent une forme définitive au premier refroidissement : ils deviennent durs et ne se ramollissent plus une fois moulés. La technique de fabrication est difficile à mettre en œuvre mais elle produit des matériaux très solides et très résistants aux agressions chimiques et à la chaleur. Les aminoplastes sont les plastiques thermodurcissables les plus utilisés.

Les élastomères :

Les élastomères sont élastiques : ils se déforment et tendent à reprendre leur forme initiale et supportent de très grandes déformations avant rupture. Ce ne sont pas réellement des « plastiques ». Issu du latex d'Hévéas (arbre d'Amazonie), le caoutchouc naturel est resté longtemps le seul élastomère connu mais les méthodes modernes de fabrication ont permis d'obtenir une grande diversité de matériaux en ajoutant des additifs, accélérateurs, agents protecteurs (anti UV, anti oxygène,...) et en les combinant à d'autres matériaux (métaux, textiles, autres plastiques...). On distingue trois grandes catégories qui présentent chacune de nombreux produits aux propriétés variées : caoutchoucs, élastomère spéciaux, élastomère très spéciaux.

Les élastomères présentent des caractéristiques bien spécifiques : grande élasticité, bonne étanchéité, fort pouvoir amortissant... Employés essentiellement en tant que pneumatiques, on les utilise également sous la forme de joints, de tubes et tuyaux, de membranes, de dispositifs antivibratoires,... dans de nombreux domaines d'activités : automobile, industrie, aéronautique, médecine.

Les thermoplastiques :

Sous l'effet de la chaleur, les thermoplastiques ramollissent et deviennent souples malléables et durcissent à nouveau quand on les refroidit. On peut alors leur donner une forme qu'ils garderont en refroidissant. La transformation est réversible et renouvelable un grand nombre de fois, les thermoplastiques sont ainsi facilement recyclables. Cependant ils ne sont pas biodégradables et ont une « durée de vie » de plusieurs centaines d'années. Ce sont les matières plastiques les plus utilisées (notamment PE et le PVC).

Leurs polymères de base sont constitués par des macromolécules linéaires, reliées par des liaisons faibles qui peuvent être rompues sous l'effet de la chaleur ou de fortes contraintes. Elles peuvent alors glisser les unes par rapport aux autres pour prendre une forme différente et quand la matière refroidit, les liaisons se reforment et les thermoplastiques gardent leur nouvelle forme.

Les polymères thermoplastiques (non-réticulés) sont complexes car, en plus de posséder une température de fusion, T_f , au-dessus de laquelle leur structure cristalline disparaît, de tels plastiques ont une seconde température, plus basse, T_g en-dessous de laquelle ils deviennent rigides et cassants, et peuvent fissurer ou se briser en éclats. Au-dessus de T_g , les liaisons secondaires (Van der Waals) non-covalentes entre les chaînes des polymères deviennent faibles en comparaison de l'agitation thermique, et le polymère devient souple et capable de se déformer élastiquement ou plastiquement sans rupture.

Ils représentent 80% des matières plastiques consommées en Europe en 2000 soit plus de 35 millions de tonnes ! Avant transformation, ils sont sous forme de granulés ou de poudres dans un état chimique stable et définitif car il n'y a pas de modification chimique lors de la mise en forme. Les granulés sont chauffés puis moulés par injection et le matériau broyé est réutilisable. Beaucoup de polymères thermoplastiques ont une structure amorphe: polyéthylène basse densité (PEBD), polystyrène (PS), polyméthacrylate de méthyle (PMMA). Les macromolécules linéaires y sont entremêlées en pelote comme des nouilles dans un plat.

Les polymères thermoplastiques sont solubles dans leurs solvants respectifs tels que l'acétone pour le PMMA par exemple. Le plus souvent ils sont constitués par un réseau mono dimensionnel ou des chaînes faiblement ramifiées. On peut les mettre en forme (injection, extrusion...) au-delà de leur température de fusion T_f . Ils possèdent la mémoire de cette forme après déformation plastique lorsqu' on les chauffe au-delà de la température de transition vitreuse, T_g . Comme ils peuvent être remis en forme par simple passage au-dessus de T_f . Ces propriétés sont mises à profit dans les processus de mise en œuvre de ces matériaux qui peuvent être moulés, coulés et/ou extrudés.

II.8 Applications :

L'utilisation d'un polymère dépend en partie de l'habilité de sa structure à rester inchangée le plus longtemps possible. Depuis le début des années 1950, la production des polymères est en continuelle ascension et avec une pente beaucoup plus élevée que celle des autres matériaux. Cette production croissante résulte d'une utilisation accrue dans le monde moderne que nous vivons. Les domaines d'utilisation des polymères sont très diverses et variés, car les polymères ont envahi tous les domaines de notre vie quotidienne.

La grande majorité des matériaux polymères actuellement utilisés sont des thermoplastiques. Avec plus de 250 millions de tonnes produites annuellement, les matériaux polymères sont en effet une des plus grandes révolutions industrielles du XX^{ème} siècle. Qu'on essaie d'imaginer le monde sans « matière plastique » pour s'en rendre compte ! Ils font désormais intégralement partie de notre environnement : des emballages alimentaires aux ailes d'avion, en passant par les sondes médicales, les textiles ou les jouets pour enfants. La production mondiale a explosé, si bien que, moins de cent ans après leur découverte, le volume produit chaque année dépasse celui de l'acier. Les polymères sont utilisés pour un nombre extraordinaires d'applications à tous les échelons de la vie :

Le secteur de la construction : Les portes, conduites d'eau et l'assainissement, peinture des murs des planchers et des plafonds, revêtement du sol.

Industrie de l'emballage Bouteilles, pots de yaourt, boîtes aux lettres, problème thermique, gainage films vidéo.

Médecine et santé Poches de sang, gants, lentilles, verres de lunettes, les organes artificiels, Seringues, industrie dentaire, prothèses, outils de chirurgie

Articles ménagers Tupperware, poubelles, seaux, vaisselle.

Matériel électrique et électronique et les communications Tension d'isolement, isolation, laveuses, ordinateurs et les caméras, Radio et télévision, téléphone.

Industrie automobile Système vitre claire, Tapie, carrosserie, optiques, planches de bord, habillage intérieur, Façades de téléviseurs, gainage de câbles.

Industrie textile Vêtement, fibres textiles naturelles et synthétiques, sacs, ski, similicuir, non tissés.

Dans le domaine agricole Colles, vernis, mousses.

Sports-loisirs Certaines parties des bâtiments, des avions et des bateaux, DVD, bandes magnétiques, Files de pêche et les cordons utilisés, piscines, coques de bateaux.

Industrie chimique Tuyauterie, cuves, revêtements.

Le domaine alimentaire Procédés de fabrication d'aliments, emballages (bouteilles, pots de yaourt, briques de lait, boîtes à œufs) ou industriel (flacons de détergent, sachets et sacs, casiers)...

Le matériel de maison Meuble, vaisselle, accessoires... ; Utilisés en industrie pour maintenir le matériel d'une violente collision.

II.9 Propriétés des polymères :

Les propriétés des matériaux polymères sont beaucoup plus sensibles que celles des métaux aux influences extérieures telles que la température, la dureté, l'intensité de la contrainte appliquée, les radiations UV et les agents chimiques.

Le principe de formation sous-jacent est très souple et il permet de produire des polymères caractérisés par un large éventail de propriétés et de combinaisons de propriété. Les polymères sous forme d'objets, fibres ou pellicules peuvent être : rigides ou souples, transparents, translucides ou opaques, durs ou mous, résistants aux conditions climatiques ou dégradables, résistant aux températures élevées ou basses.

Les caractéristiques de résistance peuvent différer seulement d'un ordre de grandeur. Hormis les paramètres spécifiques ou matériaux (masse molaire, taux de ramification, mobilité des chaînes, taux de réticulation,...), et les conditions extérieures (humidité, agents chimiques, température, vitesse de sollicitation, type et intensité des contraintes appliquées).

II.9.1 Propriétés physiques des polymères :

Avant tout, rappelons qu'il existe une grande variété de matières plastiques, tout comme il existe un grand nombre d'alliages métalliques, une des caractéristiques physiques générales des polymères est : La masse volumique des matières plastiques est peu élevée. La légèreté des polymères est sans aucun doute une des qualités qui a le plus largement contribué à leur diffusion. En ce qui concerne le rapport (résistance à la traction / masse volumique), certains polymères sont en fait supérieurs bien à des matériaux métalliques. La faible masse volumique des plastiques est due au faible poids atomique des principaux atomes de leurs chaînes (principalement l'hydrogène et le carbone).

II.9.2 Propriétés thermiques :

La température de transition vitreuse " T_g " et la température de fusion " T_f " sont les deux températures fondamentales nécessaires dans l'étude des matériaux polymères. La température de transition vitreuse est partiellement importante pour les polymères amorphes, notamment les thermoplastiques amorphes, pour lesquels, il n'existe aucune force de cohésion importante autre que l'enchevêtrement. Les températures caractéristiques d'un seul et même matériau peuvent alors être classées de la façon suivante :

Température de transition vitreuse < Température de cristallisation < Température de fusion < Température de décomposition thermique.

Selon la température à laquelle il est soumis, un matériau polymère peut présenter des comportements mécaniques différents. Ceci peut se produire pour les thermoplastiques semi cristallins dans un domaine même étroit de la température. En fonction de leurs propriétés thermiques

II.10 Mise en forme des thermoplastiques :

Comme pour les métaux, les produits en thermoplastiques peuvent être fabriqués par différentes procédés. Ces techniques de transformation demeurent cependant marginales. Généralement on utilisera des procédés de mise en forme permettant de réaliser des séries importantes. Pour les matières thermoplastiques, on emploiera principalement les procédés suivants :

1. L'injection thermoplastique (moulage par injection) :

Le moulage par injection est une technique de mise en forme des thermoplastiques. Les pièces techniques industrielles sont fabriquées à l'aide d'une presse d'injection plastique : la matière plastique (polymère) est d'abord ramollie, puis injectée dans un moule pour y être refroidie.

2. L'extrusion :

Est une technique de transformation des matières thermoplastiques qui permet d'obtenir des objets finis ou semi-ouvrés par un processus technologique continu (tubes). L'extrusion est un procédé de fabrication (thermo)mécanique par lequel un matériau compressé est contraint de traverser une filière ayant la section de la pièce à obtenir. On forme en continu un produit long (tube, tuyau, profilé, fibre textile) et plat (plaque, feuille, film).

3. Soufflage :

Le soufflage est couramment utilisé dans les lignes de production de gaines et de films en continu. Il consiste à extruder un tube, à le pincer à quelque distance de la filière à l'aide de 2 panneaux et de rouleaux de direction, et à le gonfler en envoyant de l'air sous faible pression à travers l'axe de la filière. On distingue deux techniques de soufflage dans le secteur de la transformation du plastique. Le soufflage par injection ou le soufflage par extrusion, techniques qui combinent les processus d'extrusion, ou d'injection à celui du soufflage, pour obtenir différents types de produits finis.

4. Le rotomoulage (Moulage par rotation):

La technique du rotomoulage, aussi appelée moulage rotatif, s'impose aujourd'hui progressivement comme une alternative de production tant pour le monde du design que pour une large gamme d'applications industrielles. Elle est un procédé de transformation des matières plastiques utilisé pour réaliser des pièces creuses de petites ou grandes dimensions ou encore des pièces à double paroi. Le principe du rotomoulage est relativement simple ; ce procédé permet cependant la fabrication de pièces complexes. Ces deux avantages sont la clé de son succès.

5. Thermoformage :

C'est la technique la plus importante pour la réalisation des applications orthopédiques (prothèse provisoire et les orthèses).

La modification primaire des plastiques procède des liquides, poudres ou granulés et les transforme en objets ou en semi-produits. Les semi-produits subissent une transformation secondaire qui les assemble ou modifie leur forme.

La technique de thermoformage utilise les matériaux semi-ouvrés tels que les plaques ou feuilles rigides en matière thermoplastique pour les transformer en objets tridimensionnels avec une épaisseur de paroi proche de l'épaisseur du matériau de départ.

Il s'agit d'une technique où les matières plastiques, présentées sous formes de plaques, sont confrontées à de hautes températures afin de les ramollir et les rendre ainsi malléables. Un moule vient ensuite épouser la matière afin de lui donner la forme souhaitée. Une fois refroidit, le plastique redevient rigide. Nous utilisons ce procédé avantageux tant pour les petites et moyennes séries que pour les grandes.

5.1 Principe du thermoformage : (voir figure II.5)

On obtient des feuilles rigides de plastique pincée dans un cadre à plat par extrusion; on les ramollit par infrarouge, (chauffer une feuille, ou une plaque, à une température permettant sa déformation). Une fois la feuille ramollie elle est gonflée à l'air, puis on la plaque sur un moule métallique froid par aspiration de l'air ou par action d'une différence de pression entre ses deux faces dont elle épouse le relief, Après refroidissement découpée la selon la forme désirée. La mise en forme s'effectue généralement par une pression d'air sur la feuille, ou une dépression d'air sous cette dernière, souvent assistée mécaniquement par un poinçon. C'est un procédé de transformation « basse pression », qui impose de faibles contraintes à la feuille. Les matériaux ne peuvent donc être formés que lorsque leurs propriétés mécaniques ont chuté, dans la zone du plateau caoutchoutique pour les polymères amorphes et dans la zone de la température de fusion pour les semi-cristallins. On peut citer 6 étapes du principe qui sont :

1. Mise en place de la feuille et chauffage par un plateau chauffant supérieur et inférieur.
2. Montée du moule : la feuille est ramollie et le moule monte pour emboutir la feuille.
3. Formage /Refroidissement : une fois le moule en position haute, le vide est fait entre le moule et la feuille.
4. La feuille se plaque sur le moule et en prend sa forme. De l'air ou de petites gouttelettes d'eau sont projetées sur la pièce pour la refroidir et lui donner sa forme finale.
5. De l'air est soufflée à l'intérieur du moule pour décoller la pièce du moule et celui-ci descend pour libérer la pièce.
6. Une fois le moule descendu, la pièce peut être enlevée puis décortiquée pour enlever les chutes de production (cercle rouge).

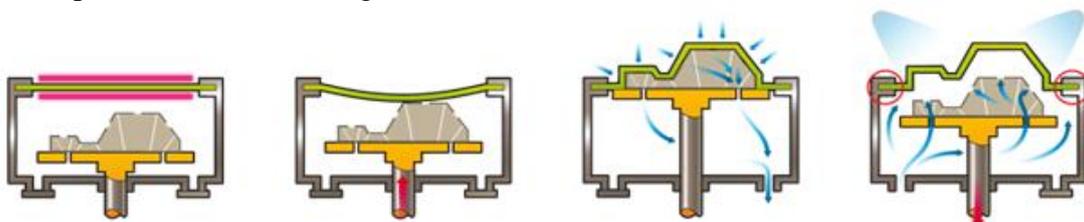


Fig II.5 : Principe de thermoformage

II.11 Les matériaux étudiant :

Le principal polymère utilisé pour des applications orthopédiques est le polyéthylène (PE) et polypropylène (PP) qui possède différents avantages qui le rendent attrayant par rapport aux autres polymères, donc ils restent les matériaux les plus utilisés en raison de son faible coût et de sa facilité de fabrication. Ces matériaux font partie de la famille des thermoplastiques. Cette famille de polymère est constituée de macromolécules organiques reliées entre elles par des liaisons faibles de type liaison de Van der Waals. Ainsi, les thermoplastiques qui sont solides à température ambiante se ramollissent à des températures élevées pour atteindre un état plastique dans lequel ils se déforment assez facilement.

II.11.1 Le polyéthylène :

II.11.1.1 Historique :

Le polyéthylène (PE) a été synthétisé la première fois par le chimiste allemand Hans von Pechmann, qui l'a préparé par accident dans 1898 tout en chauffant le diazométhane. Le polymère a été en grande partie oublié jusqu'en 1933 où il a été produit encore par accident par Reginald Gibson et Eric Fawcett fonctionnant alors aux industries chimiques impériales géantes industrielles britanniques (ICI). La paire où expérimentant en s'appliquant extrêmement à haute pression (plusieurs centaines d'atmosphères) à un mélange d'éthylène et d'aldéhyde benzoïque. Cependant les leurs eus été une fuite dans leur appareil d'essai nous et contamination de l'oxygène de trace lancent une réaction qui a produit un matériel cireux blanc. En tant qu'eux où ignorant du containination ils ont trouvé l'expérience difficile à se reproduire. Elle n'avait pas lieu jusqu'en 1935 qu'encore ICI chimiste, Michael Perrin, a développé cet accident en synthèse à haute pression reproductible pour le polyéthylène qui est devenu la base pour la production industrielle de LDPE commençant en 1939. Le PE est bon marché, flexible, durable, et chimiquement résistant. Ils se sont transformés en deux formes, d'"polyéthylène faible densité" (LDPE) qui est employé pour faire des films pour la nourriture se déformant et des matériaux d'emballage, et "polyéthylène à haute densité" (HDPE) qui est employé pour les récipients, la tuyauterie, et les garnitures des véhicules à moteur. D'autres évolutions ont évolué autour de développer plusieurs types de catalyseur qui favorisent la polymérisation d'éthylène aux températures et à des pressions plus douces. Celles-ci ont également des implications pour les propriétés du polymère qui est produit par les différents catalyseurs. Le premier de ces derniers était un catalyseur découvert en 1951 par Robert Banks et John Hogan au pétrole Phillips, appelé le catalyseur Phillips. Alors en 1953, le chimiste allemand Karl Ziegler a développé un système catalytique qui a fonctionné encore à des conditions plus modérées que le catalyseur Phillips. Le troisième type de système catalytique, un basé sur les composés organométalliques a appelé des metallocenes. Ceux-ci ont été découverts en 1976 en Allemagne par Walter Kaminsky et Hansjörg Sinn.

II.11.1.2 Présentation de PE :

Le polyéthylène est un membre de la famille importante des résines de polyoléfine. C'est le plastique le plus largement répandu dans le monde. Le polyéthylène PE est un matériau thermoplastique obtenu par polymérisation de l'éthylène (C_2H_4) menant à des macromolécules composées de la répétition d'un motif monomère (CH_2-CH_2), polyéthylène (PE), lumière, résine synthétique souple faite à partir de la polymérisation à haute température de l'éthylène, issu du raffinage du pétrole. Au cours de sa solidification, le polyéthylène est poussé à travers une filière et découpé en granulés.

L'architecture macromolécules et la cristallinité sont probablement les facteurs les plus importants contrôlant les propriétés rhéologiques du polymère à l'état fondu, et ont une influence sur le procédé de mise en forme, et les propriétés mécaniques du produit final.

- ✓ Le procédé de polymérisation de basse pression a comme conséquence les chaînes linéaires de polymère avec les branches latérales courtes. Des modifications de densité au polymère résultant sont faites en changeant la quantité de comonomère utilisée avec de l'éthylène pendant le procédé de polymérisation.
- ✓ Le procédé de polymérisation de haute pression a comme conséquence des chaînes de polymère avec des branches latérales plus fortement développées. Des modifications de densité au polymère résultant sont faites en changeant les températures et les pressions utilisées pendant le procédé de polymérisation.

II.11.1.3 Propriétés du PE:

Le polyéthylène est un matériau très durable offrant des caractéristiques techniques exceptionnelles dans les applications où la facilité de nettoyage, la stabilité aux UV et aux intempéries sont souhaitables.

Le polyéthylène est disponible dans un large éventail de propriétés mécaniques pour offrir robustesse, facilité de traitement, bon taux de retrait, à l'abrasion chimique, faibles coefficients de frottement, durabilité des éléments et absorption d'humidité quasi nulle. Ces propriétés font du polyéthylène un matériau idéal pour de nombreuses utilisations.

Le polyéthylène est le polymère le plus fabriqué à l'échelle mondiale et tout individu est en contact avec ce polymère quotidiennement. Au départ, le PE était considéré comme un produit supplémentaire dans le monde des matériaux, bien qu'initialement, il s'était imposé comme isolant pour les câbles électriques. De nos jours, la force du polyéthylène réside dans ses propriétés intrinsèques, dans son utilité largement reconnue et dans son vaste potentiel opérationnel.

Blanchâtre, semi opaque, plus solide et rigide, offrant une meilleure résistance chimique, plus léger que l'eau (masse volumique entre 0.90 et 0.97 g/cm³), brûle entièrement en rejetant du CO₂ et de l'eau, non toxique et inerte.

Ses propriétés électriques, particulièrement à hautes fréquences, ainsi que ses propriétés de protection, bien que peu remarquables, sont meilleures que celles du PEFD.

Les propriétés physiques des matériaux de PE sont spécifiques à chaque catégorie ou dactylographient (tableau II.1), et peuvent être modifiées par les deux variations dans la densité, et de la distribution de poids moléculaire. Un grand nombre de catégories des matériaux de PE sont employées dans la pipe et des systèmes de garnitures et les propriétés spécifiques sont travaillées pour l'application particulière. Les types les plus généraux de matériaux de PE sont comme suit :

Types de polyéthylène :

Le polyéthylène est le plastique le plus utilisé du monde. Le polyéthylène est long de l'éthylène subits. Qu'ils ont une chaîne centrale, dont ils peuvent s'embrancher dehors du degré varing s'embranchant de nous obtiennent des différents types de polyéthylène.

Polyéthylène est un nom générique employé pour décrire les polyoléfines issues de la polymérisation de l'éthylène. Il existe de nombreux types de polyéthylènes et principalement trois grandes familles qui se définissent en fonction de leur masse volumique :

- Polyéthylène Basse Densité ou PE-BD (en anglais LDPE) : $0,92 \text{ g/cm}^3 < r < 0,94 \text{ g/cm}^3$.
- Polyéthylène Haute Densité ou PE-HD (en anglais HDPE) : $0,95 \text{ g/cm}^3 < r < 0,97 \text{ g/cm}^3$.

Propriétés	Unité	Moyenne Densité	Basse Densité	Haute Densité
Indice de Fluidité	dg/mn à 190°C- 2,16 Kg	3 à 10	3 à 10	3 à 10
Résistance Traction au seuil	Mpa	15 à 23	7 à 15	23 à 30
Allongement Rupture	%	500 à 1000	500 à 1000	500 à 1000
Point de Fusion	°C	~125	~120	~135
Coefficient de Poisson		0,4	0,45	0,4
Température de transition vitreuse	°C	-110	-110	-110
Poids Volumique	Kg/M3	930 à 945	0,915 à 929	946 à 960

Tableau II.1: Caractéristiques des différentes propriétés de PE

- **PEBD** : (figure II.7.a)

Le PEBD a été découvert en 1933 par accident pendant une expérience entreprise par le Reginald et Eric Fawcett. Une fois que les découvrir, les scientifiques de remorquage commençaient à traiter le matériel de polymère, lui donnant le polythène nommé. Il est obtenu par polymérisation sous haute pression, les ramifications ont des tailles très dispersées.

Le PEBD a une structure à chaînes fortement embranchée avec une combinaison de petites et grandes chaînes latérales. La densité du PEBD s'étend entre 920-940 kg/m³ et le PEBD montre la flexibilité et la conservation élevées des propriétés à de basses températures.

Le PEBD contient beaucoup de branches de poids, avec une structure moléculaire moins compacte, rendant le PEBD moins dense. Le PEBD a une flexibilité, une dureté d'impact, et une résistance bien meilleures à l'effort environnemental cracking que le PEHD.

Le PEBD est utilisé pour faire des feuilles de plastique et des sachets en plastique. Il est également employé pour faire les bouteilles et la tuyauterie, les récipients d'entreposage de nourriture, les plateaux, les récipients d'entreposage de laboratoire, l'enduit d'extrusion, et l'isolation de câble mais l'utilisation principale pour le PEBD dans la tuyauterie est dans les applications micro de tube d'irrigation ou de dispositif d'écoulement avec des tailles jusqu'au diamètre de 32 millimètres. Polyéthylène Basse Densité, malléable, tenace et flexible, dont la grande pureté permet l'emploi dans de nombreuses applications industrielles.

Des matériaux de PEBD peuvent être modifiés avec des élastomères (le caoutchouc modifié) pour améliorer des valeurs de la résistance de fente d'effort environnemental dans des applications micro d'irrigation où les pipes fonctionnent dans les environnements exposés tout en portant les produits chimiques agricoles.

- **PEHD** : (figure II.7.b)

Parmi les polymères semi-cristallins, le PEHD a fait l'objet de nombreux travaux et est souvent considéré comme un matériau modèle pour l'étude du comportement mécanique. En 1953, les chimistes allemands Karl Zeigler et Erhard Holzkamp inventé plastique à haute densité de polyéthylène pour son invention réussie de HDPE Zeiglerz gagné le prix Nobel pour la chimie en 1963.

Le polyéthylène à haute densité est un polymère linéaire ne comportant aucune ramification courte et une fraction de branches longues très faible. Ce polymère, de densité comprise entre 0,94 et 0,97, et obtenu à basse pression. Le PEHD est non ramifié, ainsi les polymères peuvent être ensemble beaucoup plus étroitement, faisant à PEHD puis un PEBD plus dense. en

conséquence, le PEHD est plus fort, plus résistant aux produits chimiques et moins perméable que le PEBD.

Le PEHD est utilisé pour faire des récipients pour le ménage et les produits chimiques industriels. Il est employé pour faire des bouteilles pour le lait et autres boissons, des récipients d'entreposage de nourriture, des approvisionnements des véhicules à moteur de jouets, des chaises et des tables se pliantes, et de divers genres de canalisations. Polyéthylène Haute Densité, solide, rigide, et ductile, qui permet la réalisation de films fins et légers.

- **PEUHMP :**

Le polyéthylène ultra-haut-moléculaire-poids (PEUHMP) est premier commercialement polymérisé en 1955 par Ruhrchemie AG, Oberhausen, Allemagne. Du fait la même année, le matériel a été présenté la première fois à l'exposition commerciale K55 commerciale en plastique.

PEUHMP se compose des chaînes extrêmement longues, avec le poids moléculaire mesuré en millions que le matériel a la résistance aux chocs la plus élevée parmi les polyéthylènes. Il a la résistance élevée d'abrasion ; bas coefficient de frottement, et excellente résistance chimique. PEUHMP est souvent employé pour faire des bandes d'usage, la protection de bord sur des patinoires de glace, des vitesses, des pistons, etc... PEUHMP est largement répandue comme matériel de roulement en remplacements communs totaux.

En outre, il y a beaucoup d'autres catégories dans la famille de PE, telle que le polyéthylène (PEBDL) à basse densité linéaire, le polyéthylène moyen de densité (PEMD), etc. que nos broyeurs en plastique peuvent écraser des matériaux de PE dans les granules, qui peuvent être réutilisés pour la reproduction des produits en plastique.

Combinaison des deux précédentes, résistant et stable il est utilisé pour la fabrication de produits souples ou rigides et permet de réaliser des films fins et multicouches (notamment utilisé dans les films étirables CAST de palettisation).

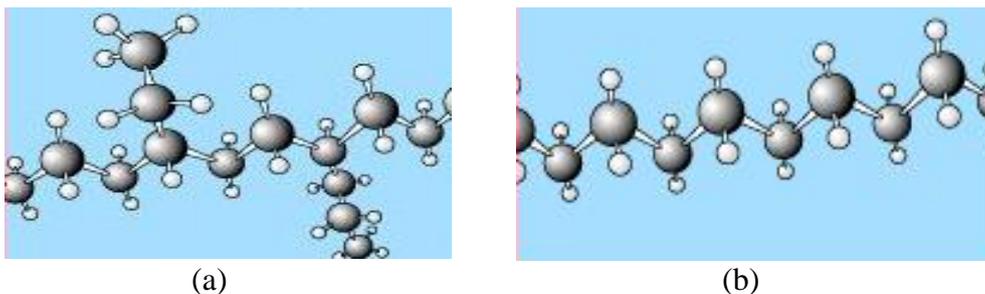


Fig II.7 : structure moléculaire d'un PEBD (a), PEHD (b)

II.11.1.4 Domaine d'application du PE :

De loin le produit thermoplastique le plus populaire utilisé dans des produits de consommation (particulièrement produits créés par le bâti de rotation). Le polyéthylène est probablement le polymère que vous voyez le plus souvent dans la vie de tous les jours. Le polyéthylène est le plastique le plus populaire du monde. Étant transformé en des produits s'étendant de l'enveloppe claire de nourriture et des sacs à provisions aux bouteilles alimentaires obtenues par soufflage, les tuyaux et leurs attaches et les films d'emballage, les jouets des enfants, et même les gilets pare-balle et aux réservoirs de carburant détersifs d'automobile. Il peut également être fendu ou tourné dans les fibres synthétiques ou être modifié selon le prendre les propriétés élastiques d'un caoutchouc.

La consommation mondiale de polyéthylène connaît une croissance supérieure aux chiffres de la croissance économique moyenne. L'utilisation totale dans le monde était estimée à 62 millions de tonnes en 2001 ; ce qui résulte en une moyenne mondiale de presque 10/kg par personne. En Europe occidentale, le volume de polyéthylène utilisé en 2001 approchait les 11 millions de tonnes (environ 35 kg / personne). Le tableau I.2 ci-dessus décrit l'évolution de la consommation de polyéthylène entre 1987 et 2001.

	1987	1996	2001
Europe occidentale (kt/an)	6873	9755	11330
Europe orientale (kt/an)	2177	1720	3110
Reste du monde (kt/an)	24731	38500	49100

Tableau II.2 : Evolution de la consommation de polyéthylène

Les produits en polyéthylène remplacent encore les matériaux traditionnels tels que le papier ou les métaux. Il est possible de différencier trois types principaux de polyéthylène. Le total de ces trois types est utilisé dans plus de 90 % des applications.

II.11.2 Le polypropylène :

II.11.2.1 Historique :

Les aperçus de la chimie de polymère gagnée par des découvertes telles que le polyéthylène facilité la production et la découverte d'autres polymères. Le polypropylène (pp) a été séparément inventé environ neuf fois dans un espace court de temps, dans l'early 1950s, par un certain nombre de différentes équipes de recherche. Ceci a causé un certain nombre d'excédent légal de batailles qui étaient les inventeurs originaux. Il n'avait pas lieu jusqu'en 1989 que deux chimistes américains J. Paul Hogan et banques de Robert, ont été crédité en tant qu'inventeurs "officiels", toutefois un autre scientifique Giulio Natta est également souvent donné le crédit comme inventeur de polypropylène. Le polypropylène est semblable à son ancêtre, polyéthylène, et partage le bas coût du polyéthylène, mais il est beaucoup plus robuste. Il est employé dans tous des bouteilles en plastique aux tapis aux meubles en plastique, et est très fortement utilisé à la fabrication de voiture.

II.11.2.2 Présentation de PP :

Le polypropylène (PP) est un polymère cristallisable de la famille polyoléfines, c'est un des matériaux thermoplastiques le plus important d'un point de vue économique. Ce thermoplastique commercial semi cristallin, c'est une polyoléfine linéaire qui peut être comparée à bien des égards au polyéthylène haute densité (PEHD) et qui est fabriqué de manière très semblable. Le polypropylène résulte respectivement de la polymérisation du propylène (propène). L'unité de base du PP consiste en trois atomes de carbone et six atomes d'hydrogène. Comme il est indiqué à la figure II.8.

Le PP est un polymère linéaire qui appartient à la classe des polyoléfines. Le groupe méthyle (CH_3) est caractéristique. En fonction de la disposition spatiale de ces groupes par rapport à la chaîne principale CC, on peut différencier le PP atactique (PPa) avec une disposition CH_3 irrégulière de part et d'autre de la chaîne, le PP isotactique (PPi) avec des groupes CH_3 du même côté de la chaîne de carbone et le PP syndiotactique (PPs) avec une disposition en alternance de CH_3 comme il est indiqué à la figure II.9. L'intensification de la tacticité (régularité de la disposition CH_3) entraîne une augmentation du degré de cristallinité, de la température de fusion, de la puissance élastique, de la rigidité et de la dureté.

Le polypropylène est fabriqué par la catalyse de metallocene semblable au processus utilisé en PE. En outre semblable au PE, ce processus peut être employé pour commander la structure de la molécule, qui peut donner à PP différentes propriétés physiques. Les catalyseurs utilisés contrôlent si bien la stéréorégularité du polymère que les polypropylènes commerciaux sont très souvent fortement isotactiques. La forme homopolymère du polypropylène est plus dure et résiste à des températures plus élevées que le PEHD, Les qualités copolymères sont, de ce fait, préférées pour toute application soumise à des conditions de froid ou d'hiver.

Le polypropylène a des propriétés mécaniques et chimiques très semblable à lui du PE cousin. Structural PP par grande quantité de cristaux, le rendant plus fort que le polyéthylène. La structure différente donne également à PP par point de fusion plus élevé, autour de 160°C .

Elle est également relativement chimiquement inerte et résistante à l'attaque chimique à partir de la plupart des dissolvants, bases et acides. Comme le PE, PP a également la résistance électrique élevée, lui faisant un bon isolateur.

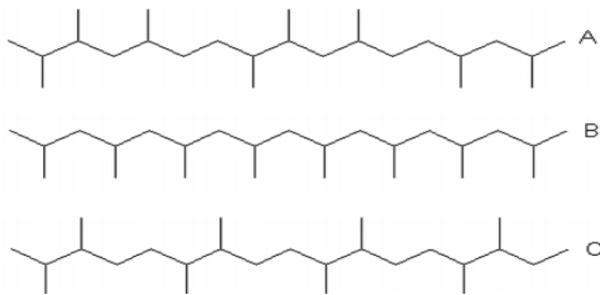
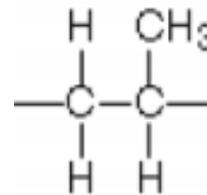


Fig II.9: Structures moléculaires du polypropylène

- A) polypropylène atactique
- B) polypropylène isotactique
- C) polypropylène syndiotactique



FigII.8 : Unité de base du polypropylène

II.11.2.3 La structure du polypropylène :

- **La structure semi cristalline :**

La quasi-totalité du volume du polypropylène est constitué d'une partie cristalline. Lors de sa mise en œuvre, il passe par un état fluide caractérisé par une température de fusion T_f . Pendant son refroidissement, les chaînes moléculaires adoptent une conformation régulière en zigzag plan ou hélice, et s'empilent de façon ordonnée et compacte: le polypropylène se cristallise. Les chaînes ainsi disposées forment des lamelles cristallines. L'épaisseur d'une lamelle est de quelques dizaines de motifs monomères, de l'ordre d'une centaine d'Angstroms, ce qui est inférieur à la longueur d'une macromolécule (1000 à 100000 Å). Par conséquent, une même chaîne macromoléculaire peut être incluse dans plusieurs domaines cristallins et amorphes. Cette chaîne macromoléculaire peut également être ainsi repliée sur elle-même dans une même cristallite.

- **La structure amorphe :**

Le polypropylène est constitué également d'une zone amorphe qui est caractérisée par l'absence d'ordre à grande distance. Dans cette zone, les macromolécules peuvent former des zones d'enchevêtrement physique. La longueur des segments entre ces enchevêtrements est assez grande pour que les segments se comportent comme des chaînes individuelles. La présence de volume libre dans cette zone détermine la mobilité des macromolécules et l'aptitude du polymère à changer de conformation. Ainsi, seule la fraction amorphe est affectée par le vieillissement physique.

II.11.2.4 Propriétés du PP :

Les propriétés du polypropylène dépendent de manière décisive du procédé de polymérisation et des catalyseurs utilisés. Blanc et semi opaque est fabriqué dans une grande diversité de qualités plus ou moins modifiées. Tout comme les polyéthylènes, le polypropylène résiste bien aux produits chimiques mais médiocrement aux U.V. (sauf s'il a été stabilisé ou protégé).

Le polypropylène se caractérise par plusieurs propriétés intéressantes comme une faible densité (0.9 g/cm³) plus basse que celle des thermoplastiques habituels, une relative stabilité thermique et une bonne résistance à la dégradation grâce auxquelles le large champ de ses applications industrielles en fait un des polymères le plus utilisé (voir tableau II.3). Ses propriétés sont déterminées principalement par sa structure mais sa masse moléculaire joue également un rôle important. En effet, plus la masse moléculaire est grande, plus les chaînes moléculaires sont longues, donc plus elles présentent des difficultés à s'arranger parallèlement les unes aux autres, ce qui influence la structure du polypropylène.

Le PP présente une stabilité dimensionnelle sous la chaleur plus élevée que le PE et il n'est pas résistant à l'oxydation. Les paramètres tels que le degré de cristallisation, la gamme de mélange, la rigidité et la dureté montent en parallèle avec une augmentation de la part des composants isotactiques. Il n'est pas résistant aux UV sans stabilisation, il est hydrofuge, il est chimiquement résistant aux acides (à l'exception des acides oxydants), aux liquides alcalins, au solvant, à l'alcool, à l'eau, aux jus de fruits, au lait ainsi qu'aux huiles, aux graisses et aux détergents. Le PP n'est pas résistant aux hydrocarbures chlorés et aromatiques, au benzène, au gasoil et aux oxydants puissants.

Propriétés	
Masse volumique (g/cm ³)	0,9
Température de fusion (°C)	160
Température de fléchissement sous charge (°C)	50-60

Tableau II.3: Caractéristiques du polypropylène

Le polypropylène possède un point de fusion plutôt élevé, une faible densité. Ces propriétés varient en fonction du degré de cristallisation et du type et du niveau du comonomère contenu dans le produit. Les produits en polypropylène peuvent être composés de caoutchouc pour modifier leurs propriétés à basse température ou de charges minérales ou de fibres de verre pour augmenter la rigidité et la stabilité dimensionnelle.

Le polypropylène est fortement sensible à l'injection la vitesse et la pression et ont installé rapidement dans moule, permettant à des molders d'atteindre la haute taux de production. Cette combinaison des propriétés d'exécution donne le polypropylène à position dans le domaine de moulage par injection qui est unique parmi le thermoplastique. Polypropylène démontre également l'excellent produit chimique résistance, bonne résistance d'abrasion, bonne stabilité dimensionnelle, et un lustre extérieur élevé sur les morceaux finis. La polyvalence de ce polymère la fait en particulier puits adapté au film et aux fibres exigence de la force supérieure, qualités optiques, graisser la résistance, et les propriétés de barrière d'humidité.

II.11.2.5 Applications du PP :

Les applications comprennent (pour les homopolymères): les boîtiers d'appareils électriques, articles de ménage, emballages, boîtiers de cassettes ainsi que les fibres, monofilaments, bandes de film coupées; pour les copolymères: tuyaux, récipients, coques de bateaux, sièges et pièces pour automobiles, par exemple, les bacs d'accumulateurs et les parechocs bien que ceux-ci soient souvent fabriqués à partir de polypropylènes comprenant beaucoup plus d'élastomère, En 2002, la production de l'Europe occidentale a atteint environ 8000 kt. Le développement de la production de propylène en Europe occidentale au cours des années 2000 à 2002 est indiqué au tableau II.4.

Année	2000	2001	2002
Volume de production	7004 kt	7230 kt	7805 kt

Tableau II.4: Production du polypropylène en Europe occidentale de 2000 à 2002

II.11.2.6 Procédé de fabrication du PP :

Le polypropylène provient de la polymérisation du monomère propylène. Le mode de synthèse le plus répandu actuellement est le procédé de catalyse hétérogène Ziegler Natta qui conduit à l'obtention de polypropylène isotactique (voir figure II.10). D'autres modes de synthèse permettent l'obtention de conformations atactiques (position aléatoire du groupement méthyle) ou syndiotactiques (position alternée du groupement méthyle).

La plupart des procédés utilisés dans la production du polypropylène ressemblent beaucoup à ceux utilisés pour fabriquer du polyéthylène haut densité. Néanmoins, cette section décrit les procédés les plus importants et les plus couramment utilisés dans le domaine de la fabrication du polypropylène. En général, deux types de procédés différents sont appliqués dans la production du polypropylène : procédés en phase gazeuse et procédés en suspension. Les procédés en suspension traditionnels utilisant un diluant organique sont classés au sein de la nomenclature PP comme procédés « avec suspension épaisse ». Les procédés en suspension modernes utilisent un monomère liquide à la place d'un solvant. Et ils sont connus dans le monde PP comme des procédés « en masse ».

Le Polypropylène (PP) peut être transformé par extrusion, par extrusion-soufflage, par calandrage et par injection. Vous trouverez des explications écrites ou des vidéos détaillant ces différentes techniques de production aux adresses Internet suivantes : L'injection, L'extrusion, L'extrusion-soufflage, Le calandrage.

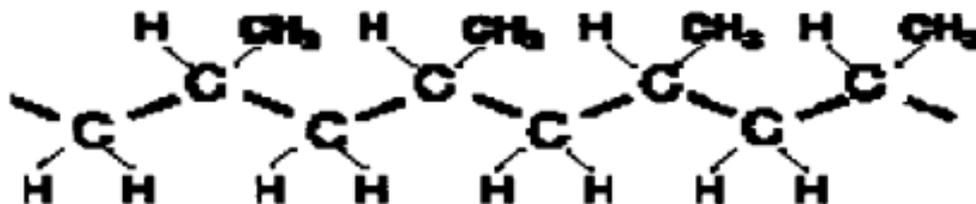


Fig II.10 : Polypropylène isotactique

Chapitre III : Matériels et expérimentales

III.1 Introduction :

Le choix des matériaux pour une application industrielle donnée exige une connaissance et une maîtrise de ses caractéristiques mécaniques. A ce stade, la caractérisation mécanique des matériaux repose sur l'étude de son comportement vis-à-vis les sollicitations extérieures qui engendrent des contraintes et des déformations. Pour cela, on recourt à un certain nombre d'essais normalisés. Ces derniers, permettent de déterminer les grandeurs physiques caractérisant le comportement mécanique des matériaux testés.

Donc sur la caractérisation mécanique usuelle indispensable pour les calculs de structures et de dimensionnement des pièces mécaniques en vue de prédire leur aptitude de résistances aux différentes sollicitations mécaniques imposées en service. On s'y adresse, donc, à décrire les techniques expérimentales associées permettant la caractérisation mécanique des matériaux : soient leur résistance à la déformation évaluée par les essais de traction ou leur résistance au choc mécanique évalué par un essai de résilience Charpy, ainsi que son dureté par l'essai de dureté Rockwell type B puis on fait une analyse microscopique des éprouvettes.

III.2 Notions sur l'essai:

III.2.1 Essais Mécaniques :

Les essais mécaniques constituent la plus ancienne discipline des essais de matériaux et leur importance n'a cessé de croître .D'ailleurs certaines caractéristiques peuvent être déterminées par ces essais et notre présent travail sera consacré aux essais de traction, de choc et essai de dureté.

➤ Essais de traction :

Un essai de traction est une expérience qui permet de mesurer le degré de résistance à la rupture d'un matériau quelconque. C'est le moyen le plus couramment employé pour caractériser le comportement mécanique d'un matériau sous une sollicitation progressive à vitesse de chargement faible ou modérée.

La traction offre l'avantage de proposer un système de contrainte simple. Cependant, dans la plupart des conditions, l'éprouvette testée présente une instabilité géométrique qui conduit à une striction après la limite élastique σ_e . Néanmoins, nous avons utilisé cette technique pour étudier le comportement de notre matériau aux différentes vitesses de déformation.

L'essai permet, en outre, l'étude et l'identification des mécanismes physiques de déformation plastique. Cette dernière, gouverne le processus majeur de mise en forme, par ou sans enlèvement de matière, des matériaux dans la plus part des procédés de fabrication utilisés dans l'industrie mécanique.

L'essai de traction permet la détermination des caractéristiques mécaniques telles que la contrainte à rupture des échantillons, la déformation à rupture ou bien encore le module d'Young des matériaux.

1. Rappel théorique :

Les propriétés mécaniques des matériaux sont d'un grand intérêt, puisqu'elles conditionnent non seulement les problèmes de mise en forme des matériaux, mais également leur comportement en service dans des applications industrielles extrêmement diversifiées. Le choix du matériau d'une pièce industrielle dépendra des propriétés mécaniques comme la résistance, la dureté et la ductilité. Il est donc nécessaire de mesurer ces grandeurs physiques, par des essais mécaniques. L'essai de traction est le procédé expérimental le plus largement utilisé dans l'étude du comportement mécanique des matériaux, il permet de déterminer qualitativement si un matériau est fragile ou ductile rigide ou souple. Il aide aussi à quantifier certaines propriétés mécaniques, telles que le module d'élasticité, la résistance maximale ou la contrainte et l'allongement à la rupture en traction, suivant la nature du matériau.

2. Principe de l'essai de traction :

L'essai de traction est réalisé sur une machine de traction (Figure III.1) consiste à exercer sur l'éprouvette étudiée une force de traction et mesurer son allongement. L'essai consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction croissant en vue de déterminer ses caractéristiques mécaniques. Cet effort et l'allongement de l'éprouvette peuvent être mesurés simultanément ; on obtient une courbe de traction (figure III.2).

Des éprouvettes du matériau concerné, en forme de barreau cylindrique ou prismatique comportant une partie centrale calibrée à section constante S_0 et longueur L_0 raccordée à chaque extrémité à deux têtes de section plus importante, sont fixées dans une machine de traction.



Fig III.1 : Machine de traction.

Une simple courbe contrainte-déformation constituera un bon élément de base pour connaître le comportement mécanique d'un matériau donné. Pour une éprouvette ductile de longueur initiale l_0 et de section initiale S_0 , la courbe contrainte-déformation pour une expérience de traction est donnée sous la forme suivante (figure III.2) :

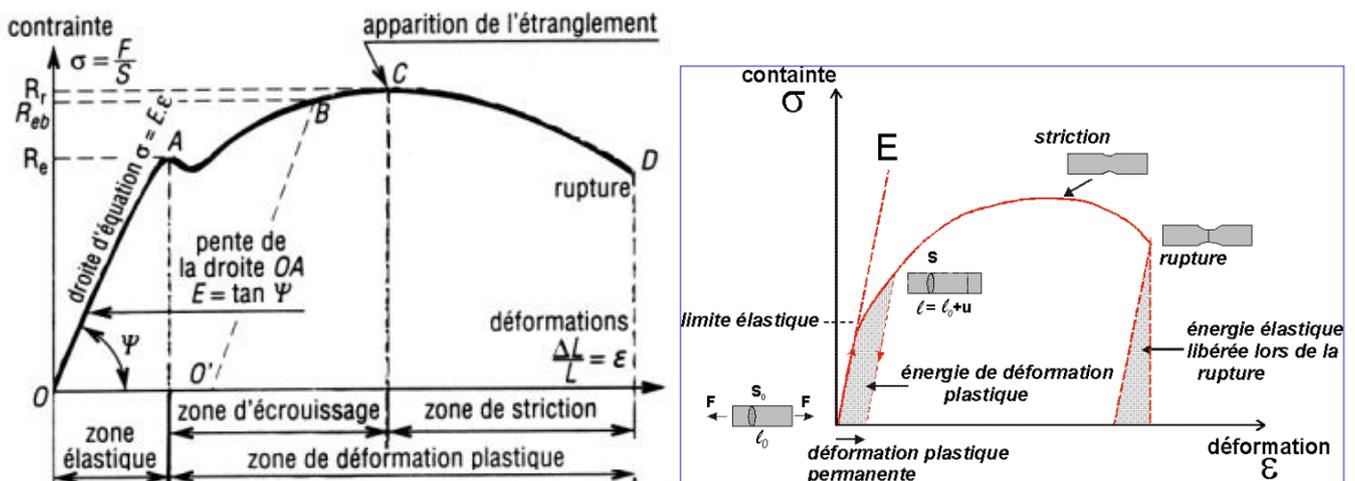


Fig III.2 : Exemple de courbe de traction (σ - ϵ)

σ : contrainte (MPa), σ contrainte = F (Force) / S (Surface).

F : force (N).

ϵ : déformation = $\Delta l / l_0$; Δl est l'allongement.

R_e : limite apparente d'élasticité.

3. Caractéristiques mécaniques déterminé par l'essai de traction:

Sur le diagramme contrainte-déformation, qui peut être enregistré ou tracé par points, on utilise les coordonnées suivantes :

- ✓ **Module d'élasticité:** C'est le rapport de la contrainte de traction à la déformation correspondante dans la limite de contrainte maximale qu'une matière peut supporter. Il représente un critère de rigidité, il s'exprime comme suit : $E = \sigma/\varepsilon$ (N/ m²).
E: Module d'élasticité (MPa);
 σ : Contrainte à la rupture N/ m²
 ε : Allongement à la rupture (%)

Le coefficient de Poisson exprime le rapport entre la déformation longitudinale de l'éprouvette et la déformation transversale. Pour les polymères on a environ : $\nu = 0,4$. $\nu = (d-d_0)/(L-L_0)$

Le module de cisaillement G exprime le rapport entre le couple et la déformation par cisaillement, par exemple dans un essai de torsion.

Ces trois grandeurs sont liées par la relation suivante : $G=E/ 2(1-\nu)$

- ✓ **Contrainte à la rupture:** C'est la charge de traction supportée par l'éprouvette à l'instant de sa rupture par unité de surface, elle est donnée par l'expression suivante :

F: Charge de traction supportée par l'éprouvette (N); $\sigma = \frac{F}{S_0}$
S: Section initiale (m²).

La **limite d'élasticité** (ou résistance élastique à la traction) : $R_e = \frac{F_e}{S_0}$

- ✓ La **résistance à la traction** ou résistance à la rupture (bien qu'il n'y ait pas encore rupture) : C'est la charge maximale atteinte durant l'essai de traction. A partir de ce point, la déformation commence à se localiser sous forme de striction, ce qui explique la décroissance de l'effort nécessaire aux déformations.

$$R_m = \frac{F_r}{S_0}$$

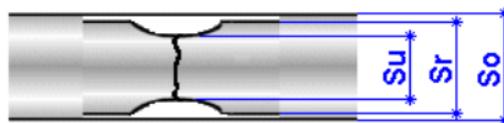
- ✓ **Allongement à la rupture:** C'est l'augmentation de la distance entre les repères sur la partie calibrée de l'éprouvette produite par une charge de traction au moment de la rupture de l'éprouvette. Il est indiqué en pourcentage sous la forme suivante:

$\Delta L = L - L_0$ $\varepsilon\% = 100 \cdot \frac{L - L_0}{L_0}$

L_0 : Longueur initiale de l'éprouvette;
 L : Longueur finale de l'éprouvette.

- ✓ La **striction** est la réduction de section maximale de l'éprouvette rompue (figure III.3) c'est-à-dire dans la section de rupture. Le coefficient de striction traduit l'aptitude à la déformation à froid.

$Z\% = 100 \cdot \frac{S_0 - S_u}{S_0}$ Avec S_0 : section initiale et S_u : section après rupture.



S_0 : Dimension éprouvette initiale
 S_r : Dimension éprouvette après rupture
 S_u : Dimension de la striction après rupture

Fig III.3 : Zone de striction

4. Epreuve :

La forme et les dimensions des éprouvettes dépendent de la forme et des dimensions des produits métalliques dont on veut déterminer les caractéristiques mécaniques. L'éprouvette est généralement obtenue par usinage d'un prélèvement d'un produit ou d'une ébauche moulée. Cependant, les produits de la section constante (profilés, barres, files, etc.), ainsi que les éprouvettes brutes de fonderie (par exemples : fontes, alliages non ferreux) peuvent être soumises à l'essai sans être usinées. Les éprouvettes usinées doivent comporter un congé de raccordement entre les têtes de fixation et la partie calibrée lorsque celles-ci sont de dimensions différentes. Les dimensions de ce congé peuvent être importantes et il est recommandé pour qu'elles soient définies dans la spécification du matériau. Les têtes de fixation peuvent être de toute forme adaptée aux dispositifs de fixation de la machine. Les éprouvettes non usinées (par exemple celles brutes fonderie) doivent comporter un congé de raccordement entre les têtes de fixation et la partie calibrée. Les dimensions de ce congé sont importantes et il est recommandé pour qu'elles soient définies dans la norme de produit (voir figure III.4).



Fig III.4 : L'éprouvette

5. Les différents types de comportement mécaniques :

Il existe deux types de déformation : la déformation élastique et la déformation plastique. La déformation élastique se caractérise par la linéarité entre la force nécessaire à l'élongation et le taux d'élongation, les déformations étant réversibles. La déformation plastique se caractérise par une déformation résiduelle permanente après le relâchement des contraintes ayant provoqué ces déformations : il s'agit donc d'une déformation irréversible.

Ces deux types de déformation dans le cas de polymère se superposent, c'est pourquoi on parle des matériaux viscoélastiques.

On peut classer les comportements mécaniques des matériaux en deux catégories, le comportement fragile et le comportement ductile. Un matériau est considéré fragile lorsqu'il se casse dans son domaine élastique, c'est-à-dire sans subir de déformation plastique avant la rupture, au contraire un matériau est considéré ductile lorsqu'il subit de grande déformation plastique avant la rupture.

6. Facteur influence sur les propriétés mécaniques des polymères :

Les facteurs influencent sur les propriétés mécaniques des polymères sont différents par exemple le taux de cristallinité qui correspond au pourcentage en poids de phase cristalline dans le matériau. La température de transition vitreuse T_g est aussi l'un du facteur qui influe, elle correspond à la température à laquelle le polymère passe de l'état vitreux à l'état caoutchoutique. Le taux de réticulation correspond à la densité de liaison pontale entre les chaînes. Ils évaluent que la présence des liaisons covalentes entre les chaînes donne lieu à des propriétés différentes de celle des polymères purement linéaire (polymères thermoplastique) dont les seules liaisons intermoléculaires sont des liaisons faibles comme les liaisons de Van Der Waals. Les craquelures et les impuretés sont dès l'une les facteurs les plus importants qui ont de grandes influences sur le comportement mécaniques des matériaux.

➤ Essai de choc

L'essai de choc est utilisé pour déterminer le comportement des matériaux à des vitesses de déformation élevées.

La résistance au choc des matériaux peut aisément être caractérisée par un essai de résilience. Cet essai consiste à rompre en son milieu d'un seul coup de mouton-pendule une éprouvette entaillée en V en son milieu et reposant sur deux appuis. On détermine l'énergie absorbée dont on déduit la résilience.

1. Principe de l'essai de choc :

Les moutons pendules déterminent le travail de choc absorbé d'une éprouvette normalisée jusqu'à la déformation rapide ou la rupture en mesurant la remontée du marteau après l'impact. L'essai est destiné à mesurer l'énergie nécessaire pour rompre en une seule fois une éprouvette préalablement entaillée d'une masse en mouvement pendulaire à la suite d'un choc unique. On utilise un mouton pendule munit à son extrémité d'un couteau qui permet de développer une énergie donnée au moment du choc. Une partie de l'énergie disponible est consommée par la rupture de l'éprouvette.

L'énergie absorbée est obtenue en comparant la différence d'énergie potentielle entre le départ du pendule et la fin de l'essai. La machine est munie d'index permettant de connaître la hauteur du pendule au départ ainsi que la position la plus haute que la pendule atteindra après la rupture de l'éprouvette.

La résilience est définie par la lettre a_K (Joules/cm²). L'essai se réalise sur une machine appelée mouton pendule (figure III.5) rotatif. On mesure la résistance au choc du matériau. L'énergie obtenue (en négligeant les frottements) est égale :

$$W = m \cdot g \cdot h - m \cdot g \cdot h' = m \cdot g \cdot (h - h')$$

m : masse du mouton-pendule

g : accélération de la pesanteur (environ 9.81 m.s⁻²)

h : hauteur du mouton-pendule à sa position de départ

h' : hauteur du mouton-pendule à sa position d'arrivée

La graduation de la machine permet généralement d'obtenir directement une valeur en joule. Au départ, le pendule est placé à une hauteur paramétrée qui devra délivrer une énergie normalisée (si l'on tient compte de la gravité de 9,81 m/s²).

-Le pendule est libéré, ce qui grâce à son propre poids, provoquera un choc. L'éprouvette encaissera une partie du choc, mais sera brisée.

-Le pendule continuera dans son élan jusqu'à une certaine hauteur, ce qui permettra de mesurer l'énergie absorbée par l'éprouvette.

L'énergie absorbée est calculée grâce à $W=P (h_0-h_1)$ (P en N).

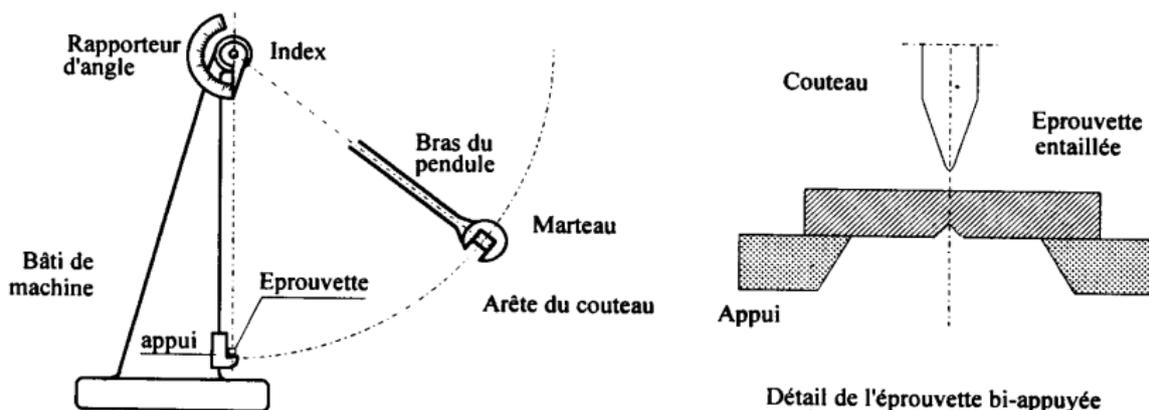


Fig III.5: Schématisation de l'essai de résilience

Les éprouvettes pour la résilience :

2.1 Eprouvettes Charpy U :

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

2.2 Eprouvettes Charpy 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.

2. Machine de choc :

Le mouton Pendule Charpy permettant de réaliser des essais de résilience avec une capacité disponible qui peut atteindre 750 J selon les versions. L'essai permet de déterminer l'énergie absorbée lors de la rupture d'une éprouvette entaillée. Le pendule est constitué d'une base en fonte et de deux colonnes d'appui pour le support des éprouvettes CHARPY, un mouton-pendule avec son bras, un système de levage du mouton motorisé et un mécanisme de déclenchement (voir figure III.5).

Un afficheur numérique permet la lecture de l'énergie absorbée par l'éprouvette testée et un frein motorisé assure la réaction sur le mouton en ralentissement rapide des oscillations. L'équipement est disponible en versions ... Joules et avec différents couteaux d'impact pour répondre aux normes en rigueurs.

Les principales caractéristiques du mouton pendule sont sa précision, fiabilité et conception ergonomique. Les nouveautés techniques suivantes ont été introduites:

- Les moutons pendules reconnaissent automatiquement le pendule utilisé.
- Le pendule est équipé d'un dispositif de remplacement rapide. Le remplacement du pendule s'effectue sans outillages spécifique.
- Frein de pendule à disque à usure faible.
- Ergonomie parfaite. Les principaux éléments de réglage (clavier, frein, levier de déclenchement et affichage) sont placés sur un même plan, pour une ergonomie optimale.
- L'électronique de dernière génération comporte un encodeur haute-résolution pour la mesure précise de l'angle d'impact. Une interface est incluse pour l'intégration dans un système de gestion de l'information. La liaison PC s'effectue par Plug & Play via une interface USB.

➤ Essai de dureté :

La dureté caractérise la résistance qu'un matériau oppose à la pénétration d'un corps dur. L'essai de dureté consiste à créer une empreinte sur une pièce par une pénétration soumise à une force déterminée. Il peut être considéré dans certains cas comme un moyen de contrôle non destructif, utilisé en contrôle final car :

- Il est possible d'obtenir, à partir d'un indice de dureté, une bonne approximation de la résistance à la traction.
- Il permet de vérifier la qualité d'un traitement sur un matériau.

C'est l'essai mécanique de base en raison notamment de sa rapidité et de la facilité de la mise en œuvre. Et chaque type de dureté à un domaine d'application.

1. Principe d'essai:

Que ce soit pour une dureté Brinell, Rockwell ou Vickers, l'essai consiste à appliquer sur une pièce à mesurer, un pénétrateur (dont la forme varie selon le type de l'essai) sous une charge F (variable). La dureté est proportionnelle au quotient de la force " F ", par l'aire " S " de la surface déformée par le pénétrateur sur le matériau.

1.1 Essai Brinell :

Le pénétrateur est une bille de diamètre D (figure III.6). On détermine le diamètre moyen " d " de l'empreinte laissée par le pénétrateur sur la surface du matériau, après enlèvement de la charge.

La dureté Brinell est un nombre proportionnel au quotient de la charge d'essai F , par l'aire de l'empreinte considérée comme une calotte sphérique de diamètre d .

1.2 Essai Vickers :

Le pénétrateur Vickers est en diamant de forme pyramidale à base carrée. On mesure la moyenne des deux diagonales " d " de l'empreinte laissée par le pénétrateur sur le matériau. C'est l'essai le plus précis des trois essais de dureté, et celui qui a le domaine d'application le plus étendu.

1.3 Essai Rockwell :

Il existe 2 types de pénétrateurs:

Pour les fortes duretés, essai C le pénétrateur est un diamant conique. L'expression de la dureté est la suivante : $HRC = 130 - 500.z$ avec $z = e_2 - e_0$

Pour les faibles duretés, essais B le pénétrateur est une bille (figure III.7). L'expression de la dureté est la suivante : $HRB = 100 - 500.z$ avec $z = e_2 - e_0$

Cet essai est effectué en 3 étapes d'application de la force (F_0 , $F_0 + F_1$, F_0). On mesure l'accroissement " e " en profondeur et on en déduit la dureté Rockwell. Le paramètre mesuré est l'augmentation de z (mm) de la profondeur de pénétration entre les mesures faites sous précharge, avant et après essai de charge total.

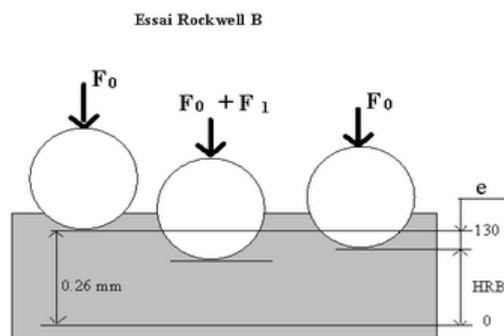


Fig III.7 : essai de Rockwell type B

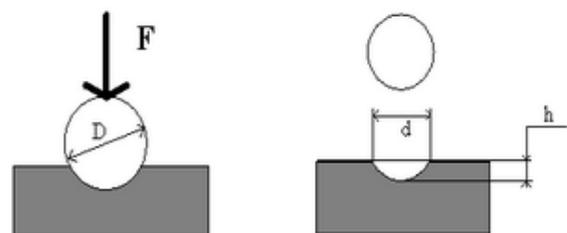


Fig III.6 : essai de dureté Brinell

III.3 Partie expérimentale :

III.3.1 Choix du matériau :

Les matériaux choisis pour la réalisation de nos travaux sont le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP). Il est utilisé généralement pour la réalisation des orthèses et des prothèses provisoires pour l'handicapés.

III.3.2 Préparation et géométrie des éprouvettes :

L'usinage de l'éprouvette est réalisé sur une machine à commande numérique à partir des plaques à PE et PP, ces derniers sont découpés par une machine de CEAST de laboratoire Polymed d'entreprise sonatrack, avec un moule de géométrie et dimension dépendent des normes et du matériau testé, si l'on se réfère aux normes ASTM D-1922 pour l'essai de traction et de choc et la machine d'entailleuse aux normes ASTM D-256 pour l'entaille V de l'essai de choc (voir figure III.8).



Fig III.8: Machines de CEAST ASTM D-1922 et machine d'entailleuse ASTM D-256 avec le moule de l'éprouvette

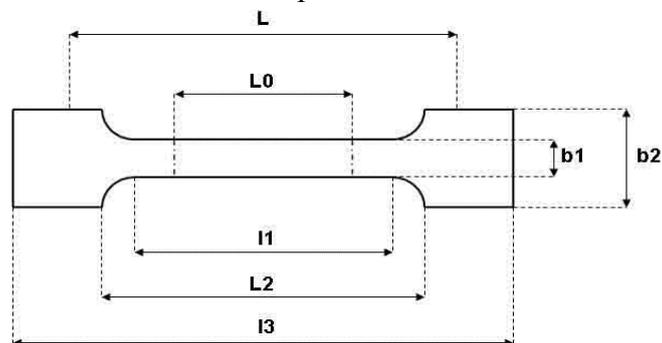


Fig III.9 : Géométrie de l'éprouvette de traction

✚ pour l'éprouvette de traction : (voir figure III.9)

L_0 = Longueur de référence (20mm)

L = Ecartement entre outillages

l_1 = Longueur de la partie calibrée étroite (37mm)

L_2 = Ecartement entre les parties parallèles larges (75mm)

l_3 = Longueur totale (115mm)

b_2 = Largeur dans la zone d'épaulement (25mm)

b_1 = Largeur dans la zone de la longueur de référence (5,5mm)

h = épaisseur de l'éprouvette (différentes épaisseurs 4mm, 5mm, et 6mm)

✚ pour l'éprouvette de choc : (voir figure III.10)

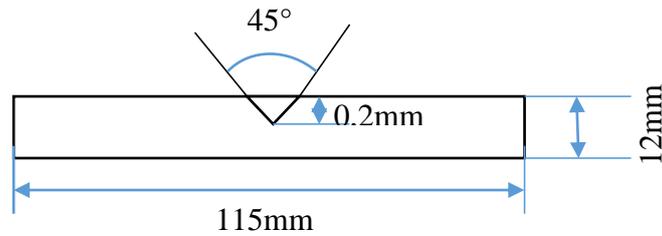


Fig III.10 : Géométrie de l'éprouvette de choc

III.3.3 Techniques expérimentales :

a) Cas de l'essai de choc :

Les essais de résilience, ont été réalisés sur une machine de Charpy Zwick au niveau de département de génie civil à l'université Badji Mokhtar Annaba (figure III.11), cette appareille à une capacité de 50 J avec un marteau de 7,5 kg. La machine est de type Zwick/Roell 5113 universel qui conforme aux normes EN 10045-2/DIN 51222. DIN 51233. ISO 442 et ASTM D 256. Elle couvre les méthodes Charpy et Izod selon ASTM et ISO de même que les essais de choc traction selon ISO dans une plage jusqu'à 50 Joule. Grace à l'utilisation de différentes longueurs de pendule et l'angle de déclenchement 160/124,4, toutes les vitesses d'impact exigées par les normes peuvent être sélectionnées. La machine est semi instrumentée, elle nous donne les valeurs de l'énergie de choc et de la résilience seulement. Des analyses de mécanique de la rupture ou une reconnaissance de la transition ductile-fragile peuvent être ainsi effectué.

L'entaille que l'on introduit pour concentrer les contraintes et fragiliser l'éprouvette est de 2mm. Le choc est donné au centre de l'éprouvette par un marteau de 7,5 Kg. Un marteau pendule de 7,5 Kg avec une énergie cinétique déterminée vient frapper la face arrière de l'éprouvette non entaillée (figure III.12) ; l'éprouvette est écrasée. Ainsi, au moment de la rupture de l'éprouvette, une partie de l'énergie cinétique du marteau est absorbée par le processus de déformation dans l'éprouvette. La quantité d'énergie diffère selon le matériau et la température (température ambiante). Conformément à l'énergie absorbée par l'éprouvette pendant l'impact, le marteau pendule oscille moins haut sur le côté opposé. Il atteindrait une hauteur quasi-identique à celle du point de départ, si aucune éprouvette n'était introduite. L'énergie d'impact W est alors déterminée en Joule, pour un matériau déterminé à une température déterminée.

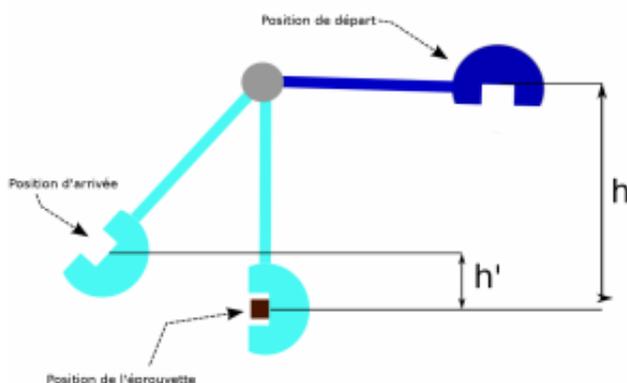


Fig III.12 : Représentation du mouton-pendule et des Charpy hauteurs à prendre en compte pour le calcul de l'énergie absorbée



Fig III.11 : machine de choc Zwick/Roell 5113

Au moins 4 éprouvettes entaillées en V ont été testées, pour déterminer une valeur moyenne de résistance au choc. Ces éprouvettes sont découpées selon la norme ASTM D-1922, le tableau III.1 suivant regroupe les dimensions utilisé pour cette teste.

Dimension	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Entaille en V (mm)
	115	10	3,8	2 (45°)

Tableau III.1: dimension des éprouvettes d'essai selon la norme ASTM D-1922

Résultats obtenue :

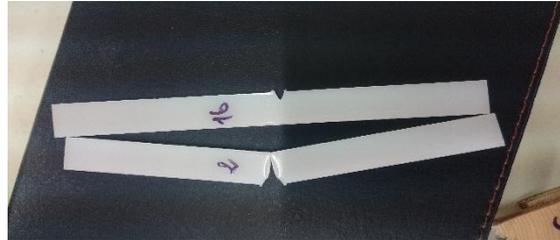


Fig III.13 :L'éprouvette avant et après l'essai de choc

Nr	Energie de choc (J)	Section (mm ²)	Largeur éprouvette b ₀ (mm)	Epaisseur éprouvette a ₀ (mm)
1	1,07	45,6	12	3,8
2	0,87	45,6	12	3,8
3	0,92	45,6	12	3,8
4	0,85	45,6	12	3,8

Tableau III.2 : Essai de choc pour le PE

Série n = 1	Energie de choc (J)	Epaisseur éprouvette a ₀ (mm)	Section (mm ²)	Largeur éprouvette b ₀ (mm)
{x}	0,93	3,8	45,6	12
s	0,1	0	0	0
{n _y }	10,45	0	0	0

Tableau III.3 : Les moyens d'énergie de choc

Les résultats sont indiqués sur la courbe l'énergie de choc en fonction du numéro de l'éprouvette pour le polyéthylène (voir figure III.14)

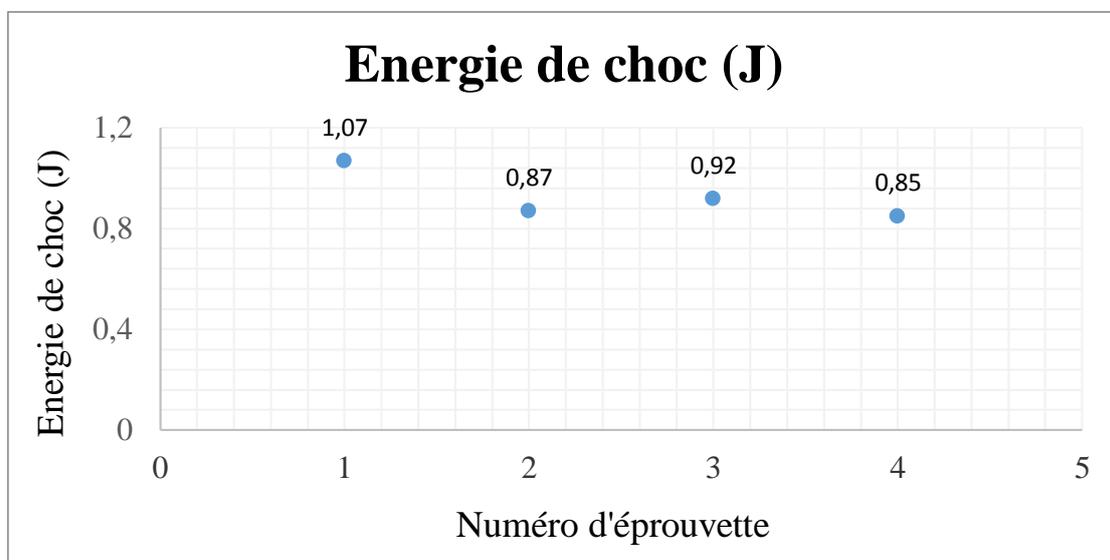


Fig III.14 : Courbe de choc pour le PE

Détermination de la résistance au choc a_k :

$$a_k = W / (b_0 - 2) \cdot e \text{ (J/mm}^2\text{)}$$

a_k : La résilience pour éprouvette avec entaille (J/mm²) ;

W : L'énergie cinétique absorbée par l'éprouvette entaillée au moment de l'impact (J);

b_0 : La largeur de l'éprouvette en (mm).

e : L'épaisseur de l'éprouvette en (mm) ;

Nr	Energie de choc (J)	Section (mm ²)	Largeur éprouvette b_0 (mm)	Epaisseur éprouvette a_0 (mm)	Résilience (J/mm ²)
1	1,07	45,6	12	4	0,02675
2	0,87	45,6	12	4	0,02175
3	0,92	45,6	12	4	0,023
4	0,85	45,6	12	4	0,02125

Tableau III.4: la résilience des éprouvettes de PE

Interprétation :

L'énergie absorbée par les éprouvettes de PE est différente : l'énergie max=1,07 J et l'énergie min=0,85 J. Ces énergies m'ont permis de trouver la résilience du matériau, et avec ça on trouve que la résilience augmente avec l'augmentation de l'énergie de choc.

Ces différences d'énergie avec la même éprouvette due à la morphologie et les faisceaux dans chaque éprouvette pendant la découpe, cela représenté parmi l'analyse microscopie de l'éprouvette avant et après l'essai (figure III.13).

On a d'après la littérature ISO 179/1eA, la résilience de matériau PP est 50j/m² et d'après notre étude on a la résilience de PE est 26,75j/m² cela veut dire que le matériau PP résiste mieux au choc que le matériau PE.

b) Cas de l'essai de traction :

Les essais de traction, ont été réalisés sur une machine de Zwick Roell Z050, elle est pilotée par ordinateur à base d'un logiciel TestXpert (figure III.15), au laboratoire des essais mécaniques à l'université de Badji Mokhtar Annaba, au niveau de bloc E département de métallurgie, cette machine a une capacité de 50 kN. Pour chaque vitesse on a au moins 3 éprouvettes et chaque vitesse a été réalisé par des épaisseurs différentes.

1. Description de la machine Zwick Z050 :

Une machine de traction moderne dispose d'un entraînement électrique réglable pour effectuer des essais simples ou cycliques à vitesse contrôlée. Elle doit être équipée de capteurs de force et d'allongement, ainsi que d'un système d'amarrage. Grâce micro-ordinateur, le contrôle d'essai et l'acquisition des données sont devenus très simples. Des capteurs combinés avec des cartes d'acquisition des données, gérés par des logiciels hautement polyvalents, permettent de contrôler des machines pouvant développer des forces de 50kN, à l'aide de quelques touches.

La Zwick n'est pas seulement une machine universelle, c'est aussi un système d'essai modulaire. La figure III.15 illustre les parties principales de la Zwick Z050. La machine contient une cellule de déplacement et une cellule de force, celle-ci est montée avec les amarrages supérieurs sur le travers mobile qui se déplace selon un guidage sans jeu. Avec un extensomètre à grande course mécanique, elle permet de mesurer des déformations importantes sur les plastiques... Ses avantages sont :

Robustesse et simple d'utilisation, prise de mesure de déformation jusqu'à rupture
Reconnaissance automatique par prise intelligente, Bras de palpeur interchangeable.

La Zwick peut être commandée manuellement grâce au pupitre de commande manuelle ou par ordinateur (utilisation de logiciel TestXpert). L'ordinateur et le logiciel correspondants assurent le traitement des valeurs mesurées et le contrôle du déroulement des essais.

Dans cet essai, on exerce une force de traction sur une éprouvette de longueur $L_0 = 115\text{mm}$, qu'on a déterminé, Car les résultats d'essai sont influencés par la précision de mesure des dimensions de l'éprouvette, Jusqu'à sa rupture. En enregistrant la force F appliquée à l'éprouvette par la machine de traction et son allongement progressif. La gamme de vitesse de déplacement de la traverse mobile varie de à 200mm/mn . Celle utilisée pour nos essais est de 10mm/mn , 100mm/mn , et 180mm/mn , 3mm/s , 2mm/s , 1mm/s et 0.5mm/s .

Les résultats sont recueillies par des capteurs et grâce à le logiciel de TestXpert, les données sont traitées puis affichées sur un écran d'ordinateur.



Fig III.15: machine de traction Zwick/Roell Z050 pilotées par ordinateur



Fig III.16 : les éprouvettes pour l'essai de traction

b.1 Résultats obtenues :

1. Pour le PE d'épaisseur de 3,8 mm :

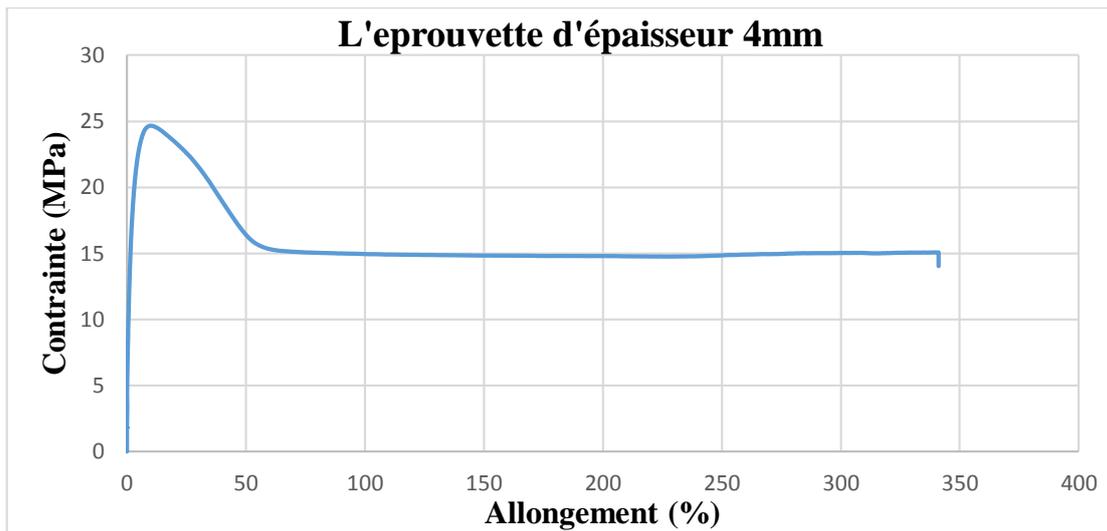
Matériau d'éprouvette	L_0 (mm)	e (mm)	b (mm)	S_0 (mm ²)
PE	20	4	5,5	22
PE	20	5	5,5	27,5
PE	20	6	5,5	33
PP	20	4	5,5	22

Tableau III.5 : Les dimensions des éprouvettes des essais

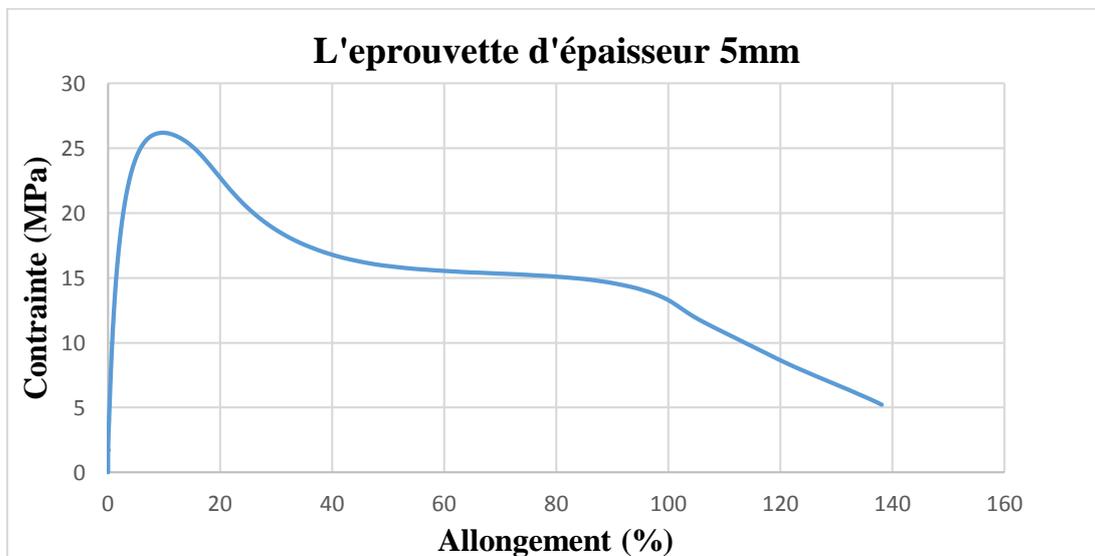
Les résultats des essais de traction pour 3 éprouvettes en différents vitesses et matériaux, sont illustrés sur les figures ci-dessus : Contrainte (σ) en fonction de la déformation (ϵ) pour différentes vitesses.

a. Résultats du PE :

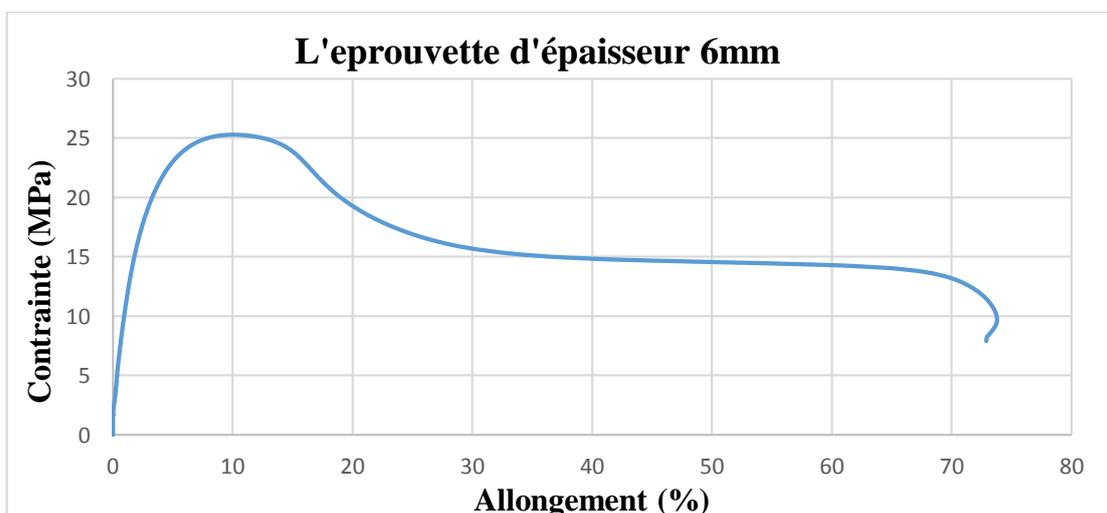
1. Vitesse 3mm/s :



FigIII.17 : Courbe contrainte-allongement d'éprouvette de PE d'épaisseur 4mm

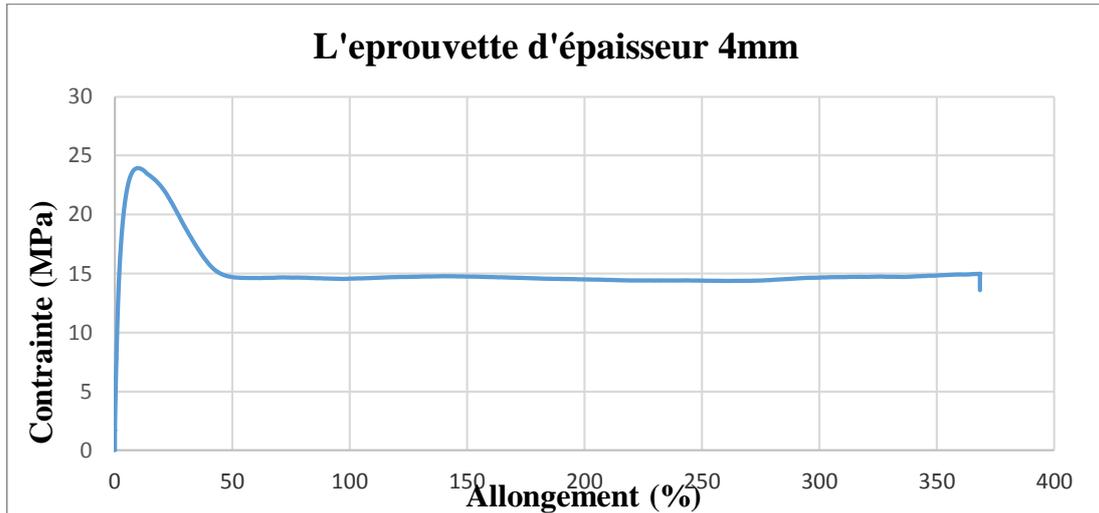


FigIII.18 : Courbe contrainte-allongement d'éprouvette de PE d'épaisseur 5mm

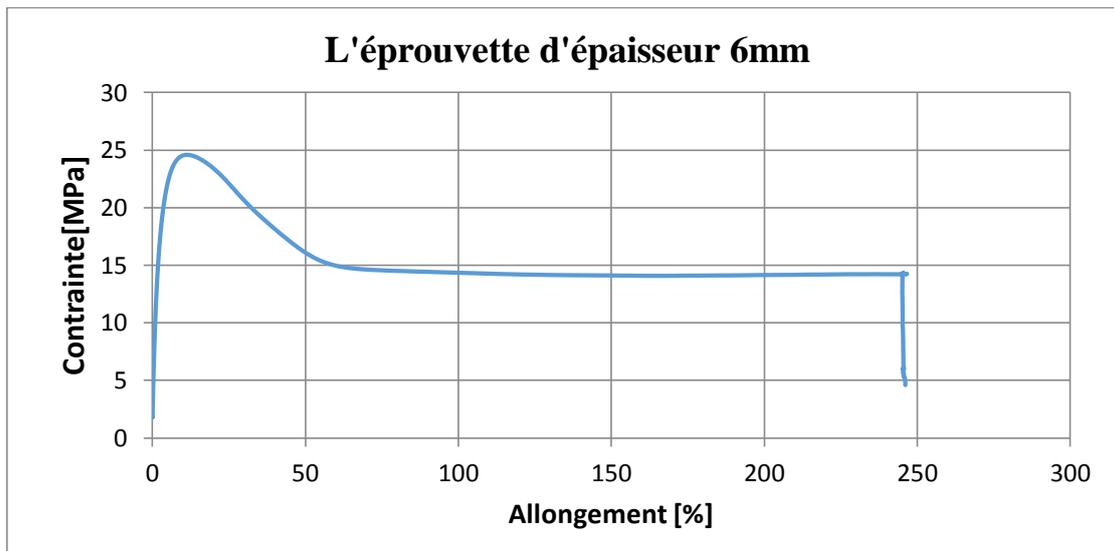


FigIII.19 : Courbe contrainte-allongement d'éprouvette de PE d'épaisseur 6mm

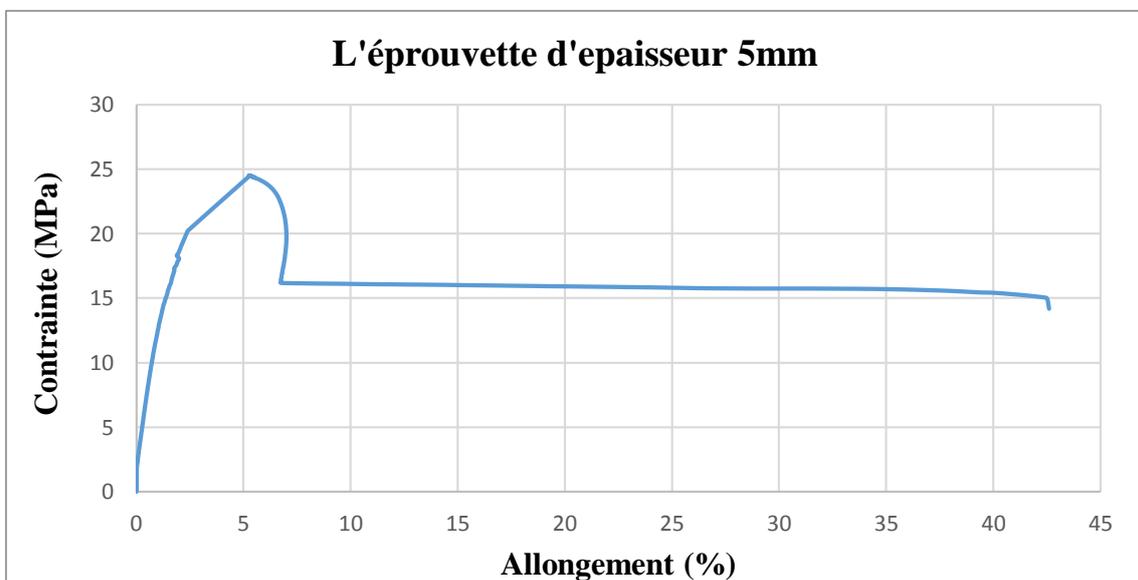
2. Vitesse 2mm/s :



FigIII.20 : Courbe contrainte-allongement d'éprouvette de PE d'épaisseur 4mm et vitesse 2mm/s

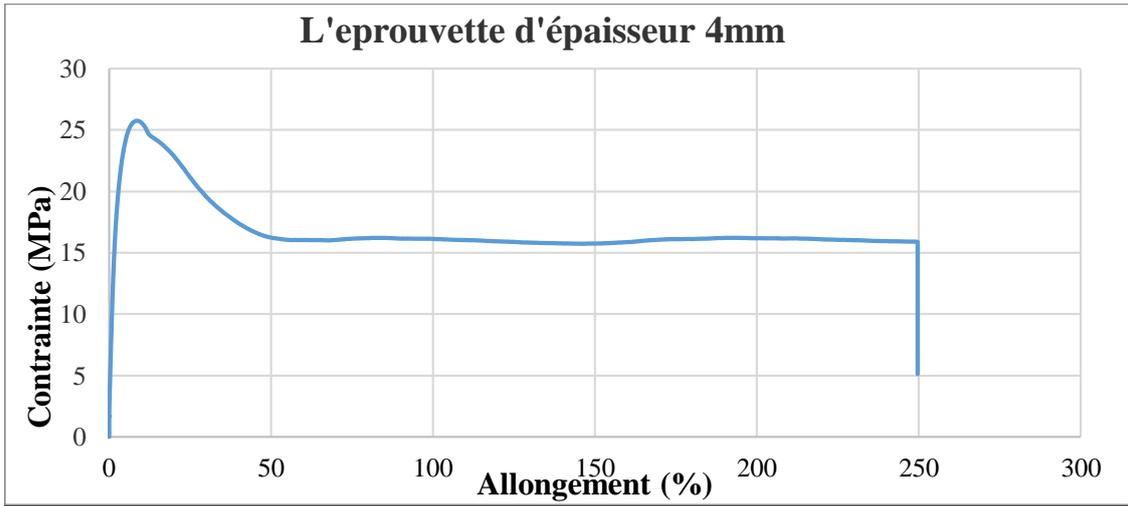


FigIII.21 : Courbe contrainte-allongement d'éprouvette de PE d'épaisseur 6mm et vitesse 2mm/s

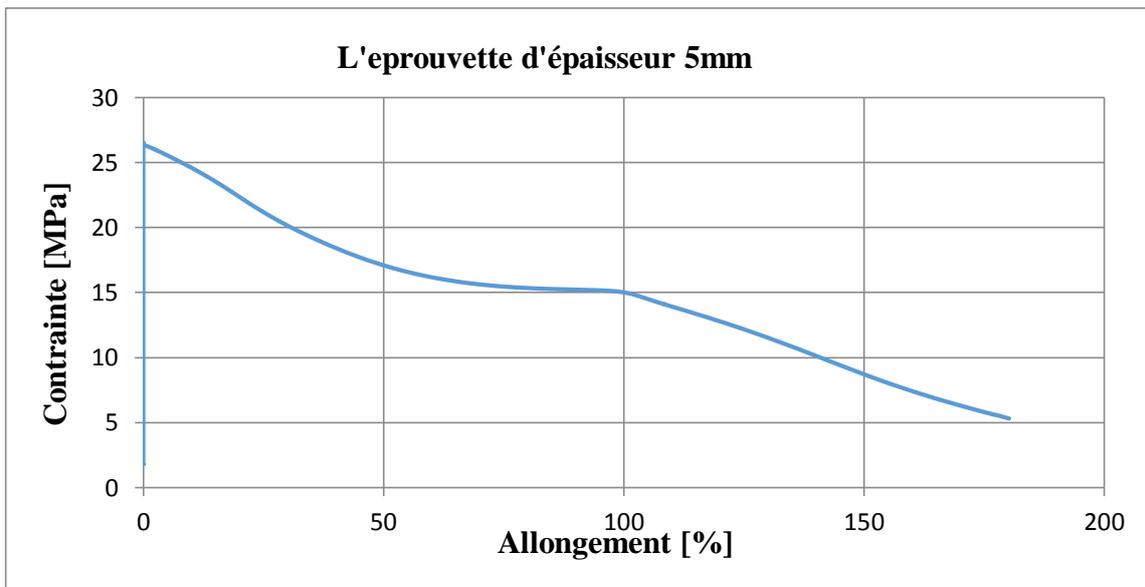


FigIII.22 : Courbe contrainte-allongement d'éprouvette de PE d'épaisseur 5mm et vitesse 2mm/s

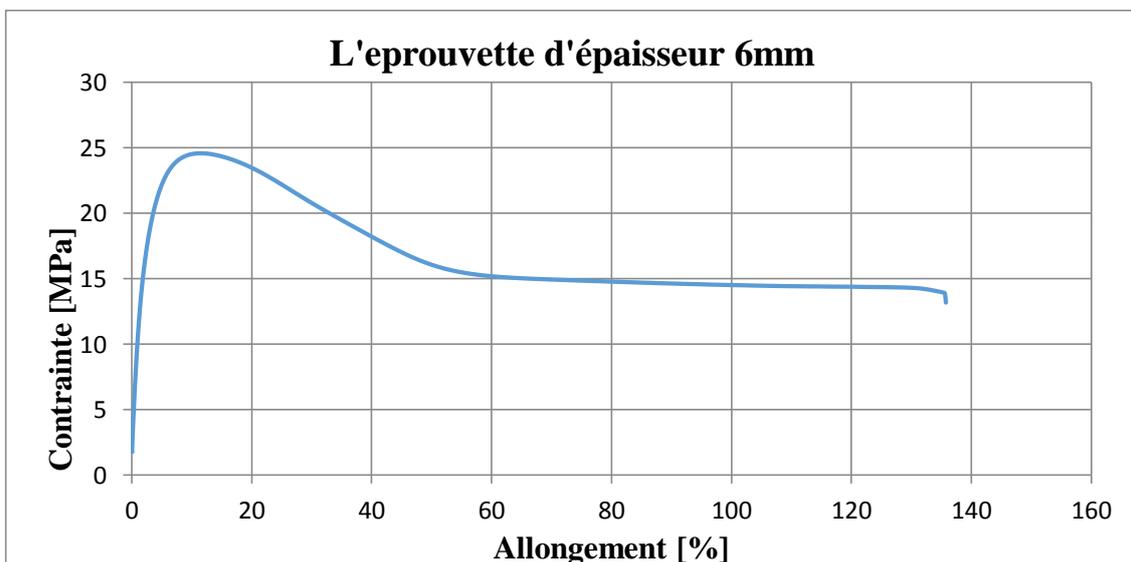
3. Vitesse 1mm/s :



FigIII.23 : Courbe contrainte-allongement d'éprouvette de PE d'épaisseur 4mm et vitesse 1mm/s

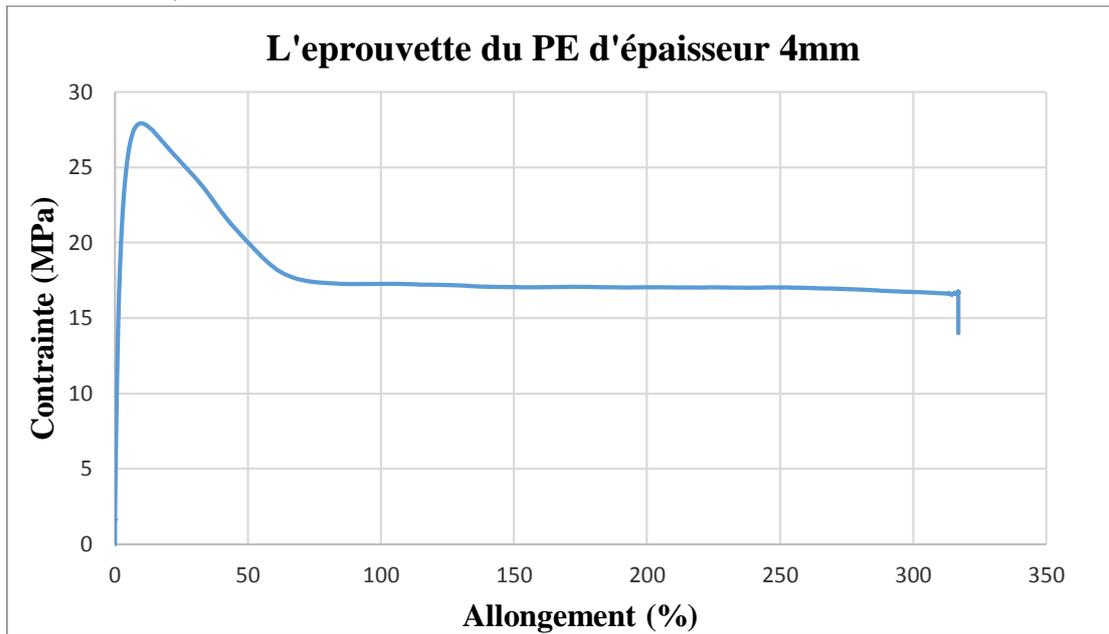


FigIII.24 : Courbe contrainte-allongement d'éprouvette de PE d'épaisseur 5mm et vitesse 1mm/s



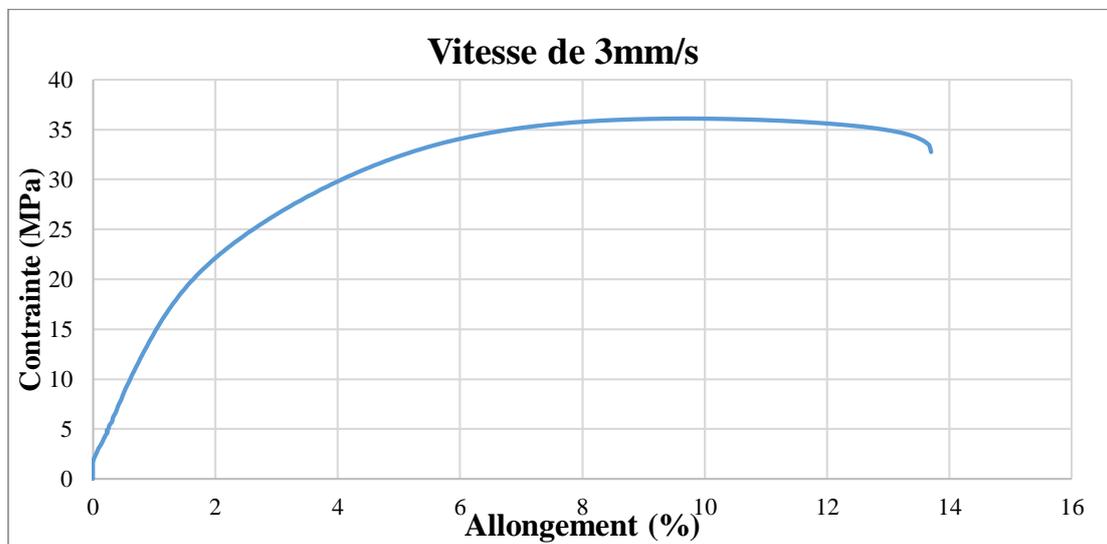
FigIII.25 : Courbe contrainte-allongement d'éprouvette de PE d'épaisseur 6mm et vitesse 1mm/s

4. Vitesse 0,5mm/s :

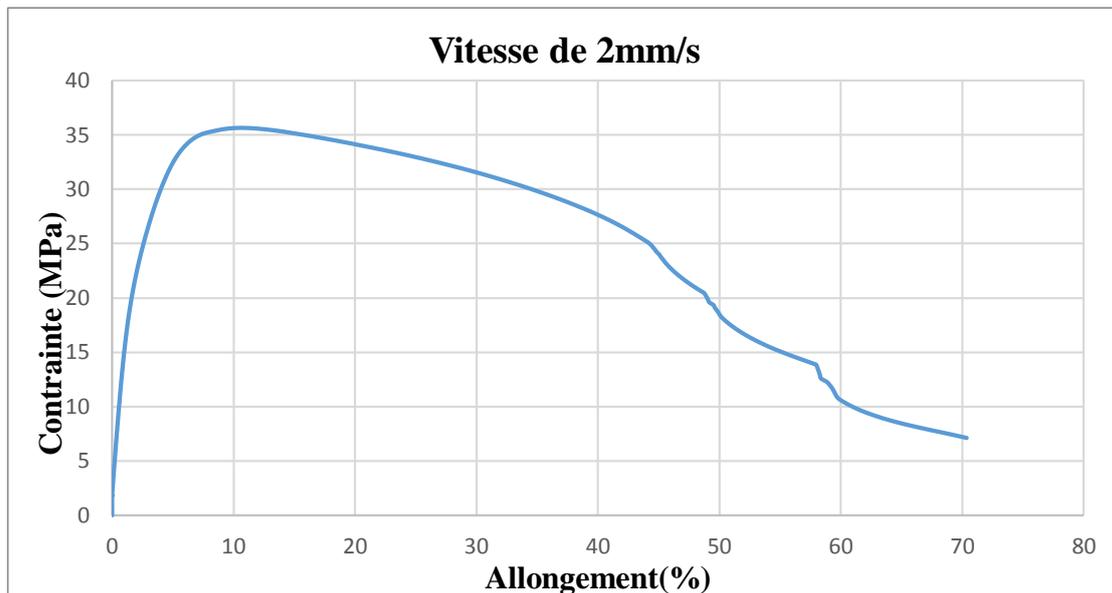


FigIII.26 : Courbe contrainte-allongement d'éprouvette de PE d'épaisseur 4mm et vitesse 0,5mm/s

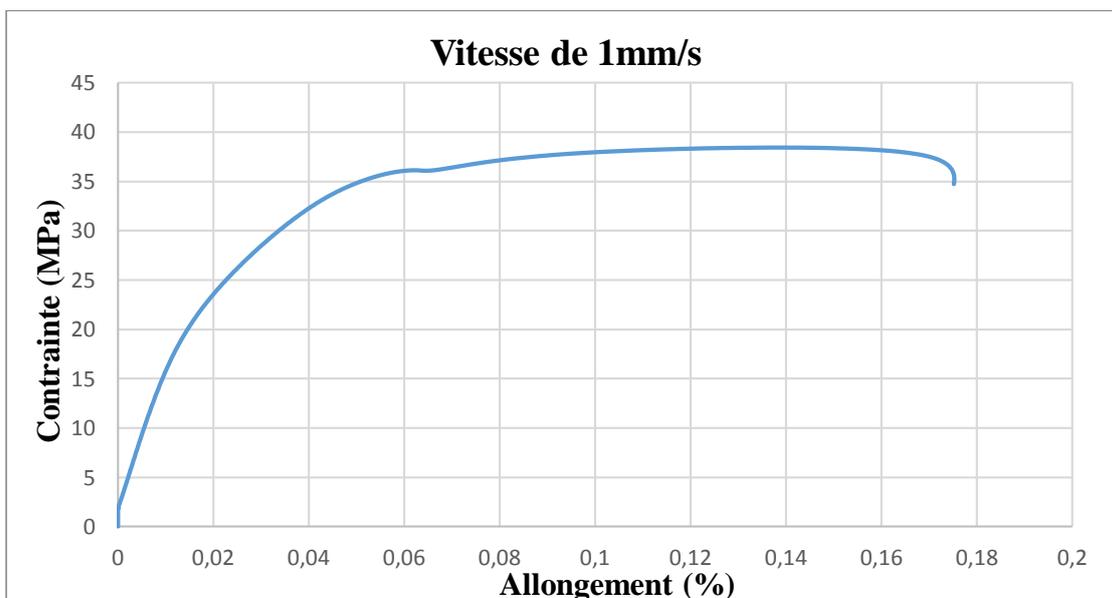
b. Résultats du PP :



FigIII.27 : Courbe contrainte-allongement d'éprouvette de PP d'épaisseur 4mm et vitesse 3mm/s

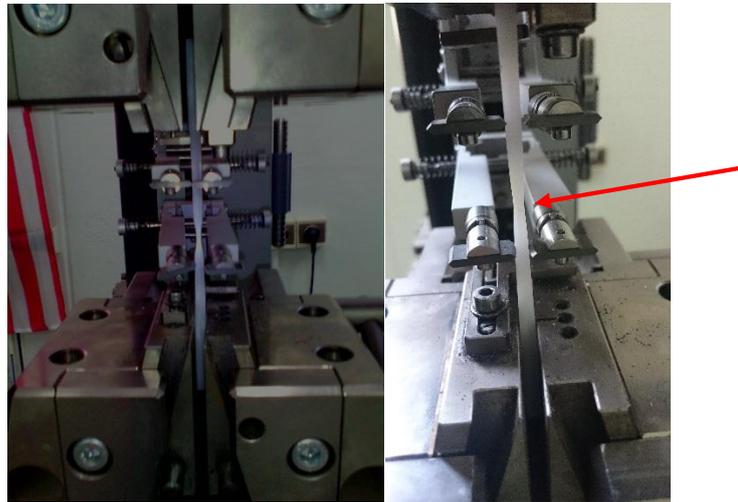


FigIII.28 : Courbe contrainte-allongement d'éprouvette de PP d'épaisseur 4mm et vitesse 2mm/s



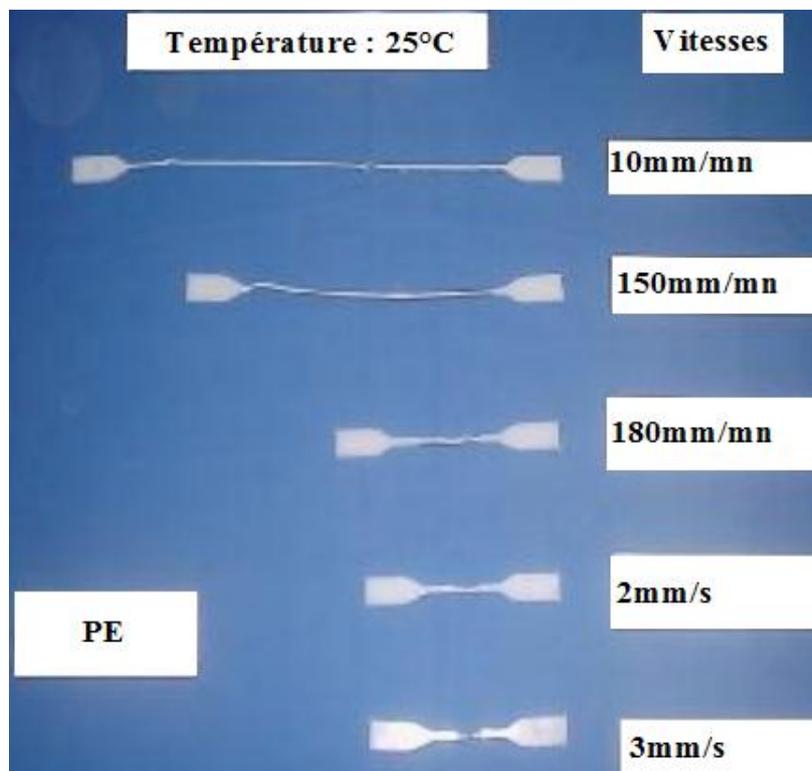
FigIII.29 : Courbe contrainte-allongement d'éprouvette de PE d'épaisseur 4mm et vitesse 1mm/s

Une partie de la courbe suit une allure linéaire ; cette partie concerne la déformation élastique (le comportement suit la loi de Hooke). Cette déformation est assurée par la phase amorphe et est liée à la distorsion des liaisons de Van der Waals. La courbe fait apparaître une partie élastique puis plastique dans ce cas-là la contrainte arrive à un maximum et commence à diminuer dès la formation d'une striction au centre ou aux extrémités de l'éprouvette dans la zone plastique (figure III.30). Ainsi, le maximum ou seuil d'écoulement haut correspond à l'apparition du phénomène de striction. Une réduction de section pouvant aller jusqu'à la moitié de la largeur, suivie d'une amorce de rupture, se propageant ensuite à toute la largeur. La rupture engendre un allongement pouvant atteindre 400%. La longueur des zones de striction augmente avec l'allongement, comme la montre les figures des courbes précédentes. Pendant toute cette phase, la contrainte d'étirage est presque constante, mais elle adopte quelques fluctuations qui sont attribuées aux petites strictions qui apparaissent pendant l'étirement et forment des petits faisceaux de matière. Chaque fois qu'une striction se forme, la charge diminue et l'étirement d'un faisceau de matière comprise entre deux strictions requiert une augmentation de la contrainte dans cette phase.



FigIII.30 : zone de striction pendant l'essai de traction

Les propriétés mécaniques obtenues sont comparables à celles trouvées dans la bibliographie. La figure III.31 montre les éprouvettes testées pour différentes vitesses et pour une largeur de 4mm. Une diminution de la vitesse d'allongement contribue à l'évolution de la déformation par striction vers une déformation plus uniforme de l'éprouvette. Dès le début de l'essai de traction, pour les courbes représentées précédemment, le phénomène de striction débute au seuil d'écoulement, lorsque l'éprouvette est soumise à une vitesse de déformation constante. La longueur des zones de striction augmente avec l'allongement.



FigIII.31 : Epreuves testées pour différentes vitesses.

On observe que la rupture des éprouvettes était remarquée avant d'accomplir l'étape après durcissement, cela est dû à la présence de défauts liés aux modes de préparation de celles-ci. (Voir figures de l'analyse microscopie optique, cas de traction)

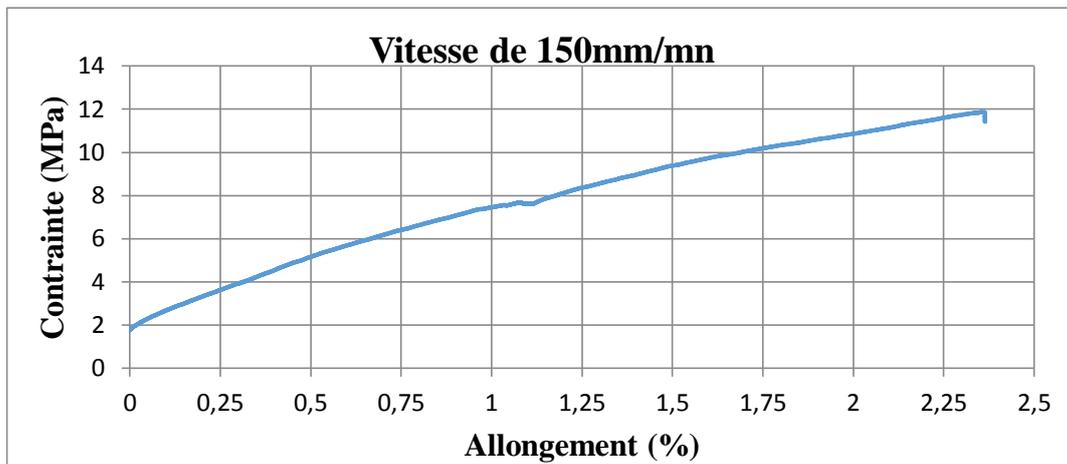


Fig III.32: Courbe de contrainte-allongement pour du PE d'épaisseur 4mm à vitesse 150mm/mn

Le tableau suivant indique les valeurs du module d'élasticité et de la contrainte de traction maximale pour les éprouvettes. Le module d'élasticité moyen est de 0,421 GPa et la contrainte moyenne ultime (R_m) est de 24,79 MPa pour le PE, et pour le PP on trouve que Le module d'élasticité moyen est de 0,454 GPa et la contrainte moyenne ultime (R_m) est de 35,37 MPa.

Vitesses	PE				
	Module d'élasticité (GPa)	R_m (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	Agt(corr) (%)	At(corr) (%)
$V_1=3\text{mm/s}$	0,404	24,661	19,789	12,250	91,591
$V_2=2\text{mm/s}$	0,361	23,954	19,695	12,125	81,018
$V_3=1\text{mm/s}$	0,499	25,740	20,193	9,992	202,110

Tableau III.6: Les propriétés mécaniques des PE

Vitesses	PP				
	Module d'élasticité (GPa)	R_m (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	Agt (corr) (%)	At (corr) (%)
$V_1=3\text{mm/s}$	0,438	36,099	29,435	12,721	16,747
$V_2=2\text{mm/s}$	0,443	35,638	29,477	13,577	73,357
$V_3=1\text{mm/s}$	0,480	34,384	29,553	12,280	20,322

Tableau III.7: Les propriétés mécaniques des PP

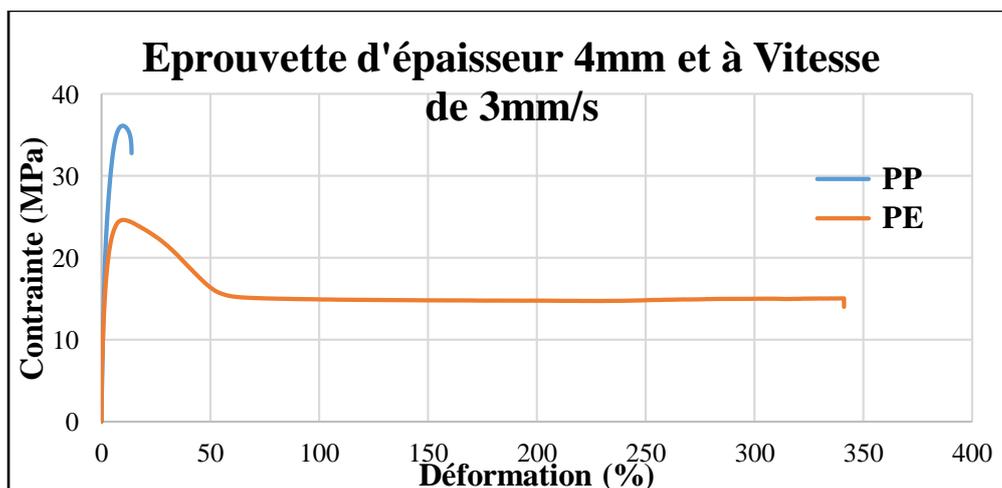


Fig III.33: Comparaison des courbes contrainte-déformation des deux matériaux PP et PE

En comparant les courbes contrainte-déformation obtenue sur les éprouvettes confectionnées à partir des deux matériaux PE et PP, on constate que :

- Le comportement des deux matériaux fait 2 zones de déformation élastique et plastique.
- Le matériau PP a du contrainte plus que le PE, donc le PP résiste mieux à la déformation sous l'effet de la contrainte avant de rompre à $\epsilon = 0,12\%$ et la contrainte maximale supportée par le PP est plus grand que celle de matériau PE.

D'après ces les tableaux et le courbe, on résume que le PE est moins rigide et a une charge inférieure devant le PP.

Comparaison des courbes de traction:

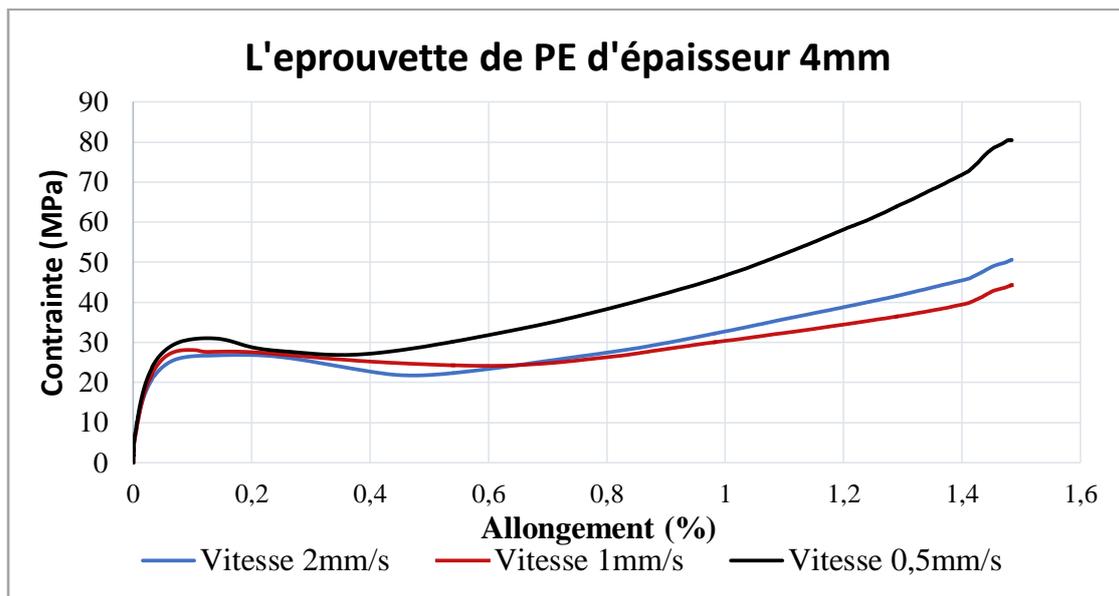


Fig III.34: courbes contrainte-allongement pour éprouvette de PE d'épaisseur 4mm et à différents vitesses

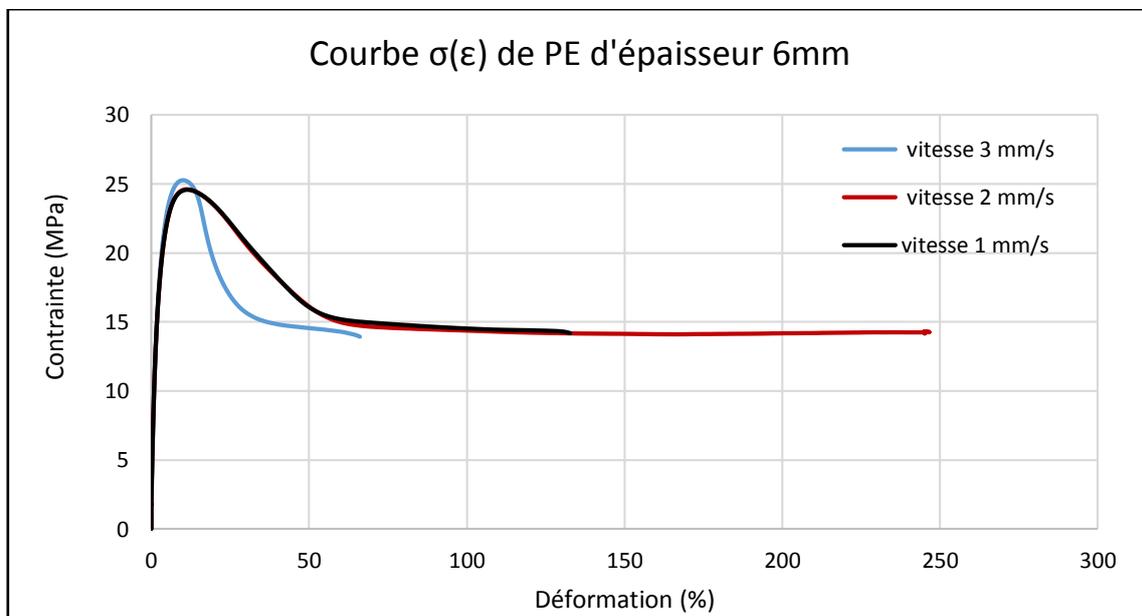


Fig III.35 : courbes contrainte-allongement pour éprouvette de PE d'épaisseur 6mm et à différents vitesses

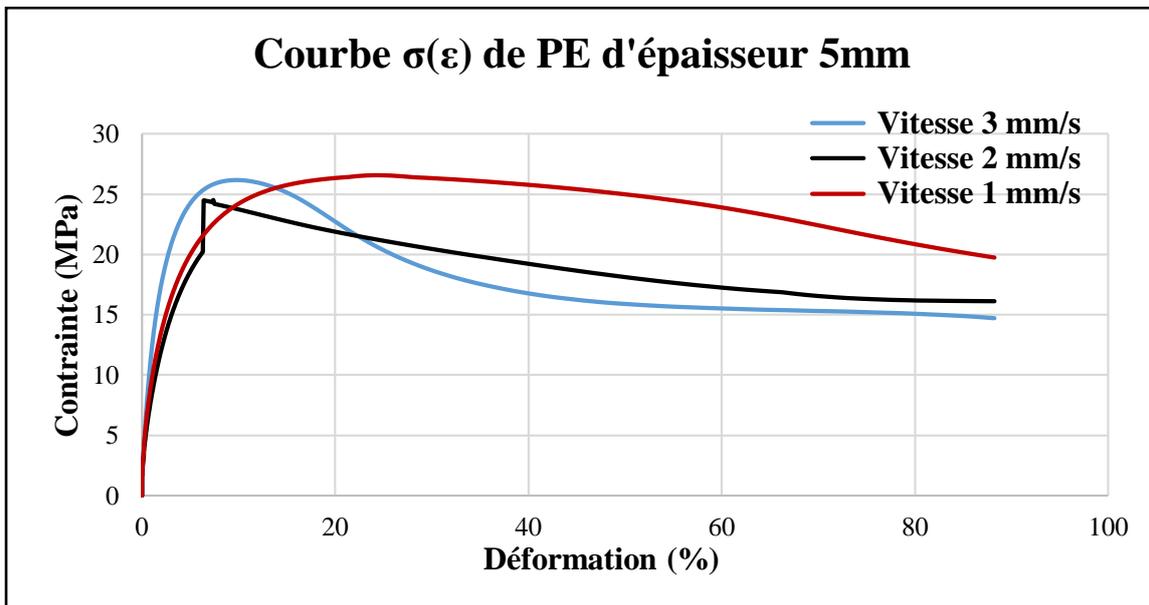


Fig III.36: courbes contrainte-allongement pour éprouvette de PE d'épaisseur 5mm et à différents vitesses

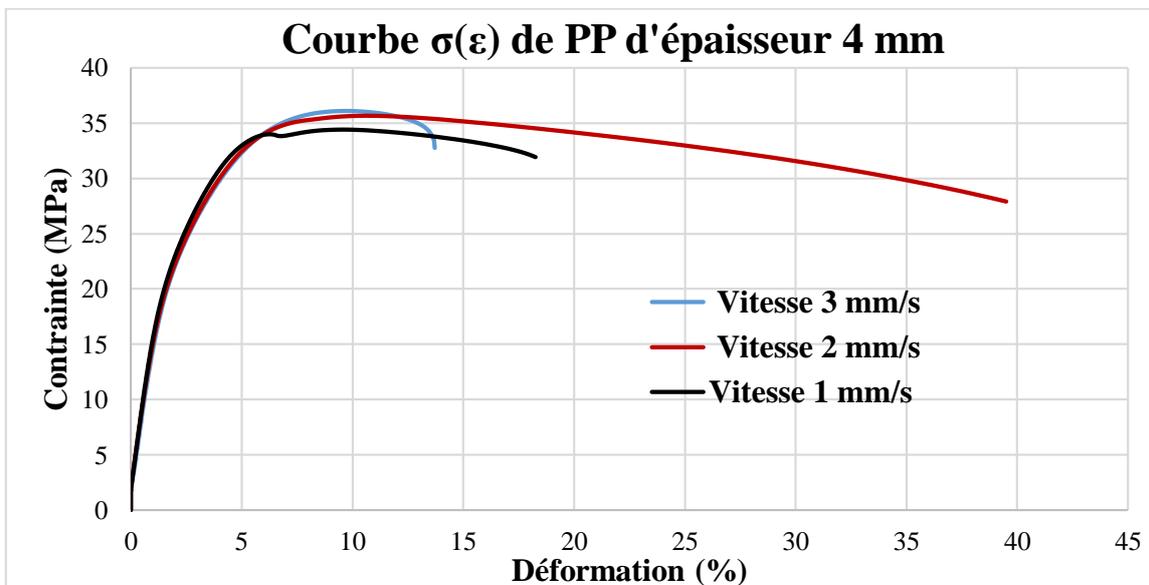


Fig III.37 : courbes contrainte-allongement pour éprouvette de PP d'épaisseur 4mm et à différents vitesses

D'après les résultats obtenus par les courbes précédemment, on dit que le changement de la vitesse a des influences sur les caractérisations des polymères.

L'influence de la vitesse de traction sur la courbe de traction s'explique par le fait que la déformation plastique ne suit pas instantanément la variation de déformation ϵ imposée. Lors d'un incrément rapide et discontinu de l'allongement, l'éprouvette se déforme d'abord élastiquement. Au cours du temps, une partie de cette déformation élastique est transformée en déformation plastique produisant ainsi le phénomène de relaxation de la contrainte.

Pour un essai de traction à vitesse constante, ces deux phénomènes opèrent en même temps et la courbe obtenue dépend de la cinétique et de l'amplitude de la déformation plastique. La courbe $\sigma(\epsilon)$ passe, au-delà de la limite d'écoulement plastique, par un niveau d'autant plus haut que la vitesse de déformation est élevée.

➤ **Analyse Microscopique :**

1. Cas de l'essai de choc pour le PE :

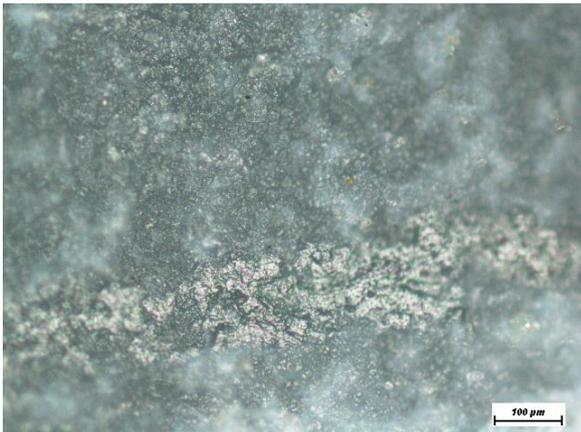


Fig III.38 : Surface de PE d'épaisseur 4mm (x100)

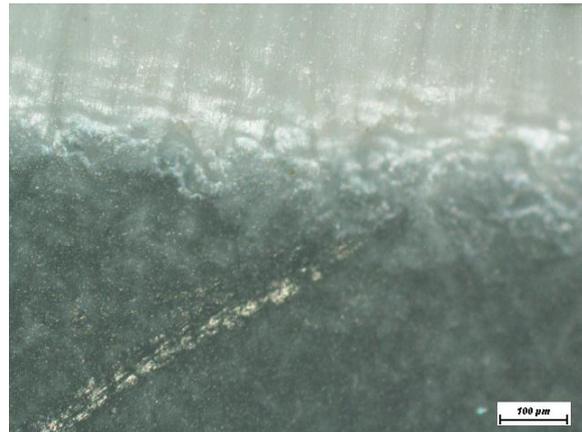


Fig III.39 : Surface de rupture PE d'épaisseur 4mm (x50)

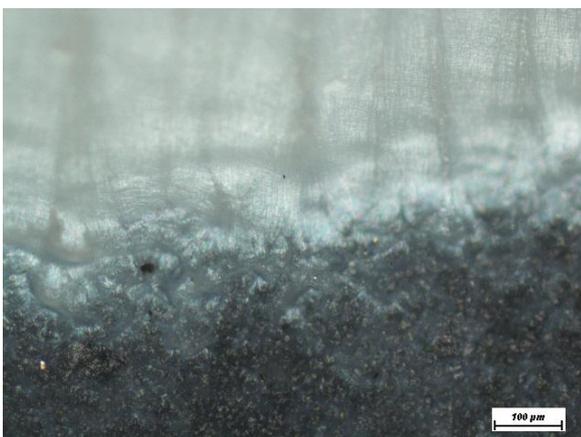


Fig III.40 : Surface de rupture PE d'épaisseur 4mm (x100)

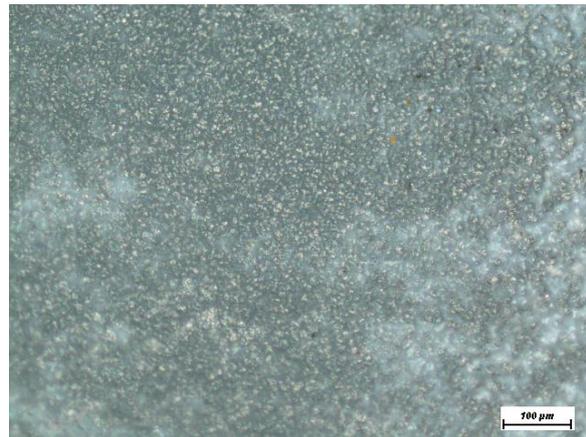


Fig III.41 : Surface de PE d'épaisseur 4mm (x50)

2. Cas de l'essai de traction pour le PE :



Fig III.42 : Surface de PE d'épaisseur 5mm (x50)



Fig III.43 : Surface de rupture d'épaisseur 5mm (x50)

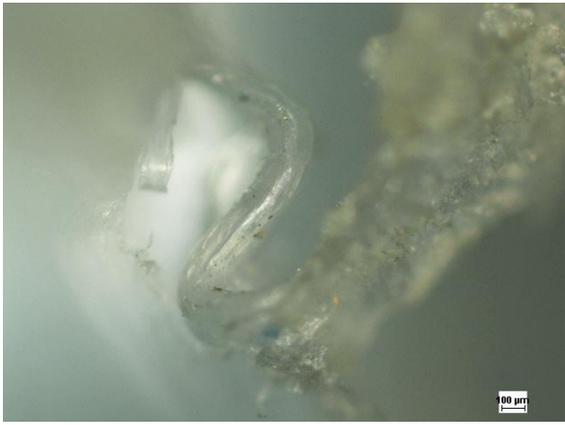


Fig III.44 : Surface du point de rupture PE d'épaisseur 5mm (x50) .

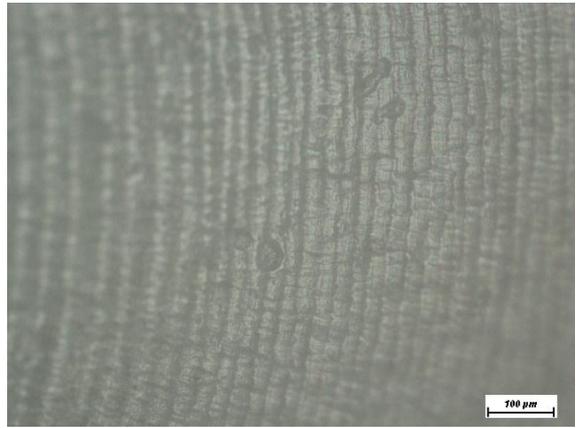


Fig III.45 : Surface de rupture PE d'épaisseur 5mm avec des impuretés et des instruisis (x100)

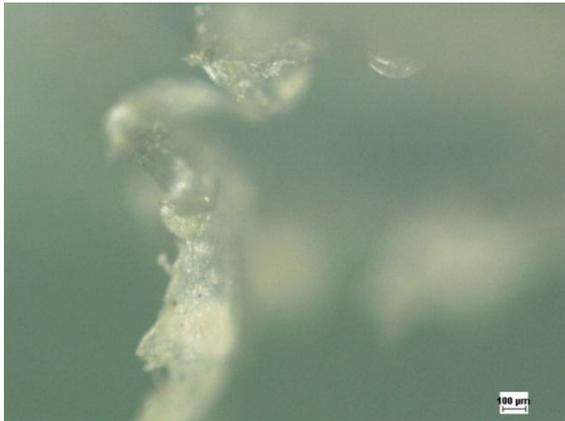


Fig III.46 : Surface du point de rupture PE d'épaisseur 6mm (x50)

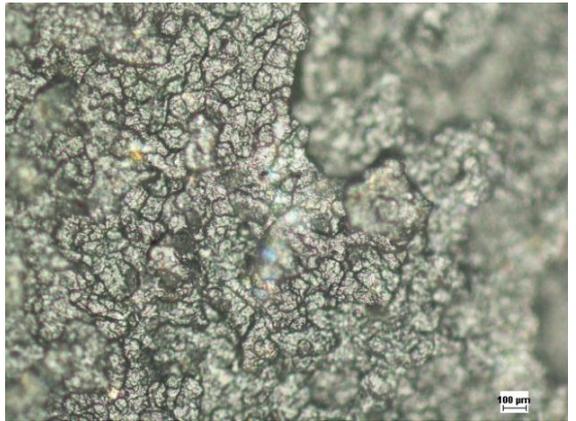


Fig III.47 : Surface de PP d'épaisseur 4mm (x100)

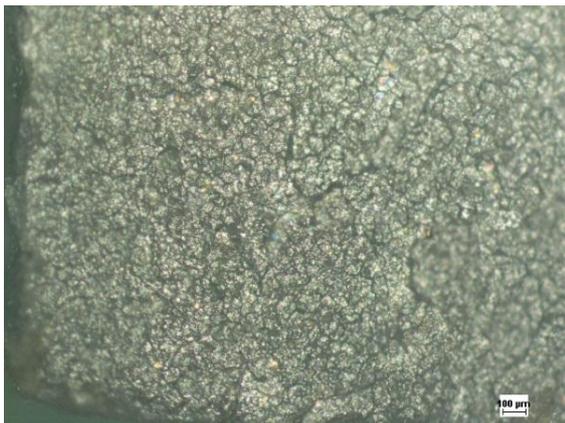


Fig III.48 : Surface de PP d'épaisseur 4mm (x100)

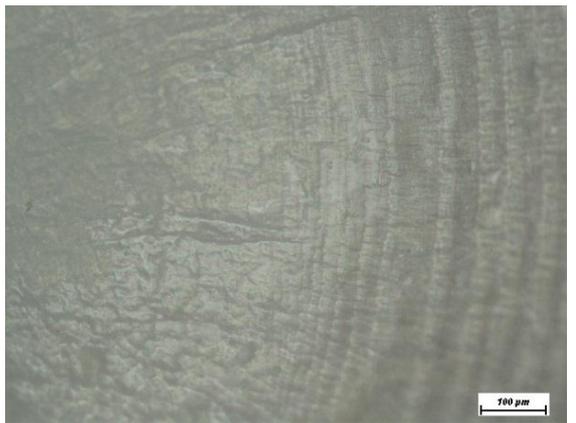


Fig III.49 : Les instruisis dans le PE d'épaisseur 5mm après l'essai (x100). .



Fig III.50 : les impuretés sur la surface de PP d'épaisseur 4mm (x100)

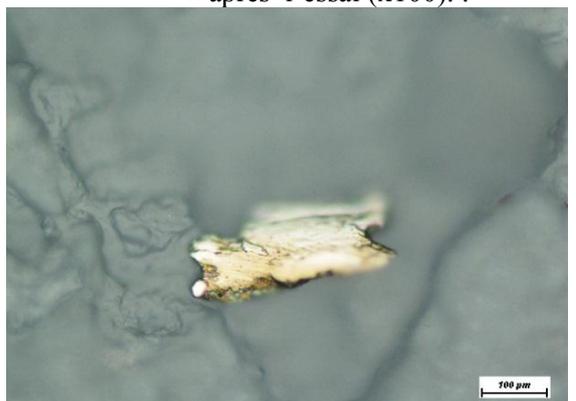


Fig III.51 : les impuretés sur la surface de PE

D'après l'analyse microscopique on peut dire que les impuretés qui existent dans le matériau influencent sur les résultats des essais, en créant de microfissures. Ce dernier se propage et s'amorce plus pendant l'essai, ce qui fait une rupture rapide de l'éprouvette.

c) Cas de l'essai de dureté :

Les essais de dureté de Rockwell (HRB), ont été réalisés sur une machine de Zwick, Duromètre universel de 100 kgf avec bille de 2,5 mm de diamètre, comme indiquée sur la figure III.52 suivante.

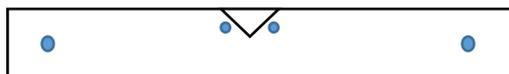


Fig III.52: Machine de dureté Rockwell Zwick 5113

Des jauges de déformation collées sur les différents marteaux permettent de mesurer l'effort au niveau des percuteurs. La flèche de l'échantillon est mesurée pendant l'essai à l'aide d'un capteur laser.

Résultats obtenues :

On détermine la dureté de Rockwell B avant et après les essais dans la zone de rupture et approche de la zone de l'entaille pour l'essai de choc.



Pour chaque matériau on réalise 3 éprouvettes avant et après l'essai (à gauche et à droite de l'éprouvette).

a. PE : Essai de choc (épaisseur de l'éprouvette 4mm)

Nr d'éprouvette	Avant l'essai		Après l'essai	
		Approche de l'entaille	Gauche	Droite
1	66,8 HRB	19,0 HRB	7,4 HRB	6,1 HRB
2	73,3 HRB	18,4 HRB	1,2 HRB	8,5 HRB
3	71,6 HRB	16,8 HRB	2,9 HRB	3,0 HRB

Tableau III.8 : La dureté de l'essai de choc pour PE d'épaisseur 4mm

b. PE : Essai de traction (épaisseur de l'éprouvette 4mm)

Nr d'éprouvette	Avant l'essai				Après l'essai	
	1	2	3	4	Gauche	Droite
1	47,2 HRB	5,4 HRB	9,6 HRB	56,3 HRB	4,1 HRB	3,1 HRB
2	49,9 HRB	6,7 HRB	10,4 HRB	58,2 HRB	6,1 HRB	0,1 HRB
3	74,1 HRB	2,3 HRB	8,1 HRB	80,6 HRB	0,2 HRB	3,6 HRB

Tableau III.9: La dureté de l'essai de traction pour PE d'épaisseur 4mm

c. PE : Essai de traction (épaisseur de l'éprouvette 6mm)

Nr d'éprouvette	Avant l'essai				Après l'essai	
	1	2	3	4	Gauche	Droite
1	71,1 HRB	16,6 HRB	17,2 HRB	71,3 HRB	1,5 HRB	3,1 HRB
2	73,8 HRB	15,5 HRB	13,4 HRB	51,6 HRB	6,1 HRB	0,1 HRB
3	69,4 HRB	14,9 HRB	9,1 HRB	67,5 HRB	0,2 HRB	3,6 HRB

Tableau III.10: La dureté de l'essai de traction pour PE d'épaisseur 6mm

d. PE : Essai de traction (épaisseur de l'éprouvette 5mm)

Nr d'éprouvette	Avant l'essai				Après l'essai	
	1	2	3	4	Gauche	Droite
1	57,2 HRB	40,4 HRB	48 HRB	56,1 HRB	26,9 HRB	20,1 HRB
2	60,2 HRB	44,1 HRB	46,3 HRB	60,2 HRB	22,6 HRB	33,1 HRB
3	69,6 HRB	14,7 HRB	44,1 HRB	69,1 HRB	28,6 HRB	41,0 HRB

Tableau III.11: La dureté de l'essai de traction pour PE d'épaisseur 5mm

e. PP : Essai de traction (épaisseur de l'éprouvette 4mm)

Nr d'éprouvette	Avant l'essai				Après l'essai	
	1	2	3	4	Gauche	Droite
1	76,7 HRB	54,1 HRB	52,7 HRB	90,5 HRB	40,9 HRB	47,9 HRB
2	89,7 HRB	72,6 HRB	54,6 HRB	65,1 HRB	47,1 HRB	49,8 HRB
3	77,7 HRB	69,1 HRB	48,8 HRB	55,0 HRB	54,2 HRB	44,0 HRB

Tableau III.12: La dureté de l'essai de traction pour PP d'épaisseur 4mm

On peut dire d'après cette résultats que la dureté du PE et PP est augmenté quand on a plus loin de la zone de rupture ou bien quand on a une surface homogène, par contre à partir de la zone d'entaille ou de rupture, la dureté diminuer jusqu'à 0.2 HRB. Cela veut dire que l'hétérogénéité de la surface influe sur la dureté du matériau.

Parmi ces résultats on constate que la dureté du PP est plus que la dureté du PE donc on peut conclure que le PP est plus dur et rigide que le PE.

➤ Application au modèle numérique :

La simulation numérique a fait des progrès considérables durant les vingt dernières années, suite à une grande croissance des capacités des moyens de calcul et stockage de données associées aux interfaces graphiques à la disposition de l'utilisateur de CAO. Grâce à des algorithmes de plus en plus robustes, la méthode des éléments finis peut traiter des problèmes non linéaires issus du comportement du matériau. Ce logiciel est très important dans le champ des simulations pour obtenir des résultats sur les diverses variables, et pouvoir comprendre le comportement des matériaux.

Des modèles numériques de simulation été réalisés avec le logiciel d'éléments finis ABAQUS. Il y a plusieurs paramètres importants à prendre en compte pour la modélisation. Pour avoir un résultat plus précis nous avons affiné notre modèle en respect la dimension des éprouvettes comme montre la figure 53.

Notre simulation s'appuiera sur la simulation des éprouvettes en traction puis comparer le avec l'expérimentale. Les calculs ont été réalisés avec ABAQUS V6.7 student edition. Ce logiciel ne travaillant pas avec des unités, nous devons les choisir en données d'entrées afin qu'elles soient homogène. Choix des unités pour notre simulation:

distance : mm

temps : ms

masse : g

masse volumique : $g \cdot mm^{-3}$

force : $g \cdot mm \cdot ms^{-2} = N$

contrainte/pression : $g \cdot mm \cdot ms^{-2} \cdot mm^{-2} = N \cdot mm^{-2} = MPa$

Les résultats de simulation seront donc donnés avec ces unités.

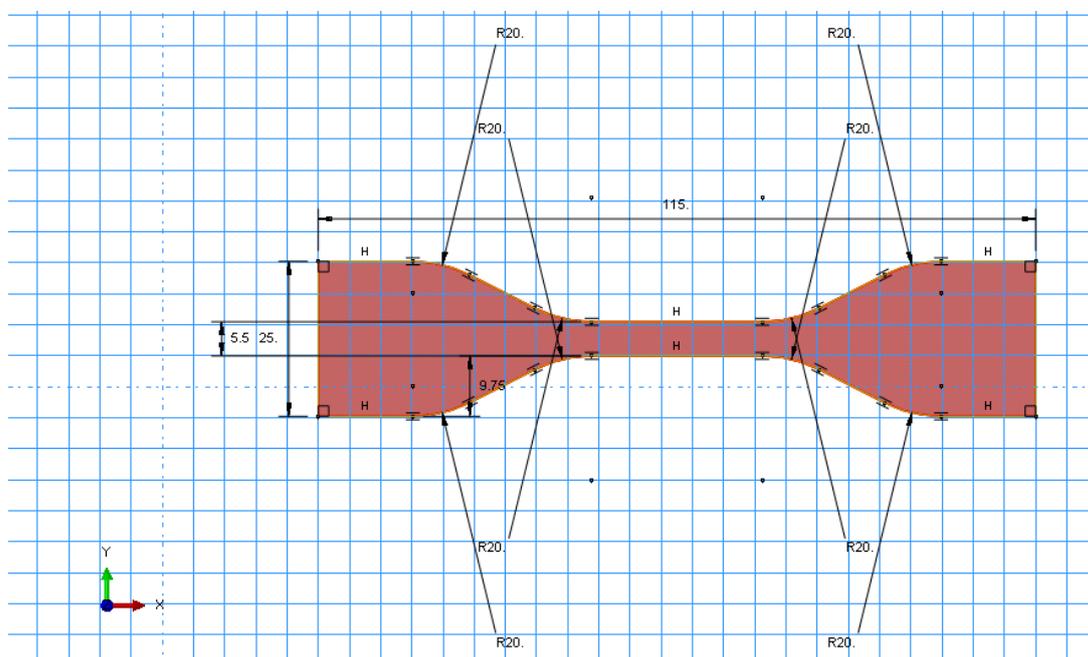


Fig III.53 : Géométrie de l'éprouvette sur la simulation

1. Le PE (épaisseur 4mm) :

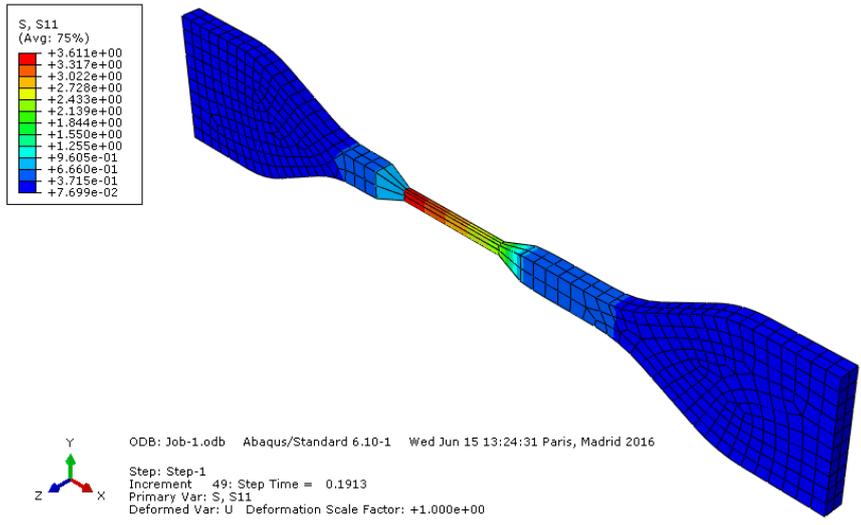


Fig III.54 : Contrainte d'éprouvette de PE par simulation d'Abaqus

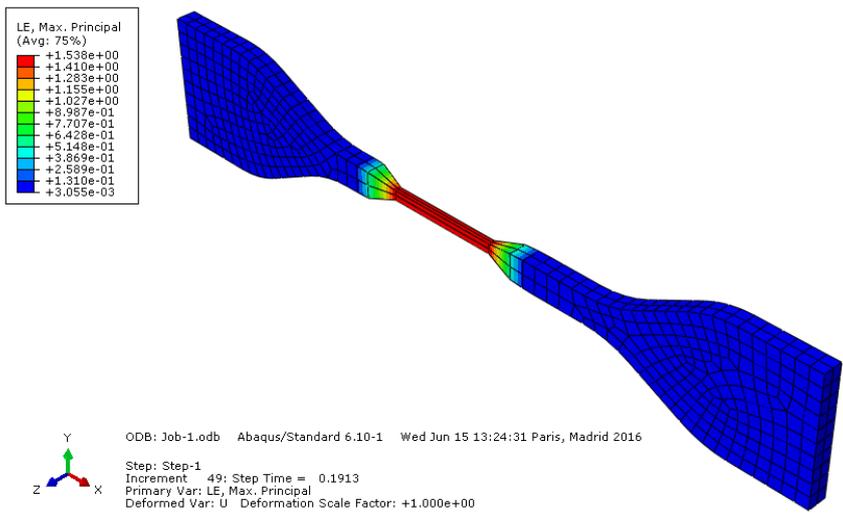


Fig III. 55 : Déformation d'éprouvette de PE par simulation d'Abaqus

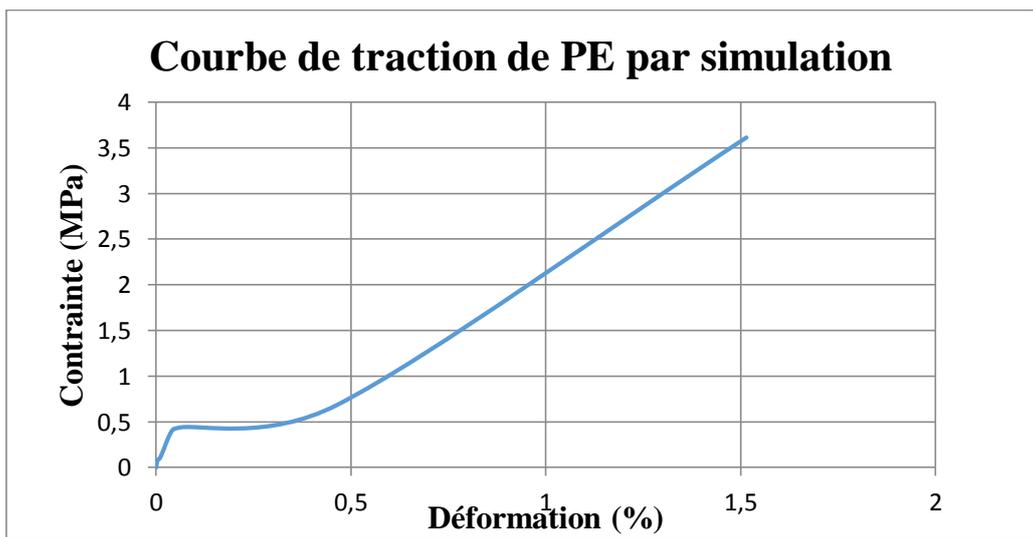


Fig III.56 : Courbe contrainte-déformation de l'éprouvette de PE par simulation d'Abaqus

2. Le PP (épaisseur 4mm) :

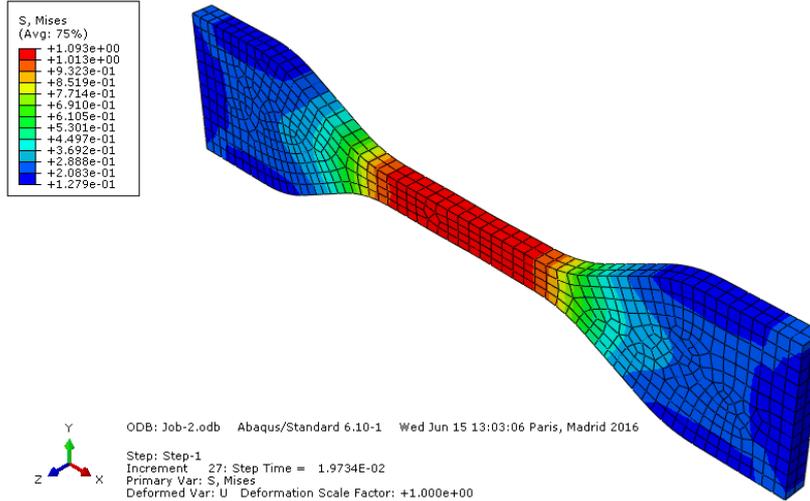


Fig III.57: Contrainte d'éprouvette de PP par simulation d'Abaqus

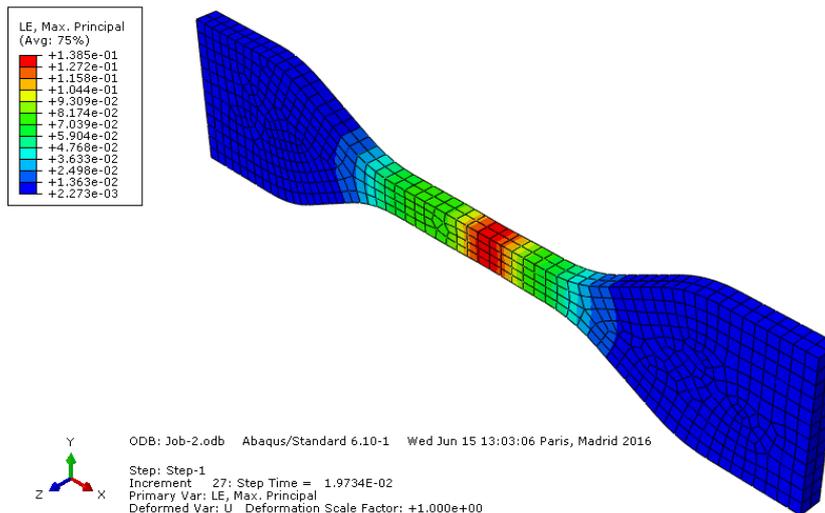


Fig III.58 : Contrainte d'éprouvette de PP par simulation d'Abaqus

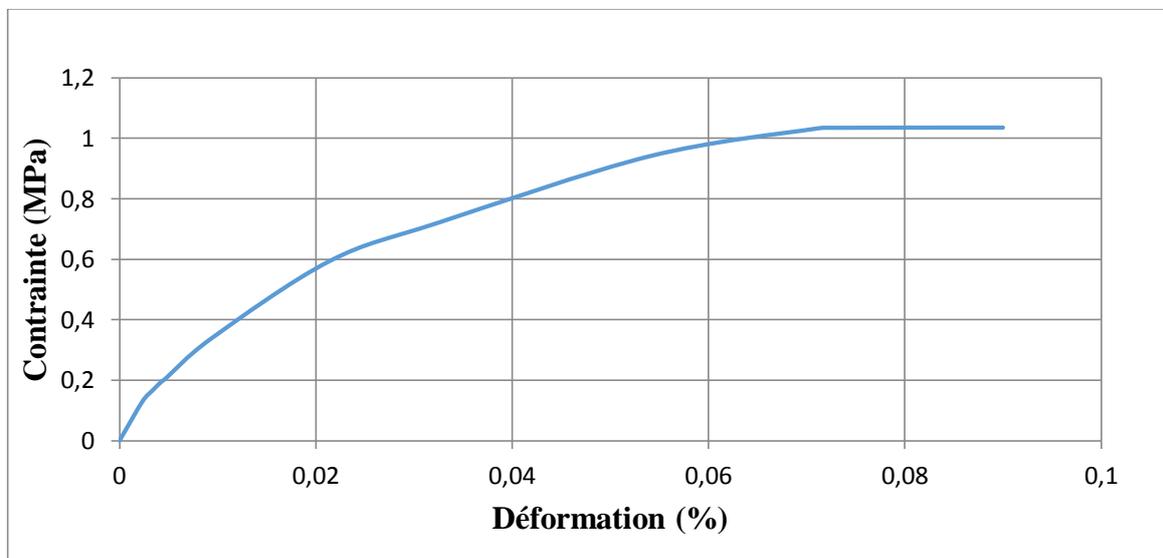


Fig III.59 : Contrainte d'éprouvette de PE par simulation d'Abaqus

Comparaison entre les résultats de l'expérimentale et numérique :

- **Le PE :**

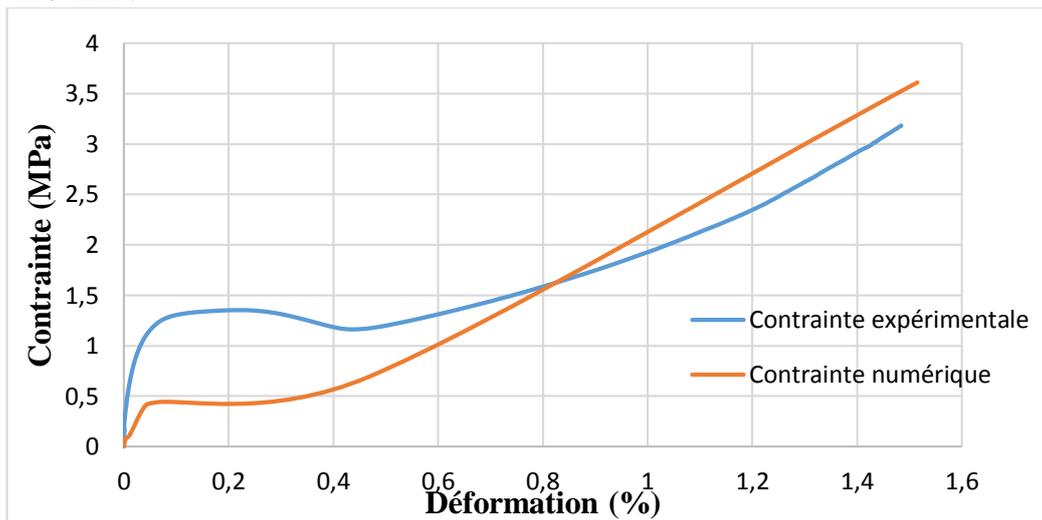


Fig III.60 : Courbe contrainte-déformation d'éprouvette de PE numérique et expérimentale

- **Le PP :**

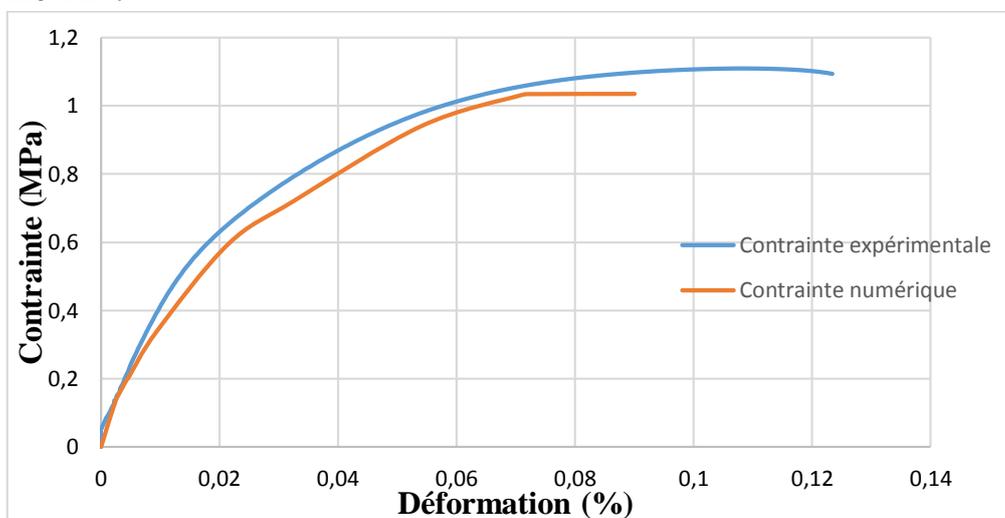


Fig III.61 : Courbe contrainte-déformation d'éprouvette de PP numérique et expérimentale

Interprétation :

Dans un essai de traction, un fois arrivé à une valeur spécifique, les déformations s'accumulent généralement dans la partie centrale de l'éprouvette, en provoquant une grande diminution de la section. Cela s'appelle striction. A partir de ce moment, l'accumulation sera plus grande chaque fois jusqu'à la rupture complète de l'éprouvette.

Les résultats des simulations montrent, comme dans l'expérience, une augmentation de la déformation limite. Pour bien comparer les résultats il faut regarder les déformations, contraintes dans l'éprouvette

Ces résultats sont proches aux résultats précédents, Cela peut expliquer qu'ABAQUS fait les déformations de chaque élément, les résultats sont concernées à la partie de l'éprouvette la plus déformée (le centre). On observant les courbes, et on sait que la striction apparaît pour des déformations de 1,53 %, on peut voir que la courbe rouge (numériques) est toujours au-dessous de la bleue (expérimentale), sauf dans le PE on trouve que la courbe rouge est augmenté sur le bleue après une déformation de 0,8%, Il faut tenir compte qu'après la striction les résultats ne sont pas fiables.

Conclusion générale

Les études des comportements mécaniques des deux matériaux PP et PE, nous permis de conclure :

- Les courbes de traction (contrainte-déformation) ont mis le matériau de plus forte rigidité pour lequel peut supporter une contrainte maximale. Donc de préférer que le matériau efficace de ces deux pour l'utilisation des orthèses qui est le polypropylène (PP) parce qu'il est à travers a propriétés il est le plus rigide et facile de mouler.
- La courbe de l'énergie d'essai de choc est pour déterminer les énergies absorbées par voie conséquence .Les résiliences des éprouvettes confectionnées à partir de PE d'épaisseur 4mm et comparé le par le PP de même dimension. On trouve que l'énergie absorbée par les éprouvettes des PP est plus grande que celle de PE et aussi pour la résilience qui est aussi plus grand que celle de PE.
- L'analyse microscopique dont le but est de déterminer l'influence des craquelures et des impuretés sur les caractérisations mécaniques des matériaux, pour ca on trouve que les résultats de l'épaisseur 4mm sont efficace, par contre les résultats due à des impuretés telque les PE d'épaisseur 5 et 6mm ne sont pas fiables.

L'étude comparative des matériaux PP et PE grâce à des essais de traction , de résilience et de dureté avec l'aide de la simulation numérique ainsi que la microscopie optique nous a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

Le PP présente une meilleure résistance à la traction et dureté que le PE.

Le PE présente une plus grande résistance à la traction et une grande dureté en fonction de l'épaisseur.

La microscopie optique nous a permis de trouver des impuretés au sein du matériau qui peut se manifester par une fragilisation.

Bibliographiques :

1. **P. WEISS** : Société Francophone de Biomatériaux Dentaires: la chimie des polymères 2009-2010, p 3.
2. **LABED Abdellatif** : Caractérisation Morphologique et Mécanique du Polyéthylène Semi Cristallin Extrudé, Présenté en vue de l'obtention du diplôme de magister université Badji Mokhtar Annaba, p 37
3. **Commission européenne**: Document de référence sur les meilleures techniques disponibles, Fabrication des polymères Août 2007, p (33-34) et (62-65)
4. **SADOUN SOFIANE** : contribution à l'étude expérimentale d'un polyéthylène à haute densité –effet de la température et la vitesse de déformation université Badji Mokhtar Annaba.
5. **Materials for automobiles** : Lec 17 Plastics Adhesives Material Costs, p 2,3
6. **Carlota Pons** : Durabilité des géomembranes en polyéthylène haute densité utilisée dans les installations de stockage de déchets non dangereux, thèse présentée pour obtenir le grade de Docteur de l'Université Paris-Est Spécialité : Structures et Matériaux, p 78
7. **Landscapeforms™** : Polyéthylène fiche technique, Février 2010, p 1
8. **Michel Fontanille Yves Gnanou** : chimie et physico-chimie des polymères, Dunod, Paris, p19
9. **INEOS OLIFINS & POLYMERS USA**: Polypropylène Processing Guide, p3
10. **FADEL Ahlem** : Influence des diverses modifications du Genêt d'Espagne sur les propriétés mécaniques, rhéologiques et thermiques de composites à matrice thermoplastique, Université Sétif-1- Faculté de Technologie Département de Génie des Procédés, p 61-62.
11. **Julien BIEBER** et **Fabien KAUFFMANN** : Elèves-ingénieurs InSic (1A 2008-09), essai de traction, p 1
12. **Cours d'essai de traction** : NF EN ISO 527.
13. **C. Fond** : Cours des polymères.
14. **Alimi Latifa** : Comportement mécanique et rupture du HDPE sous environnements contrôlés, Mémoire de magister.
15. **Rabia Khelif** : Thèse pour obtenir le grade de docteur d'université, université Balaise Pascal-Clermont II
16. **Rocdacier** : Essai de traction, et essai de résilience cours technologie, en complément au cours de Christophe Sam.
17. **Noëlle BILLON** : Comportement mécanique des polymères, Mines de paris-centre de mise en forme des matériaux - UMR CNRS 7635
18. **G. Moulin** : MQ17 Comportement des matériaux en traction
19. **B. Tanguy, J. Besson, A. Pineau** : Modélisation de l'essai Charpy : application à la transition ductile–fragile d'un acier bainitique 16MND5, Centre des Matériaux, École des Mines de Paris, UMR CNRS 7633, BP 87 Evry cedex 91003
20. **Marc Blétry** : Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux
21. **D. KOLB** : Licence Pro Métrologie/Qualité, Initiation au contrôle des matériaux - Chapitre 1
22. **Houria LADJABI** : MEMOIRE Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister : Etude Expérimentale du Comportement Mécanique des Polymères, Université Badji Mokhtar-Annaba
23. **Roland FORTUNIER** : Ecole Nationale Supérieure des Mines, Comportement mécanique des matériaux

- 24. Dr A. Foisneau-Lottin, Dr D. Pétry, Pr J. Paysant, C. Gable, Dr C. Gavillot, Dr J.M. Galas :** Les orthèses du membre supérieur et de la main, Cours Des-DIU MPR
- 25. Tilo Schimanski:** High-performance polypropylene structures for eco-friendly, fully recyclable composites.
- 26. Jean-Marc HAUDIN CEMEF :** Cours Matériaux 2005 ; Solidification mise en forme des polyéthylènes
- 27. Philippe Cassagnau :** Mise en Forme des Matériaux Polymères, Polymer Processing