

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار عنابه

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

INTITULE

***COMPORTEMENT MECANIQUE EN TRACTION MONOTONE
D'UN POLYMERE ASSOCIE A LA POUDRE DE FER PUR***

(PEHD5502 CHARGE EN FER PUR)

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE MECANIQUE

SPECIALITE : CONSTRUCTION MECANIQUE

PRESENTE PAR : *Mr CHAOU Yazid*

DIRECTEUR DU MEMOIRE : Dr CHEMAMI A/N.

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : Pr BEY K. UNIVERSITE D'ANNABA

Encadreur : Dr CHEMAMI A/N. UNIVERSITE D'ANNABA

Co-cadreur : Mr BOUKHEZAR S. URMA ANNABA

Membres :

Dr BENAMIRA M. UNIVERSITE D'ANNABA

Dr BOUARICHA A. UNIVERSITE D'ANNABA

Pr HAIAHEM A. UNIVERSITE D'ANNABA

Année : 2018/2019

Dédicace

Je dédie ce travail :

A mes défunts parents,

Ma mère et mon père.

A ma femme.

A mes chers enfants.

A toute ma famille.

A tous ceux qui me sont cher.

Remerciements

Je remercie tout d'abord Dieu tout puissant pour tous ces biens, de m'avoir donné la force et la confiance pour surmonter toutes les difficultés

*Je remercie en premier lieu, mon encadreur Monsieur A/N. **CHEMAMI** docteur au département de mécanique, pour avoir accepté de diriger ce travail, pour ses encouragements et ses conseils judicieux tout le long de la réalisation de ce mémoire.*

*Je tiens à adresser mes vifs remerciements et mon profond respect à Monsieur **Professeur BEY K.** pour son soutien et Messieurs le **Professeur KHADRE Y.** chef de département de génie mécanique et le docteur **DIB** Responsable de la pédagogie du département de génie mécanique, Université de **BADJI Mokhtar Annaba***

*J'exprime aussi ma gratitude à tous les membres de l'équipe, **Mr BOUKRAA M.**, **Mr BOUCHELEGHEME A/A.** et **Mr BOUKHEZAR S.** de m'avoir accepté dans leurs laboratoire, pour leurs soutiens et leurs explications.*

Je remercie profondément tous mes enseignants et mes collègues étudiants de la promotion 2018-2019.

Enfin, je remercie toute ma famille et tous ceux qui me sont cher.

TABLE DES MATIERES

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Table des matières	iii
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	x
Nomenclature	xi
Introduction générale	01

1^{ER} PARTIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I GENERALITES SUR LES POLYMERES

I-1.	Définition d'un polymère	07
I-2.	Famille des polymères.....	08
I.2.1.	Les homopolymères	08
I.2.2.	Les copolymères	08
I.3.	Classement des polymères	09
I.3.1.	Polymère naturel.....	10
I.3.2.	Les polymères thermoplastiques.....	10
I.3.3.	Les élastomères.....	12
I.3.4.	Les polymères thermodurcissables	13
I.4.	Structure d'un moléculaire	13
I.4.1.	Polymères à molécules linéaires	13
I.4.2.	Polymères à molécules ramifiées.....	14
I.4.3.	Polymères à molécules réticulées.....	14
I.5.	Propriétés des polymères	15
I.5.1.	Propriétés physique.....	15
I.5.1.1.	Influence de la température.....	16
A.	La température de transition vitreuse (T_g).....	16
B.	La température de fusion (T_f).....	16
C.	La température de décomposition (T_d).....	16
I.5.2.	Propriété mécanique.....	16
A.	Courbes contrainte-déformation (différent type de matériau).....	18
B.	Module d'élasticité et résistance en traction.....	18

I.6.	Les plastiques	19
I.6.1.	Définition.....	20
I.6.2.	Différents plastiques	21
I.6.3.	Les adjuvants	21
I.6.3.1.	Les plastifiants.....	22
I.6.3.2.	Les stabilisants.....	22
I.6.4.	Autres Adjuvants.....	23
I.6.4.1.	Les colorants pigments.....	23
I.6.4.2.	Les conductrices et antistatiques.....	23
I.6.4.3.	Les conductrices et antistatiques.....	23
I.6.4.4.	Les ignifugeants.....	24
I.6.4.5.	Les lubrifiants.....	24
I.6.4.6.	Divers adjuvants.....	24
I.7.	Les thermoplastiques.....	24
I.7.1.	Les polyéthylènes (PE)	28
I.7.2.	Les différents types de polyéthylène.....	29
I.7.2.1.	Le polyéthylène basse densité (PEBD).....	29
I.7.2.2.	Polyéthylène à haute densité (PEHD).....	29
I.7.2.3.	Polyéthylène à moyenne densité (PEMD).....	29
I.8.	Propriétés du polyéthylène	30
I.8.1.	Propriétés physiques.....	30
I.8.1.1.	Propriétés thermique.....	30
I.8.1.2.	Propriétés électriques.....	31
I.8.2.	Propriétés chimiques	31
I.8.3.	Propriétés mécaniques	31

CHAPITRE II MISE EN ŒUVRE DES POLYMERES

II-1.	Processus d'élaboration des polymères.....	36
II.1.1.	Degré de polymérisation.....	37
II.2.	Résines.....	38
II.2.1.	Les résines thermodurcissables.....	39
II.2.2.	Les résines thermoplastiques.....	39

II.3.	Transformation des polyéthylènes	40
II.3.1	Le calandrage.....	40
II.3.2.	L'extrusion (principe).....	41
II.3.3.	Le moulage	43
II.3.4.	L'enduction	45
II.3.5.	Le thermoformage	46
II.4.	Emploi des polyéthylènes	46
II.4.1.	Fin de vie des polyéthylènes.....	47
II.4.2.	Recyclage des polyéthylènes	48
II.5.	Avantages et inconvénients des polyéthylènes.....	49

**CHAPITRE III : COMPORTEMENT MECANIQUES
DES POLYETHYLENES**

III.1.	Principe de l'essai de traction.....	51
III.2.	Description de l'essai de traction	52
III.2.1.	Eprouvette.....	52
III.2.2.	Amarrage.....	52
III.3.	Endommagements	52
III.3.1.	Types d'endommagements.....	53

PARTIE EXPERIMENTALE 56

CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE 57

IV.1.	Matériaux étudiés.....	58
IV-1-1.	Caractéristiques des matériaux.....	58
	A Caractéristiques du PEHD 5502 vierge	58
	B Caractéristiques de la poudre de fer pur	58
IV.1.2.	Modes d'obtentions du matériau (PEHD 5502 vierge)	59
IV.1.3.	Modes d'obtentions du matériau (PEHD 5502/Fe15%)	61
IV.2.	Éprouvettes.....	62
IV.3.	Banc d'essai et conditions d'essais	63
IV.4	Déroulement de l'essai.....	64
V.5	Interprétation des résultats.....	65

V.5.1.	Observation des faciès et analyse endommagement.....	71
IV.5.1.1.	Introduction.....	71
IV.5.1.2.	Observation des facies.....	72
IV.5.1.3.	Conclusion.....	75
	Conclusion générale.....	78
	Référence bibliographique	81

Liste des figures

1^{er} Partie

Chapitre I : Généralité sur les polymères

Figure I.1	Evolution mondiale de la consommation des polymères.....	07
Figure I.2	Matériaux utilisés dans la réalisation des cellules des avions AIRBUS.....	07
Figure I.3	Structures de molécules à chaînes carbonées.....	14
Figure I.4	macromolécule de polyéthylène.....	15
Figure I.5	Comportement mécanique des matériaux différents.....	18
Figure I.6	production de différent matériaux, dans le monde occidental ou dans le monde entier	19
Figure I.7	Plastique matière première.....	20
Figure I.8	dérivés du polymère.....	21
Figure I.9	Schématisation du mécanisme de plastifiant à l'échelle moléculaire.....	22
Figure I.10	Variation de la rigidité avec un plastifiant.....	22
Figure I.11	Consommation mondiale, en million de tonnes (Mt), de matières plastiques en 1999, 1998, 1997. Réparation par type de polymères.	25
Figure I.12	Evolution de la production des principaux types de matières plastiques dans le monde occidental.....	26
Figure I.13	Secteur d'application et consommation des matières plastiques, en France.....	27
Figure I.14	Croissance de la consommation du thermoplastique en Europe	28
Figure I.15	Schématisation des ramifications dans les polyéthylènes.....	29
Figure I.16	Variation de cristallinité en fonction du taux de branchement cours	30
Figure I.17	Variation des propriétés mécaniques en fonction de la masse molaire d'un polyéthylène.....	32

Chapitre II : Mise en œuvre des polymères

Figure II.1	Grandes étapes de la fabrication des plastiques.....	36
Figure II.2	De la résine aux granulés.....	38
Figure II.3	Transformation irréversible de la structure d'une résine thermodurcissable par réticulation.....	39
Figure II.4	Différent technique de mise en œuvre de polyéthylène.....	40
Figure II.5	Principe de procédé de calandrage.....	40
Figure II.6	Principe de procédé d'extrusion.....	41
Figure II.7	Les différentes phases d'extrusion.....	41
Figure II.8	Principe de procédé d'extrusion-gonflage	41
Figure II.9	Obtention des bouteilles par principe de procédé d'extrusion soufflage.....	42

Figure II.10	Machine de molage par rotation de deux axes perpendéculaire.....	43
Figure II.11	Objets mis en œuvre par moulage par rotation.....	44
Figure II.12	Procédé de moulage par injection.....	44
Figure II.13	Fabrication des bouteilles par machine de moulage.....	44
Figure II.14	Moulage par compression.....	45
Figure II.15	Procédé de d'enduction de PE.....	46
Figure II.16	Objets mis en œuvre par thermoformage.....	55
Figure II.17	Destination de production de polyéthylène à haute densité PEHD (Source POLYMED).....	47
Figure II.18	Signe de propriété recyclage.....	48
Figure II.19	Sigle Ruban de Möbius pour quelques polymères.....	48

Chapitre III : Comportement mécaniques des polyéthylènes

Figure III.1	Courbe de comportement contrainte-déformation lors d'un essai de traction d'un thermoplastique semi-cristallin.....	52
Figure III.2	Déformation du polyéthylène en traction uniaxial.....	54
Figure III.3	Etapas de formations des craquelures pour un polymère semi-cristallin.....	55
Figure III.4	Microstructure d'une craquelure.....	55

Partie Expérimentale

Chapitre IV : Etude expérimentale

Figure IV.1	Machine des R X ULTIMAT IV Rigaku	58
Figure IV.2	Préparation d'échantillon en poudre de fer pur.....	59
Figure IV.3	Mode d'obtention de plaque en PEHD vierge	60
Figure IV.4	Presse hydraulique.....	60
Figure IV.5	Rouleaux mélangeurs.....	61
Figure IV.6	Presse pneumatique à découper, éprouvettes en PEHD vierge en haut et en bas PEHD/Poudre de fer pur.....	62
Figure IV.7	Géométrie de l'éprouvette selon la norme ASTM D638.....	62
Figure IV.8	Machine d'essais de traction type MTS Criterion modèle 43.504...	63
Figure IV.9	Différentes étapes de l'essai sur éprouvette en PEHD/Poudre de fer pur.....	64
Figure IV.10	Différentes étapes de l'essai sur éprouvette en PEHD vierge	65
Figure IV.11	Evolution de la contrainte en fonction des déformations PEHD 5502 vierge.....	66

Figure IV.12	Courbe moyenne de traction (contrainte- déformation PEHD 5502 vierge.....	66
Figure IV.13	Evolution de la contrainte en fonction de la déformation PEHD 5502/ Poudre de fer pur.....	68
Figure IV.14	Courbe moyenne de traction (contrainte- déformation) PEHD 5502/ Poudre fer pur.....	68
Figure IV.15	Comparaison des courbes moyennes de traction (contrainte- déformation) PEHD 5502 vierge et PEHD 5502 chargé en poudre de fer pur.....	70
Figure IV.16	Microscope optique NIKON ECLIPSE LV 100 ND.....	72
Figure IV.17	Observation du faciès de rupture des éprouvettes en PEHD 5502 / poudre de fer.....	74
Figure IV.18	Observation du faciès de rupture des éprouvettes en PEHD vierge côté frontale	74
Figure IV.19	Observation du faciès de rupture des éprouvettes vierge.....	74
Figure IV.20	Eprouvettes après essais (a : PEHD chargé, b : PEHD vierge).....	75

Liste des tableaux

1^{er} Partie

Chapitre I : Généralité sur les polymères

Tableau I.1	Les polymères thermoplastiques.....	11
Tableau I.2	Caractéristiques de quelques polymères courants.....	17
Tableau I.3	Valeurs théoriques et expérimentales du module d'élasticité (Module de Young) et de la résistance en traction de différents matériaux.....	18
Tableau I.4	Propriétés à la rupture en fonction du taux d'étirage d'un polyéthylène.	33

Chapitre II : Mise en œuvre des polymères

Tableau II.1	Production de polyéthylène à haute densité (PEHD) en 2003, de quelques pays (en milliers de tonnes)	46
--------------	---	----

Partie Expérimentale

Chapitre IV : Etude expérimentale

Tableau IV.1	Les caractéristiques du PEHD 5502 vierge.....	58
Tableau IV.2	Caractéristiques de poudre métallique (fer pur).....	59
Tableau IV.3	Conditions de travail de la presse hydraulique.....	61
Tableau IV.4	Résultats de l'exécution d'essai (éprouvettes en PEHD 5502 vierge)....	67
Tableau IV.5	Résultats de l'exécution d'essai (éprouvettes en PEHD 5502 chargé en poudre de fer pur).....	69

NOMENCLATURE

A	: Longueur totale de l'éprouvette
A %	: Allongement relatif (%)
ABS	: Copolymères à base de styrène
ASA	: Copolymères à base de styrène
B	: Largeur aux extrémités
C	: Longueur de la partie étroite parallèle
D	: Longueur de la partie étroite
E	: Petit rayon
F	: Grand rayon
G	: Distance entre les traits de repère
H	: Longueur de référence
I	: Epaisseur de l'éprouvette
CDM	: Mécanique des milieux continus
E	: module de Young (MPa)
EP	: Résine Polyépoxyde
HB	: Classement par UL96
HCL	: Acide chlorhydrique
mPE	: Film polyéthylène
Mt	: Million tonnes
NR	: Elastomère Polyisoprène
PBD	: Elastomère polybutadiène
PC	: Polycarbonate
PE	: Polyéthylène
PEBD	: Polyéthylène basse densité
PEHD	: Polyéthylène haute densité
PEMD	: Polyéthylène moyenne densité
PET	: Polyéthylène-téréphtalate
PF	: Résine phénoplastes
PMMA	: Polyméthacrylate
PP	: Polypropylène
PS	: Polystyrène
PSE	: Polystyrène expansé
PTFEE	: Polytétrafluoréthylène
PVC	: Polychlorure de vinyle
SAN	: Copolymères à base de styrène
SI	: Silicone
SiO ₂	: Verre
Tc	: Température de cristallisation [C°]
Td	: Température de décomposition

T_m	: Température de fusion [C°]
T_g	: Température de transition vitreuse [C°]
UP	: Résine polyester
U.V.	: Rayon ultraviolet
ε	: Déformation sous contrainte
ξ	: Caractérise des propriétés du diélectrique
ΔL	: Allongement (mm)
σ	: contrainte normale

Introduction générale

Introduction général

Beaucoup de recommandation et des exigences ne sont pas satisfait par les matériaux classiques (les métaux : fer, cuivre et aluminium ...). À cet effet les polymères viennent en aide pour déboucher sur un nouveau monde grâce aux efforts des chercheurs et scientifiques qui ont pu dévoiler énormément des questions et de résoudre plusieurs problèmes rencontrés dans l'industrie (automobile, navale, aéronautique...), les secteurs de santé, électroniques, agricole, textile et d'autres. Le développement et l'amélioration continue des polymères synthétiques ont rendu de plus en plus la vie plus commode grâce à leurs propriétés chimique (résistance au milieu acide, résistance à la corrosion...), physique (légèreté, transformation sous l'effet de la température), mécanique (faculté de la mise en œuvre des pièces de formes complexes par différents procédés, bonne résistance au choc et au frottement...). Depuis l'apparition des polymères synthétiques, une grande variété des matériaux composites et des plastiques a marqué un développement et une croissance économique vertigineuse ainsi la substitution des métaux classiques. Ces derniers ont connu un recul en consommation dans des différents domaines et plusieurs secteurs.

Ce travail intitulé « étude du comportement mécanique d'un polymère (polyéthylène à haute densité chargé par la poudre de fer pur (PEHD5502/15 % de Fe), le travail est fondé sur deux parties essentielles et une référence bibliographique.

➤ La première c'est une étude bibliographique structuré en trois chapitres :

✚ Le premier chapitre traite les généralités sur les polymères, leurs découvertes et leurs importances pour le développement industriel et économique par rapport aux autres matériaux métallique et la connaissance sur leurs structures et leur propriété physique et chimique, ainsi que l'évolution des plastiques et leur l'impact sur le développement économique, étude structurale, propriétés chimiques, physiques et mécaniques des polyéthylènes et leurs diversités.

✚ Le second chapitre décrit l'obtention, quelques procédés et la mise en œuvre des plastiques.

➤ Le troisième chapitre définit le comportement mécanique de différents types de polyéthylènes et leurs mécanismes d'endommagement.

➤ La deuxième partie est consacrée à une étude expérimentale d'un polyéthylène (PEHD 5502) associé à une poudre de fer pur qui a été mis en œuvre au laboratoire de POLYMED SKIKDA.

L'étude du comportement mécanique en traction statique monotone, ainsi que la mise en évidence du mécanisme d'endommagement qui en découle.

1^{er} Partie

Etude bibliographique

Chapitre I :
Généralité sur les polymères

CHAPITRE I : Généralité sur les polymères

Depuis longtemps, là où l'homme utilise les métaux, les polymères existent dans la nature. Presque tous les systèmes biologiques sont constitués de polymères qui assurent :

- Des fonctions mécaniques, comme le bois, le cuir, les os, le cartilage...
- La régulation des fonctions chimiques, dans les feuilles, les veines, l'ADN, les cellules vivantes ...

Le développement industriel des polymères appelés généralement matières plastiques, s'appuie à l'heure actuelle sur des bases de physique et de chimie formant la « science des polymères » [1].

➤ **La « science des polymères »**

Les polymères forment un groupe de matériaux, constitués de longues molécules appelées macromolécules dont les noms usuels sont les matières plastiques, les caoutchoucs...

Le concept de macromolécule a été formulé au début du vingtième siècle par le chimiste pionnier allemand, Staudinger. Il étudia, dès 1920, la structure et les propriétés de ses molécules géantes et inhabituelles à cette époque. Ses travaux, constituant la base de la science des polymères.

Cependant le concept de macromolécule fut vérifié par les études (cristallographie par rayon X). La synthèse totale de macromolécules par réaction chimique de polycondensation fut d'une fécondité importante, car elle a ouvert la voie à la synthèse d'autres types de macromolécules.

Par la suite les principes fondamentaux sur les polymères furent énoncés un énorme travail a permis d'associer les connaissances expérimentales et théoriques de la science des polymères qui est arrivé à maturité, à cette époque

Le quart de dernier siècle a été marqué par l'exploitation des connaissances de la science des polymères, grâce à l'apparition de concepts physiques ou mathématiques novateurs et des nouvelles méthodes de caractérisation (diffusion des neutrons et des rayons X, microscope électronique, spectroscopie, simulation et modélisation numérique...).

➤ **L'industrie des polymères**

Bien que l'industrie des polymères soit actuellement bien développée, son essor a souffert pendant longtemps du manque de connaissance de leur structure.

Elle a démarré au XIX^e siècle :

Vers 1839, par la découverte de l'Américain Charles Goodyear et de l'Anglais Thomas Hancock, à propos du changement des propriétés élastiques du caoutchouc naturel, en le chauffant dans du soufre. Le procédé industriel de vulcanisation par le soufre était né. Ce traitement actuellement utilisé, permet de produire un caoutchouc dur et résistant.

Vers 1850, par la production industrielle de caoutchouc naturel vulcanisé. Celle-ci bénéficia dès le début d'une croissance importante, pour atteindre une production notable de 10 000 tonnes par an, à la fin du XIX^e siècle.

Plusieurs autres étapes ont marqué la progression de cette industrie dont le plein essor se situe au milieu du XIX^e siècle :

En 1870, la fabrication et la commercialisation de la matière plastique qui dura près de quarante ans. Ce produit fut un substitut de l'ivoire naturel (boule de billard), de la corne et de l'écaille.

En 1892, débute la fabrication de fibres de viscosse pour le textile artificiel et la production de films de cellophane, à partir de la cellulose (polymère naturel).

En 1910, la production de la bakélite devient possible. C'est le premier polymère thermodurcissable complètement synthétique à être commercialiser. En effet avant cette date, les matières plastiques étaient obtenues à partir de polymères naturels. Ce nouveau produit encouragea le développement d'autres résines synthétique.

Entre 1920 et 1940, alors que la science des polymères fait d'énormes progrès, les matières thermoplastiques commencent à être produites en grande quantité. De plus pendant ces années, les résines thermodurcissables prennent un essor important, notamment dans le domaine des articles ménagers.

➤ **Evolution mondiale de la consommation des polymères**

Actuellement, en volume physique, la production annuelle mondiale des polymères a dépassé celle des métaux. Elle était d'environ 130 millions de tonnes à la fin du XX^e siècle.

Après une forte croissance ces 40 dernières années réparti sur les pays (Amérique du Nord, Europe, Asie), la production mondiale a tendance à se ralentir maintenant, tout en restant a un niveau élevé (figure 1.1). Cependant, de nouveaux développements sont attendus. La figure 1.2 par exemple, montre que le secteur de l'aéronautique utilise de plus en plus de matériaux composites, constitués de polymères associés à des renforts.

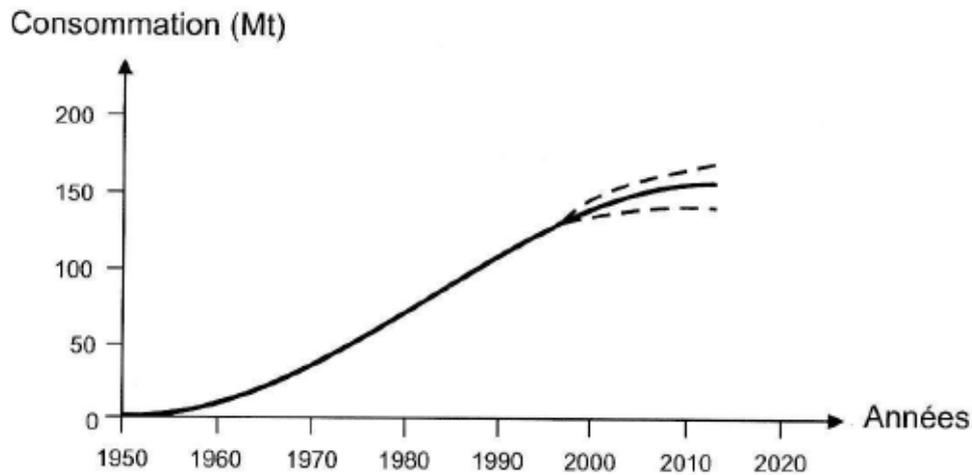


Figure I-1 : Evolution mondiale de la consommation des polymères [1].

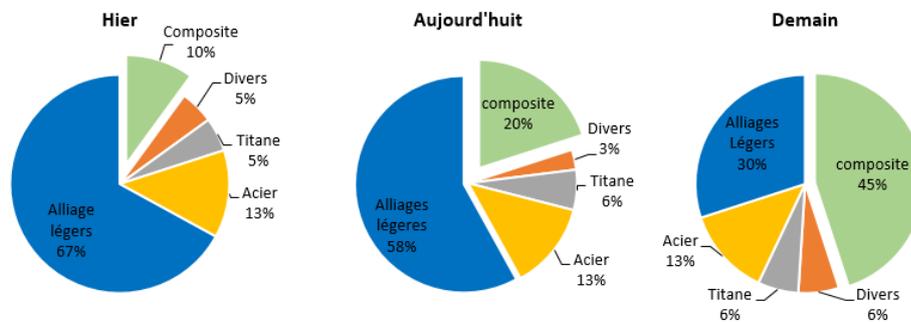


Figure 1.2 : Matériaux utilisés dans la réalisation des cellules des avions AIRBUS [1].

I.1. Définition d'un polymère

Un polymère est une substance composée de longues chaînes moléculaires appelées macromolécules.

Une macromolécule résulte de l'enchaînement par liaison covalente, d'unités constitutives (ou groupes d'atomes) appelées « mère » (provenant du grec « *meros* » qui signifie « partie »). Par exemple dans la macromolécule suivante :



L'unité constitutive est A ; elle est formée d'un groupe d'atomes qui se répète.

A l'échelle d'une certaine de nanomètres (10^9 mm) la plupart des macromolécules se présentent sous forme de fils longs et souples. Ces longues molécules souples confèrent aux polymères leur atout principal qui réside dans la facilité de mise en œuvre et leur grande déformabilité. Les réactions chimiques qui permettent de passer d'un constituant chimique appelé monomère A à la macromolécule $[-A-]_n$ du polymère, s'appellent polymérisation [1].

I.2. Familles de polymère

La polymérisation résulte de l'enchaînement de groupes d'atomes « unités constitutives » qui peuvent se lier entre eux. On distingue deux grandes familles d'association de ces groupes d'atomes

- Homopolymères.
- Les copolymères.

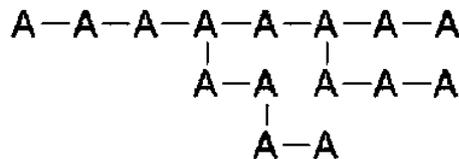
I.2.1. Les homopolymères

Ce sont des polymères dont la structure est formée par la répétition d'une seule « unité constitutive ». Ils sont obtenus par polymérisation d'une espèce monomère. Par exemple, un monomère **A** peut par polymérisation former la macromolécule composée de n unités constitutives $[-A-]$ liées entre elles par les liaisons covalentes.

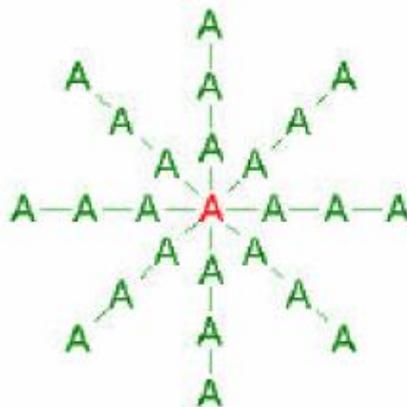
- Homopolymères linéaires



- Homopolymères branchés



- Homopolymères étoilés



I.2.2. Les copolymères

Ces matériaux sont obtenus par polymérisation :

- De deux espèces de monomères (A et B) : **bipolymères**.
- De trois espèces de monomères (A, B et C) : **tripolymères**.
- Ou plus.

On distingue les sous-familles suivantes :

- b) Suivant la diffusion industrielle : polymères de grande diffusion (PVC, PE, PS...) ; POLYMERES techniques (PMMA, PC...); polymères à haute performance (Kevlar...).
- c) Suivant l'usage : polymères comme matériaux de structure (aspect mécanique) ; polymère comme matériaux fonctionnels (fonctions électrique ou optique ...).
- d) Suivant les propriétés d'utilisation, dans ce dernier type de classement, il existe alors quatre grandes familles usuelles de polymères :
 - Les polymères naturels.
 - Les polymères thermoplastiques.
 - Les élastomères.
 - Les polymères thermodurcissables.

I.3.1. Polymère naturel

Substance composé de macromolécules ayant des unités structurales répétitives, comme par exemple les Celluloses (Base de toute la vie végétale en tant que constituant principal des parois cellulaires), le Lignine (Autre grand constituant des parois de tous les végétaux) et les Protéines (Gélatine, laine, soie).

I.3.2. Les polymères thermoplastiques

Ils forment le groupe le plus important parmi les polymères de synthèse. Ils constituent la plus grande proportion du tonnage annuel fabriqué par l'industrie. Ils sont constitués de macromolécules linéaires ou ramifiées. La cohésion entre les chaînes moléculaires est assurée par des liaisons covalentes. Ils sont sensiblement à effet de la température et des solvants.

Certains de ces polymères sont semi-cristallins ; ils contiennent alors des régions cristallines ordonnées et des zones amorphes, ils sont donc biphasés. D'autres sont complètement amorphes ; dans ce cas sont monophasés.

Ils sont rigides à basse température et leur rigidité diminue par une élévation de la température. Ils acquièrent une grande plasticité à chaud et se ramollissent si la température est supérieure à la température de transition vitreuse T_g (-100 à 150°C environ). Ce processus est réversible et peut être répété plusieurs fois sans trop d'altération des propriétés du matériau. Ils sont ainsi faciles à mettre en forme par chauffage jusqu'à fusion si nécessaire, puis moulage par injection ou extrusion, suivi d'une solidification. Leur recyclage ne pose pas de problème compte tenu de la réversibilité de leur plasticité sous effet de la température. Il faut cependant remarquer que leur recyclage ne peut pas se faire de façon infinie car, lors des opérations de mise

en œuvre (injection...), la chaleur dégrade plus en les chaînes. Donc les polymères se dégradent par élévation trop de la température. Il se produit une modification irréversible, avec une destruction des liaisons chimiques fortes du squelette moléculaire ou des chaînes latérales.

Tableau I .1. Les polymères thermoplastiques

Thermoplastique	Mère ou unité constitutive	Usage
Polyéthylène (PE)	$\left(\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right)_n$ Partialement cristallisé	Tubes, films minces, bouteilles, tasses, isolation électrique, emballage.
Polypropylène (PP)	$\left(\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{CH}_3 \end{array} \right)_n$ Partialement cristallisé	Même application que le PE, mais plus léger, plus rigide, plus résistant à la lumière
Polytétrafluoréthylène (PTFE)	$\left(\begin{array}{cc} \text{F} & \text{F} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{F} & \text{F} \end{array} \right)_n$ Partialement cristallisé	Téflon. Bon polymère pour la tenue à haute température, avec un coefficient de frottement et une adhésion très faible. Poêles qui n'attachent pas, paliers, joints.
Polystyrène (PS)	$\left(\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} \right)_n$ Amorphe	Objet moulés bon marché. Incorporation de butadiène pour faire du polystyrène choc. Expansé au CO ₂ pour fabriquer les emballages courants (mousses)
Polychlorure de vinyle (PVC)	$\left(\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{Cl} \end{array} \right)_n$ Amorphe	Emploi dans le bâtiment (châssis de fenêtres...). Rendu souple pour La fabrication du simili cuir, de tuyaux, de vêtement. Film minces.

Thermoplastique	Mère ou unité constitutive	Usage
Polyméthacrylate de méthyle (PMMA)	$\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{CH}_3 \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{COOCH}_3 \end{array} \right]_n$ <p>Amorphe</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Perspex, lucite, plexiglass, altoglass, - Feuilles transparentes, moulage. - hublots d'avion, pare-brise feuilletés.
Nylon (polyamide 6)	$(-\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NO}-)$ <p>Partiellement cristallisé à l'état étiré</p>	Textiles, cordages, moulages.
Polycarbonate (PC)	$\left[\begin{array}{c} \text{O}-\text{C}(=\text{O})-\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}(\text{CH}_3)_2-\text{C}_6\text{H}_4 \\ \\ \text{O} \end{array} \right]_n$ <p>Amorphe</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Stable en température et bonne rigidité. Isolant électrique. Transparent. - Electromécanique : prise, relais. - Optique : appareils photos, CD. - Matériel de protection : casque, pare-brise de motos. - Eclairage : feux automobiles, luminaires. - Médical : biberons, seringues. - Electroménager : vaisselle, sèche-cheveux, rasoirs, mixeurs...

I.3.3. Les élastomères

Ce sont des matériaux amorphes. Ils sont constitués de macromolécules linéaires avec quelques pontages entre des chaînes ; ces liaisons étant assurées par des atomes (S, C ou O) la réaction chimique conduisant à ces liaisons covalentes entre chaînes s'appelle la vulcanisation.

Ces polymères ont une structure tridimensionnelle très souple déformable, le nombre de pontage ou le taux de réticulation est faible. Dans l'automobile, les pneumatiques sont des élastomères, le nombre de pontage est d'environ cent « unités constitutives ».

Utilisés au-delà de leur température de transition vitreuse, les caoutchoucs ont une grande capacité de déformation réversible qui peut dépasser 1000 % (soit dix fois leur longueur), le solide peut ainsi retrouver sa forme initiale lorsque la contrainte est supprimée.

Lorsque l'on fait diminuer la température d'un élastomère, il quitte l'état caoutchouteux pour devenir vitreux, au passage de la température de transition vitreuse T_g . A l'état vitreux, il perd son aptitude aux grandes déformations ; il devient dur et cassable à très basse température.

Soit par exemple les élastomères types caoutchoucs : le Polyisoprène (NR) pour le caoutchouc naturel, le Polybutadiène (PBD) pour caoutchouc artificiel et pneumatique ainsi que le Polychloroprène (Néoprène. Caoutchouc résistant au pétrole) utilisé des joints d'étanchéités.

I.3.4. Les polymères thermodurcissables

Ils sont amorphes et sont formés par un réseau tridimensionnel de macromolécules. Le taux de réticulation est de 10 à 100 fois élevé que dans les élastomères. Ils sont rigides, compte tenu de leur taux de réticulation élevé.

La mise en œuvre de ces polymères est souvent lente à cause du temps que met la réaction chimique de polymérisation servant à les fabriquer ; leur mise en forme se fait une fois pour toutes à la fabrication, lors de la réaction chimique entre les molécules d'un **durcisseur** et celles d'une **résine**. Soit par exemple les résines : Polyépoxyde (EP), Polyester (UP) pour les fibres de verre et Phénol-formaldéhyde (PF) (phénoplastes) pour Bakélite et formica Cassable.

A chaud, ils se dégradent par rupture des chaînes moléculaires puisqu'ils ne sont pas susceptibles de fondre ; ils sont difficilement recyclables.

I.4. Structure d'une macromolécule

I.4.1. Polymères à molécules linéaires

En générale, ils sont formés de molécules dites linéaires dont le squelette principal de la chaîne est constitué par des atomes de carbone ou par d'autres groupes d'atomes (groupement phényle) comme le montre le tableau I.2 et la figure I.3 ; ce squelette comporte donc deux extrémités. Sur les atomes de carbone, formant le squelette de la chaîne, sont greffés soit des atomes comme le chlore, le fluor ... ou des groupements d'atomes (groupement phényle) comme par le polystyrène.

Les molécules linéaires peuvent être flexibles et souples. On considère qu'une macromolécule est formée de segments (segment élémentaire ou maillon) ou portions de molécule. Dans le cas d'une chaîne carbonée souple comme le polyéthylène (PE), chaque extrémité d'un segment élémentaire correspond à un atome de carbone et la longueur de ce segment est la distance interatomique C-C ($\approx 0,1$ nm) entre deux carbones voisins. Par contre, dans le cas d'un squelette peu flexible comportant des éléments rigides, le segment élémentaire constitue une « liaison rigide naturelle » du squelette, de longueur supérieure à la simple liaison C-C (exemple du polystyrène PS). Généralement, les molécules linéaires (ou ramifiées) ne forment pas de réseau tridimensionnel stable. Elles constituent principalement les polymères thermoplastiques.

I.4.2. Polymères à molécules ramifiées

Le squelette d'une molécule linéaire peut comporter des branches latérales (figure I.3), c'est-à-dire d'autres petites molécules identiques branchées latéralement sur le squelette de la chaîne principale. Ce sont les ramifications. Celles-ci sont caractérisées par leur nombre et leur taille.

I.4.3. Polymères à molécules réticulées

C'est un réseau tridimensionnel macromolécules, ces dernières sont reliées chimiquement entre elles (**figure I.3**). La jonction ou « pontage » entre chaînes principales peut se faire :

- Soit par un ou quelques atomes : S, O, C, ..., c'est le pontage chimique.
- Soit par des brins de chaînes plus ou moins longs.

Le point de jonction entre deux chaînes est appelé le nœud de réticulation. Ces polymères sont en générale les élastomères et les thermodurcissables.

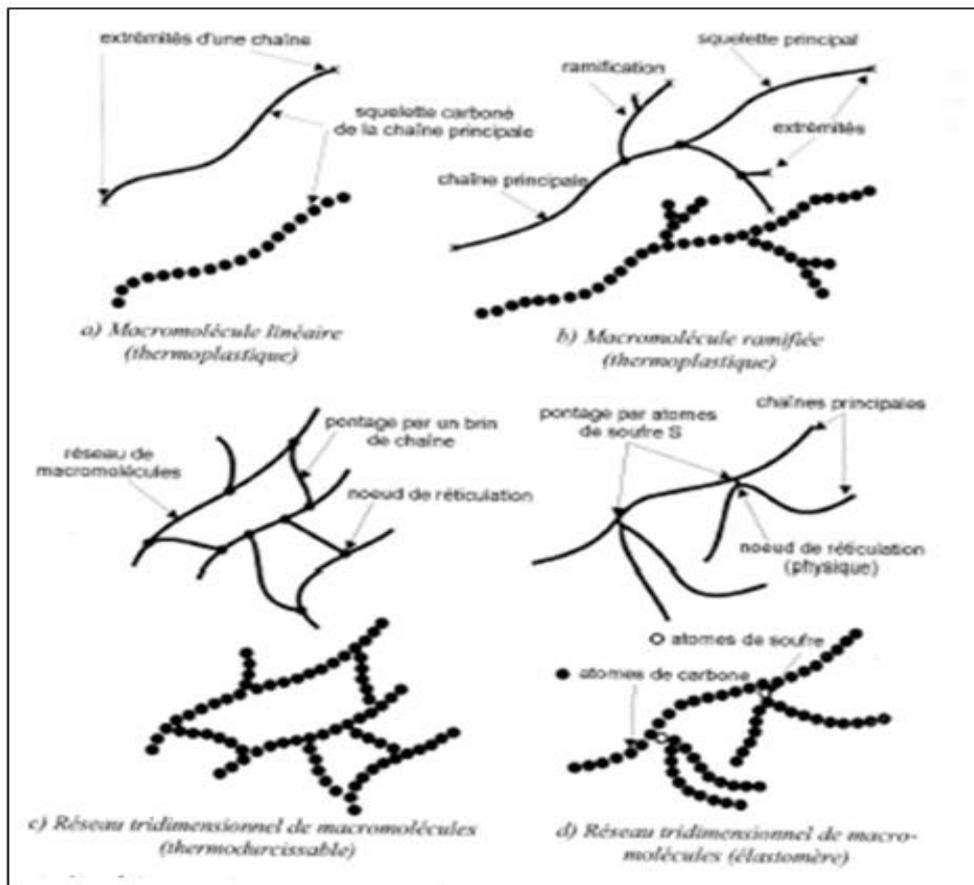


Figure I.3. Structures de molécules à chaînes carbonées [1].

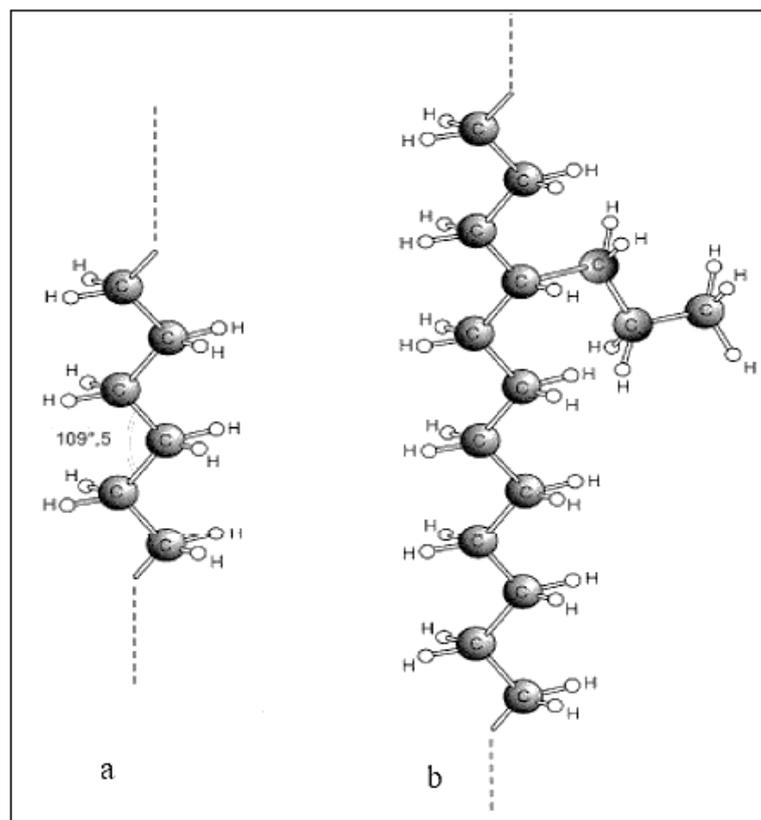
On appelle densité de pontage ou taux de réticulation le nombre de nœuds de réticulation du réseau tridimensionnel, unité de volume de polymère.

Suivant la valeur du taux de réticulation, on obtient des polymères différents, ainsi dans un élastomère, le taux de réticulation correspond à environ un nœud pour quelques centaines d'atome de carbone de la chaîne principale ; tandis que pour un polymère thermodurcissable très réticulé, ce taux est de 10 à 100 fois plus élevé que dans un élastomère.

I.5. Propriétés des polymères

I.5.1. Propriétés physiques

Beaucoup de propriétés physiques des polymères (densité, température de fusion, température de transition vitreuse...) dépendent de leurs architectures moléculaires. Donc, il est intuitivement aisé de comprendre que la ramification des molécules diminue la densité, le point de fusion de la cristallinité d'un polymère, en élargissant la distance entre les chaînes principales. Ainsi, le polyéthylène linéaire non ramifié (de haute densité) a un point de fusion d'au moins 20 °C plus élevé que le polyéthylène ramifié (de basse densité) figure I.4.



a : Polyéthylène linéaire

- Haute densité $\approx 0,96$.
- Température de fusion $\approx 130 - 145^{\circ}\text{C}$
- Très cristallisé

b : polyéthylène ramifié

- faible densité $\approx 0,91$
- température de fusion $\approx 105 - 110^{\circ}\text{C}$
- peu cristallisé

Figure I.4 macromolécule de polyéthylène [1].

I.5.1.1 Influence de la température

La température est un paramètre très important influant sur les propriétés des matériaux polymères, la température de transition vitreuse (T_g) et la température de fusion (T_f) sont les deux températures fondamentales à considérer dans l'étude des matériaux polymères, en vue d'application technique en construction.

En générale la température pour un polymère varie comme suit :

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Température} & & \text{Température} & & \text{Température} & & \text{Température} \\ \text{de vitreuse} & < & \text{de cristallite} & < & \text{de fusion} & < & \text{de décomposition} \end{array}$$

A) La température de transition vitreuse (T_g)

Elle est particulièrement importante pour les polymères amorphes, pour lesquels aucune force de cohésion importante, autre que les enchevêtrements, n'existe. Lorsque les zones amorphes se ramollissent à partir de la température de transition vitreuse, la tenue mécanique des thermoplastiques semi-cristallins est encore assurée par les cristallites celle des matières thermodurcies et les élastomères par les nœuds de réticulation. La structure des polymères réticulés n'est pas thermiquement réversible : elle est détruite de façon irréversible en approchant des températures relativement élevées

B) La température de fusion (T_f)

Au-delà de température de transition, une température qui ne concerne que la phase cristalline du polymère, cette phase fond sur une plage de température et non à une température fixe comme un corps pur ; la température de fusion T_f est alors définie comme la température moyenne de fusion des zones cristallines du polymère

C) La température de décomposition (T_d)

C'est là où les liaisons covalentes du squelette des macromolécules commencent à se rompre sous l'action de la chaleur fournie aux molécules. Le polymère perd son intégrité.

I.5.2. Propriétés mécanique

Les polymères comportant des chaînes linéaires non réticulées et flexibles sont souples (à certaines températures), par contre les polymères très réticulées formant un réseau tridimensionnel, sont plus rigides, les premiers donnent lieu à des polymères

thermoplastiques qui se déforment et se moulent bien à chaud, les seconds sont à la base des polymères thermodurcissables rigides et moins déformables à chaud.

D'autres part, lorsque le pontage entre chaînes principales est par un ou quelques atomes étrangers (S, O, C), on appelle vulcanisation la réaction chimique qui lie par de fortes liaisons covalentes, ces atomes étrangers aux chaînes principales. Ce procédé est très utilisé dans la fabrication des élastomères (caoutchoucs) pour les pneumatiques. En effet, avec un taux de réticulation moyen (densité de pontage), un élastomère est souple et possède une grande élasticité réversible. Par contre, ce même corps devient rigide si la réticulation est forte, il perd sa forte élasticité.

Tableau I.2: Caractéristiques de quelques polymères courants [1].

Matériau	Masse volumique (g/cm ³)		Tempé. de Transition vitreuse T _g (°C)	Tempé. de fusion T _f (°C)
	amorphe	Cristallin		
Polymères thermoplastiques				
-Polyéthylène (PE)	0,855	0,997	≈ - 80	130 à 140 (H D) 105 à 110 (bas. D) 160 à 180
-Polypropylène (PP)	0,852	0,946	-20	-
-Polychlorure de vinyle (PVC)	1,39	-	80	327
-Polytétrafluorure d'éthylène (PTFE)	2	2,203	-20	-
-Polystyrène (PS)	1,05	-	100	-
-Polyméthacrylate de méthyle (PMMA)	1,19	-	105	-
-Polycarbonate (PC)	1,2	-	140	-
Elastomères				
-Polyisoprène (NR) (Caoutchouc naturel)	0,93	-	-73	-
-Polybutadiène (PBD)	0,94	-	-100	-
-Polychloroprène	1,25	-	-40	-
Polymère thermodurcissable				
-Polyépoxyde (EP)	1,1 – 1,5	-	100 à 220	-
-Polyester (UP)	1,22– 1,27	-	10 à 120	-
-Phénol-formaldéhyde(phénoplaste)	1,25	-	T _g >T _d (150–250)	-
Verre (SiO ₂)			1200	

A). Courbes contrainte-déformation (différent type de matériau)

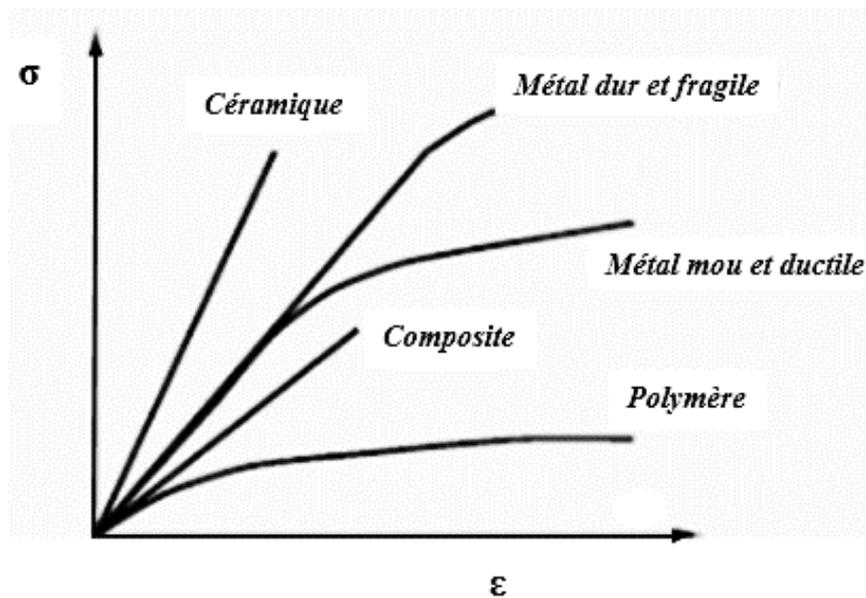


Figure I.5 : Comportement mécanique des matériaux différents.

B). Module d'élasticité et résistance en traction

Tableau I.3 : Valeurs théoriques et expérimentales du module d'élasticité (Module de Young) et de la résistance en traction de différents matériaux [2].

Matériau	Module d'élasticité (MPa)		Résistance en traction (MPa)			
	Théorique	Expérimental		Théorique	Expérimental	
		Fibres	Massif		Fibres	Massif
Polyéthylène	300 000	100 000 (33 %)	1 000 (0,33 %)	27 000	1 500 (5,5 %)	30 (0,1 %)
Polypropylène	50 000	20 000 (40 %)	1 600 (3,2 %)	16 000	1 300 (8,1 %)	38 (0,24 %)
Polyamide	160 000	5 000 (3 %)	2 000 (1,3 %)	27 000	1 700 (6,3 %)	50 (0,5 %)
Verre	80 000	80 000 (100 %)	70 000 (87,5 %)	11 000	4 000 (36 %)	55 (0,5 %)
Acier	210 000	210 000 (100 %)	210 000 (100 %)	21 000	4 000 (19 %)	1 400 (6,7 %)
Aluminium	76 000	76 000 (100 %)	76 000 (100 %)	7 600	800 (10,5 %)	600 (7,9 %)

I.6. Les plastiques

Ces matières étaient essentiellement connues pour leurs intérêts en électronique. Un développement remarquable, surtout pour les thermoplastiques, a été observé à partir de 1926 avec les travaux de chimiste allemand Staudinger. Celui-ci mit en évidence, que les matières plastiques sont effectivement formées de longue chaîne moléculaires, appelées macromolécules. Ce concept constitue la base scientifique de l'étude systématique des matières plastiques. Une nouvelle impulsion importante pour le développement des matières plastiques survint du milieu des années 1950 avec la conversion d'une matière première, le charbon en dérivé pétrochimiques. On obtient, à partir des sous-produits, des fractions légères, dont l'éthylène. Les principaux thermoplastiques dérivés sont le polypropylène (PP), le polyéthylène (PE), le polystyrène (PS) et le polychlorure de vinyle (PVC).

Ces matières ont pu être produites plus économiquement à partir de cette découverte. 6% environ de la totalité des produits pétroliers sortant des raffineries sont utilisés [2].

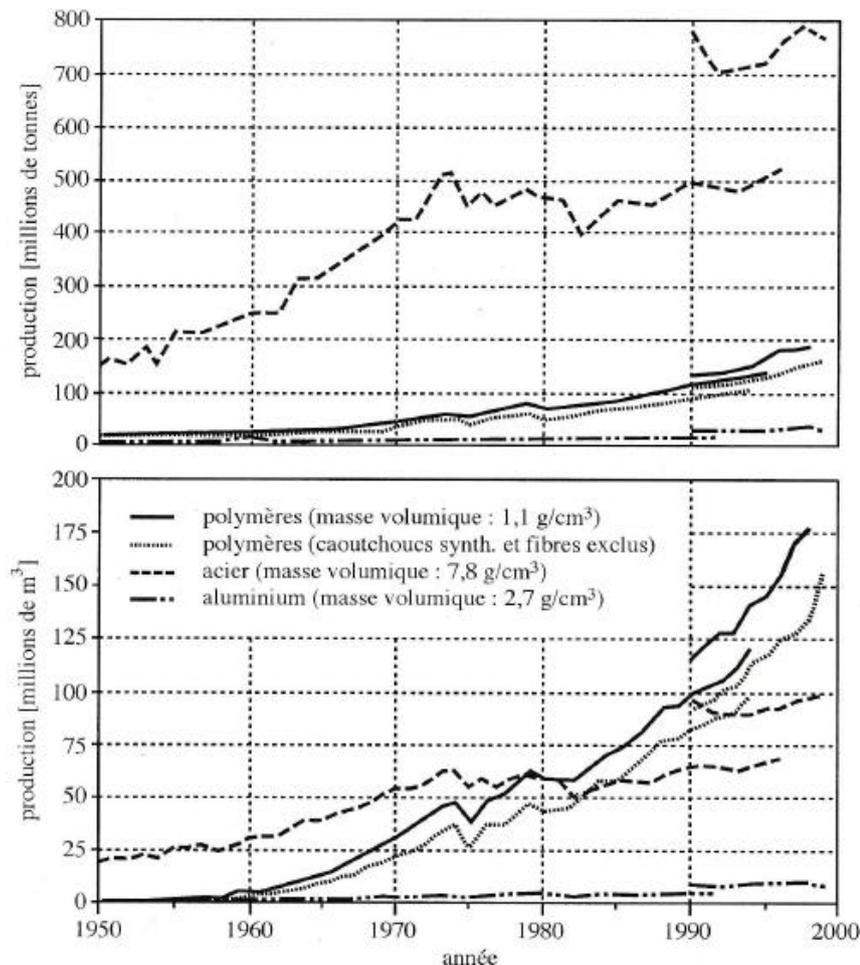


Figure I.6. Production de différents matériaux, dans le monde occidental à partir de 1950 ou dans le monde entier à partir de 1990 : Production en masse (en haut) et en volume (en bas) [2].

La figure I.6 permet de comparer, en masse et en volume, la production d'acier et d'aluminium avec celle des matières plastiques depuis 1950. La présentation de la production volumique est appropriée puisque les caractéristiques essentielles des matériaux utilisés en construction (contrainte et module d'élasticité) dépendent de la géométrie des pièces, c'est-à-dire du volume. Au cours des 25 dernières années, la production des plastiques a presque quadruplé, alors que la production d'acier est restée relativement stable. La production d'aluminium a connu une progression d'environ 50%, mais demeure comparativement à un niveau nettement plus bas.

I.6.1. Définition

Le terme plastique est généralement utilisé pour décrire un large éventail de matériaux synthétiques ou semi-synthétiques qui sont utilisés dans un éventail très étendu d'applications. Où que vous posiez les yeux, vous trouverez des plastiques. Nous utilisons des produits à base de plastiques pour rendre nos vies plus propres, plus faciles, plus sûres et plus agréables. Nous retrouvons des plastiques dans les emballages, les vêtements, les constructions, les appareils médicaux, les véhicules, les Smartphones. Les plastiques sont des matières organiques tout comme le bois, le papier ou la laine. Les matières premières utilisées pour produire les plastiques sont des produits naturels comme la cellulose, le charbon, le gaz naturel, le sel et, bien entendu, le pétrole brut. Les plastiques sont devenus le matériau moderne par excellence parce qu'ils permettent d'équilibrer les besoins d'aujourd'hui et les préoccupations environnementales.

Le terme "plastique" provient du mot grec "plastikos", ce qui signifie prêt à être moulé. Il fait référence à la malléabilité du matériau, sa plasticité durant sa fabrication, qui permet qu'il soit moulé, pressé, extrudé pour prendre les formes les plus diverses : des films, des fibres, des disques, des tubes, des bouteilles, des boîtes et tant d'autres encore [10].



Figure I. 7 : Plastique matière première [10].

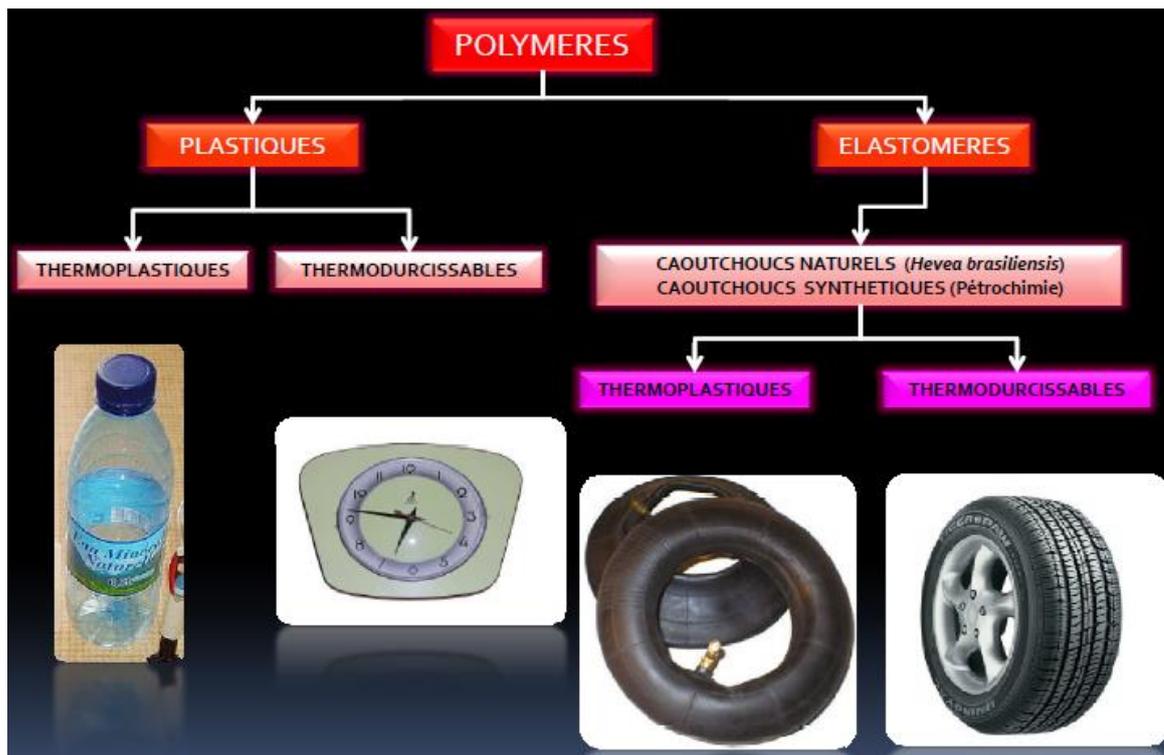


Figure I.8: dérivés du polymère [13].

I.6.2. Différents plastiques

Les matières plastiques sont importantes à l'échelle industrielle correspondent à 30 ou 40 types polymères différents, selon 13 000 combinaisons et sous 25 000 marques commerciales environ. En fonction de leurs applications, de leurs prix et des quantités produites, on peut les classer en trois groupes.

- Les thermodurcissables
- Les élastomères ou les caoutchoucs
- Les thermoplastiques

I.6.3. Les adjuvants [1]

Ce sont des produits généralement organiques, que l'on mélange aux polymères pour améliorer leurs caractéristiques mécaniques ou modifier leurs propriétés physiques (par exemple plastifiant) ou chimiques (par exemple stabilisateur).

Quel que soit le type d'adjuvant, il est important de prendre en considération les critères suivants :

- Performances propres
- Compatibilité avec la mise en œuvre (en particulier thermostabilité et faible volatilité).
- Compatibilité avec les adjuvants.
- Compatibilité avec l'usage (par exemple non-toxicité) :

- Tenue à long terme (résistance à la dégradation).
- Rapport performance /prix.

I.6.3.1. Les plastifiants

Un plastifiant est un solvant qui, incorporé aux polymères, détruit partiellement les interactions entre chaînes responsable à la cohésion mécanique (figure II.4) et transforme un matériau rigide en matériau souple, flexible.

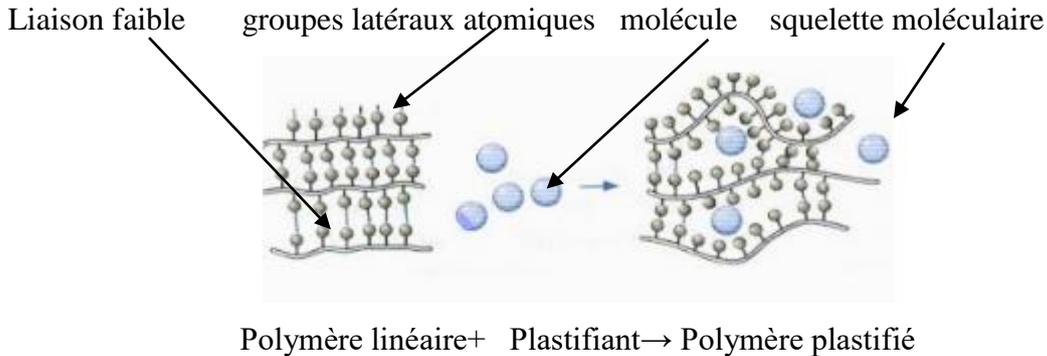


Figure I.9. Schématisation du mécanisme de plastifiant à l'échelle moléculaire [1].

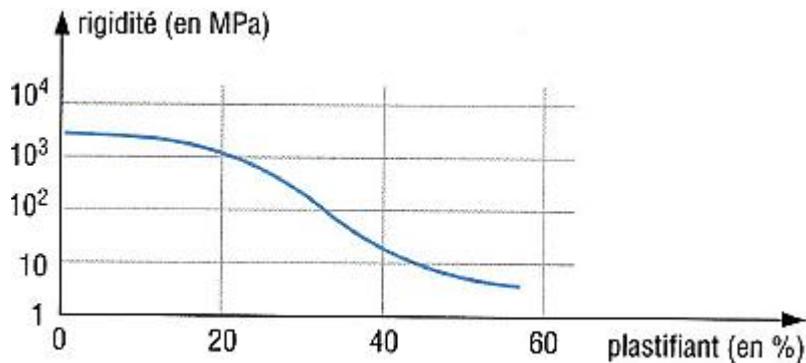


Figure I-10. Variation de la rigidité avec un plastifiant [5].

I.6.3.2. Les stabilisants

Ils sont destinés à retarder ou supprimer les phénomènes contribuant à altérer la structure des polymères, pendant leur mise en œuvre ou lors de leur utilisation. Ils sont utilisés en faible concentration (< 3%). Les principaux types sont :

A) Les anti-oxygènes

Ils retardent l'oxydation thermique qui dégradent notamment les propriétés mécaniques du polymère. Ils sont utilisés en particulier pour le polyéthylène, les élastomères... en très faible concentration, afin de pas modifier les propriétés physiques et la couleur du polymère. Ce sont les phénols, les amines, les phosphates, le noir du carbone...

B) Les stabilisants thermiques

Ils ont pour fonction de retarder le dégagement d'acide chlorhydrique, HCL, et la formation de composés colorés, dans les polymères chlorés comme le polychlorure de vinyle (PVC).

C) Les stabilisants vis-à-vis de la lumière

Ce sont les pigments organiques en particulier le noir de carbone, les adsorbants de rayonnement ultraviolet (qui empêchent la pénétration des U.V. dans le polymère) et d'autres « extincteurs ». Ce sont des corps organiques. Ils évitent les réactions photochimiques notamment avec les caoutchoucs ; ces réactions sont néfastes car elles diminuent leur élasticité caoutchoutique, et même les rendre cassants, en modifiant leur taux de réticulation.

I.6.4. Autres Adjuvants

Dans cette famille on trouve de nombreux types :

I.6.4.1. Les colorants pigments

Certains sont solubles dans la matrice du polymère ; ils permettent la réalisation de formules colorées et transparentes. D'autres sont insolubles et donne lieu à des matériaux opaques. En majorité ces pigments sont d'origines minérale, il existe par ailleurs, d'autres colorants d'origine organique.

I.6.4.2. Les antichocs

Ce sont principalement des copolymères (acrylonitrile - butadiène - styrène ABS ; méthacrylate - butadiène - styrène) qui forment des systèmes multiphasés avec le polymère à renforcer et améliorent ainsi sa résistance au choc.

I.6.4.3. Les conductrices et antistatiques

Les polymères organiques sont des isolants thermiques et électriques. Pour certaines applications, il est donc nécessaire d'ajouter un élément conducteur [1.6]. Les principales charges utilisées sont :

- ✓ Des poudres ou paillettes métalliques telle que le cuivre, le fer, l'aluminium, etc...
- ✓ Des microbilles de verre métallisées (cuivre, argent).
- ✓ Des particules de carbone (noir de carbone).
- ✓ Des filaments métalliques.

I.6.4.4. Les ignifugeants

Ils rendent plus difficiles l'amorçage ou la propagation de combustion d'un polymère.

I.6.4.5. Les lubrifiants

Ils sont utilisés généralement en très faible concentration ($\approx 0,1\%$), il doit être insoluble dans le polymère et exsuder rapidement pour former une couche superficielle permettant de diminuer le frottement entre les polymères et un métal.

I.6.4.6. Divers adjuvants

Il existe d'autres adjuvants comme :

- ✓ Les agents énucléant qui accélèrent la germination de la cristallisation, et par suite diminue la taille de sphérolites ce qui favorable pour les propriétés mécaniques.
- ✓ Les anti-retraits pour compenser la diminution de volume de certains polymères, lors de leur refroidissement.
- ✓ Les adjuvants à relargage contrôlé qui lorsqu'ils sont introduit dans un polymère, sont libérés progressivement dans leur environnement. C'est ainsi que certain médicament incorporés dans des prothèses osseuses ou dans des pansements, sont libérés lentement dans l'organisme.

I.7. Les thermoplastiques

Ce sont les plastiques standard ou plastique de commodité, présentent une grande diffusion comme le polychlorure de vinyle (PVC), le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), et les polymères à base de styrène (PS, PS-I).

Les plastiques thermiques ou thermoplastiques possèdent de meilleures propriétés mécaniques, thermique et électriques que les plastiques standards. Ils peuvent être employés dans des structures soumises à de fortes sollicitations et sont capables de résister à des charges élevées. Ce groupe est constitué des polyamides (PA), du polyoxyméthylène (POM), du polycarbonate (PC), du polytéréphtalate d'éthylène (PET), du polytéréphtalate de butylène (PBT), des copolymères à base de styrène (ABS, ASA, SAN) ainsi que des mélanges PC+ ABS et PC+PBT.

- Les plastiques de spécialité ou de haut performance sont des plastiques techniques présentant d'excellentes propriétés, qui les rendent notamment utilisables à haute température. Leur mise en forme requiert généralement l'emploi d'équipements

spéciaux. On peut citer les polyamides aromatiques, les polysulfones (PSU, PPSU), les polyaryléthercétones (PEK, PEEK, PEEKK), les polyamides (PI, PAI, PEI) le polysulfure de phénylène (PPS), les polymères à cristaux liquides (LCP) et les polymères fluorés (PTFE...).

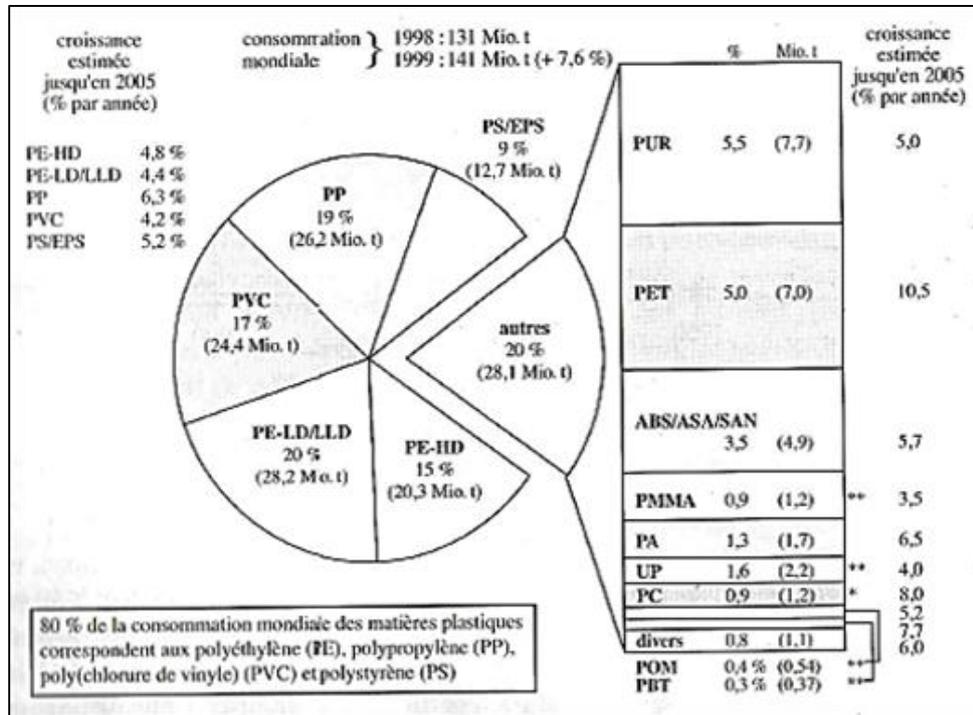


Figure I.11. Consommation mondiale, en million de tonnes (Mt), de matières plastiques en 1999, 1998, 1997. Répartition par type de polymères [2].

Les matières plastiques les plus utilisées dans les applications techniques sont les thermoplastiques. La consommation des polyoléfines (PE, PP), du PVC et des polymères à base de styrène représente 80 % environ de la consommation mondiale de l'ensemble des thermoplastiques disponibles sur le marché (figure 1.11). Les polyuréthanes (PUR) ainsi que les plastiques techniques comme le polycarbonate (PC), le polyméthacrylate de méthyle (PMMA), les polyamides (PA) et les copolymères à base de styrène (ABS, SAN et ASA) sont d'autres matières plastiques produites en grandes quantités. La consommation mondiale des principales matières plastiques est représentée sur la **figure 1.11**.

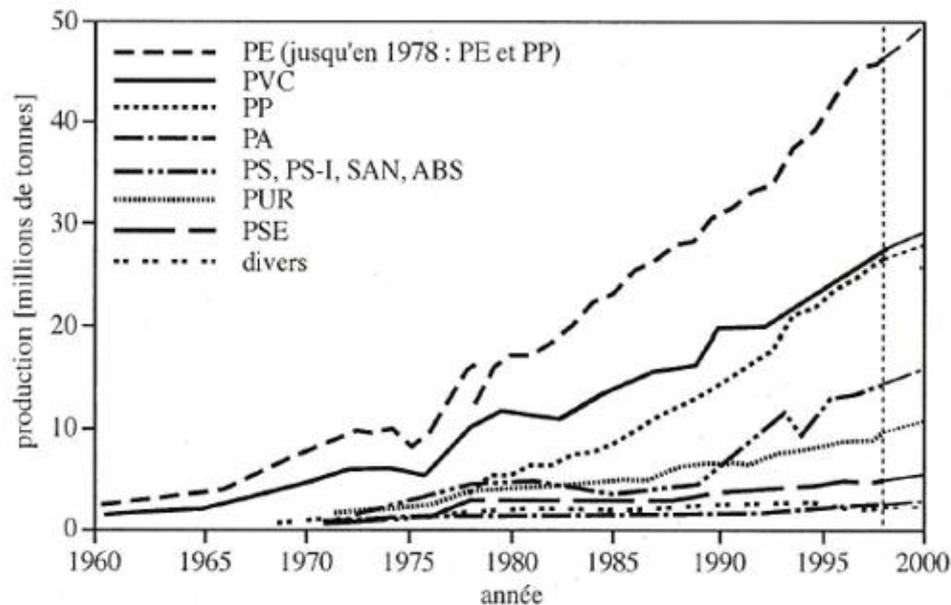


Figure I.12 : Evolution de la production des principaux types de matières plastiques dans le monde occidental (valeurs à partir de 1998 = provisions) [2].

Polyéthylène (PE), Polychlorure de vinyle (PVC), Polypropylène (PP), Polyamides (PA),

Polystyrène (PS), Polyuréthanes (PUR), Polystyrène expansé (PSE).

Les plastiques, contrairement à beaucoup d'autres matériaux produits à partir de sources naturelles, comme les métaux et les céramiques, sont développés et produits en vue d'applications industrielle spécifiques (figure I.12).

➤ Secteurs d'applications

La figure 1.13 présente les principaux secteurs d'application des matières plastiques, en France, en 1998. Le secteur d'emballage, marché qui a connu dans le passé une forte croissance, et le secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP) constituent à eux seuls plus de la moitié de l'ensemble des marchés faisant appel aux matières plastiques. On trouve ensuite les applications dans des secteurs de haute qualité technique comme les industries électrique et électronique et l'automobile. Les matières plastiques standard les plus impliquées dans l'industrie de l'emballage sont les plastiques standard comme le PE, le PS, le PET. Dans le bâtiment, il s'agit essentiellement du PE et le PVC. Les plastiques techniques comme les PA, PUR, PC, ABS, et POM trouvent principalement des applications dans l'industrie électrique/électronique et le secteur de l'automobile.

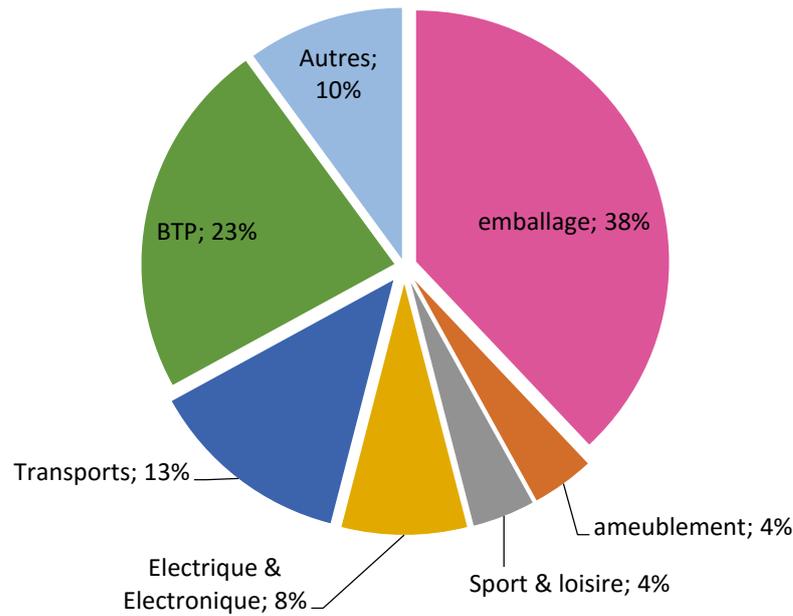


Figure 1.13 : Secteur d'application et consommation des matières plastiques, en France, en 1998 Total : 5,078 million de tonnes, Secteur d'emballage (PE, PS...) compris (1,93 Mt) et PUR compris (0,182 Mt) [2].

➤ Amélioration de la qualité

Le développement des plastiques a été essentiellement favorisé par quatre facteurs :

- Amélioration de la qualité (en particulier pour les plastiques standards).
- Progrès des techniques de mise en forme.
- Poursuite de la baisse des prix.
- Elévation et élargissement du niveau des connaissances.

Même si les plastiques possèdent, contrairement à d'autres matériaux, les avantages d'un poids spécifique faible et d'une mise en forme relativement simple et flexible, ils présentent aussi certains inconvénients. L'un d'entre eux est lié au fait que les valeurs expérimentales des principales caractéristiques mécaniques (rigidité et résistance) des matériaux massifs sont égales à une fraction seulement des valeurs théoriques (tableau 1.9). Les valeurs correspondant au même matériau, sous forme de fibres, sont plus proches des valeurs théoriques. A cet effet il existe un large potentiel d'amélioration des propriétés mécaniques pour les plastiques massifs (compact). Ce potentiel reste élevé, contrairement à celui des matériaux classiques comme l'acier, le verre et l'aluminium.

Une amélioration des propriétés du polyéthylène (PE) est possible par autorenforcement à l'état fondu, au cours de la mise en forme. L'utilisation de nouveaux catalyseurs, permettant la production de matières plastiques avec un meilleur contrôle de leurs propriétés, est également encourageante.

L'amélioration de la quantité des matières plastiques les a conduites à être de plus en plus en mesure de rivaliser avec d'autres matériaux plus usuels et de pouvoir les remplacer dans certains cas. La production en forte croissance de bouteilles recyclables en poly (téréphtalate d'éthylène) (PET) en est un excellent exemple. Une concurrence existe non seulement entre les plastiques et les matériaux traditionnels, mais aussi entre les différents plastiques (figure 1.14). D'autre part, on cherche souvent à remplacer les plastiques les plus chers, généralement de qualité supérieure.

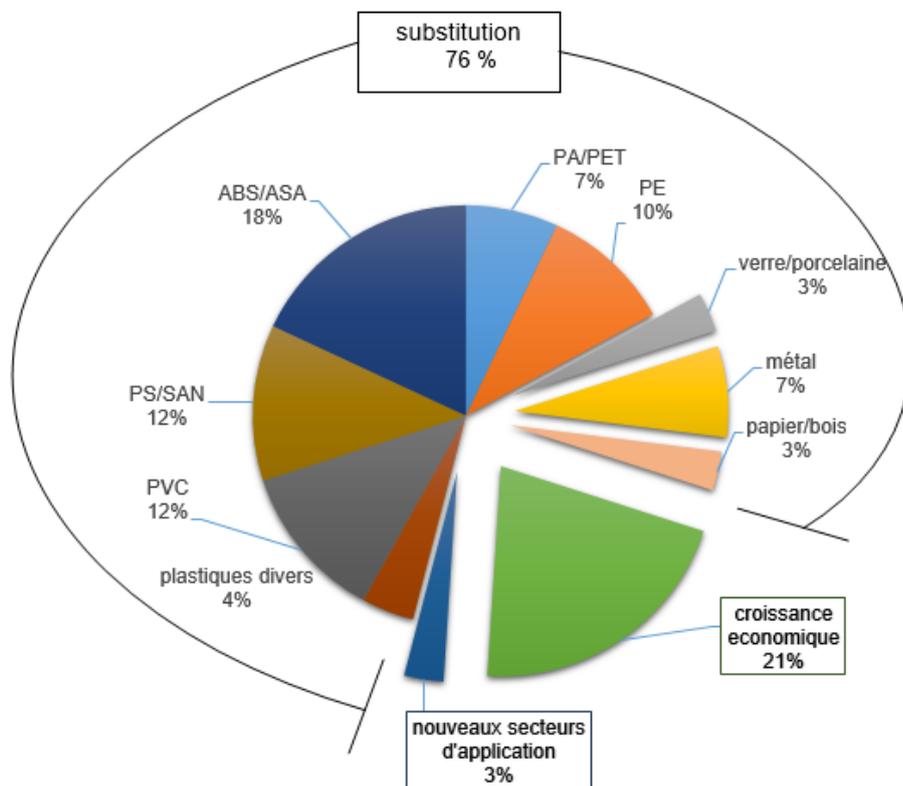


Figure I.14 : Croissance de la consommation du thermoplastique en Europe [2].

I.7.1. Les polyéthylènes (PE)

Sont des polymères semi-cristallins qui appartiennent à la famille des polyoléfines (PE, PP, Pib, PMP). Ils sont obtenus par la polymérisation de l'éthylène gazeux et sont de nature différente suivant les modes de polymérisation.

I.7.2. Les différents types de polyéthylènes

Par variation de ramification, les polyéthylènes changent de densité, (figure I.15).

I.7.2 .1. Le polyéthylène basse densité (PEBD)

Le procédé « Haute Pression » est le plus ancien (1933). Ce procédé de polymérisation en masse ou en émulsion nécessite de comprimer l'éthylène gazeux à plus de 1 000 bars. Ce procédé conduit à un polyéthylène ramifié, difficilement cristallisable [5].

I.7.2.2. Polyéthylène à haute densité (PEHD)

Le procédé « Basse Pression » (exemple : Ziegler-Natta) ils sont basés sur l'utilisation de catalyseurs et nécessitent des pressions faibles ≤ 50 bars. Ils permettent d'obtenir des chaînes macromoléculaires linéaires plus facilement cristallisables. C'est l'obtention du polyéthylène à haute densité [5].

I.7.2.3. Polyéthylène à moyenne densité (PEMD)

Ce type de polyéthylène ayant une densité intermédiaire entre celle du polyéthylène basse densité et celle du polyéthylène haute densité. Ils sont obtenus par un catalyseur (Ziegler-Natta, Phillips) [5,15].

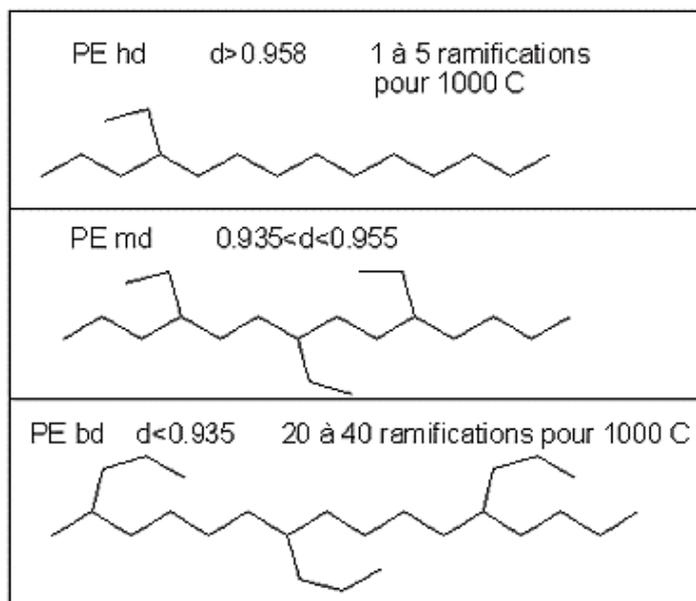


Figure I-15 : Schématisation des ramifications dans les polyéthylènes [5].

I.8. Propriétés du polyéthylène

I.8.1. Propriétés physiques

Le mode de polymérisation des polyéthylènes conduit à des taux de cristallisation variables. Ils seront d'autant plus difficiles à cristalliser que le polymère est ramifié, ces ramifications gênant l'arrangement macromoléculaire. Les densités des PE vont de 0,910 à 0,960

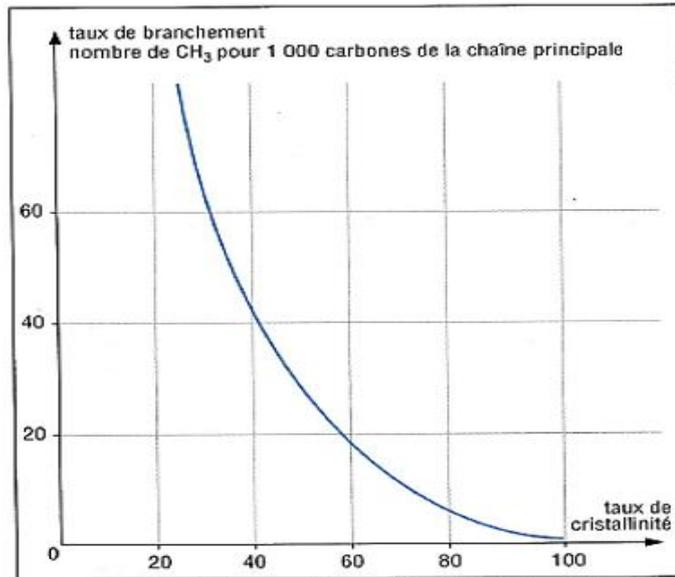


Figure I-16 : Variation de cristallinité en fonction du taux débranchement cours [5].

L'aspect des polyéthylènes est blanc laiteux et de toucher cireux. Ils sont opaques en forte épaisseur, et transparents en films. Souvent utilisés comme contenants ou comme emballage, ils sont imperméables à l'eau, à l'air et aux hydrocarbures, les polyéthylènes sont utilisés pour la fabrication des réservoirs d'eau et d'essence, des bouteilles de lait ou des bâches et films agricoles.

L'augmentation de la cristallisation traduit par une diminution de la solubilité et de la diffusivité.

I.8.1.1. Propriétés thermiques

Les polyéthylènes même en absence de la flamme initiatrice avec une flamme bleutée et ils « gouttent ». Dans une combustion incomplète (incendie), il se forme de l'oxyde de carbone et de faibles quantités d'hydrocarbure.

En absence de contrainte, le PEHD peut supporter une température de 110 à 120 °C (stérilisation par exemple). Mais cette température :

- Décroit avec la charge ≤ 100 °C

- Augmente avec le taux de réticulation $< 130\text{ }^{\circ}\text{C}$,

Le passage de la température de transition vitreuse est d'autant moins sensible que le polymère est plus cristallin comme le PEHD [5].

I.8.1.2. Propriétés électriques

Les polyéthylènes sont d'excellents isolants électriques pour des conditions variées d'ambiance.

Ceci explique leur tendance à être électrostatique.

Ils ont une résistivité très élevée et une rigidité diélectrique élevée (ξ caractérise des propriétés du diélectrique ≈ 2.3), d'où le (PE) est utilisé comme isolant de câbles, et des fils [5].

I.8.2. Propriétés chimiques

Les polyoléfines possèdent une très bonne stabilité chimique. A des températures inférieures à $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, elles sont pratiquement insolubles.

Elles ne sont attaquées ni par les acides (sauf oxydant) ni les bases, ni les solutions de sels (d'où leur utilisation en vaisselle de chimie). Elles sont insolubles dans l'eau et même plutôt hydrophobes.

Elles sont reconnues utilisables pour les applications alimentaires (bouteilles de lait), détergent...

Notons qu'un (PE) refroidi lentement et donc plus cristallin et moins perméable aux solvants.

Les polyéthylènes sont à l'état naturel très sensibles à l'action des rayons ultraviolets (U.V.) en présence d'oxygène (air) mais il existe des photos stabilisantes efficaces, comme par exemple le carbonblack le colorant inévitablement en noir.

En l'absence de l'oxygène, le polyéthylène est réticulé sous l'effet des rayonnements ionisant. Cette propriété est parfois utilisée pour augmenter la résistance à la fissuration sous contrainte mais cela peut réduire l'allongement à la rupture et la résistance à choc [5].

I.8.3. Propriétés mécaniques

A température ambiante ($23\text{ }^{\circ}\text{C}$), les polyéthylènes (PE) partiellement cristallins, sont au-dessus de leur température de transition vitreuse donc leur phase amorphe est caoutchoutique.

- Le PEBD est, à température ambiante, plus sensible au fluage que le PEHD (plus cristallin).

- Le PHBD est souple à la température ambiante permettant la réalisation des gains, fils, tuyaux souples, emballage...
- Le PEHD a un module d'élasticité plus élevé que celui de PEBD, un allongement à la rupture (A %) plus faible.

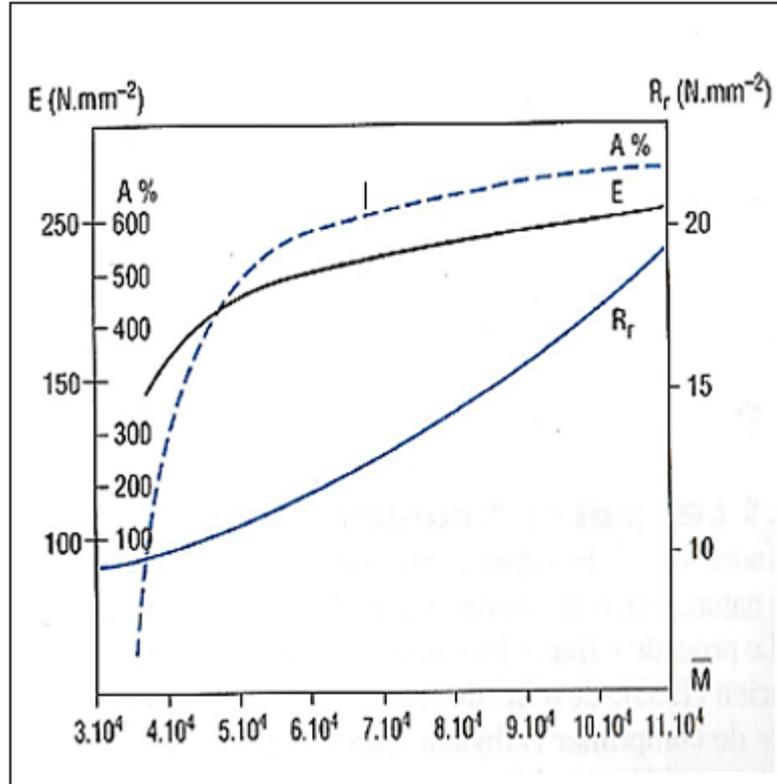


Figure I.17 : Variation des propriétés mécaniques en fonction de la masse molaire d'un polyéthylène [5].

Les polyéthylènes sont très sensibles à l'orientation, c'est-à-dire que les propriétés mécaniques ont été améliorées, si les macromolécules ont été orientées dans la direction de la sollicitation :

- Soit de la mise en œuvre par exemple. Cette orientation des macromolécules à l'état fondu peut alors conduire aussi à une augmentation de la cristallinité. Cette orientation peut être prévue l'injection en choisissant le point d'injection donc le mode d'alimentation et d'écoulement dans le moule.
- Soit par étirage mécanique de fils ou bandelettes afin de les rendre plus résistants. On peut aussi réaliser l'étirage de films dans deux directions (biaxial). Il s'agit là d'une orientation de macromolécules repliées dans la phase amorphe (Tableau I.4) [5].

Tableau I.4 : Propriétés à la rupture en fonction du taux d'étirage d'un polyéthylène [5].

Rapport d'étirage $I_{\text{initiale}} / I_{\text{étirage}}$	Résistance à la rupture N/mm^2	Allongement à la rupture %
1/4	200	105
1/8	300	30
1/12	600	10

Propriétés au choc

Pour ces polymères cristallins, il faudra éviter les entailles préjudiciables à la résistance au choc. Il faudra donc prévoir des congés de 0,2 à 0,5 mm au fond des rainures.

Les polyéthylènes refroidis rapidement (trompe), moins cristallins, seront moins sensibles au choc, il a une certaine capacité d'amortissement [5].

Propriétés au frottement

La nature de paraffinique du polyéthylène (surtout le PEHD), est un matériau avec de bonnes propriétés de frottement (surtout sous forme injection) [5].

Chapitre II

Mise en œuvre des polymères

CHAPITRE II : Mise en œuvre des polymères

La production des matières premières ne fait presque qu'exclusivement intervenir le secteur de la chimie lourde. La fabrication des machines de transformation est, quant à elle, incluse dans le secteur des moyennes entreprises ou dans celui des industries de l'acier ou du génie mécanique. La forte capacité d'innovation du marché de la fabrication de machines est entre autres, due au fait que les plastiques sont à l'origine du développement de nouveaux procédés de mise en forme, ce qui n'est pas le cas pour les métaux ou les autres matériaux traditionnels. Au cours des dernières années, des développements exceptionnels et couronnés de succès ont été obtenus dans le domaine de la mise en forme. C'est le cas du procédé multimatières. Cette technique consiste non seulement à la combinaison de plastiques avec d'autres matériaux, mais aussi en la mise en forme simultanée de plusieurs matières plastiques différentes. Elle permet d'obtenir une meilleure adhésion ou un meilleur glissement (antifriction) entre les différents composants. Il est d'autre part possible, d'introduire des composants de différentes couleurs, souples, décoratifs et fonctionnels, mais également des associations entre des feuilles, des plaques, des tissus ou des cuirs et une matière plastique. Les matériaux hybrides métal-plastique connaissent eux aussi un succès notable : des surfaces métalliques pouvant supporter des sollicitations mécaniques élevées sont associées sur de larges surfaces à des plastiques, ces derniers présentant simultanément une structure portante complexe et fonctionnelle.

Les matériaux composites à fibre se sont développés pendant le vingtième siècle grâce à la création des résines et des fibres synthétiques à l'origine des polymères. À côté des composites naturels tels que le bois, les hommes depuis l'antiquité ont élaboré un grand nombre de matériaux ou de structures composites. Citons, dans le domaine de la construction, des fibres naturelles noyées dans la boue. Les origines des composites avancés datent toutefois des années 1930. Les premières résines et fibres synthétiques ont été développées au cours de cette décennie.

II.1. Processus d'élaboration des polymères

Les matières plastiques sont essentiellement produites à partir de la pétrochimie, le cycle suivant est le plus souvent déployé figure II.1 :

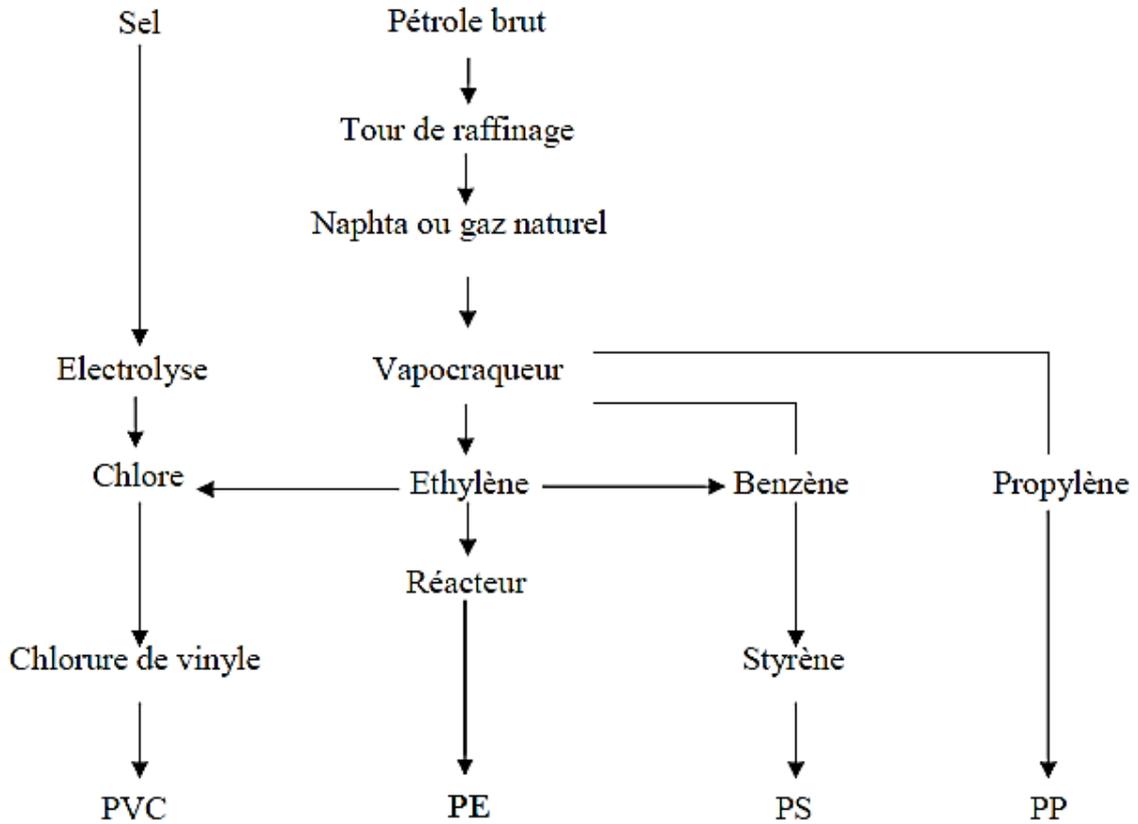
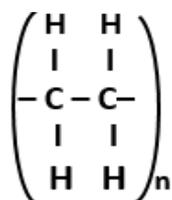
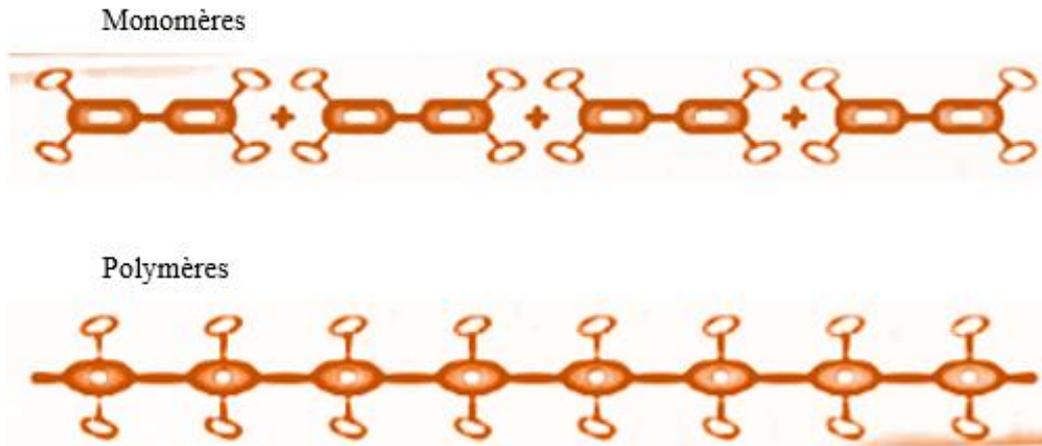


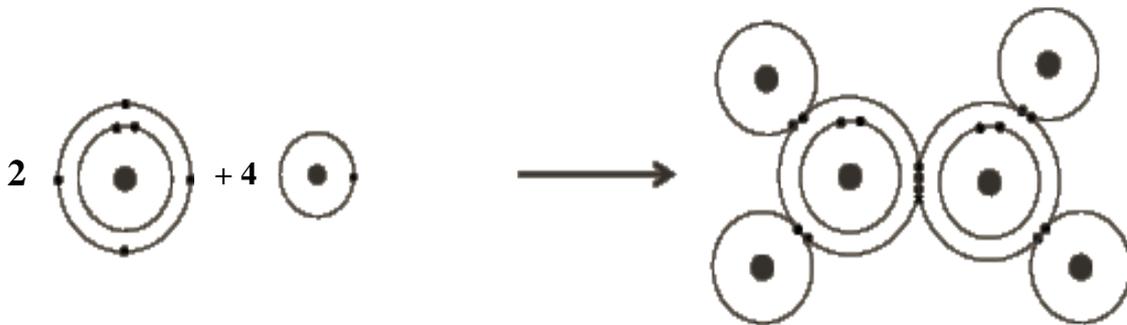
Figure II.1 : Grandes étapes de la fabrication des plastiques [4].

A partir de naphta, les plastiques sont obtenus par vapocraquage (ou reformage), les grands intermédiaires de la pétrochimie, dont les monomères qui, sous l'effet de pression, température, catalyseurs deviendront des polymères (polycondensats), qui constituent les matières plastiques proprement dites, que l'on utilisera dans la transformation. La polymérisation est la réaction ou les processus de passage du monomère au polymère (combinaisons de monomères) [4].





Soit une molécule C₂H₄



II.1.1. Degré de polymérisation

Le degré de polymérisation est le nombre "n" de molécules de monomère formant la macromolécule de polymère.

Par exemple dans le cas du polyéthylène : [CH₂-CH₂] n fois, ce nombre "n" peut varier de 500 à 50 000 unités

Ce qui concerne la macromolécule ou la chaîne les liaisons intermoléculaires sont covalentes : très résistantes et très rigides.

Un polymère peut être caractérisé par son degré de polymérisation moyen en poids :

$$\overline{DP}_n = \overline{M}_n / M_0 \dots\dots\dots (II.1) [2].$$

\overline{M}_n : poids moléculaire moyen du polymère.

M_0 : poids moléculaire du monomère.

II.2. Résines

Les résines sont des polymères, des matériaux légers dont la densité est légèrement supérieure à celui de l'eau. Elles peuvent être employées en solution ou en granulés (figure II.2) après fusion pour imprégner des fibres à des températures et des pressions plus faibles que celle nécessaires à d'autres matériaux tels que les métaux. De plus les résines mieuX à la plupart des milieux corrosifs. Le faible module mécanique des polymères facilite le transfert de charge aux fibres et permet ainsi exploitation des propriétés mécaniques de ces dernières. Parmi les inconvénients, notons que les polymères ne possèdent pas des propriétés à haute performance, rendant ainsi les composites unidirectionnels très anisotropes. De plus l'absorption de l'eau par les polymères peut nuire aux performances des composites. L'hydrolyse de la résine peut en effet entraîner la destruction des interfaces fibre-matrice.

Les polymères peuvent être classés en deux grandes familles : les thermoplastiques et les thermodurcissables. Cette dernière comprend les résines insaturées et les résines époxydes. Très souvent employées comme matrices dans les composites.

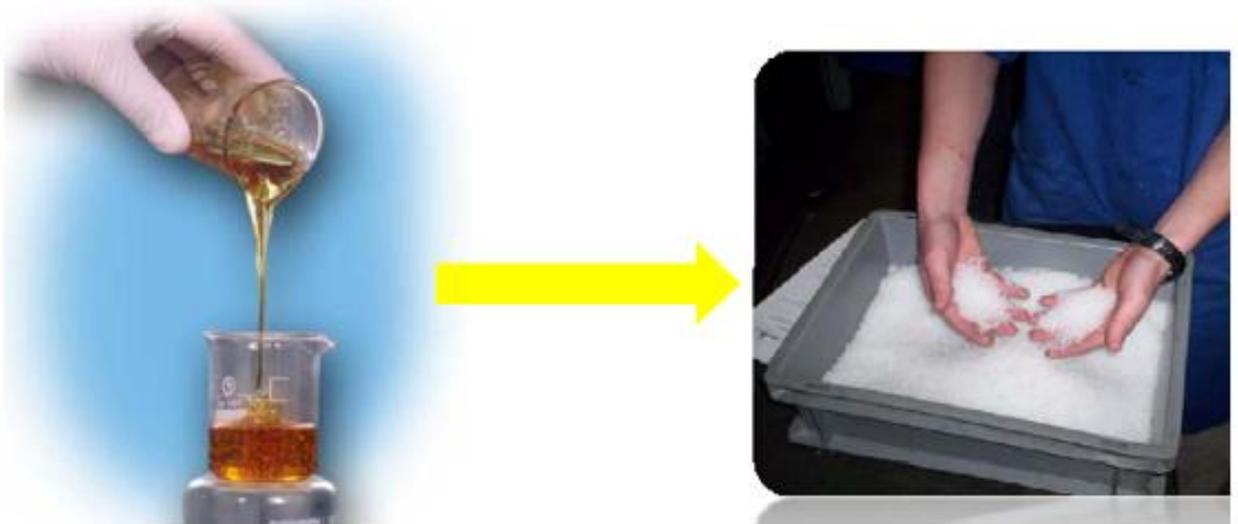


Figure II.2 : De la résine aux granulés [13].

II.2.1. Les résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables sont composées de longues macromolécules possédant des liaisons disponibles pour créer un réseau moléculaire tridimensionnel. Cette réaction est déclenchée par des durcisseurs et par la température. La figure II.3 montre schématiquement la réticulation d'une résine thermodurcissable. Il en résulte une transformation de la résine initialement sous forme de liquide visqueux composé de molécules longues et indépendantes, en un solide ayant une structure tridimensionnelle. Cette réaction est irréversible. Puisque la réaction est thermoactive, les résines thermodurcissables doivent être conservées à basse température, souvent à $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

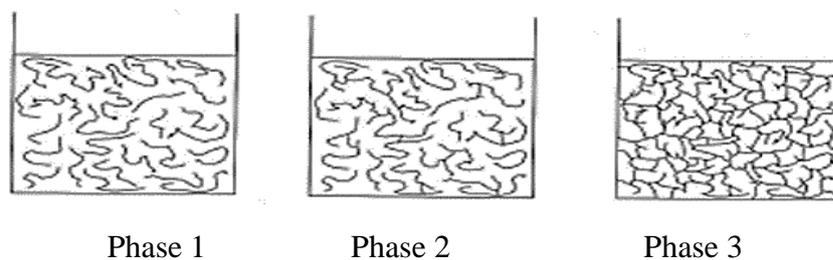


Figure II.3 : Transformation irréversible de la structure d'une résine thermodurcissable par réticulation [3].

La résine passe d'un état liquide composé de macromolécules indépendantes à un état solide ayant une structure moléculaire tridimensionnelle [3].

II.2.2. Les résines thermoplastiques

Ces résines sont composées de longues chaînes macromolécules qui ne possèdent pas de liaisons disponibles pour créer des ponts forts avec d'autres molécules, elles peuvent être amorphes ou semi-cristallins, tels que le polyamide ou le polyester. Les thermoplastiques se ramollissent à la température de transition vitreuse pour laquelle ils peuvent être facilement déformés. Contrairement aux résines thermodurcissables.

II.3. Transformation des polyéthylènes

Les polyéthylènes se mettent facilement en œuvre par les techniques de conception classique des pièces.

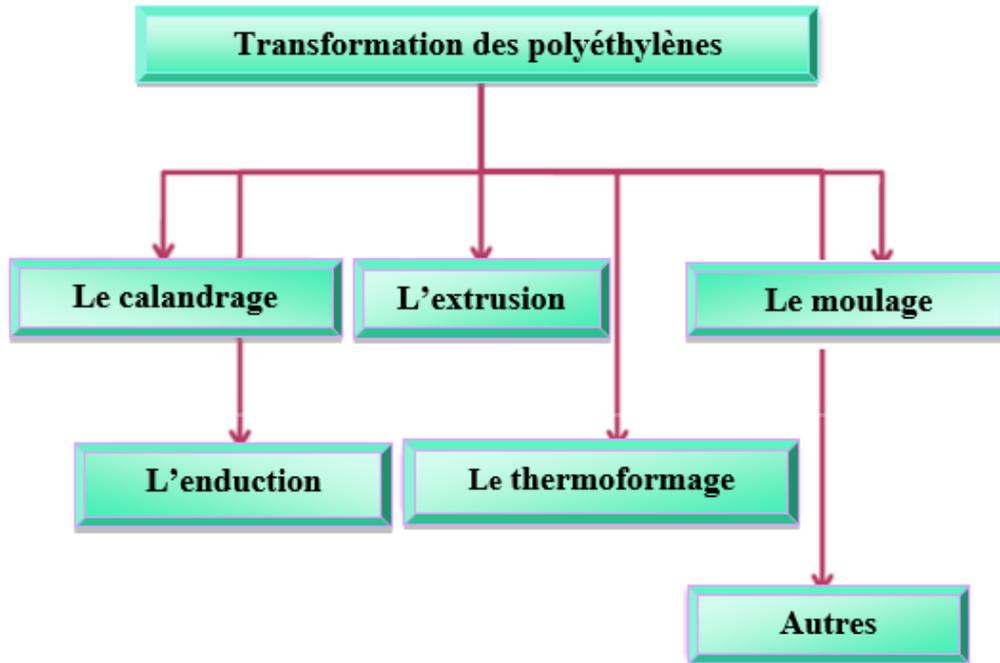


Figure II.4 : Différent technique de mise en œuvre de polyéthylène [13].

II.3.1. Le calandrage

Le calandrage c'est le passage de la matière subit une plastification préalable, entre des cylindres chauffés. Ce procédé permet la fabrication en continu de feuilles en PVC souple ayant des aspects différents (lisses ou grainées, unies ou marbrées). On peut se servir du calandrage pour fixer des feuilles en plastiques sur des supports de nature différente (tissus) pour faire des alèses, bâches [5] (Figure II.5)

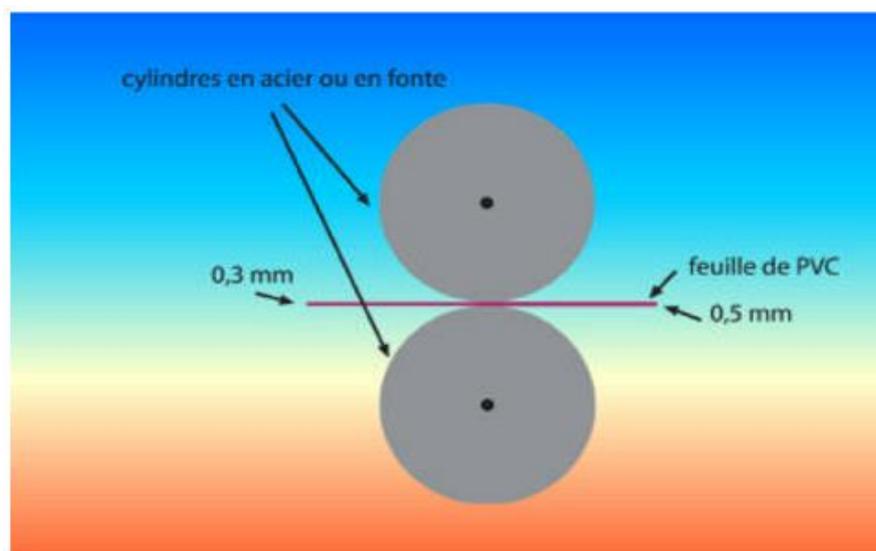


Figure II.5 : Principe de procédé de calandrage [13].

II.3.2. L'extrusion(principe)

Dans l'extrudeuse, la matière est ajoutée dans la trémie sous forme de poudre ou de granules. La trémie alimente en continu le cylindre chauffé contenant une vis rotative. La vis assure à la fois le chauffage, le malaxage, la mise en pression et le dosage du polymère qui est refoulé sous pression dans la tête d'extrusion. La tête contient une filière qui donne la forme approximative de la pièce dont le polymère est ensuite refroidi à l'eau ou à l'air pour prendre sa forme finale. Les dispositifs de tirage entraînent le polymère qui se refroidit, soit pour l'enrouler en bobine, soit pour permettre de le couper à la longueur [9].

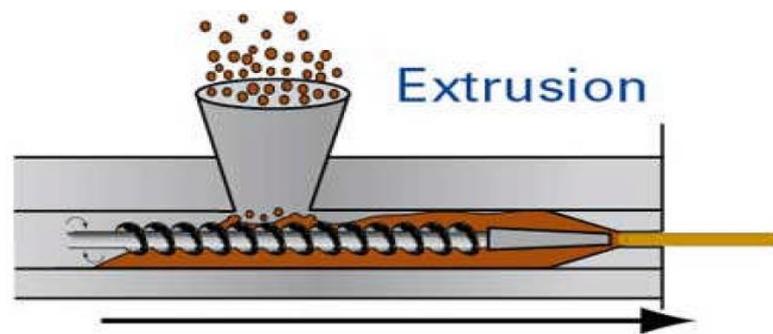


Figure II-6. Principe de procédé d'extrusion [13].

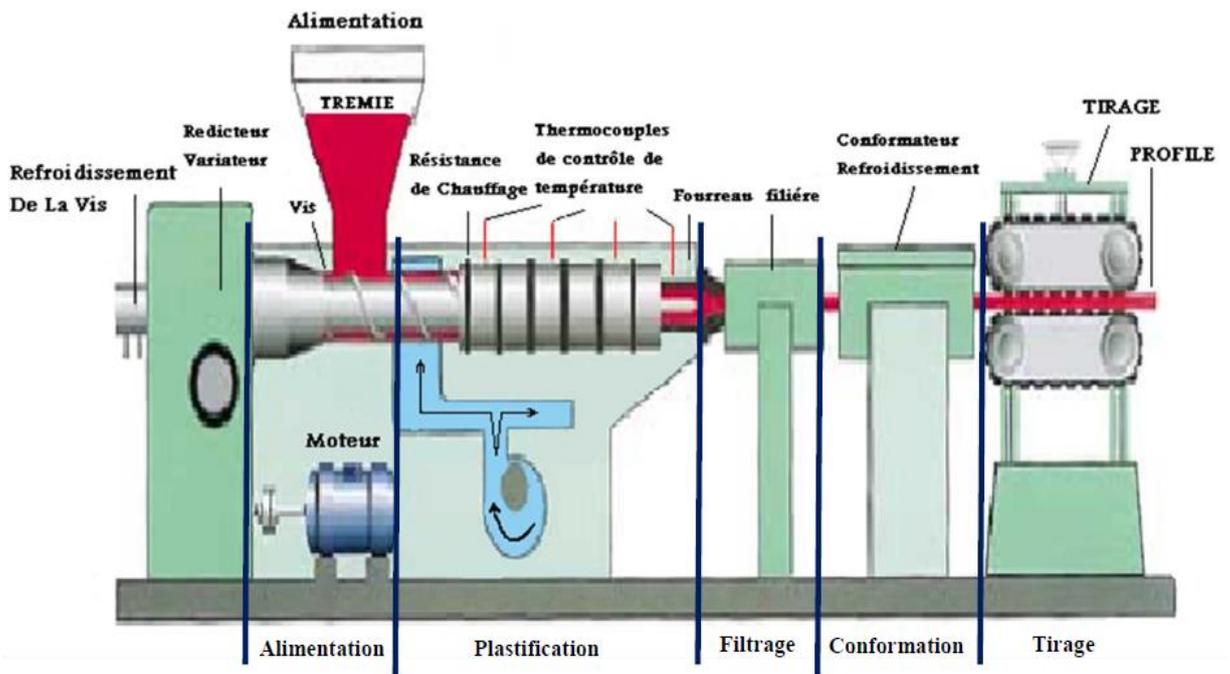


Figure II.7 : Les différentes phases d'extrusion [9].

Le polyéthylène plastifié sert à la réalisation des tuyaux d'arrosage, garnitures de sièges, profilés, des plaques, des films-couvre-joint.

Les plaques et revêtement de sols sont extrudés par filières plates ou rarement par filières circulaires.

Le gainage des fils ou des câbles électriques représente un important débouché pour le polyéthylène [5].

a) Extrusion-gonflage

L'épaisseur du film de polyéthylène varie de 10 μm minimum à 250 μm maximum. En moyenne 30 μm . Suivant l'application le PE utilisé traité anti-UV en agriculture ou transparent pour des sacs et serres...

Les films thermo-rétractables épousent parfaitement la forme de l'objet à emballer ou à conditionner. Les films étirés utilisés dans le domaine d'allongement de 5 % à 20 % pour maintenir des charges en palette de manutention [5].

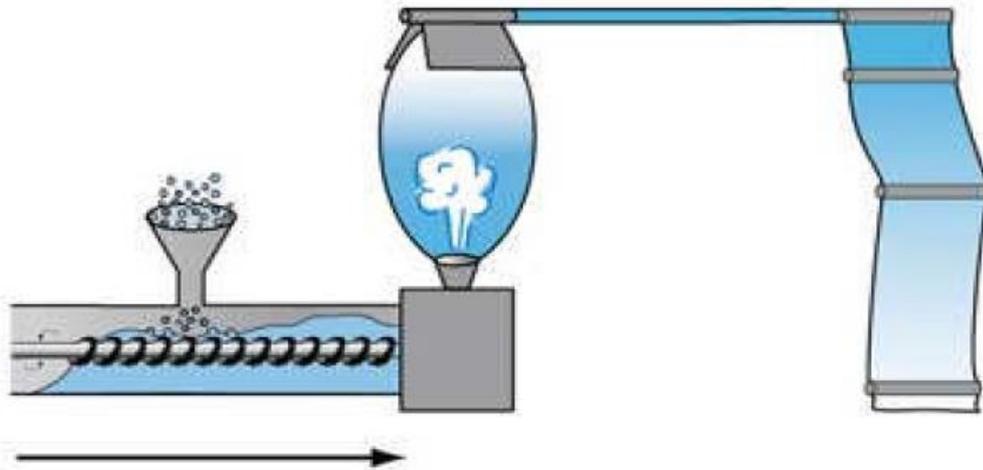


Figure II.8 : Principe de procédé d'extrusion-gonflage [13].

b) Extrusion-soufflage

Les polyoléfines sont largement utilisées dans la réalisation de corps creux : bouteilles, bidons, réservoirs... (réservoirs d'essence à une capacité élevée pour voiture.

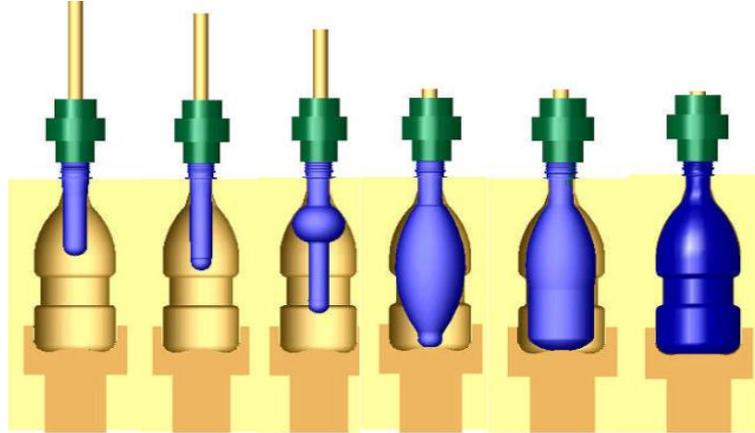


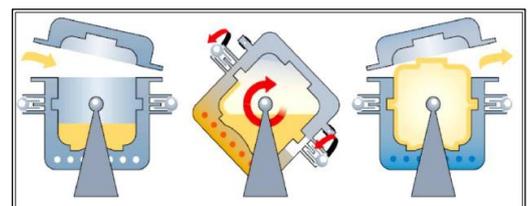
Figure II.9 : Obtention des bouteilles par principe de procédé d'extrusion soufflage [9].

II-3-3. Moulage

A) Moulage par rotation

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

A partir de poudre de polyéthylène (granulométrie = 250 µm) on peut obtenir de grands récipients de forme complexes. L'épaisseur des pièces peut aller jusqu'à 30 mm (par exemple : pièces d'automobile, réservoirs, fosses, cuves...) [5.9].



La différente phase d'obtention de pièce par moulage par rotation.

Figure II.10 : Machine de molage par rotation de deux axes perpendéculaire [5.9].



Figure II.11 : Objets mis en œuvre par moulage par rotation [5.9].

B) Moulage par injection

La plage de températures d'injection du polyéthylène est assez élevée (160 à 300 °C) pour la fabrication des pièces simples. Un séchage préalable des granulés est toujours souhaitable, afin d'éliminer leur humidité de surface [5].

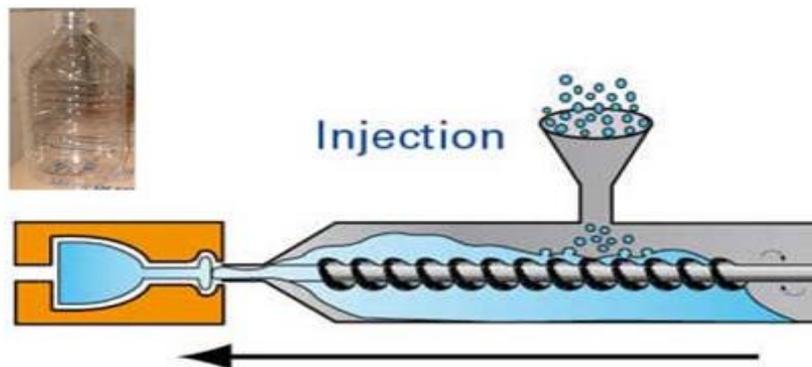


Figure II.12 : Procédé de moulage par injection [13].



Figure II.13 : Fabrication des bouteilles par machine de moulage [13].

C) Moulage par compression

Cette technique s'applique aux polymères thermoplastiques ou thermodurcissables. Le polymère ou l'ensemble « résine-durcisseur... » est chauffé et pressé entre deux matrices (figure II-14). Ce procédé est bien adapté aux plastiques thermodurcissable ou encore aux composites (comme les garnitures intérieures des portes des véhicules).

La durée de la mise en œuvre est très faible (quelques minutes) et la pression mise en jeu est plus petite que pour le moulage par injection, d'où un prix de revient moindre.

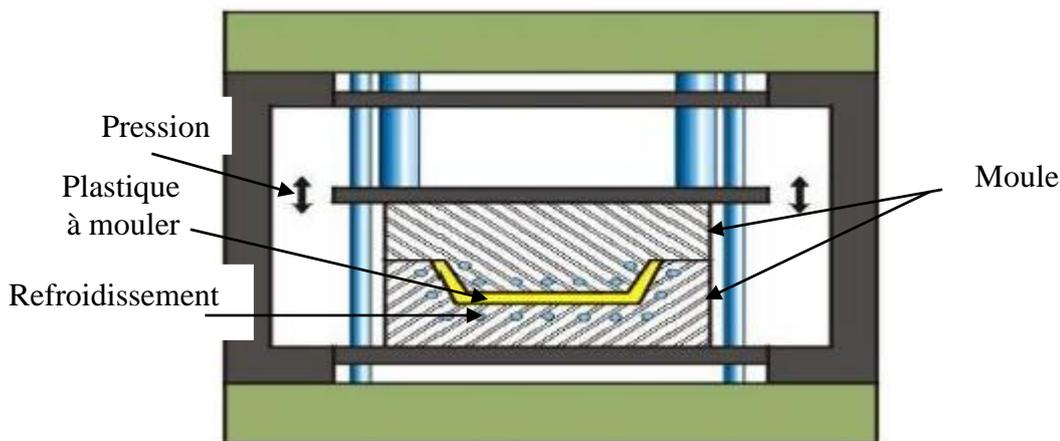


Figure II.14 : Moulage par compression [9].

II.3.4. L'enduction

Le polyéthylène est utilisé pour imperméabiliser divers supports (sac à engrais, emballages de meubles, film, cartonnage de produit alimentaire liquide...).

Le PE de bonne étirabilité, bonne stabilité thermique, sans odeur, est employé sur des papiers kraft, cartons, cartons ondulés, cellophane, feuille d'aluminium, toile de jute [5].

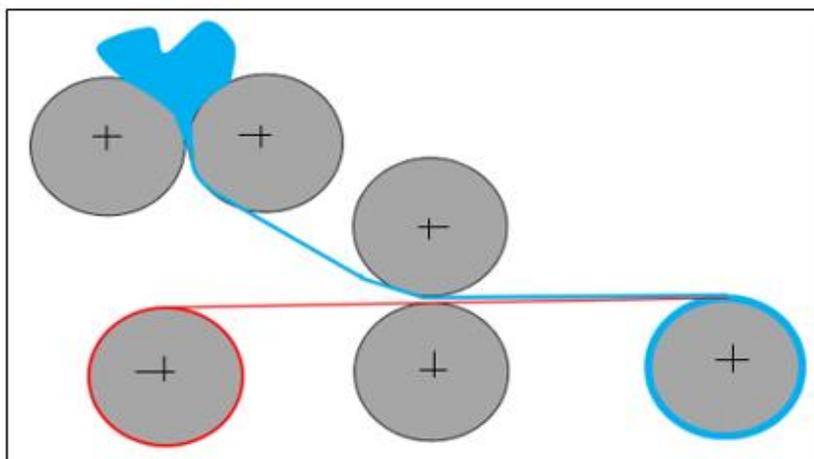


Figure II.15 : Procédé de d'enduction de PE [13].

II.3.5. Le thermoformage

Le thermoformage consiste à chauffer une feuille de polymère ou une plaque, afin de lui permettre de se déformer dans un moule dont elle épouse la forme à l'aide d'une différence de pression entre les deux faces. Cette mise en œuvre est parfois assistée par un piston. Lors d'un thermoformage par inspiration, la pression atmosphérique plaque contre un moule, une feuille ramollie par chauffage, lorsque le vide est fait entre le moule et la feuille (figure II.16) [1].



Figure II.16 : Objets mis en œuvre par thermoformage [9].

II.4. Emploi des polyéthylènes

L'utilisation de PEHD est appliquée dans plusieurs domaines, on donne ici des exemples pour quelques applications :

- **Agriculture** : film, filet de pêche, pipe d'irrigation, cageots.
- **Industrie** : cosmétiques, alimentaire (bidons d'huile), produits d'entretien.
- **Emballage** : pipe gaz naturel et eaux, pièces techniques et automobiles, conteneurs.

Une production mondiale de PEHD pour quelques pays, en 2003 présenté dans le tableau II.1 en milliers de tonnes :

Tableau II.1 : Production de polyéthylène à haute densité (PEHD en 2003, de quelques pays (en milliers de tonnes) [8].

Pays	PEHD
Etats-Unis	7976
Europe	4845
Japon	1170
France	505

➤ Production

En Algérie, l'usine qui produit ce polymère se trouve dans la wilaya de Skikda ; c'est la société POLYMED (Société Méditerranéenne des Polymères) dans la zone industrielle.

SONATRACH ; produit le PEHD suivant le procédé PHILIPS, d'une densité comprise entre 0,94 et 0,965 g/cm³.

Sa production est de 130.000 Tonne/ An, d'où 54% est exportée (figure II.17).

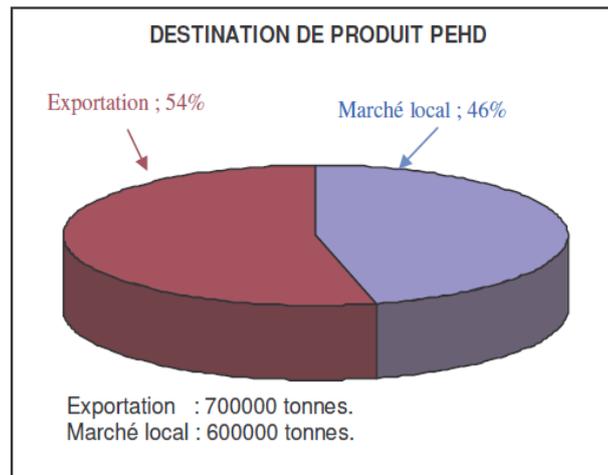


Figure II.17 : Destination de production de polyéthylène à haute densité PEHD (Source POLYMED)

II.4.1. Fin de vie des polyéthylènes

Les polymères thermoplastiques sont indispensables dans la vie quotidienne, leurs applications sont énormes dans plusieurs domaines et des différents secteurs, la durée d'utilisation d'un objet en plastique ordinaire avant et après usage est très courte par rapport à la durée de vie du matériau de cet objet après usage ou son endommagement, vu sa grande résistance aux agents atmosphériques sa dégradation très difficile dans la nature dure des siècles. Les déchets des plastiques envahie la planète, des solutions viennent en aide :

- ✓ La réutilisation des objets récupérés afin de réduire la consommation.
- ✓ Le recyclage diminue considérablement les déchets en plastique et rebut dans la nature
- ✓ Rendre le plastique biodégradable injectant un additif dans la matrice (amidon granulaires et amidon de pomme de terre...) afin qu'il soit dégradé naturellement dans un temps plus ou moins acceptable.

II.4.2. Recyclage des plastiques

Les thermoplastiques se distinguent par leurs propriétés de recyclage. Ils ont la possibilité de conserver leurs propriétés plastiques contrairement aux thermodurcissables et les élastomères.

La figure II.18 signifie que les matériaux concernés à la propriété de recyclage, ce signe est appelé sigle Ruban de Möbius [4].

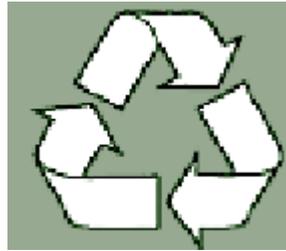


Figure II.18 : Signe de propriété recyclage [15].

Ces flèches signifient :

La première : symbolise la collecte des matériaux usés.

La seconde : la réutilisation des produits usagés tant qu'ils sont en bonne état.

La troisième : indique le besoin davantage du consommateur en produits plastique [15].

On trouve généralement un nombre entre ces trois flèches désigne le nom du plastique (figure II.19).



Figure II.19 : Sigle Ruban de Möbius pour quelques polymères [14].

Ce système de codage peut être utilisé pour identifier les plastiques lorsqu'ils sont triés manuellement.

Le recyclage des plastiques est un moyen de protection de l'environnement, ceci par la réduction de déchets. Etant donné que le plastique est un dérivé du pétrole la réduction du plastique et ses déchets représentent un intérêt environnemental et économique, sachant que le recyclage d'une tonne de plastique équivaut à une économie de 700 Kg de pétrole brut.

Les produits fabriqués à base de plastiques recyclés couvrent plusieurs domaines : des tuyaux de drainage, des cassettes audio et vidéo, des casques de vélo, il existe même des ordinateurs en plastique recyclé, c'est le défi qu'a relevé la firme IBM [14].

II.5. Avantages et inconvénients des polyéthylènes [10]

a) Avantage

Utilisé pour la production des cuves est une matière première recyclable à 100%.

- **Solidité, résistance aux chocs et à l'abrasion**

Les propriétés mécaniques garantissent robustesse et inaltérabilité, il est employé pour la fabrication des gilets pare-balles, coques de bateau, par exemple. Il bénéficie également d'un faible coefficient de friction.

- **Inertie chimique et Non toxique pour usages alimentaire.**

Le polyéthylène est garanti atoxique, il peut ainsi être employé pour usages alimentaires.

- **Résistant à la corrosion et à l'oxydation...**

Employé pour la production de cuves, il garantit une fiabilité maximum face aux problèmes de corrosion et d'oxydation. Il empêche la formation d'algues et peut être traitées avec des agents anti-UV.

- **Adaptabilité**

Il est possible de produire des pièces de toutes tailles et contenance ; ses propriétés mécaniques permettent de le manipuler / façonner aisément : perçage métalliques, accessoires, raccords, personnalisations...

- **Sécurité**

Légers et résistants, les produits en polyéthylène sont faciles à manipuler et réduisent les risques sur les chantiers par exemple, comparé à d'autres matériaux.

- **Isolation électrique.**

- **Respect de l'environnement**

Le polyéthylène linéaire à haute densité est abondamment disponible, et 100% recyclable. De nouvelles avancées technologiques permettent de l'obtenir à partir de ressources non fossiles telles que la canne à sucre.

b) Inconvénients

- Sensibilité aux UV en présence d'oxygène.
- Sensibilité à la fissure sous contrainte.
- Sensibilité à la déformation sous contrainte.
- Mauvaise tenue à la chaleur.
- Collage important...

Chapitre III :
Comportement mécanique du
polyéthylène

CHAPITRE III : Comportement mécanique du polyéthylène**III.1. Principe de l'essai de traction [7]**

L'essai de traction est essentiel pour la détermination des lois de comportement. En effet, c'est le seul qui procure un état de contrainte uniaxial et qui exige donc par une interprétation par le calcul en méthode inverse. En premier lieu il permet de déterminer des caractéristiques normalisées des matériaux, souvent exigée dans les cahiers des charges : limite d'élasticité, charge et allongement (ΔL) de rupture. En second lieu, on déduit la relation rationnelle entre contrainte (σ) et déformation (ϵ). En dépit de sa simplicité l'essai de traction demande quelques précautions, dans sa réalisation et dans son application (figure III.1).

La contrainte (σ) associée à la force (F) est définie par :

$$\sigma = \frac{F}{S} \dots \dots \dots (III.1)$$

Avec (S) est la section de l'éprouvette.

La déformation (ϵ) se réfère à la longueur initiale L_0 de la partie délimitée par l'extensomètre (déformation nominale).

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \dots \dots \dots (III.2)$$

$$\Delta L = L - L_0 \dots \dots \dots (III.3)$$

Avec L_0 c'est la longueur initiale utile, et L longueur utile finale.

La tangente de la pente de la partie droite du diagramme d'essai de traction à l'axe des abscisses caractérise le module de Young E .

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \dots \dots \dots (III.4)$$

E : Module d'élasticité (module de Young).

ΔL : allongement.

ϵ : déformation.

σ : contrainte normale.

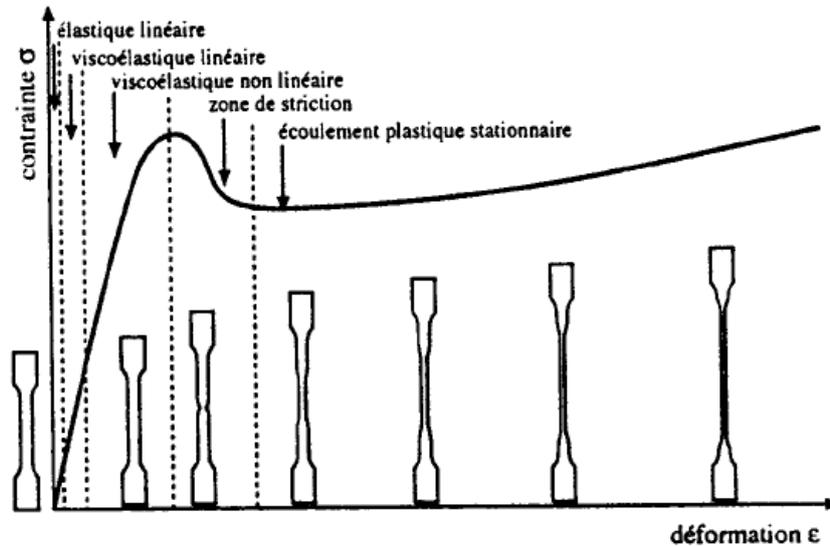


Figure III.1: Courbe de comportement contrainte-déformation lors d'un essai de traction d'un thermoplastique semi-cristallin et représentation schématique d'une éprouvette dans les différentes zones [2].

III.2. Description de l'essai de traction

III.2.1. Eprouvette

Cet essai utilise une éprouvette plate normalisée de section constante sur une longueur suffisante pour que la contrainte y soit homogène. Aux deux extrémités sont des têtes d'amarrage avec des rayons de raccordement assez grands a de réduire les concentrations de contrainte [7].

III.2.2. Amarrages

L'éprouvette est montée dans les amarrages (mors) de la machine de traction. Une extrémité est maintenue par le mors inférieur fixe et l'autre par le mors mobile tout en laissant La longueur utile L_0 destinée à l'essai symétrique par rapport au centre de l'éprouvette dans la direction de l'étirage. Celle-ci est sollicitée en traction sur une machine d'essais universelle. L'effort d'étirage uniaxial monotone appliqué sur éprouvette suivant son axe principal longitudinal à une vitesse constante, l'éprouvette a subi une déformation (allongement longitudinal et une restriction de section sur toute l'allongement) puis une rupture [7].

III.3. Endommagement

Comme le polyéthylène est un matériau semi-cristallin a une structure biphasée généralement isotrope (phase amorphe et cristallin "§ I"), son comportement mécanique global par une combinaison du comportement plastique de la phase cristalline et de comportement caoutchoutique de la phase amorphe, on l'observe à l'échelle moléculaire [1].

▪ Aux basses températures ($T < T_g$ état vitreux), ces polymères se comportent comme les polymères amorphes, au point de vue plasticité, dans la mesure où la phase amorphe est primordiale [1].

▪ Aux températures supérieures à T_g la phase amorphe est caoutchoutique : c'est la partie amorphe souple qui participe en premier temps à la déformation (jusqu'à 10 à 30 %) provoquant des écartements (ou des glissements) entre les lamelles cristallines [1].

La phase amorphe est constituée de long segment de chaîne ayant une tendance à former des pilotes et des segments plus courts reliant des lamelles cristallines. Ces derniers, tout en s'allongeant, assurent un transfert des contraintes aux lamelles cristallines et les font basculer (figure III-2) ; celles-ci ont la possibilité de se déformer plastiquement (glissement) par les mécanismes associés aux dislocations, comme dans le cas des solides cristallins [1].

Sous l'action de la contrainte appliquée, l'extension des segments moléculaires reliant les lamelles et le basculement de ces lamelles déclenchent dans celles-ci des glissements appliqués, par cisaillement sur les plans intermoléculaires, soit parallèlement, soit perpendiculairement à l'axe des chaînes [1].

Lorsque le cisaillement est important on assiste à la destruction des cristaux lamellaires par fragmentation en blocs cristallins plus petits, reliés dans la phase amorphe par des segments de chaîne macromoléculaire étirés [1].

La déformation plastique modifie de façon importante la morphologie polymère. A partir d'une structure lamellaire, une structure fibrillaire très anisotrope se forme, avec alignement des blocs cristallins dans la direction de l'étirage (figure III- 2 d) [1].

III.3.1. Types d'endommagements

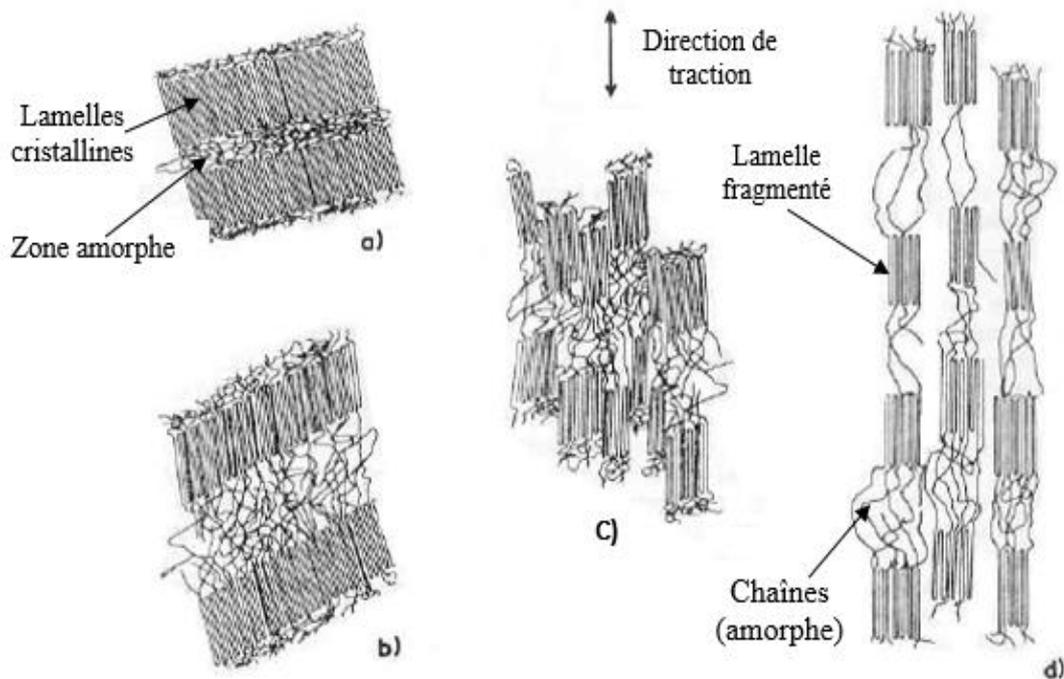
✓ Craquelure

Les craquelures apparaissent principalement dans les polymères thermoplastiques amorphes et dans les thermoplastiques semi-cristallins, sollicités en traction. Ces craquelures sont la conséquence d'un phénomène de cavitation propre aux polymères ; elles ont une forme lenticulaire dont les dimensions latérales se situent entre 10 μm et quelques millimètres, et l'épaisseur varie entre 1 et 10 μm . Lorsqu'elles sont observées au microscope électronique, elles révèlent un réseau de vides et de fibrilles étirées reliant les deux faces de la craquelure (figure III-3). Les fibrilles ensemble de macromolécules orientées ont un diamètre de l'ordre de 10 nm. La présence de fibrilles permet à la craquelure de soutenir une charge dans la direction perpendiculaire à ses faces. L'évolution de la craquelure est alors très limitée par le solide environnant qui n'est pas déformé. Le taux d'allongement est très élevé : il est de l'ordre de 100 à 500 %. Cela ressemble à un étirage localisé à l'intérieur du polymère. A cet

effet la craquelure peut donner naissance d'une fissure en son milieu et rupture de fibrilles, cette zone devient blanche suite à la diffusion de lumière [1].

Les propriétés mécaniques sont peu affectées par la taille des lamelles cristallines. Durant la propagation de la striction, la structure des cristallins sont modifiés deviennent une structure fibrillaire [12].

Comme le montre la partie I de la Figure III.3, la séparation des lamelles cristallines causée par l'application d'une contrainte présentant une composante normale favorise la création de microvides dans la partie interlamellaire amorphe à l'origine de la formation des craquelures [11].



- a) Etat initial : lamelles cristallines et zone amorphe.
- b) Ecartement et rotation des lamelles cristallines pour les rendre parallèles à l'axe de traction et extension des chaînes.
- c) Fragmentation des lamelles cristallines en blocs plus petits.
- d) Les lamelles fragmentées et les chaînes amorphes s'alignent parallèlement à l'axe de traction ; il se forme une structure fibrillaire.

Figure III.2 : Déformation du polyéthylène en traction uniaxial [1].

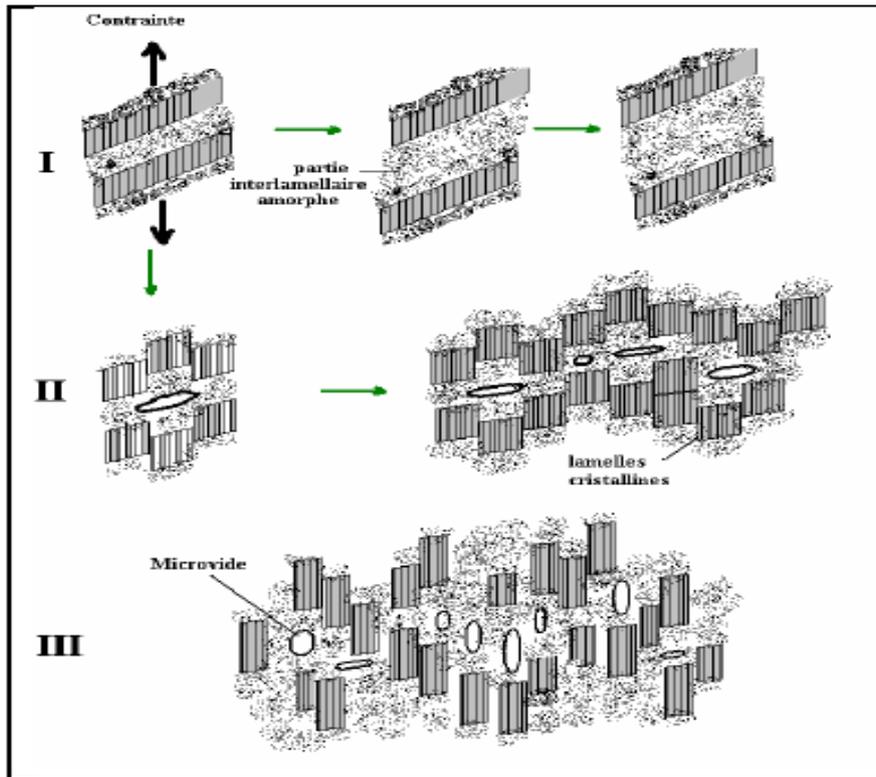


Figure III.3 : Etapes de formations des craquelures pour un polymère semi cristallin [11].

✓ **Rupture :**

La fissure sous l'action de l'effort de traction se propage, souvent avec une zone de craquelure à son extrémité, jusqu'à la rupture finale. Dans ce cas, l'étirage est fortement réduit ou complètement absent, fini par la ruine du matériau [1].

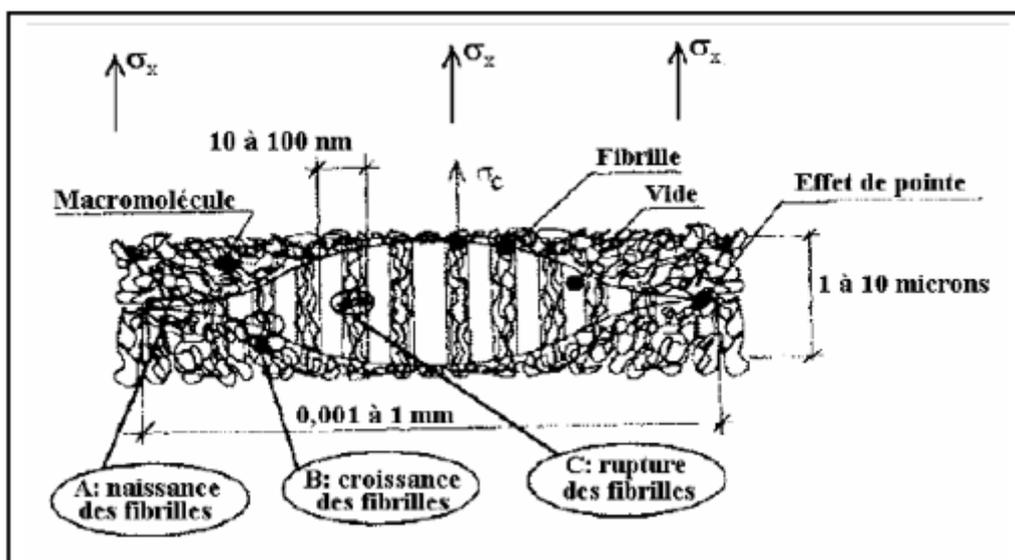


Figure III.4 : Microstructure d'une craquelure [11].

Chapitre IV

Etude expérimental

Chapitre IV : Etude expérimentale

IV.1. Matériaux étudiés

IV.1.1. Caractéristiques des matériaux

A) Caractéristiques du PEHD 5502

Les caractéristiques du PEHD 5502 sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.1: Les caractéristiques du PEHD 5502 vierge.

Grade	Indice de fluidité (poudre/granulé)	La densité
5502	0,55-0,70 /0,27-0,43	0,9530-0,9580

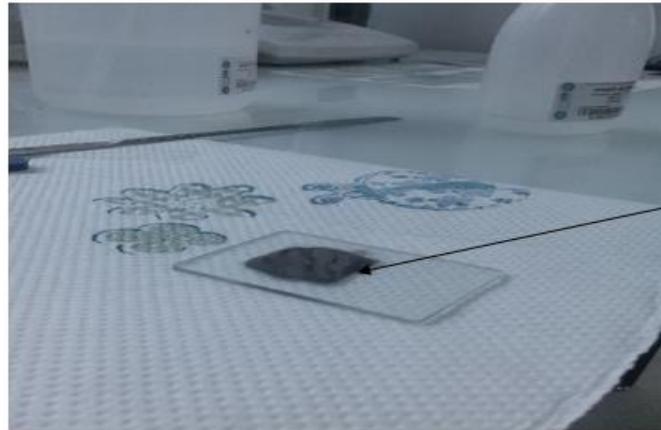
B) Caractéristiques de la poudre de fer pur

La caractérisation de la poudre de fer a été réalisée sur une machine à balayage par rayon X figure IV.1.



Figure IV.1 : Machine des R X ULTIMAT IV Rigaku.

Une quantité suffisante de poudre de fer pure est mise sur un support de caractérisation puis pressée pour qu'elle soit bien plate avec une épaisseur uniforme figure IV.2 (1, 2, 3). Le support est ensuite introduit dans la machine qui permet de caractériser l'échantillon.



Poudre de fer pur

(1)



(2)



(3)

Figure IV.2 (1, 2 &3) : Préparation d'échantillon en poudre de fer pur.

Les résultats sont répertoriés sur le tableau IV.2

Tableau IV.2 : Caractéristiques de poudre métallique (fer pur)

Composant	C%	Si %	Mn%	P%	S%	Fe%
concentration (%)	0,0126	0,13	0,30	0,0076	0,0106	98,8

IV.1.2. Modes d'obtentions du matériau (PEHD 5502 vierge)

Des granulés de PEHD 5502 sont mis dans un moule carré en acier inoxydable de 150x150x2 mm afin de réaliser des plaques. Le moule est mis entre deux feuilles de cellophane dont la fonction est d'éviter le collage du PEHD fondu aux bas et le haut du moule de la presse d'une part, d'assurer l'uniformité de l'épaisseur de la plaque et l'obtention d'un bon état de surface d'autre part. (figure IV.3)



Granulé de PEHD 5502



Moule



PEHD 5502 moulé



Plaque en PEHD 5502 vierge

Figure IV.3 : Mode d'obtention de plaque en PEHD vierge.

Le produit est pressé par une presse hydraulique à chaud (figure IV.4), dont le cycle de préparation est effectué selon la norme ASTM D-683.72.



Figure IV.4 : Presse hydraulique

Le temps du cycle de préparation de la presse est de 18 minutes et s'effectue en cinq phases cité sur le tableau IV.3.

Tableau IV.3: Conditions de travail de la presse hydraulique

La température initiale (°C)			177
Le taux de refroidissement (°C /min)			15
Phase	Temps (min)	Température (°C)	Pression (bar)
1	1	177	10
2	3	177	50
3	7	80	100
4	5	40	50
5	2	30	1

IV.1.3. Modes d’obtentions du matériau (PEHD 5502/Fe15%)

Le matériau étudié est constitué d’une matrice en polyéthylène haute densité (PEHD 5502) de densité qui se situe entre 935 et 965 kg/m³, renforcé par la poudre métallique. La mise en œuvre de ce matériau est effectuée, dans un premier temps, où seul le PEHD est malaxé (pendant environ 2 min) entre deux rouleaux mélangeurs (figure IV.5). La matière à température de chauffage est de 175° C est versée entre ces deux cylindres écarté de 1,5 mm. Dans un second temps, 15% du poids du PEHD de poudre de fer pur est étalée entre les deux cylindres de malaxeur en mouvement relatif.



Figure IV.5 : Rouleaux mélangeurs

Le mélange de (PEHD/poudre de fer) est obtenu sous forme de pâte découpée en petits morceaux est mis dans un moule carré en acier inoxydable de 150x150x2 mm afin de réaliser des plaques comme pour l’obtention des plaques en PEHD vierge réalisées ci-dessus.

IV.2. Eprouvettes

Dans les deux cas de figure (PEHD vierge et PEHD/Fe). Les épreuves sont obtenues en découpant la plaque réalisée, par une poinçonneuse (figure IV.6).

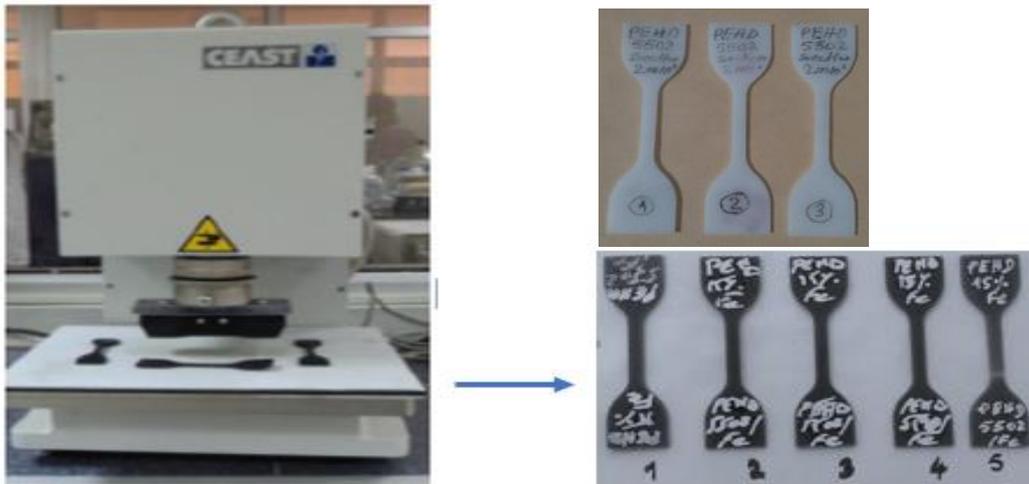


Figure IV.6 : Presse pneumatique à découper, épreuves en PEHD vierge Et en PEHD/Poudre de fer pur.

Trois épreuves en PEHD vierge et Cinq épreuves en PEHD/Fe ont été découpées suivant la norme ASTM D638 (figure IV-7), sur cette dernière leurs caractéristiques géométriques.

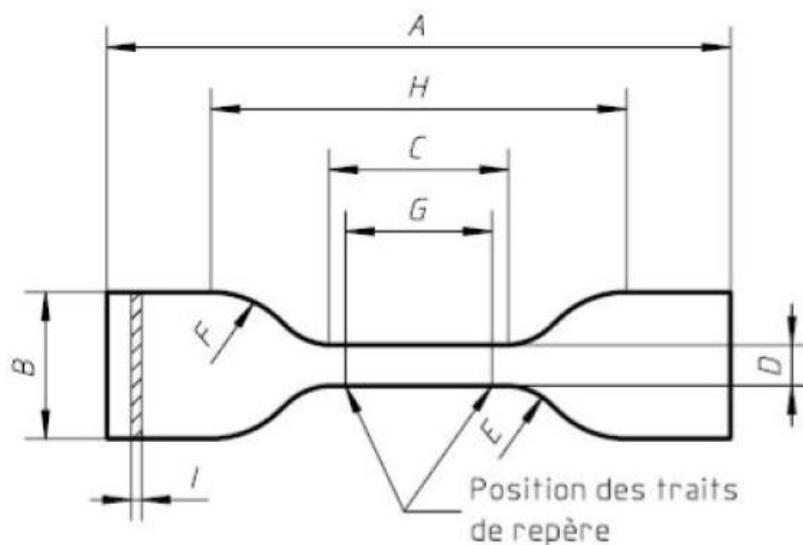


Figure IV.7 : Géométrie de l'épreuve selon la norme ASTM D638

Caractéristiques géométriques de l'éprouvette :

A :	Longueur totale.	115 ± 1 mm
B :	Largeur aux extrémités.	25 ± 1 mm
C :	Longueur de la partie étroite parallèle.	50 ± 0.5
D :	Largeur de la partie étroite.	$6 \pm 0,4$ mm
E :	Petit rayon.	14 ± 1 mm
F :	Grand rayon.	25 ± 2 m
G :	Distance entre les traits de repère.	33 ± 2 mm
H :	Longueur de référence.	64 ± 1 mm
I :	Epaisseur de l'éprouvette.	2 ± 0.4 mm

IV.3. Banc d'essai et conditions d'essai

Les essais sont réalisés sur une machine de traction de type MTS Criterion Modèle 43.504 (figure IV.8), dotée d'un capteur de force et pilotée par un ordinateur, possédant des mâchoires de type « mécanique en coin », conçue de façon à faciliter le chargement de l'échantillon. La machine est pilotée par ordinateur utilisant le logiciel MTS TestSuite™ assurant le traitement des valeurs mesurées et le contrôle du déroulement des essais. La vitesse de déplacement est de 2 mm/min.

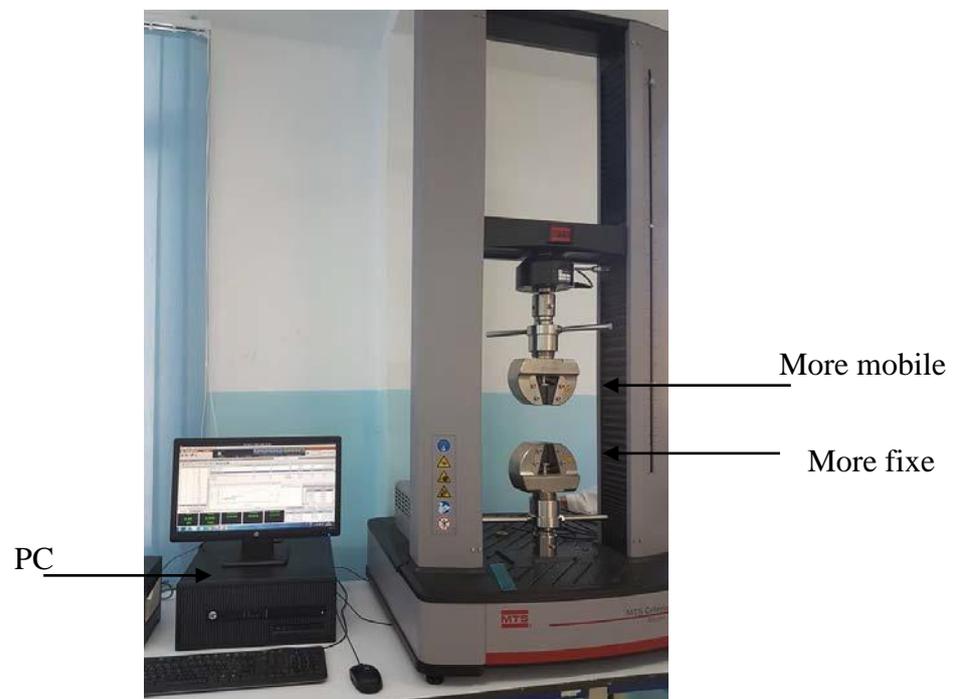


Figure IV.8 : Machine d'essais de traction type MTS Criterion modèle 43.504

IV.4. Déroulement de l'essai

Sous une température ambiante de 22 °C et à la pression atmosphérique. Les conditions suivantes sont nécessaires pour la réalisation de l'essai :

- Placer l'éprouvette entre les mores de la machine à une distance entre mores bien définie (figure IV.9) à « H ».
- Introduire les paramètres propres aux éprouvettes longueurs entre mores (H=64 mm), épaisseur de l'éprouvette (I = 2 mm) et la vitesse d'essai dans le PC de pilotage.
- Initialisation de la machine, démarrage de l'essai

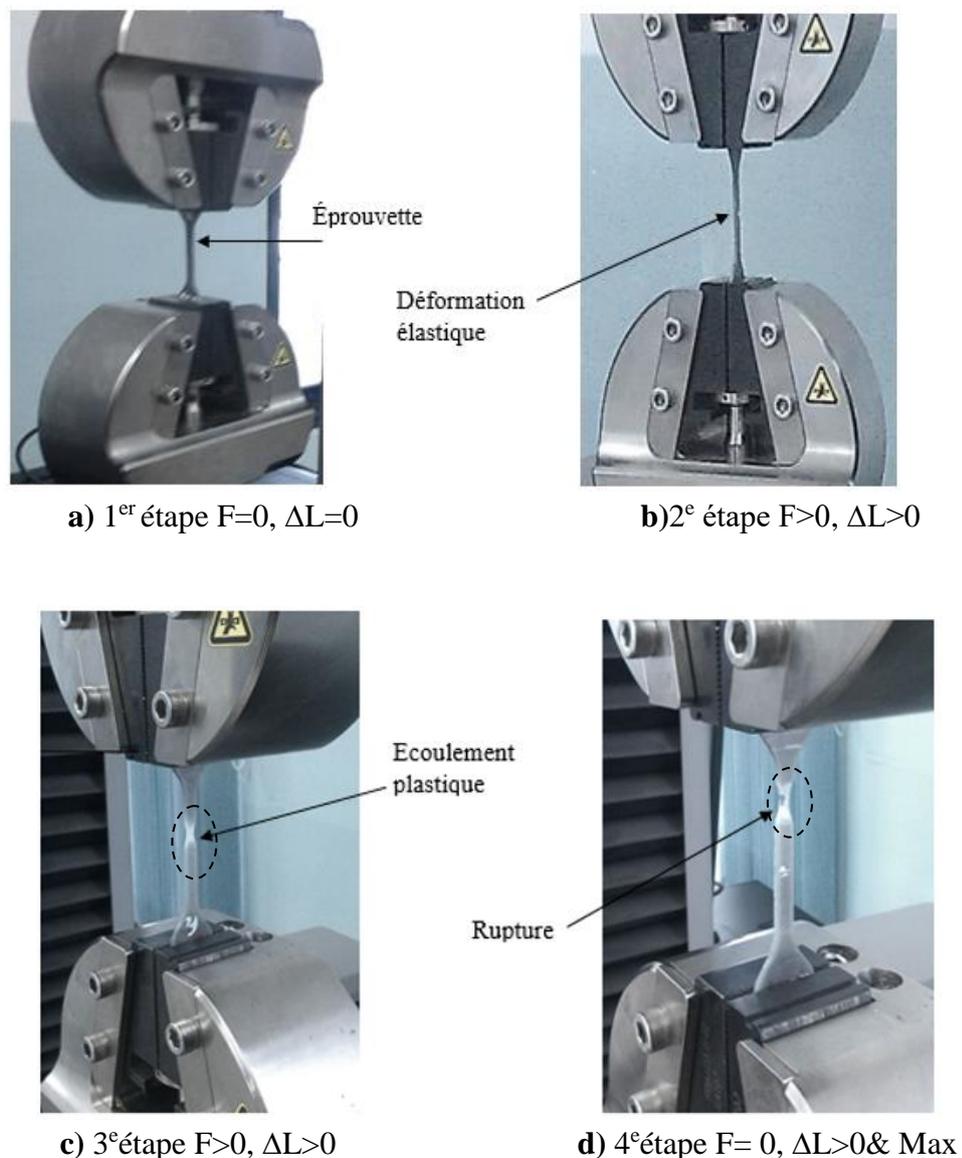


Figure IV.9 : Différentes étapes de l'essai sur éprouvette en PEHD/Poudre de fer pur.

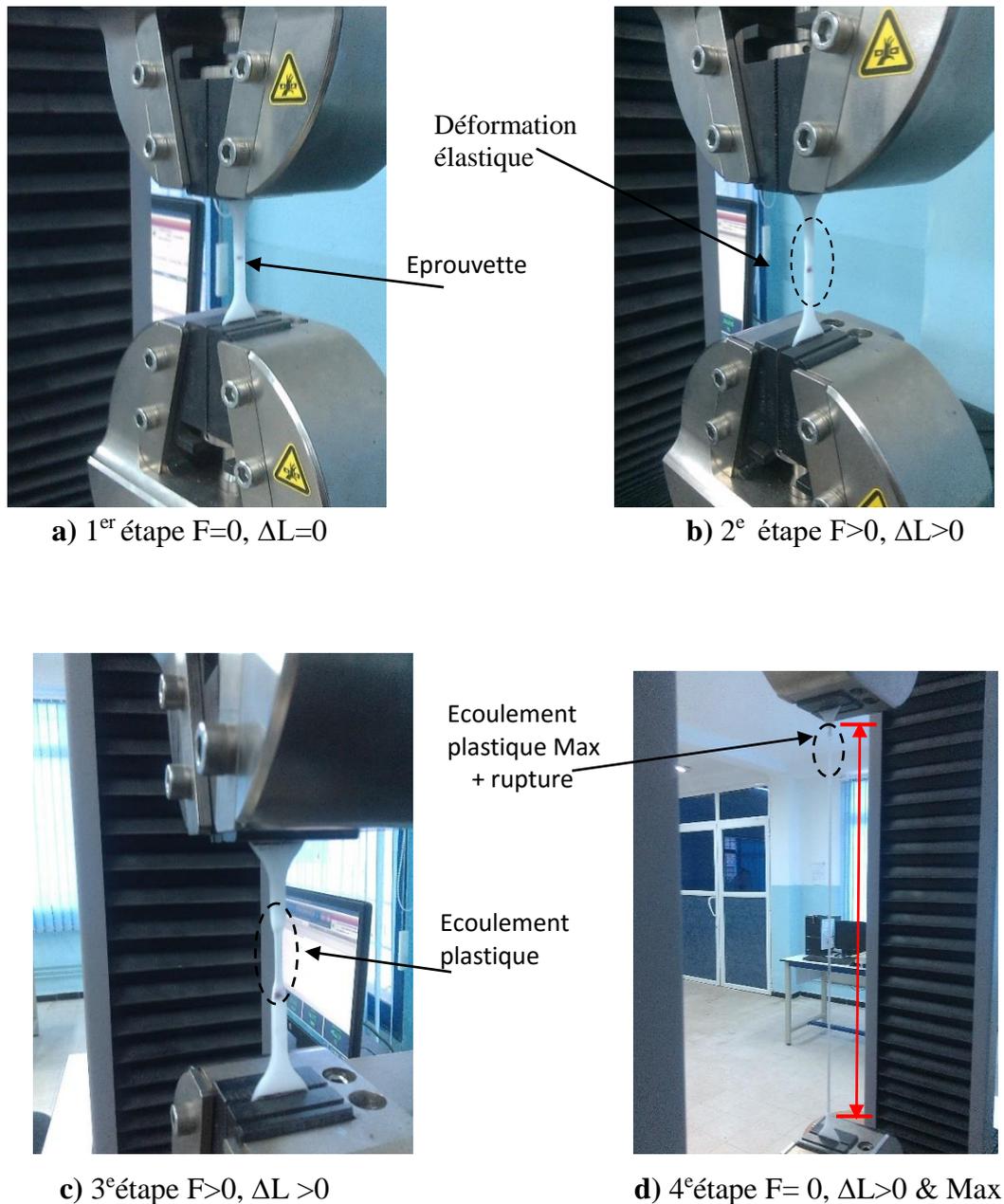


Figure IV.10 : Différentes étapes de l’essai sur éprouvette en PEHD vierge.

IV.5. Interprétation des résultats

Trois essais au moins pour le (PEHD vierge) et cinq essais pour le (PEHD/poudre de fer) ont été réalisés. La figure IV.11 montre l’évolution de la contrainte en fonction de la déformation du PEHD vierge. La figure IV.12 illustre la courbe moyenne obtenue.

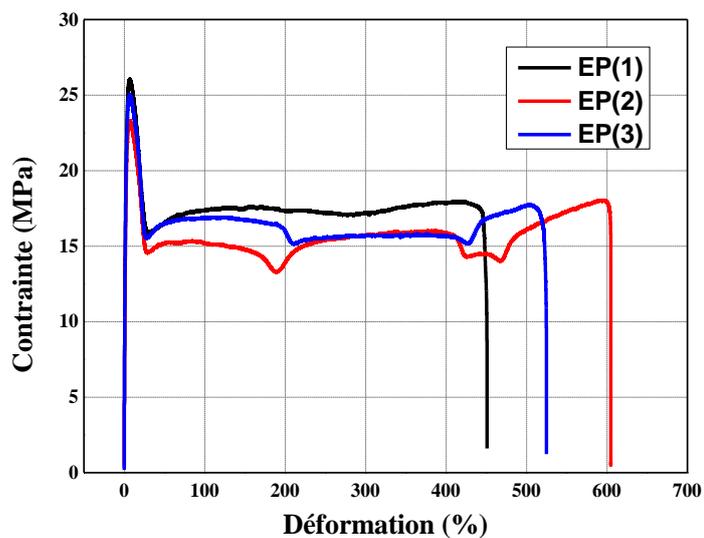


Figure IV.11 : Evolution de la contrainte en fonction des déformations PEHD5502 vierge.

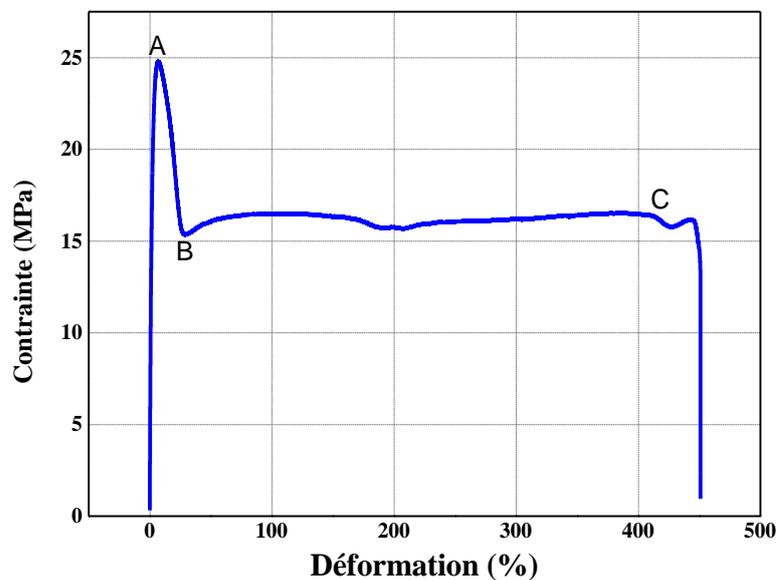


Figure IV.12 : Courbe moyenne de traction (contrainte- déformation) PEHD 5502vierge.

Tableau IV.4 : Résultats de l'exécution d'essai (éprouvettes en PEHD 5502 vierge)

Eprouvette	F_{max} (kN)	F_{max moy} (kN)	σ_{Max} (MPa)	σ_{max moy} (MPa)	E (MPa)	E_{moy} (MPa)
1	0.312	0.297	26.034	24.771	951.285	910.122
2	0.280		23.281		851.891	
3	0.300		25.00		927.109	

A partir de cette courbe moyenne figure IV.12, on peut décrire les différentes phases de déformations :

- Dans la première phase (0 à A), il s'agit de la déformation élastique réversible du matériau due à la phase amorphe, du fait que le module de cette phase est beaucoup plus faible que celui de phase cristalline. La courbe initialement linéaire, fait apparaître une certaine non linéarité juste avant d'atteindre la contrainte maximale, par suite des effets viscoélastiques.
- Dans une deuxième phase point A, quand la contrainte atteint son maximum, une striction, qui correspond à une déformation hétérogène du matériau, s'amorce sur un défaut au niveau de l'éprouvette (des défauts structuraux tels que des dislocations, des structures en bloc, les frontières inter-cristallines dans le cristal, des structures globulaires ou fibrillaires ou des couches amorphes dans les polymères peuvent tous conduire à une distribution non uniforme de la contrainte).
- La troisième phase entre les points A et B, correspondant à la diminution de la contrainte, la striction se forme jusqu'à stabilisation.
- Dans une quatrième phase du point B au point C, la striction se propage le long de l'échantillon jusqu'au taux naturel de déformation.
- Au-delà de la quatrième phase point C, la déformation redevient homogène grâce à un durcissement structural jusqu'à rupture.

Les figures IV.13 et IV.14 montrent successivement l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation et la courbe moyenne obtenue en traction du PEHD/poudre de fer. Les caractéristiques obtenues pour les cinq essais sont représentées au tableau IV.5.

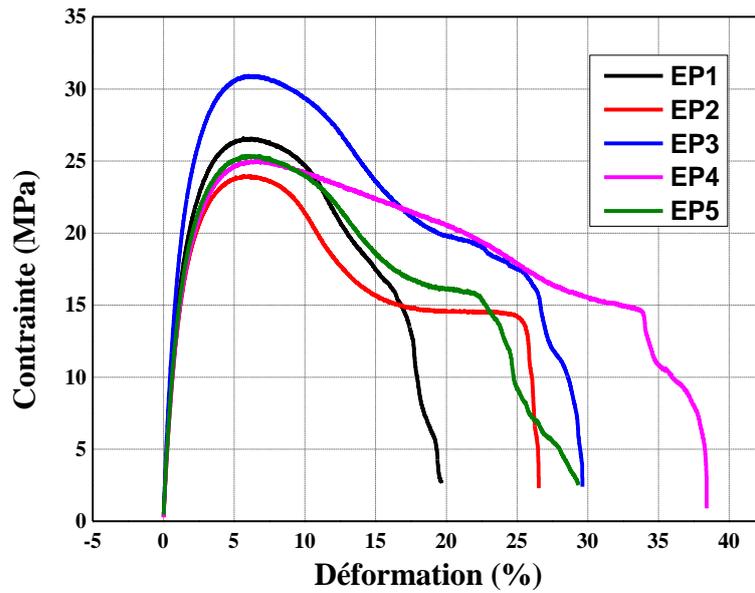


Figure IV-13 : Evolution de la contrainte en fonction de la déformation
PEHD 5502/ Poudre de fer pur.

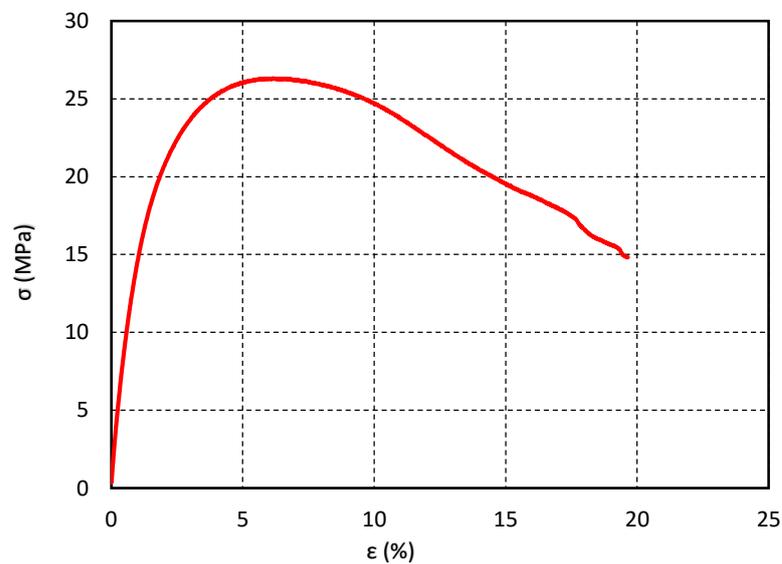


Figure IV-14 : Courbe moyenne de traction (contrainte- déformation)
PEHD 5502/Poudre fer pur.

Tableau IV.5 : Résultats de l'exécution d'essai (éprouvettes en PEHD 5502 chargé en poudre de fer pur)

Eprouvette	F_{max} (kN)	F_{moy} (kN)	σ (MPa)	σ_{moy} (MPa)	E (MPa)	E_{moy} (MPa)
1	0.329	0.326	26.60	26.366	1082.083	1076.053
2	0.380		23.96		1011.566	
3	0.370		30.91		1289.18	
4	0.278		25.02		1010.897	
5	0.277		25.34		986.541	

De l'analyse des résultats (comparaison des courbes moyennes figure IV.15), on remarque que l'incorporation d'un petit pourcentage de poudre de fer renforce la matrice de manière significative. Ceci s'explique par le fait que l'incorporation de la poudre de fer renforçant le matériau provoque une augmentation du module de Young, de la contrainte à la rupture et de la limite élastique d'une part et une légère diminution de la déformation à la limite élastique.

Ce comportement peut se décomposer en 3 phases principales, à savoir :

- La première phase correspond à une augmentation linéaire de la contrainte avec la déformation ;
- La deuxième phase de comportement non linéaire, dans laquelle la contrainte maximale est atteinte ;
- La troisième et dernière phase où l'on observe une diminution de la contrainte jusqu'à la rupture totale de l'éprouvette

Dans ce cas de structure à 15% de poudre de fer pur, le comportement est caractérisé en plus des trois phases citées ci-dessus, par une diminution considérable du palier d'écoulement plastique.

L'analyse des résultats obtenus (tableau IV.5) met en évidence l'influence de la poudre de fer (pourcentage d'additif) sur le comportement statique du matériau étudié. La rigidité des deux matériaux, dans le domaine élastique, est similaire (coïncidence des courbes dans la partie linéaire). Dans la partie non linéaire (plastique) on remarque que le matériau chargé ayant un pourcentage de poudre de fer de 15% est plus rigides et sa contrainte maximale est supérieure à celle du PEHD vierge.

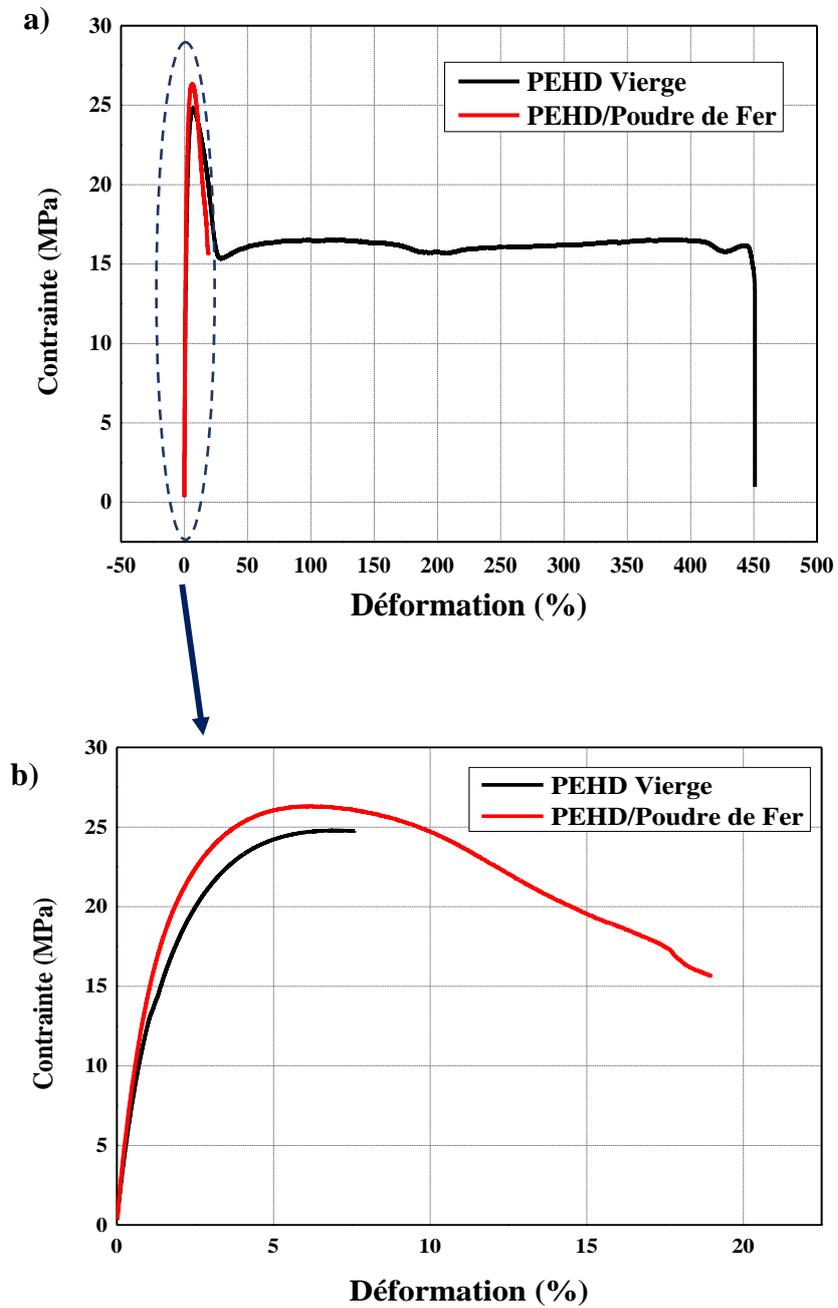


Figure IV-15 : Comparaison des courbes moyennes de traction (contrainte-déformation) PEHD 5502 vierge et PEHD 5502 chargé en poudre de fer pur.

IV.5.1. Observation des faciès et analyse endommagement***IV.5.1.1 Introduction***

L'endommagement est un phénomène dissipatif à l'origine de la création de microvides ou de microfissures dans le matériau étudié. Le mécanisme en jeu peut être la nucléation de microcavités ou la décohésion de grains constituant la matrice solide. La création de microvides réduit la surface effective du matériau considéré, dont les caractéristiques mécaniques sont diminuées.

La fissuration peut avoir des origines physiques diverses. Mécaniquement, une fissure fermée s'ouvre toujours sous une sollicitation de type tension. Cette tension peut être provoquée par une variation de contrainte mécanique, ou de température. Par ailleurs, l'ouverture de fissures augmente le volume de l'espace poreux, ce qui transforme les modalités de transfert des fluides dans le milieu. Les transferts thermiques peuvent également être affectés, par couplage. Les modèles de joint rocheux permettent de décrire les interactions hydromécaniques entre une fissure et le continuum qui l'entoure, mais ne sont pas très appropriés pour décrire le comportement hydromécanique couplé d'un Volume Élémentaire Représentatif autour de la galerie. Les modèles de réseaux de fissures permettent de prédire les transferts de fluide interstitiel en se basant sur la modélisation des propriétés de rétention et de conductivité des réseaux poreux.

Les modèles de réseaux de fissures sont généralement complètement indépendants des problèmes de mécanique. A l'inverse, les modèles d'endommagement de la Mécanique des Milieux Continus (Continuum Damage Mechanics, CDM) ne décrivent généralement que le problème de mécanique, et sont le plus souvent formulés pour des matériaux secs. La plupart des modèles d'endommagement dédiés à des matériaux non saturés reposent sur le concept de contrainte effective de Bishop, ce qui revient à découpler partiellement le problème de mécanique de l'endommagement du problème d'interaction avec les fluides interstitiels.

Au fur et à mesure que les événements physiques se succèdent, la capacité d'un système physique à les supporter diminue et le dommage subi augmente.

Le dommage, ou le niveau d'endommagement, est un nombre qui caractérise le degré d'avancement de la dégradation qui précède une défaillance. Historiquement cette notion a été introduite lors de l'étude de la fatigue des matériaux. Les ruptures (traction, torsion, flexion...).

Une défaillance est un dysfonctionnement dont l'origine et la nature sont bien déterminés. Exemples : rupture d'une pièce en un site localisé, usure d'une région

particulière d'une surface ... Une même pièce peut avoir plusieurs défaillances. Pour un système complexe, les défaillances sont celles de chacune de ses pièces ainsi que celles associées à l'assemblage des diverses parties.

Nous verrons plus loin qu'on peut aussi définir le dommage causé par un événement : c'est la contribution de cet événement au dommage de la défaillance considérée.

IV.5.1.2. Observation des facies

L'observation macroscopique a été réalisée au centre de recherche en matériaux avancés URMA ANNABA, sur un microscope optique de type NIKON ECLIPSE LV150N avec un grossissement allant jusqu'à 500X avec port-objectifs manuels et rehausseur de colonne,



Figure IV.16 : Microscope optique
NIKON ECLIPSE LV 100 ND

Après l'essai de traction sur les cinq éprouvettes en PEHD/poudre de fer pur de l'étude et le PEHD vierge, des observations au microscope optique ont été effectuées afin d'identifier les types de rupture de ce matériau.

Pour le premier matériau, les surface de rupture sont présentées sur les figures IV.17 et IV.18. La figure IV.17 montre les surfaces de rupture successivement dans le sens longitudinal de l'échantillon ou l'on observe une mauvaise dispersion de la poudre de fer dans la matrice, mais on remarque clairement une consolidation due à la présence de grains de fer. Il apparait, dans la majorité des vues, une décohésion des grains de fer créant des lacunes favorisant la propagation des microfissures qui entraînent la rupture.

La figure IV.18 montre les faciès de rupture de l'échantillon dans le sens transversal. On remarque une partie blanchâtre qui représente l'arrachement du matériau constituant la matrice, tandis que les parties bleues représentent les fragmentations allongées. D'autre part les points noirs montrent la dispersion non homogène des grains de fer. Il est conclu que la poudre de fer dans ce cas est fortement entremêlée. Ce phénomène est responsable du comportement mécanique amélioré du matériau.

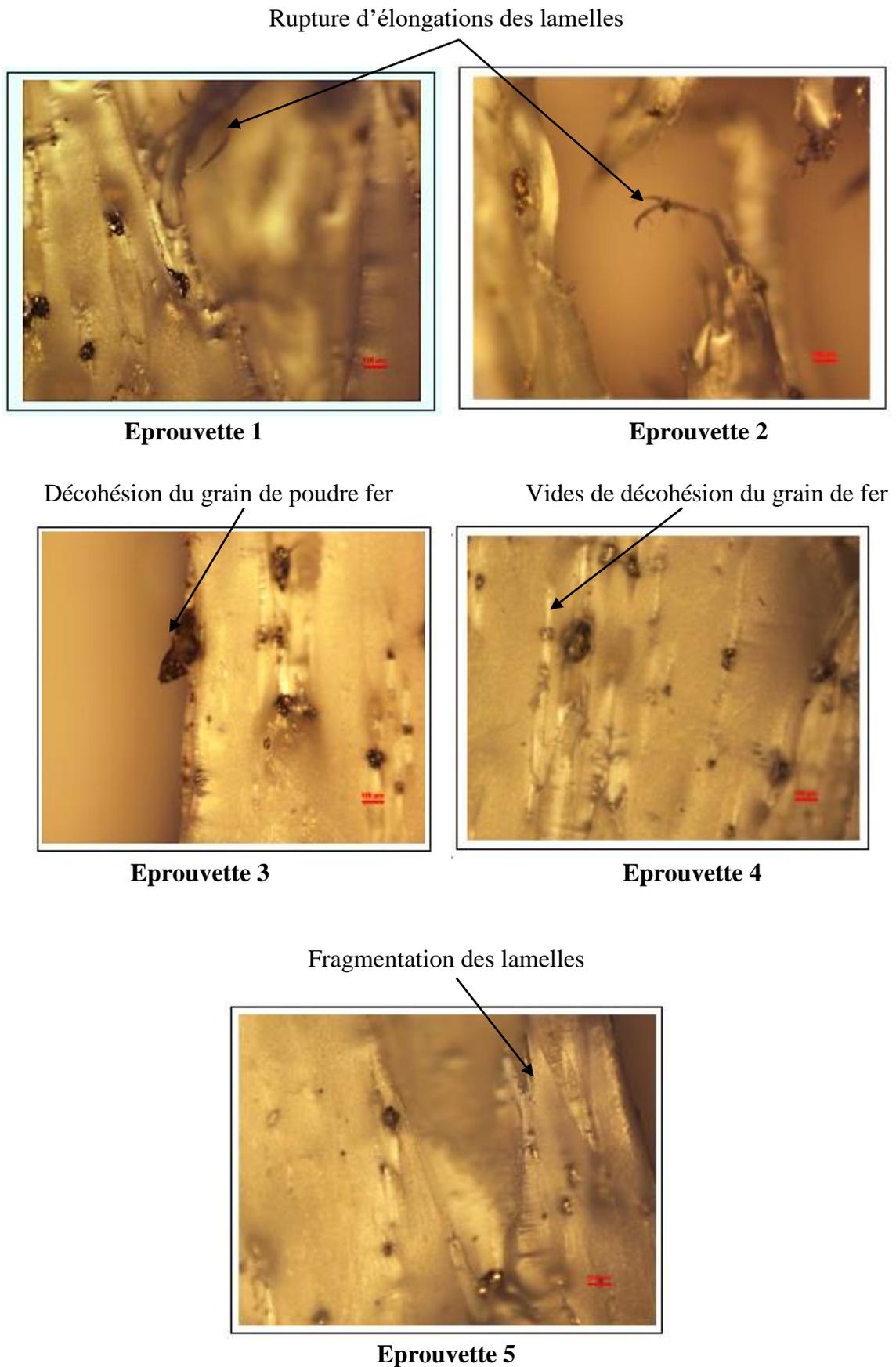


Figure IV.17 : Observation du faciès de rupture des éprouvettes en PEHD/poudre de fer pur côté face.

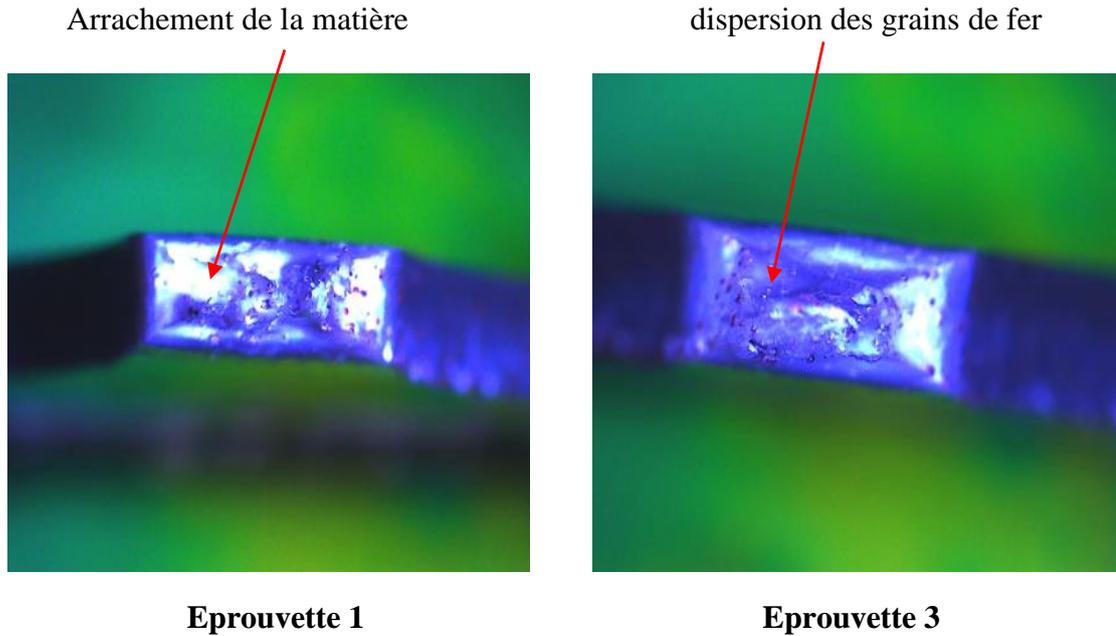


Figure IV.18 : Observation du faciès de rupture des éprouvettes en PEHD/poudre de fer pur côté frontale.

La figure IV.19 montre les surfaces de rupture successivement dans le sens longitudinal et transversal de l'échantillon. La zone blanche dans la vue transversale représente l'arrachement de la matière. A l'intérieur de cette zone une partie bleue montre la fragmentation de la matière étirée qu'on peut voir aisément sur l'observation longitudinale.

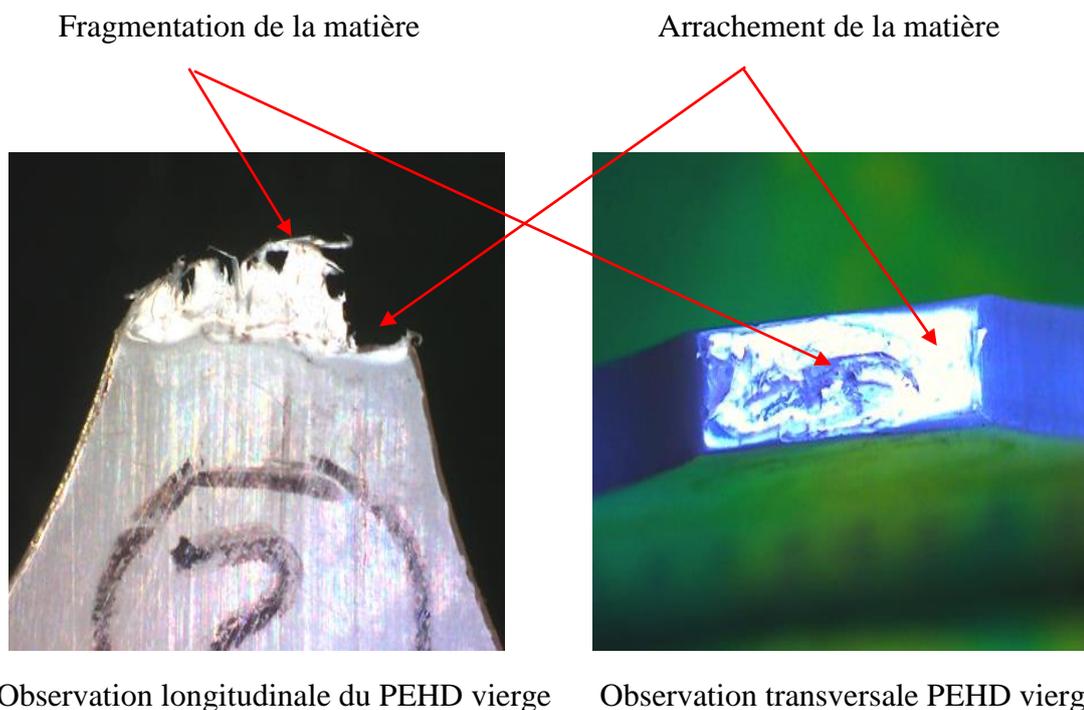


Figure IV.19 : Observation du faciès de rupture des éprouvettes en PEHD vierge.

IV.5.1.3. Conclusion

Les travaux présentés concernent l'étude expérimentale du comportement en statique de deux matériaux en PEHD vierge et PEHD/poudre de fer pur. Les matériaux en question ont été mis en œuvre au laboratoire. Ces matériaux se différencient seulement par l'incorporation de la poudre de fer pour l'un et l'absence de cette poudre pour l'autre. La connaissance des propriétés mécaniques est la première étape dans la maîtrise du comportement de ces matériaux.

Une recherche bibliographique nous a permis d'étudier le comportement en traction statique de ce type de matériau et plus particulièrement sur les modes d'endommagements. Une série d'essais statique en traction a été réalisée et les conclusions suivantes ont été tirées :

- Dans le cas de matériau chargé en poudre de fer pur testés, le comportement en traction peut se décomposer en 3 phases principales. Un comportement linéaire correspondant essentiellement au travail de la matrice thermoplastique (polyéthylène) en traction, un comportement non linéaire, pour lequel la contrainte maximale est atteinte et enfin, une diminution de la contrainte appliquée jusqu'à la rupture totale.
- Dans le cas de la structure chargée en poudre de fer pur, le comportement est caractérisé par l'absence presque totale du palier d'écoulement plastique qui a atteint une moyenne de 20 % de sa longueur de référence (H=64 mm) jusqu'à la rupture brusque contrairement au PEHD vierge présentant une déformation plastique dépassant 500 % de sa longueur de référence (H=64 mm) figure IV.20.

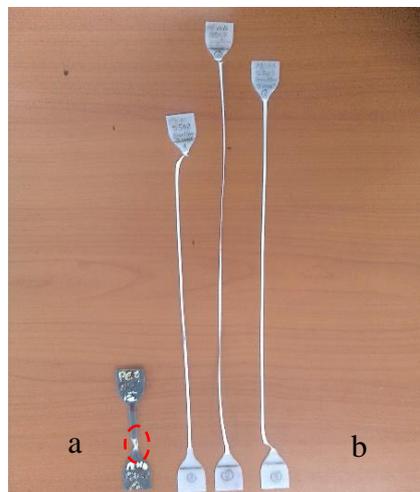


Figure IV.20 : Eprouvettes après essai (a : PEHD chargé, b : PEHD vierge).

- L'analyse des résultats obtenus nous permet de mettre en évidence l'influence du taux de poudre de fer (pourcentage d'additif) sur le comportement statique des matériaux étudiés.
- Dans la partie non linéaire (plastique) on remarque que le matériau ayant un pourcentage de poudre de fer de 15% est plus rigide et sa contrainte maximale est supérieure à celle du PEHD vierge.
- L'observation des faciès au microscope optique nous a permis de mettre en évidence la mauvaise dispersion de la poudre de fer dans la matrice. Cependant l'étude de ces faciès ont révélés que les caractéristiques du PEHD de grade 5502 ont une grande influence sur la dispersion et la taille des grains métalliques incorporées.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent l'étude expérimentale du comportement mécanique en traction statique d'un matériau en polyéthylène (PEHD 5502) chargé en poudre de fer pur. Le matériau en question a été mis en œuvre au laboratoire et est constitué d'une matrice en PEHD 5502 est une charge de 15% de son poids en poudre de fer pur. La connaissance des propriétés mécaniques et leurs comparaisons avec le PEHD 5502 vierge est la première étape dans la maîtrise du comportement de ce type de matériau.

Un premier chapitre consacré à l'étude des polymères en général, a permis de faire le point sur les connaissances de leurs structures et leurs propriétés ainsi que leurs domaines d'applications industriels. En particulier ce chapitre nous a permis de comprendre la composition chimique des polyéthylènes. Par suite une étude des différents modes de transformation des polyéthylènes a été présentée dans le second chapitre. Le comportement mécanique en général des polyéthylènes et leurs mécanismes d'endommagement ont été présentés dans le troisième chapitre.

Une série d'essais statique a été réalisé sur le PEHD vierge et chargé et les conclusions suivantes ont été tirées :

- L'analyse des résultats obtenus nous permet de mettre en évidence l'influence du taux de poudre de fer (pourcentage d'additif) sur le comportement statique du matériau étudié.
- Pour le PEHD/poudre de fer, le comportement en traction peut se décomposer en 3 phases principales. Un comportement linéaire correspondant au travail de la matrice thermoplastique (polyéthylène), un comportement non linéaire, pour lequel la contrainte maximale est atteinte et enfin, une diminution de la contrainte appliquée jusqu'à la rupture totale. Ainsi nous remarquons l'absence presque totale du palier d'écoulement plastique qui a atteint une moyenne de 20 % de sa longueur de référence (H=64 mm) jusqu'à la rupture brusque contrairement au PEHD vierge présentant une déformation plastique dépassant 500 %.
- L'addition de la poudre de fer pur a permis d'améliorer certaines caractéristiques à savoir la rigidité et la contrainte maximale atteinte.

- L'observation des faciès de rupture a permis de visualiser une mauvaise dispersion de la poudre de fer dans la matrice, mais on remarque aussi une consolidation due à la présence de grains de fer. Ce phénomène est responsable du comportement mécanique amélioré du matériau.

Le matériau étudié apporte de nouvelles propriétés :

- Mécanique
Une augmentation de la rigidité et de la résistance à la rupture, une plasticité presque nulle (négligeable par rapport à l'origine)
- Chimique
Résistance à la corrosion et à l'attaque d'acide (propriété d'origine assurée par la bonne insertion des grains d'adjuvant).
- Physique
Le matériau a gagné deux nouvelles propriétés (magnétique, électrique) grâce à l'additif (poudre de fer).

L'accomplissement de ce travail a été rendu possible grâce aux connaissances acquises au cours de l'année de master et les années d'études antérieures. Les essais au niveau du laboratoire URMA Annaba ont permis de révéler les possibilités de mise en œuvre de manière pratique ces connaissances acquises.

Référence bibliographique

REFIRENCE BIBLIOGRAPHIQU

- [1] *Physique des polymères tome I structure, fabrication, emploi & propriétés tome II*. Par P. COMBETTE et I. ERNOULT, HERMANN, éditeurs des Sciences et des Arts, PARIS France (2005).
- [2] *Matériaux polymère structure, propriétés et applications*. Par GOTTFRIED W. ERNESTINE édition française HERMES Science Publications, Paris (2000).
- [3] *Elaboration microstructure et comportement des matériaux composites à matrice*. Par JACQUES RENARD, © LAVOIZER, (2005).
- [4] M. Reyne, *Technologie des plastiques*, HERMES, Paris, (1998).
- [5] *Matières plastiques : Structures-Propriétés, Mise en œuvre Normalisation*. Par J.-P. Trotignon, J. VERDU A. DOBRACZYNSKI, M. PIPERAUD. Edition NATHN, (2006 AFNOR :2-12-425031-0).
- [6] *Matériaux composites comportement mécanique et analyse des structures*. Par J. M. BERTHELOT. *Technique & documentation*, (1999).
- [7] *Essais mécaniques et lois de comportement*. Par DOMINIQUE François, HERMES Science Europe Ltd, (2001).
- [8] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Code>
- [9] <https://www.technologuepro.com>. Procèdes de mise en forme des plastiques.
- [10] <https://www.plasticseurope.org/fr/>.
- [11] K. FRIEDRICH. *Crazes and shear bands in semi-crystalline Thermoplastics*. *Advances in polymer science*, (52-53, 225-274, 1983).
- [12] M. SCHULTZ, *microstructural aspects of failure in semicrystalline polymers*. *Polymer engineering and science*, (24(10), P. 770-785, 1984).
- [13] *Support du cours de matériaux composite, MASTER II S3*. Par Dr MENAIL Younès.
- [14] https://www.lomag-man.org/recyclage/recyclage_index.php
- [15] <http://www.chez.com/arrange/>
- [16] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Polyéthylène>.