UNIVERSITE Dr YAHYA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur

Et de la Recherche Scientifique

Université Dr. Yahia Farés de Médéa



Faculté de la Technologie
Département du Génie Mécanique
Option Ingénierie des Matériaux et des Surfaces

THEME :

L'influence de l'ajout de la charge carbonate de calcium et la matière polypropylène broyée sur les propriétés d'un produit fait en pp

Mémoire Présentées vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Présenté Par :

- *SAIDI ABIR*
- *SADOUDI ISHAK*

Directeur de thèse :Benimam Samir

Année universitaire 2019/ 2020

Dédicace

Je dédie ce travail à ma chère maman qui m'a appris à compter sur moi-même, qui m'a encouragé et m'a soutenu, que dieu la protège.

À la mémoire de mon père SAIDI MOHAMED que dieu la miséricorde

Mon mari AMIRI OUSSAMA qui est mon soutien dans ma vie et ma carrière .À mon fils inspirant OWAYSE

À mes chers frères et sœurs

Un grand merci à ma deuxième famille AMIRI et sans oublier mes chère copines SOUAD & ASMAA

Remerciments

Ce travail a été réalisé département DE GENIE MECANIQUE UNIVERSITE Dr YAHYA FARES DE MEDEA

A mon directeur de thèse Monsieur le Professeur BENIMAME SAMIRE à qui j'adresse mes sincères remercîments, vous m'avez fait un très grand plaisir en acceptant de m'encadrer pour cette thèse. vos conseils précieux et votre aide tout le long de cette thèse m'autorise à vous exprimer ma gratitude et mon fidèle attachement à votre personne.

Je remercie Monsieur ZIRARI MONIRE j'adresse mes chaleureux remercîments car j'ai eu à apprécier vos qualités humaines exceptionnelles votre savoir encyclopédique, votre rigueur scientifique, votre richesse culturelle, votre humilité et votre modestie.

Vous m'avez constamment aidé,

Je suis fidèle à vos enseignements,

Mes remerciements s'adressent enfin à tous les collègues de ma promotion pour leurs soutiens et encouragements.

SOMMAIRE

Sommaire

Listes des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Résumé

Introduction générale

Chapitre I : Etude bibliographique

I-1 Importance des matières plastiques…… 14

1-1 Caractéristiques des plastiques…… 15

I-2 généralités sur les polymères……...… 15

2-1 historiques……. 16

a- la science des polymères…….. 20

b- l'industrie des matières plastique……. 20

c- petit histoire du nylon …….. 21

I-3 les type des polymères ……... 22

3-1 thermoplastiques…….. 22

a- dépendance de la température …… 23

b- application …….. 24

3-2 thermodurcissables……..... 24

3-3 les élastomères……... 26

I-4 les propriétés des polymères……...… 27

4-1 propriétés mécaniques…….. 28

4-2 propriétés physiques …… 32

I-5 caractéristique des polymères…… 32

5-1 comment définir la masse polymère……... 34

I-6 les polymères homogènes et hétérogènes …….. 37

6-1 les polymères homogènes……..…… 37

6-2 les polymères hétérogènes……. 37

I-7 classification des polymères……. 38

I-8 différents type de polymères…… 38

8-1 les homopolymères……..…... 39

8-2 les copolymères……..…… 41

I-9 la polymérisation……..…… 42

9-1 définitions…….…..... 42

9-2 degré de polymérisation et la masse moléculaire ……. 42

9-3 typologies ……..…..…… 43

3-1 polymérisations en chaine ……..…..……... 44

3-2 réactions d'inhibition ……..……... 45

9- 4 polymérisations par étapes ……...…… 45

I-10 type de polymère …….……..…….. 46

10-1 exemples des polymères usuels ……..……..... 47

a- le polyéthylène (PE)……...…… 47

b - le polypropylène (PP) …….....….…….. 51

c - le polychlorure de vinyle (PVC)…….....…….…... 54

d - le polystyrène (PS) …….....……... 57

e - Polycarbonate (PC)…….…….....…. 60

f- acrylonitrile butadiène styrène (ABS)…….....…..……. 62

g- Le poly méthacrylate de méthyle (PMMA)…….…….....…… 65

h- polyéthylène haute densité (HDPE)…….…….....

I-11 additifs et adjuvants ……..……...…. 71

11-1 les adjuvants ……....…… 72

11-2 les additifs ……....…… 74

I-12 Conclusion ……..……... 75

CHAPITRE II : matériaux étudié et technique expérimentale

II-1 introduction ……. 77

II.2 mise en œuvre des polymères…….... 78

2-1 injections ……..... 78

II.3 mise en forme des polymères …….. 80

3-1 définitions …….…… 80

3-2 les procédés de mise en forme des matériaux polymères ……..…… 81

II.4 l'injection des polymères ……...…….. 81

4-1 introductions ……..…….. 83

4-2 définition du procédé ……. 83

4-3 principes du procédé …….. 84

4-4 déroulement du cycle d'injection …….. 84

4- 4-1 phases des moulages par injection ……...…..… 85

a- la phase de plastification ……....…….. 85

b- la phase de remplissage …….……....….. 86

c- la phase de compactage ……...…… 87

d- la phase de refroidissement et d'injection ……....…… 98

II.5 étude de la presse à injection ……. 90

5-1 description d'une presse à injection …… 91

5-2 la structure de presse d'injection ……. 91

5-3 principe de fonctionnement …….. 92

5-4 caractéristique des presses ……..…… 92

II.6 composants de la machine ……...…….. 93

6-1 le bâti……...……... 93

6-2 l'unité de plastification injection ….…….. 93

6- 2-1 l'unité d'injection …… 93

6-2-2 l'unité pots d'injection …..…….. 94

6-2-3 les vis d'injection ……..…….. 95

6-2-4 tracé de la vis ……..……..….. 96

6-2-5 les différents phases de transformation de polymère dans le Vis-fourreau 96

6-2-6 la buse ……. 98

II.7 le moule ……... 99

7-1 définitions …….. 99

II.8 conclusion …… 101

Chapitre III Partie expérimentale

III- Partie expérimentale ……..... 102

III-2 Matériau utilisé **:**..... 105

III-3 Production d'échantillons 106

III-4 observation …….....……. 107

III-5 conclusions …….....…… 107

.conclusion générale

conclusion générale..... 111

Références bibliographiques

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure (I.1): le polymère polyéthylène……46
Figure (I.2): le polymère polypropylène……50
Figure (I.3): le polymère polychlorure de vinyle……53
Figure (I.4): le polymère polystyrène……56
Figure (I.5): le polymère polycarbonate……59
Figure (I.6): le polymère acrylonitrile butadiène styrène……61
Figure (I.7): le polymère méthacrylate de méthyle……64
Figure (I.8): le polymère polyéthylène haute densité……67

CHAPITRE II

Figure (II.1) : moulage par injection……77
Figure (II.2) : machine d'injection……78
Figure (II.3) : presse électrique ……80
Figure (II.6) : machine professionnelle d'injection de moule……86
Figure (II.7) : schéma de principe d'une presse à injecter……86
Figure (II.8) : presse d'injection……87
Figure (II.9) : déroulement du cycle d'injection……88
Figure (II.10) : phase de plastification……89
Figure (II.11) : phase de remplissage……90
Figure (II.12) : phase de compactage……91
Figure (II.13) : phase de refroidissement et injection de la pièce……91
Figure (II.14) : déroulement d'un cycle d'injection……92
Figure (II.15) : cycle du moulage par injection……93
Figure (II.16) : presse injecter les thermoplastiques……93
Figure (II.17) : cylindre de plastification et moule……94
Figure (II.18) : schéma d'une presse à injecter électrique à vis de plastification……95
Figure (II.19) : l'unité de plastification……97
Figure (II.20) : l'unité d'injection……97
Figure (II.21) : post d'injection……98
Figure (II.22) : vis de plastification……99
Figure (II.23) : les déférents phases……100
Figure (II.24) : la buse déférents type des buses d'injection……101
Figure (II.25) : présentation du moule……103
Figure (II.26) : structure 3D de PP……105
Figure (II.27.28) : les bouchons……106
Figure (II.29.30) : les bouchons……107
Figure III 2 : Fiche technique de la charge utilisée..... 103
Figure III 3 : Fiche technique du PP utilisée..... 103

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITER I

Tableau (I.1) : les avantages et les inconvénients des thermoplastique……23
Tableau (I.2) : les avantages et les inconvénients des thermodurcissables……25
Tableau (I.3) : caractéristique physique moyennes de quelque polymère thermoplastique usuel……33
Tableau (I.4) : date de commercialisation des principaux plastiques exemples d'application……69
Tableau (I.5) : représentation et dénomination des quatre polymères synthétique les plus utilisée……69

LISTE DES ABREVIATIONS

ADN	Acide désoxyribonucléique
PE	Polyéthylène
PS	Polystyrène
ABS	Acrylonitrile butadiène styrène
PP	Polypropylène
PVC	Polychlorure de vinyle
PA	Polyamide
PB	Polybutadiene
SAN	Styrene Acrylonitrile

RESUME

Nous avons étudié le comportement d'une pièce en polypropléne (PP) après lui avoir ajoutée de la charge carbonate de calcium et de la matière polyéthylène broyée, la caractérisation est faite avec prise en compte de l'effet de la charge qui varie de 25% à 75%.

Un dispositif de la charge a été adapté sur la machine d'injection permettant d'une part de contrôle la matière PP.

Nous avons montré que l'effet positif du polypropylène sur la charge (CC) n'a pas perdu ses propriétés

L'observation obtenue est bien cohérente avec les études précédentes

نبذة مختصرة

لقد درسنا سلوك جزء البولي بروبلين **(PP)** بعد إضافته إليه حشو كربونات الكالسيوم ومواد البولي إيثيلين المطحون، ويتم التوصيف مع مراعاة تأثير الحشو الذي يختلف من 25 ٪ إلى 75٪.

تم تعديل جهاز التحميل على آلة الحقن ، مما يسمح ، من جهة ، بالتحكم في مادة **.PP** لقد أظهرنا أن التأثير الإيجابي للبولي بروبيلين على الشحنة **(CC)** لم يفقد خصائصه

الملاحظة التي تم الحصول عليها تتوافق بشكل جيد مع الدراسات السابقة

ABSTRACT

We have studied the behavior of a polyproplene (PP) part after adding calcium carbonate filler and ground polyethylene material, the characterization is made taking into account the effect of the filler which varies from 25 % to 75%.

A loading device has been adapted on the injection machine allowing, on the one hand, control of the PP material.

We have shown that the positive effect of polypropylene on the charge (CC) has not lost its properties.

The observation obtained is well consistent with previous studie

Introduction générale

Une matière plastique ou en langage courant un plastique est un mélange contenant une matière de base (un polymère) qui est susceptible d'être moulé, façonné, en général à chaud et sous pression, afin de conduire à un semi-produit ou à un objet. Le mot « plastique » dérive de plasticité.

Les matières plastiques couvrent une gamme très étendue de matériaux polymères synthétiques ou artificiels. On peut observer aujourd'hui sur un même matériau des propriétés qui n'avaient jamais auparavant été réunies, par exemple la transparence et la résistance aux chocs.

Les textiles (fils et fibres) ainsi que les élastomères ne sont pas des matières plastiques proprement dites.

Généralement, les polymères industriels ne sont pas utilisés à l'état « pur », mais mélangés à des substances miscibles ou non dans la matrice p

Les matériaux thermoplastiques amorphes suscitent un vif intérêt grâce à leurs importantes applications industrielles. Cet attrait est concrétisé par de nombreux travaux concernant leurs réponses mécaniques.

En effet, leurs lois de comportement présentent un intérêt fondamental et contrôlent les procédés de mis en forme.

Structure typique d'une formule :

matière plastique = polymère(s) brut(s) (résine(s) de base) + charges + plastifiant(s) + additifs

Il existe un grand nombre de matières plastiques ; certaines connaissent un grand succès commercial. Les plastiques se présentent sous de nombreuses formes : pièces moulées par injections, tubes, films, fibres, tissus, mastics, revêtements, etc. Ils sont présents dans de nombreux secteurs, même dans les plus avancés de la technologie.

Les matériaux ont de tout temps défini le niveau de développement des différentes civilisations qu'a connues l'Homme, les progrès techniques étant en général tributaires de la

mise au point de matériaux nouveaux aux performances améliorées. Les polymères s'intègrent dans cette optique.

Les polymères sont des molécules de grande taille (macromolécules) constitués par un assemblage de motifs élémentaires répétés un grand nombre de fois. Ces motifs sont les produits de la transformation de monomères.

Les matériaux macromoléculaires se distinguent des autres matériaux par une très grande diversité et un large domaine d'application. On les utilise dans l'industrie des produits alimentaires, l'industrie pharmaceutique, l'industrie électrique, mécanique, le bâtiment, le textile... Et de plus en plus, les polymères modernisent des domaines insoupçonnés à l'instar de l'industrie électronique où ils interviennent en imagerie infra-rouge et dans la mise au point des écrans plats. En fait ils se substituent aux matériaux non renouvelables.

Le développement industriel actuel qui s'accompagne d'une augmentation très importante de la production des polymères doit aussi s'adapter aux besoins de la technologie moderne en terme de qualité et de respect de l'environnement, la finalité étant l'application du principe de développement durable[1].

Chapitre I

Etude bibliographique

I-1 Importance des matières plastiques

Dans le passé, des matériaux de base durable, comme la pierre, le bronze et le fer, ont déterminé la culture humaine mais également des matières plus éphémères telles que le bois, le cuir, le lin ou la laine, ont joué un rôle important dans notre société. Pour répondre à la demande croissante de certains de ces matériaux et améliorer par la même occasion leurs précieuses propriétés, la science et l'industrie ont développé de nouveaux produits dont les matières plastiques qui présentent de nombreuses propriétés uniques, parfois inégalables.

Elles sont légères mais robustes, ne rouillent pas, se brisent moins vite que d'autres matériaux et n'ont pas besoin d'être peintes. Elles sont résistantes aux intempéries et faciles à travailler, peuvent prendre n'importe quelle forme, faite sur mesure, et assurent une bonne isolation.

L'industrie de la construction et de l'automobile, l'industrie alimentaire et le monde médical sont parmi les plus grands consommateurs de ces nouveaux matériaux .Les matières plastiques ont remplacé avantageusement quantité de 'produits naturels' dans diverses applications, ce qui représente souvent un avantage pour l'environnement .

Une matière plastique ou en langage courant un plastique est un mélange contenant une matière de base (un polymère) qui est susceptible d'être moulé, façonné, en général à chaud et sous pression, afin de conduire à un semi-produit ou à un objet. Le mot « plastique » dérive de plasticité.

Les matières plastiques couvrent une gamme très étendue de matériaux polymères synthétiques ou artificiels. On peut observer aujourd'hui sur un même matériau des propriétés qui n'avaient jamais auparavant été réunies, par exemple la transparence et la résistance aux chocs.

Les textiles (fils et fibres) ainsi que les élastomères ne sont pas des matières plastiques proprement dites.

Généralement, les polymères industriels ne sont pas utilisés à l'état « pur », mais mélangés à des substances miscibles ou non dans la matrice p

Les matériaux thermoplastiques amorphes suscitent un vif intérêt grâce à leurs importantes applications industrielles. Cet attrait est concrétisé par de nombreux travaux concernant leurs réponses mécaniques[1].

1-1 Caractéristiques des plastiques

Le "plastique" est un terme générique qui désigne une famille de matières fabriquées à partir du pétrole ou de gaz naturel. Le pétrole est raffiné et distillé. La fraction d'essence légère ou "naphta" est isolée puis "craquée" (distillée) à la vapeur, ce qui permet d'obtenir des molécules chimiques de base, " les monomères", qui sont constitués principalement d'atomes de carbone et d'hydrogène.

Les molécules sont assemblées entre elles sous formes de chaînes, linéaires ou en réseau, qu'on appelle les polymères. D'autres éléments interviennent dans la composition des polymères pour donner des caractéristiques spécifiques au produit, tels que : Oxygène, chlore, azote, etc.

Pour comprendre la nature des plastiques, il est nécessaire d'examiner les substances qui en constituent la base, c'est-à-dire, les polymères.

I -2 Généralités sur les polymères

Les polymères sont des matériaux à molécules géantes résultant de l'assemblage de molécules élémentaires appelées monomères. Les chaînes obtenues par la répétition de ces monomères vont avoir des tailles et des masses molaires très importantes, typiquement supérieures à 10000 $g.mol^{-1}$, masse à partir de laquelle les polymères vont donner un matériau au sens mécanique du terme. Les polymères sont dans l'ensemble peu denses, compte tenu de leur origine organique et, par la suite, de la présence d'éléments constitutifs légers (Carbone, Oxygène, Hydrogène, Azote). La liaison covalente des carbones est à la base de la notion de polymère. Il s'agit d'une liaison forte d'environ 100 à 450 kJ/mol (438 kJ/mol pour la liaison carbone-carbone). Par conséquent, les polymères possèdent une élasticité élevée dans le sens de la chaîne macromoléculaire.

Les polymères diffèrent des simples macromolécules parce qu'ils résultent de l'enchaînement aléatoire de monomères alors que les macromolécules (ADN, protéines) sont issues d'une succession codifiée d'éléments précis.

Parmi les matières plastiques, on distingue les homopolymères, répétition d'une unique structure moléculaire, et les copolymères, succession de plusieurs structures différentes.

Les homopolymères désignent donc des polymères fabriqués à partir d'un seul type de monomère, comme par exemple les polyéthylènes PE et polystyrène PS. Dès qu'au moins deux types de monomère participent à la formation des macromolécules, on parlera de copolymères. C'est le cas du styrène-butadiène. La variété des copolymères est très importante. Ces matériaux possèdent des propriétés physico-chimiques et mécaniques intermédiaires avec celles obtenues sur les homopolymères correspondants[1].

I-2-1 Historique

Les matières plastiques sont pratiquement nées avec le XX^{e} siècle. Des centaines de chercheurs et de bricoleurs de génie sont à l'origine de leur essor. Les premiers plastiques, artificiels, résultaient de la transformation chimique de polymères naturels tels le caoutchouc, la cellulose et la caséine (le squelette macromoléculaire étant préservé lors de cette transformation). La première matière plastique industrielle basée sur un polymère synthétique est la *Bakélite*.

- quinze siècles avant J.-C., les Égyptiens employaient des colles à base de gélatine, caséine ou albumine ;

- fin du XV^{e} siècle : Christophe Colomb apporte des plants de caoutchouc appelés *Cao* (bois) *Tchou* (qui pleure) par les Amérindiens ;

- 1839 : l'américain Charles Goodyear découvre (assez fortuitement d'ailleurs) le procédé de vulcanisation du caoutchouc naturel par le soufre ;

- 1884 : Hilaire de Chardonnet invente la viscose en dissolvant de l'acétate de cellulose dans du chloroforme ;

- 1889 : un chimiste français, Jean-Jacques Trillât, travaillant sur la caséine du lait, réussit à la durcir et obtient la Galalithe ou « pierre de lait ». Cette matière est plus dure que la corne, plus brillante que l'os et plus soyeuse au toucher que l'ivoire. Bientôt toutes les boules de billard seront en Galalithe. En 1918, commence la fabrication d'articles courants, comme le bouton, le bijou fantaisie, le fume-cigarette ou encore le stylo ;

- 1933 : obtention par polymérisation radicalaire du polyéthylène basse densité (PEBD) (LDPE pour les Anglo-saxons) (densité d~0,92) par les ingénieurs anglais Eric Fawcett et Reginald Gibson de la firme ICI en opérant sous très haute pression à environ 200 °C. Le polyéthylène (PE) est la seule polyoléfine qui puisse être obtenue par voie radicalaire ;

- 1935 : les polyamides (PA) (connus sous le nom de Nylon) sont sortis des éprouvettes du chimiste américain Wallace Hume Carothers travaillant pour Du Pont de Nemours. En 1938, la firme annonce officiellement la découverte d'une fibre synthétique « aussi solide que l'acier, aussi fine que la toile d'araignée, et d'un magnifique éclat ». Ce fut le premier plastique technique à haute performance, avec en particulier un coefficient de friction faible. Applications : fait ses preuves dans les parachutes des GI au moment du Débarquement, puis utilisé dans la confection de bas ; engrenages, cages de roulement à billes, corps de perceuse, têtes de maillet, visserie plastique, semelles de chaussures de football ;

- 1936 : la société Rhône-Poulenc crée le Rhodoïd, à base d'acétate de cellulose ;

- 1937 : le Pr Otto Bayer synthétise les premiers polyuréthanes, aussi appelés polycarbonates ; applications : adhésifs, fibres Spandex, « mousses » pour matelas et coussins, sièges de voiture, etc. ;

- 1938 : Roy J. Plunkett, un chimiste américain de Du Pont de Nemours, découvre par hasard le polytétrafluoroéthylène [formule moléculaire $(-CF_2-)_n$] (PTFE) (principalement connu sous le nom commercial de Téflon ; présent dans le Gore-Tex), un isolant qui offre une excellente résistance chimique et à la chaleur (stable jusqu'à 250 °C en service continu, avec pointes possibles à 300 °C). Isolant étanche, il sert dans l'industrie nucléaire militaire, avant de recouvrir dans les années 1960 les poêles à frire des cuisines (application de son pouvoir antiadhésif) ; joints d'étanchéité.

La Seconde Guerre mondiale exacerba les besoins en matières premières :

- 1941 : la résine « mélamine-formol », *alias* Formica (marque déposée), envahit les cuisines. Cette résine *très dure* fait partie de la famille des aminoplastes. Elle a été développée dans les années 1930 et 40 par des firmes telles American Cyanamid, Ciba et Henkel, mais sans véritable succès commercial. Ses propriétés élevées de résistance à la plupart des produits chimiques, à la chaleur, à la lumière, à l'abrasion et au feu expliquent

son succès dans l'immédiat après-guerre. Les aminoplastes sont par ailleurs utilisés comme adhésifs/liants dans l'industrie du bois ;

- les silicones (SI), *thermostables* dotés de propriétés antiadhésives ; utilisation dans les industries électriques, aéronautiques et du biomédical (isolants électriques puis fluides amortisseurs dans les trains d'atterrissage des avions, chirurgie plastique, huiles de moteur, mastics, peintures, cosmétiques, etc.) ;

- découverte du polyéthylène téréphtalate (PET) par J. R. Whinfield et J. Dickson.

Pour couvrir ses besoins, l'Allemagne, rapidement privée de ses ressources en latex naturel, avait produit durant la Première Guerre mondiale du caoutchouc « Buna », un substitut plutôt médiocre de cette substance. Ses recherches sur de nouvelles matières plastiques se poursuivirent au cours de la Seconde Guerre mondiale (réalisées notamment par IG Farben) et, en 1945, la production de caoutchouc synthétique (néo-buta) s'élevait à un million de tonnes.

À partir de la Libération, l'élan scientifique et technologique insufflé à l'industrie par la guerre se poursuivit et de nouvelles matières furent synthétisées telles les nouveaux polyamides, le polycarbonate et les poly acétals.

Puis les découvertes de nouvelles matières se firent plus rares :

- 1950 : synthèse des premiers copolymères du polystyrène, marquant une nette amélioration des qualités du PS homopolymère (tenue au choc en particulier, température limite d'utilisation, tenue aux solvants organiques) ;

- 1953 : les chercheurs Bottenbruch, Krimm et Schnell de Bayer AG découvrent le polycarbonate (PC), un polymère très transparent et extrêmement résistant aux chocs. Il a équipé le casque des astronautes pour la mission Apollo 11 en 1969. Utilisation : dans plus de 80 % des visières de casque de moto, CD, biberons incassables, phares d'automobile, profilés de toiture, vitres de cabine téléphonique, vitres pare-balles, châssis d'ordinateurs portables, etc. ;

- le chimiste allemand Karl Ziegler et son équipe découvrent fortuitement un système catalytique permettant la polymérisation linéaire de l'éthylène (ou *éthène*) sous pression

modérée (de l'ordre de 2 à 3 MPa), produisant le polyéthylène haute densité (PEHD, densité~0,95) au faible degré de ramification ;

- 1954 : un an plus tard, le chimiste italien Giulio Natta met au point, utilisant les catalyseurs « Ziegler », le polypropylène (ou polypropène) *isotactique* (PP ou PPi pour le différencier du polypropène syndiotactique de sigle PPs). Ziegler et Natta se partagent le prix Nobel de chimie en 1963 grâce à leurs travaux en science des polymères. Remarque : le PP atactique présente peu d'intérêt économique ;

- 1955 : travaux de la société Phillips Petroleum sur la polymérisation linéaire coordinative sous relativement basse pression de l'éthylène, grâce aux catalyseurs stéréospécifiques, fournissant le PEHD ;

- 1961 : commercialisation de l'*Estane* (BF Goodrich), un polyuréthane thermoplastique (TPU en anglais). Autre exemple d'élastomère thermoplastique (TPE ou TPR en anglais) : le copolymère séquencé (copolymère *bloc*) SBS ou poly(styrène-b-butadiène-b-styrène) ;

- dans les années 1990, le terpolymère ABS tend peu à peu à remplacer les résines « mélamine-formol ». C'est une matière plus noble que le polystyrène, très utilisée en habillage d'équipements électroménagers (corps d'aspirateur), pour jouets rigides, enjoliveurs, parfois en emballage (couvercles), en accessoires de salles de bains et dans l'industrie ;

  - l'ABS existe aussi en version translucide (M-ABS dit ABS transparent) ;

  - il est métallisable par galvanoplastie pour imiter l'aluminium ; utilisation : contenants en cosmétique... ;

  - il peut être mélangé avec du polycarbonate pour former un alliage polymère PC/ABS (noms Anjablend A, Bayblend, Pulse) (pièces pour automobiles). Le Noryl est un autre exemple de mélange polymère-polymère ;

- 2000 : pour le développement des polymères conducteurs intrinsèques, les chercheurs Alan J. Heeger, Alan G. MacDiarmid et Hideki Shirakawa sont récompensés par le prix Nobel de chimie.

Depuis une trentaine d'années, les voitures, les trains et les articles électroménagers (machines à laver...) n'ont cessé de s'alléger en métal et de gagner en performance grâce à l'apport des matériaux plastiques.

Les plastiques armés (matériaux composites) [typiquement les résines polyesters et polyépoxydes renforcées fibres de verre (verre : d~2,5)], plus légers pour égale résistance que l'acier ou l'aluminium, et insensibles à la corrosion, sont des matériaux non traditionnels. Certains types sont de plus en plus utilisés dans le secteur aéronautique.

De nouveaux plastiques toujours plus respectueux de l'environnement (recyclage et biodégradabilité améliorés), moins dépendants du pétrole (réduction de coût), thermostables, plus transparents, incassables, ininflammables ou originaux sont en voie de développement [1].

a) La science des polymères

Le mot polymère vient du grec « polus » plusieurs, et « meros » partie. Un polymère est une macromolécule, organique ou inorganique, constituée de l'enchaînement répété d'un même motif, le monomère (du grec monos: un seul ou une seule, et meros ; partie), reliés les uns aux autres par des liaisons covalentes. Les travaux de Staudinger dans les années 1920 Constituent la base de la science des polymères (Nobel en 1953) ou macromolécules. Flory Énoncera plus tard les principes fondamentaux sur les polymères (Nobel 1974).

b) L'industrie des matières plastiques

« Les matières plastiques » : Les matières plastiques sont des matériaux organiques de synthèse fondés sur l'emploi des macromolécules (polymères). Les caoutchoucs sont aussi regroupés sous cette appellation.

Matière plastique = résine de base + adjuvants + additifs

Cas du caoutchouc : vers 1839 l'Anglais Thomas Hancock et l'Américain Charles Goodyear.

Découvrent le procédé de vulcanisation du caoutchouc en chauffant du caoutchouc naturel en présence de souffre. Le procédé industriel sera développé à partir de 1850.

En dehors du caoutchouc, les premières matières plastiques sont apparues à la fin du XIXème siècle et existaient plutôt à l'échelle artisanale qu'industrielle. Parmi ces matériaux, on peut citer ceux d'origine naturelle comme le Celluloïd® (toute première matière plastique, 1870) ou le nitrate de cellulose (coton-poudre ou fulmicoton, produit inflammable utilisé dans les canons). la Galalith, littéralement « pierre de lait », obtenue à partir de la caséine du lait, et utilisée en remplacement de la corne et de l'écaille dans la fabrication de peignes, de boutons... On trouve des brevets de fabrication de colle à base de caséine dès 1873 et déjà utilisée dans l'ancienne Égypte. De façon générale.

les protéines peuvent être considérés comme des polymères naturels, car constituées d'enchaînement d'acides aminés. Feretti invente le Lannital ou fibre de lait (Brevet Feretti, 1935).

c) Petite histoire du nylon :

Wallace Hume Carothers (27 avril 1896 - 29 avril 1937) était un chimiste américain à la compagnie DuPont. En 1935, il synthétise le nylon. Le nylon a été breveté (en fait trois brevets U.S. Patents 2130523, 2130947 et 2130948 du 20 sept. 1938), mais le terme *nylon* n'est pas une marque déposée, il n'a donc pas à s'écrire avec une capitale initiale. DuPont a ainsi choisi de permettre au mot de devenir synonyme de bas (nylon) ; en 1992 la société dépose sa marque déposée pour le nylon sous le terme *tactel*.

La découverte fut pour la première fois commercialisée en 1938 avec un premier produit, une brosse à dent dont les poils étaient en nylon sorti la même année. En 1940 sortait un produit qui allait marquer l'histoire du nylon, les bas pour femme. En 1941, pour l'entrée en guerre des USA,

Le matériau utilisé pour les toiles dparachutes fut affublé de la phrase *Now You Lousy Old Nippons* (« À vous maintenant, vieux Japonais dégueulasses ! ») ou encore *Now You've Lost Old Nippons* (« Vous avez maintenant perdu vieux Japonais ! »). Il circule de nombreuses étymologies sur l'origine du mot nylon comme celles affirmant que le nylon provient de NY (New York) et LON (London), ou encore du prénom des épouses des inventeurs. Son inventeur, Wallace Carothers, s'étant suicidé avant de donner un nom

commercial à son polyamide 66 (suite à une dépression consécutive au décès de sa soeur) , il revint à un comité de trois membres de chez DuPont de faire le choix en 1938. Un des membres Dr. E.K.Gladding proposa "Norun" (pour *no run* soit *ne s'effile pas*), et changea aussitôt en "Nuron" pour éviter une publicité mensongère, tout en rimant ainsi avec Rayon ou *coton*, qui fut finalement déformé en *nylon* pour avoir un acronyme prononcé de la même façon pour les américains et les anglais. Cette version officielle de DuPont, voir aussi leur publication(Context, vol. 7, no. 2, 1978), fut aussitôt pervertie par quelques plaisantins en *Now You Lose Old Nippon* ou *Now You Lousy Old Nippon*, avec un succès tel que DuPont a commissionné[1] .

(PC ;PA 6 ;PA 6.6 ; PVC ; PE ; …

I-3 Type des polymères

On peut classer les polymères en trois types, en fonction de leur réaction à la chaleur :

- Les thermoplastiques.
- Les thermodurcissables.
- Les élastomères.

Dans ce qui suit, nous nous intéressons aux thermoplastiques et, plus exactement, aux thermoplastiques techniques dont l'Acrylonitrile Butadiène Styrène, ABS, qui fait objet de cette étude.

I-3-1 Polymères thermoplastiques

Une matière thermoplastique est une matière ayant la propriété de se ramollir (parfois on observe une fusion franche) lorsqu'elle est chauffée suffisamment, mais qui, se refroidissant, redevient dure. Une telle matière conserve donc toujours de manière *réversible* sa thermoplasticité initiale.

L'état de ramollissement permet leur déformation mécanique, cette déformation étant figée par le refroidissement.

Cette qualité rend le matériau recyclable, à condition que la matière ne soit pas thermiquement dégradée et que les contraintes mécaniques de cisaillement de l'éventuel procédé de mise en forme ne modifient pas la structure moléculaire. C'est le cas du verre, des métaux et en général des macromolécules monodimensionnelles (issues

de monomères bivalents), à structure linéaire ou ramifiée, de la chimie organique (par exemple, PE, PVC et PA).

Le degré de polymérisation (DP ou *n*, directement proportionnel à la masse molaire du polymère) conditionne d'une part l'aptitude à la mise en œuvre sur machines (qui dépend de la viscosité), et d'autre part les propriétés mécaniques et thermiques du produit fini.

La structure moléculaire des polymères thermoplastiques solides est soit amorphe (non organisée) (ex. : PS, PMMA et PC), soit cristalline (organisée, dans laquelle les chaînes sont alignées). Les propriétés mécaniques et thermiques sont meilleures dans le second cas. Ces deux structures peuvent coexister en proportions variables, le polymère correspondant est dit *semi-cristallin* et caractérisé par un taux de cristallinité. La présence de cristallinité dans les matériaux capables de cristalliser (tels le PE, PP et PA) dépend beaucoup de leur *histoire thermique* et donc des conditions de mise en œuvre utilisées pour fabriquer l'objet moulé.

Certains plastiques thermoplastiques peuvent présenter partiellement des structures tridimensionnelles (ex. : PS faiblement réticulé) ; le polymère semi-thermoplaste est alors dur, moins soluble, plus résistant au fluage, mais plus fragile.

a)- Dépendance de la température

Une élévation de température entraîne une séparation des longues chaînes moléculaires. Le passage du matériau de l'état solide à l'état liquide visqueux s'effectue lorsque l'agitation thermique rompt les « liaisons faibles » (liaisons *physiques*, par exemple interactions moléculaires de faible (van der Waals) ou de moyenne énergie (liaisons hydrogène)) entre deux segments macromoléculaires contigus sans affecter les liaisons covalentes caténaires. Ce mécanisme est *réversible* (le liquide visqueux se solidifie par refroidissement car les chaînes se rapprochent, créant un retrait plus ou moins

prononcé) : la matière est *thermoplastique*. Les matériaux semi-cristallins montrent un retrait général supérieur à celui des amorphes.

La température de transition vitreuse (T_v) correspond à la rupture des (peu nombreuses) liaisons faibles intercaténaires dans la phase amorphe. Elle est toujours inférieure à la température de fusion (T_f) qui correspond à la disparition des (nombreuses) liaisons faibles intercaténaires dans la phase cristalline.

b)- Applications

Le cycle de ramollissement par chauffage et de solidification par refroidissement peut être répété plus ou moins indéfiniment. Ce cycle représente un avantage considérable puisqu'il est à la base de la plupart des techniques de transformation de ces matériaux. Ce phénomène représente toutefois un inconvénient, parce que cela signifie que les propriétés des matières thermoplastiques dépendent de la température.

Le calandrage, l'extrusion et le moulage par injection sont les techniques de transformation typiques des polymères thermoplastiques. Le principal mode de transformation des matériaux thermoplastiques *techniques* est l'injection. Les polymères avec une structure amorphe et une masse molaire élevée sont préférés pour l'extrusion. Par contre, les polymères amorphes de faible masse molaire sont de bons candidats pour l'injection[1].

Avantages et désavantages des thermoplastiques

Le tableau montre les avantages et les inconvénients des thermoplastiques

<table>
<tr><th colspan="2">Avantages</th><th>Inconvénients</th></tr>
<tr><td colspan="2">- Stabilité dans le temps (pas de polymérisation au cours du temps)
- Recyclable (on peut les liquéfier à nouveau)
- Facile à réparer (par soudure ou collage)
- Post-formable</td><td rowspan="3">- Forte viscosité du fondu
- Fluage</td></tr>
<tr><th>Amorphe</th><th>Cristallin</th></tr>
<tr><td>- Bonne résistance aux impacts
- module plus élevé</td><td>- Moindre retrait au refroidissement
- plus grande dureté</td></tr>
</table>

Tableau (I.1) : Avantages et Inconvénients des thermoplastiques

I-3-2 Polymères thermodurcissables

Le terme thermodurcissable - qui s'oppose au terme thermoplastique - s'applique à un matériau polymère ne pouvant être mis en œuvre qu'une seule fois et qui devient infusible et insoluble après polymérisation. On dit que la polymérisation d'un matériau thermodurcissable est irréversible. Une fois durci, sa forme ne peut plus être modifiée.

La polymérisation peut être engendrée par une montée en température, l'action de radiations, ou de produits chimiques (catalyseurs, durcisseurs, etc.). Après polymérisation et durcissement, une nouvelle montée en température ne permettra pas au produit de revenir dans son état initial (liquide ou pâteux). Un peu comme un œuf que l'on fait cuire : une fois dur, aucune action ne pourra permettre de lui faire retrouver sa forme liquide. Une propriété qui rend les matériaux à base de thermodurcissables difficilement recyclables.

Pour former des pièces en matériaux thermodurcissables, on a recours au moulage par coulée dans lequel la résine liquide est simplement coulée dans un moule et son durcissement survient par action de la chaleur et/ou de réactifs. Le moulage par compression, lui, fait intervenir une pression élevée appliquée à chaud.

Les polymères thermodurcissables deviennent solides irréversiblement, le plus souvent après chauffage. La transformation s'effectue avec réaction chimique (polymérisation).

Ils présentent des propriétés thermomécaniques très différentes des polymères thermoplastiques ; le réseau tridimensionnel est constitué de nœuds covalents (faisant intervenir des liaisons de haute énergie) dont la rupture est, par nature, irréversible.

Contrairement aux matières thermoplastiques, les matières thermodurcissables ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois ; les produits finis ne pourront plus être fondus (sans dégradation) par un chauffage éventuel. Les matières thermodurcissables sont donc non recyclables.

Exemples de matières thermodurcissables : celles obtenues par copolymérisation du styrène en présence d'un polyester insaturé réactif, les résines aminoplaste et époxyde, les élastomères vulcanisés, etc.

Une fois la transformation réalisée, les matériaux thermodurcissables sont typiquement rigides et leurs propriétés mécaniques dépendent peu de la température.

Quelques exemples de polymères thermodurcissables :

- les polyesters insaturés qui sont bon marché, mais dont les performances sont moyennes et que l'on trouve dans des coques de bateaux ou dans des colles ;
- les époxydes qui sont plus onéreux, car leurs performances sont meilleures. On les trouve dans les colles et les adhésifs notamment et à l'intérieur des canettes de boissons ou dans les raquettes de tennis ;
- les phénoliques résistants à la chaleur et à l'humidité, mais dont la couleur a tendance à se ternir et qui servent à fabriquer des pièces automobiles ou des installations de fils électriques ;
- certains polyimides dont le prix est élevé et qui intéressent de fait plutôt des secteurs de pointe comme l'aérospatiale[1].

Avantages et désavantages des thermodurcissables

Le tableau montre les avantages et les inconvénients des thermodurcissables

Avantages	Inconvénients
- Faibles viscosité de la résine - Bon mouillage des fibres - Bon stabilité thermique après polymérisation - Résistance aux agressions chimiques - Peu sensible au fluage	- Cassant - Non recyclable par techniques standard - Non pas formable

Tableau (I.2) : Avantages et Inconvénients des thermodurcissables

I-3-3 Les élastomères

Les élastomères sont des matériaux aux propriétés bien particulières. Ce sont des polymères de haute masse moléculaire et à chaines linéaires. Le déplacement de leurs chaînes, les unes par rapport aux autres, n'étant limité que par une légère réticulation due aux enchevêtrements, on peut obtenir de grandes déformations élastiques totalement réversibles. Lorsque la contrainte est nulle, ces matériaux sont amorphes. Leurs chaînes tendant toutefois s'aligner au cours de la déformation, il se produit une augmentation de la rigidité, ou durcissement structural. Pour obtenir un tel comportement, il faut utiliser ces matériaux à une température supérieure à leur température de transition vitreuse.

I-4 Propriétés des polymères

On distingue polymères thermoplastiques et thermodurcissables. Les premiers subissent, sous élévation de température, une fusion réversible. Les seconds, soumis à un chauffage prolongé après fusion, souvent réticulés, atteignent l'infusibilité. Ils sont durs et rigides, d'où leur nom. Ils sont aptes au moulage par compression, sous des pressions de quelques dizaines de mégapascals (MPa). Les premiers sont aptes au moulage par injection : la matière plastique est injectée, sous de fortes pressions (100-300 MPa), dans le moule refroidi pour qu'elle s'y solidifie. Mais une bonne partie des thermoplastiques sont manufacturés par extrusion, sous forme de films, de fils, et des formes profilées les plus diverses. Une machine produisant des bouteilles en plastique en fait des dizaines de milliers à l'heure.

Amorphes ou cristallisés. La régularité, soit de la séquence, soit de la disposition dans l'espace (ou stéréorégularité) de la chaîne polymérique, fait que des polymères peuvent cristalliser. L'irrégularité des mêmes facteurs s'oppose à la cristallisation : d'autres polymères restent amorphes à l'état solide. Ces derniers, viscoélastiques aux températures élevées, deviennent des verres au-dessous d'une certaine température (transition vitreuse).

Densité. La masse volumique des polymères, à l'état compact, s'étage entre 900 et 1 500 kilogrammes par mètre cube. Cela en fait des matériaux très légers, comparés aux métaux, oxydes métalliques, céramiques, verres ou même certains bois. Qui plus est, certains polymères sont aptes à former des mousses, bien plus légères encore, de l'ordre de 10 kilogrammes par mètre cube. On les obtient en faisant buller un gaz, comme du gaz carbonique, de l'air, des hydrofluorocarbures..., lors de la polymérisation. Otto Bayer

(1902-1982), de la firme du même nom, le découvrit fortuitement, en 1937, lors de sa préparation de polyuréthanes, par condensation entre un diisocyanate et un diol. Des bulles de gaz carbonique s'élevaient du polymère en cours de formation.

I-4-1 Propriétés thermiques

On peut classer les polymères en deux types, en fonction de leur comportement à la chaleur : les thermoplastiques (polymères linéaires, ramifiés ou non) et les thermodurcissables [polymères tridimensionnels (réticulés)] :

- portés à une température suffisante (au-dessus de leur température de transition vitreuse Tg ou de fusion Tf), les polymères *thermoplastiques* se trouvent à l'état « fondu » (état fluide ou déformable) et sont donc susceptibles de s'écouler sous l'action d'une contrainte. Cela permet leur mise en forme au moyen des techniques habituelles (thermoformage, extrusion, injection, etc.). L'opération peut se répéter plusieurs fois ;

- les polymères thermodurcissables durcissent lors d'un premier chauffage (ou éventuellement à température ambiante). Dans le domaine des peintures, c'est une propriété très souvent mise à profit. Un apport de chaleur peut déclencher une réaction de polymérisation tridimensionnelle qui crée des pontages entre les chaînes de polymère et durcit de manière irréversible le matériau.

I-4-2 Propriétés mécaniques

Les polymères thermodurcissables sont souvent rigides et fragiles tandis que les polymères thermoplastiques et les élastomères montrent une résistance mécanique médiocre très affectée par la température.

Pour ce qui concerne la structure moléculaire, les matériaux polymères solides sont soit :

- semi-cristallins [présence de zones cristallines (cristallites et sphérolites) et existence d'un intervalle de fusion étroit qui permet une transition rapide de l'état solide ou pâteux à l'état fluide, par élévation de température], à morphologie hétérogène (exemples : PE, PPi, PA, polyesters thermoplastiques, POM [(-CH_2-O-)$_n$], PTFE) ;

- soit amorphes, montrant un ramollissement progressif par élévation de température (PS et ses copolymères, PMMA, PC, PVC, etc.).

Remarque sur l'influence de la tacticité : un polymère atactique (PMMA, PS...), dont la chaîne macromoléculaire présente une forme géométrique irrégulière, ne peut pas cristalliser, contrairement à un polymère isotactique ou syndiotactique.

La structure des polymères est reliée aux propriétés thermomécaniques. Par exemple, lors de la mise en œuvre par injection, les plastiques amorphes sont plus tolérants [process plus aisé, retrait (shrinkage en anglais) plus faible au refroidissement] que les semi-cristallins (ces derniers ont une prédisposition à cristalliser).

Le taux de cristallinité d'un polymère influence les propriétés mécaniques (le module d'Young augmente lorsque le taux de cristallites augmente. Inversement la limite de déformation élastique diminue).

On admet en général que les propriétés d'un plastique technique sont optimales lorsque la cristallinité moyenne permet de combiner la résistance mécanique et thermique de la phase cristalline à la résilience de la phase amorphe (pratiquement 50 à 60 %.

La plupart des polymères thermoplastiques ne sont pas utilisés au-dessus de 120 °C, température à laquelle se produit un ramollissement (pour les amorphes) ou une fusion (pour les semi-cristallins), qui supprime les propriétés mécaniques. Les polymères thermoplastiques amorphes sont utilisés en dessous de leur Tg, à l'état vitreux. En principe, les matières thermodurcissables ont une meilleure tenue thermomécanique (à la chaleur, au feu, au fluage, faible retrait, etc.) et chimique que les thermoplastiques. Les meilleurs thermostables sont des thermodurcissables.

Lorsque les matériaux plastiques sont observés en service, on se rend compte qu'ils sont soumis à des contraintes qui provoquent des déformations pouvant dans certains cas conduire à la rupture. Le comportement en service des matériaux définit leurs propriétés d'usage.

Il est important de connaître les propriétés intrinsèques (inhérentes aux matériaux) afin de faire un choix judicieux de la matière la plus apte à remplir les fonctions qui lui sont assignées. La résistance des matériaux est la science qui va, à partir de propriétés propres à chaque matériau, définir les caractéristiques et conditions d'utilisation de chacun.

Les propriétés mécaniques font partie des propriétés intrinsèques des matériaux et sont définies à partir d'essais comparatifs, normalisés. En général, on utilise les normes

ISO, ASTM et DIN, ou des normes « maisons » lorsque les tests sont directement liés aux propriétés d'usage.

Les propriétés mécaniques sont ensuite utilisées pour prédire les propriétés finales des objets finis. Cependant, certaines caractéristiques structurales liées à la transformation des matières plastiques, telles le degré de cristallinité, l'orientation des chaînes macromoléculaires, ou les tensions internes résultant des conditions de mise en œuvre et de refroidissement, peuvent influencer les propriétés de l'objet. Ces propriétés sont appelées propriétés de transformation.

On peut résumer les propriétés du matériau comme suit :

- propriétés intrinsèques (propres au matériau) ;
- propriétés de transformation (fonction des méthodes et conditions de mise en œuvre) ;
- propriétés d'usage (définies par les conditions d'utilisation).

Un grand nombre d'essais mécaniques utilisés pour caractériser les matières plastiques découle des techniques d'analyse des métaux telles les mesures du module d'élasticité, de la résistance à la traction et de l'allongement à la rupture.

Les analyses mécaniques et rhéologiques sont basées notamment sur des essais de traction, compression, cisaillement, flexion et torsion.

Les équipements d'analyse comprennent les appareils de mesure de l'indice de fluidité à chaud (pour les polymères thermoplastiques) (MFI, Melt flow index en anglais), les appareils de traction, les extensomètres, les analyseurs DSC, les viscosimètres (de type rotationnel, cône-plan ou capillaire) (pour les thermoplastiques), les analyseurs DMA (ces deux derniers instruments sont dédiés aux mesures dynamiques), les appareils de choc Izod et choc Charpy, etc.

En ce qui concerne les polymères solides, un simple essai de traction uniaxial permet de mesurer certaines propriétés mécaniques.

Les matériaux se répartissent d'après leur comportement en contrainte-déformation, en trois catégories générales : rigides (souvent peu ductiles et peu résistants aux chocs),

plastiques ou élastomères. Le graphique intitulé « Caractérisation mécanique » obtenu lors d'un essai de traction met en évidence ces trois catégories :

- la courbe A illustre le caractère en contrainte-déformation d'un polymère rigide (module élevé) dont la rupture se produit quasi simultanément à la limite d'élasticité. Le polymère a un comportement fragile (faible allongement à la rupture) ;

- la courbe B montre que le comportement de certains matériaux plastiques est semblable à celui de nombreux matériaux métalliques : la déformation élastique initiale est suivie d'une déformation plastique. Le matériau est tenace (fort allongement à la rupture) ;

- la courbe C indique une déformation élastique dans un large domaine de déformation ; ce comportement mécanique est typique d'un élastomère.

Les matières plastiques ont des propriétés mécaniques influencées par les principaux facteurs suivants :

- la température ;

- la cohésion des polymères ;

- la modification des propriétés mécaniques moléculaires des polymères ;

- leurs conditions de transformation.

Globalement, le module d'élasticité et l'allongement à la rupture des polymères rigides se déterminent de la même façon que dans le cas des métaux.

La limite d'élasticité Re des polymères plastiques équivaut sur la courbe à la valeur maximale de la contrainte se situant à la fin de la région élastique linéaire. De plus, la résistance à la traction Rm correspond à la contrainte entraînant une rupture ; elle peut prendre une valeur supérieure ou inférieure à Re.

Il est important de souligner que les propriétés mécaniques des polymères thermoplastiques et des élastomères dépendent fortement de la température (voir le graphique intitulé « Influence de la température »), des contraintes extérieures et du temps d'observation. Une élévation de température fait passer un matériau thermoplastique d'un comportement rigide et fragile à un comportement ductile et tenace.

I-4-3 Propriétés physiques :

Comme on le verra ultérieurement, la densité, Tf, Tg sont modifiées par l'architecture moléculaire. De façon intuitive, on comprend par exemple que la densité diminue avec la ramification des molécules en augmentant l'espace entre les chaînes principales. Ainsi le PE linéaire non ramifié présente une haute densité (PEHD) et donc un point de fusion 20°C plus élevé que le PE ramifié basse densité (PEBD)[1].

I-5 Les caractéristiques de polymère

Les propriétés des matériaux plastiques ne cessent de s'améliorer.

On constate l'emploi grandissant de pièces en matières plastiques à la place de pièces métalliques, souvent plus onéreuses, plus sensibles à la corrosion, ou plus lourdes. Certaines caractéristiques techniques diffèrent notablement de celles des métaux :

- la densité des matières plastiques non expansées est nettement plus faible que celle des métaux (hors magnésium) : de 0,83 (cas du poly-4-méthyl-pentène-1 désigné par PMP) à 2,15 (PTFE), avec 1,2 comme valeur moyenne. La densité d'un polymère est directement fonction du taux de cristallinité. Par ailleurs, la rigidité et la résistance mécanique augmentent avec ce taux ;
- température de transformation plus basse : couramment comprise entre 100 °C (le PS est facile à travailler : extrudable dès 85 °C) et 300 °C (le PC est injecté vers 300 °C). Les bioplastiques sont transformés de 160 à 200 °C, contre environ 220 °C pour des compounds ordinaires équivalents ;
- élasticité plus élevée (jusqu'à 800 % d'allongement à la rupture pour le PEHD) ;
- thermostabilité des polymères thermoplastiques nettement inférieure à celle des métaux. Rares sont les plastiques résistant à plus de 250 °C pendant de longues périodes dans l'air. Des modifications structurales, particulièrement parmi les matières thermoplastiques, permettent d'élargir le domaine thermique d'utilisation vers les basses ou hautes températures ;
- module d'élasticité plus faible (le module du PEBD est peu élevé : E~200 MPa ; à l'opposé, les aminoplastes présentent un module très élevé). Une incorporation croissante de fibres augmente le module d'élasticité et la contrainte à la rupture (ténacité) du composite. La dilatation thermique des matériaux est inversement proportionnelle à leur

module de traction. Le coefficient de dilatation des polymères thermoplastiques est supérieur à celui des métaux ;

- tenue (ou résistance) aux agents chimiques : en règle générale, les polymères résistent aux acides et aux bases [grande inertie chimique du PTFE et du PE (en raison de sa structure paraffinique)]. Ils sont cependant sensibles aux solvants (bonne tenue du PTFE, PBT et PA-6,6) ;
- les polymères ont un comportement viscoélastique. En effet, ils démontrent simultanément des propriétés élastiques et un caractère visqueux. Dans ce dernier cas, la matière s'écoule en réponse à une contrainte ;
- certains plastiques sont des amortissants vibratoires ; exemples : ABS, copolymère bloc SIS [ou poly(styrène-b-isoprène-b-styrène)] ; intérêt en vibroacoustique ;
- la plupart des polymères thermoplastiques amorphes non chargés (et non colorés…) sont transparents (PMMA, PC, PS « cristal », etc.) ;
- certains plastiques manifestent une grande résistance à l'impact (PC, PET, PMMA, etc.) ;
- certains sont résistants à l'abrasion (PTFE, PVC rigide, polyamides, PET, aminoplastes, etc.). Le PTFE possède un coefficient de friction particulièrement faible qui lui permet d'être un lubrifiant solide ;
- des déchets plastiques très stables peuvent rester des siècles durant dans l'environnement ; ils peuvent cheminer dans des organismes et ceux qui se fixent ont un effet inconnu.

Les matrices organiques sont des isolants thermiques et électriques, ainsi que les fibres de renfort (sauf fibres de carbone) :

- la conductivité thermique des polymères est environ cent fois plus faible que celle des métaux ; ainsi, beaucoup de matières plastiques, en particulier les mousses, sont utilisées comme isolants [1].

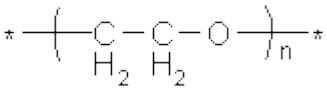
Code	Densité	Taux de cristallinité (%)	T_v (°C)	T_f ou T_r (°C)[12]	T_{maxi} (°C)[13]	Module E (GPa)
ABS	1,04-1,12	0	85-125	105-120	70-85	2,5
PA-6	1,13	50	52	215	85	1
PA-6,6	1,14	50	57	260	90	1,5
PC	1,20	0	150	220-250	120	2,4
PE-HD	0,95	80-95	−110	124-135	90	0,8-1,2
PE-LD	0,92	50-70	−110	100-125	70	0,15-0,3
PET amorphe	1,30	0	65-80	255	100	2,7
PET cristallin	1,40	40	65-80	260	100	4,1
PMMA	1,18	0	105	130-140	60-90	3
PP	0,91	60-70	−10	165	100	1,3
PS « cristal »	1,05	0	80-100	100	60	3,2
PVC rigide	1,38	0-5	80	100-120	65	2,4

Tableau(I.3) : Caractéristiques physiques moyennes de quelques polymères thermoplastiques usuels

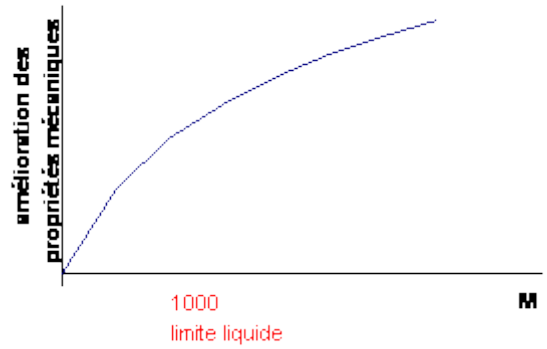
I-5-1 Comment définir la masse d'un polymère ?

Les propriétés mécaniques d'un polymère dépendent très fortement de sa masse.

Exemple :



Pour une masse d'environ 400, ce polymère est un liquide de frein. Par contre, avec une masse d'environ 2000, ce polymère apparaît sous forme de poudre blanche et est utilisé dans la fabrication de médicaments.



Comment définir la masse d'un polymère ?

Soit un échantillon de polymère qui est un mélange de N_i chaînes de masse M_i.

On ne va pouvoir traiter ce problème que de manière statistique. On parlera alors de masse statistique car leur distribution respecte à peu près une gaussienne.

La masse en nombre $\overline{M_n}$ d'un échantillon est :

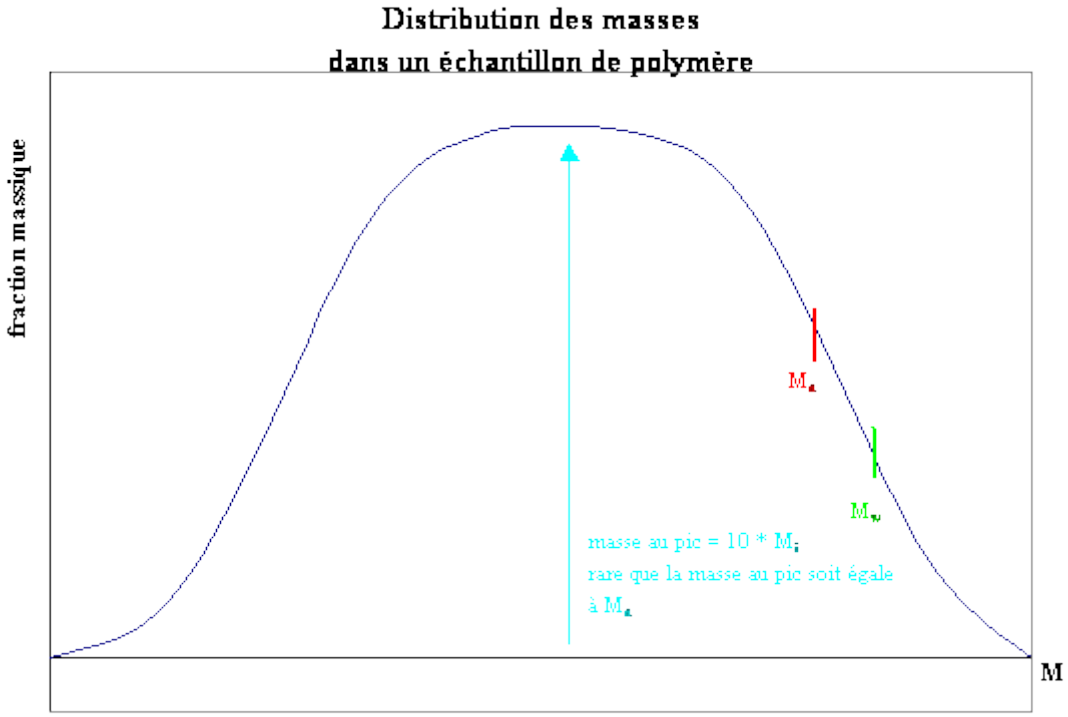
$$\overline{M_n} = \frac{\text{masse totale des chaines}}{\text{nombre total des chaines}} = \frac{\sum_i N_i M_i}{\sum_i N_i}$$

La masse moyenne d'un polymère $\overline{M_w}$ en poids est :

$$\overline{M_w} = \sum_i w_i M_i$$

où w_i est la fraction massique et $w_i = \frac{C_i}{C}$. Ainsi

$$\overline{M_w} = \frac{\sum_i C_i M_i}{\sum_i C_i} = \frac{\sum_i N_i M_i^2}{\sum_i N_i M_i}$$



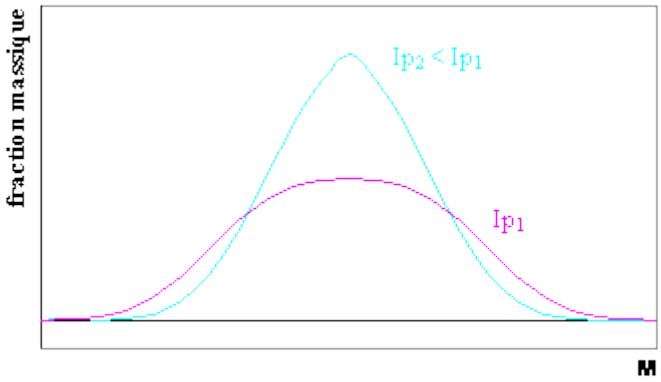
On appelle $\overline{DP_n}$ le degré de polymérisation. Il est égal à :

$$\overline{DP_n} = \frac{\text{masse de polymère}}{\text{masse d'unité ou de motif}} = \frac{\overline{M_n}}{m}$$

Le degré de polymérisation correspond au nombre de motifs moyens par chaîne.

I_p est l'indice de polymolécularité qui mesure la largeur de la dispersion des masses.

Il correspond au rapport $\frac{\overline{M_w}}{\overline{M_n}}$. Généralement on trouve un I_p compris entre 2 et 20 car $\overline{M_w} > \overline{M_n}$.



Quand $\overline{M_w} = \overline{M_n}$ on a $I_p=1$; toutes les chaînes ont la même longueur et l'on parle alors d'échantillon isomoléculaire. Suivant les propriétés que l'on veut donner le polymère, on va fabriquer un polymère de masse voulue. On considère que l'on a de bonnes propriétés pour un échantillon ayant un I_{pmax}. de 1,1.

I-6 Polymères homogènes et hétérogènes

I-6-1 Polymères homogènes

Les matériaux polymères sont définis comme homogènes lorsque leurs propriétés sont macroscopiquement identiques en tout point, c'est-à-dire qu'aucune différence de propriétés, même due aux différents types de macromolécules constitutives, n'est macroscopiquement détectée. Ceci ne signifie pas que le matériau se trouve dans un seul état physique (vitreux, caoutchoutique ou fondu).

Les macromolécules d'un thermoplastique peuvent être simultanément dans un état solide, sous forme de cristallites, et un état caoutchoutique ou vitreux, en tant que zones amorphes désordonnées entre les cristallites. On parle dans ce cas d'un matériau polymère homogène biphasique.

I-6-2 Polymères hétérogènes

Les matériaux polymères hétérogènes sont constitués au minimum de deux composés organiques de nature chimique différente, dont l'un au moins est un matériau polymère qui assure la cohésion du système. Les différents constituants sont liés entre eux, soit chimiquement, soit physiquement.

Les propriétés des matériaux polymères hétérogènes sont déterminées à partir de celles de leurs constituants. Les mélanges de polymères représentent le groupe le plus important des matériaux polymères hétérogènes et donnent naissance à des matériaux polymères à plusieurs composants, dont les propriétés peuvent être macroscopiquement différenciées .

Lorsque deux polymères différents sont mélangés, les propriétés du produit résultant ne sont pas identiques à celle des matières de départ et peuvent être, soit intermédiaires (interpolation linéaire, lois des mélanges), soit réduites (altération) ou encore améliorées par rapport aux propriétés de chacun des polymères d'origine.

Approximativement, 10 % des thermoplastiques et 75 % des élastomères sont utilisés sous forme de mélanges. Initialement, les mélanges de polymères étaient principalement destinés à améliorer la ténacité et la processabilité des matériaux. D'autres améliorations sont toutefois possibles, à savoir l'augmentation de la température de déformation à chaud, de la résistance à la fissuration sous contrainte, de l'aptitude à l'induction et à la galvanisation, mais aussi une amélioration du comportement au feu. Les mélanges de polymères les plus importants sont, du point de vue application, ceux préparés par modification d'un polymère à base de styrène par une phase élastomère [1].

I-7 Classification des polymères

On considère habituellement trois familles de polymères selon leurs propriétés mécaniques :

- les thermoplastiques : avec l'élévation de température, le polymère passe à l'état « fondu » (état fluide ou déformable), ce qui permet de le mettre en forme ; il devient rigide en se refroidissant, mais repasse à l'état fondu si on le réchauffe ; exemples : ABS, CA, PAN, PE, PEEK, PET, PMMA, POM, PP, PS, PTFE, PVC, SAN ;

- les thermodurcissables : à la fabrication, le polymère devient visqueux avec l'élévation de température, ce qui permet sa mise en forme, puis devient irréversiblement rigide en raison de réactions chimiques ; il reste rigide même si la température s'élève à nouveau ; exemple : EP, PF, certains PI, UP ;

- les élastomères : le polymère peut s'allonger énormément de manière élastique, il s'agit du caoutchouc naturel (sigle NR) et des caoutchoucs synthétiques ; il existe des élastomères thermoplastiques (TPE) (la plupart) et des élastomères thermodurcissables ; exemples : EPDM, NBR, IR.

I-8 Différents types de polymères.

Il existe deux types de polymères :

-. Les homopolymères

-. Les copolymères

I-8-1 Les homopolymères.

Les homopolymères sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité. Parmi les homopolymères, on peut citer le polyéthylène.

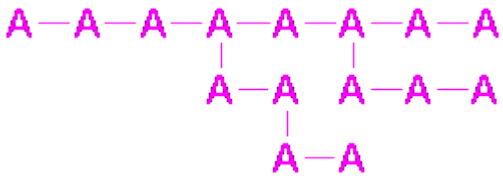
Il existe, au sein des homopolymères, différentes familles. Pour la suite du paragraphe, A sera l'unité de l'homopolymère.

Parmi les différents types d'homopolymères, nous trouvons :

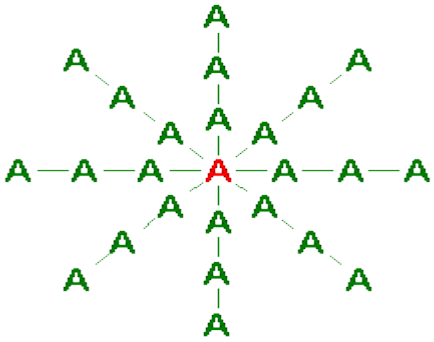
- les homopolymères linéaires.



- les homopolymères branchés.



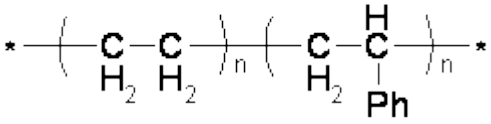
-. Les homopolymères étoilés.



I-8-2 Les copolymères.

Les copolymères sont des polymères qui possèdent plusieurs unités.

Comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se classer dans différentes familles. On parle alors de modes de copolymères



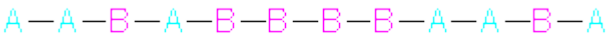
copolyéthylènestyrène

Pour la suite du paragraphe, A et B seront deux unités différentes du copolymère.

Parmi les différents modes de copolymères, nous trouvons :

- le mode statistique.

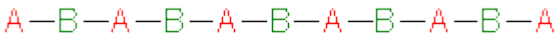
A et B se répartissent en suivant une statistique. Les copolymères désordonnés (Random) font partie de cette famille.



- le mode alterné.

(alternating copolymère) :

Les deux motifs alternent régulièrement



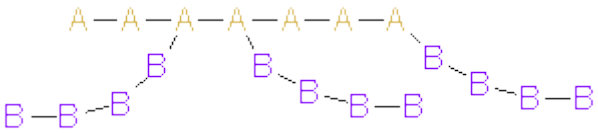
- le mode séquencé.

Chaque unité constitutive est répétée plusieurs fois de suite pour former de longues séquences



- le mode greffé.

Exemple le plus simple : une chaîne d'un homopolymère principal, sur lequel des chaînes secondaires d'un autre polymère sont greffées



Exemple le plus simple : une chaîne d'un homopolymère principal, sur lequel des chaînes secondaires d'un autre polymère sont greffées

Les polymères, qu'ils soient homo ou copolymères, peuvent être réticulés.

Un polymère réticulé est un polymère dont certaines de ses chaînes sont reliées entre elles par des ponts chimiques covalents.

La plupart des polymères doivent être réticulés avant leur utilisation. En effet, un polymère est un liquide et pour le maintenir en place, il faut le réticuler [1].

I-9 -La polymérisation

I-9-1 Définition

La polymérisation désigne la réaction chimique ou le procédé par lesquels des petites molécules (par exemple des hydrocarbures de deux à dix atomes de carbone) réagissent entre elles pour former des molécules de masses molaires plus élevées. Les molécules initiales peuvent être des monomères ou des pré-polymères ; la synthèse conduit à des polymères.

En général, en présence de réactifs et de catalyseurs, et sous l'action de la chaleur et de la pression, il se forme des chaînes macromoléculaires constituées de motifs de répétition identiques (homopolymère synthétisé) ou différents (copolymère obtenu), liés de façon covalente.

On obtient des polymères, de masses molaires éventuellement plus élevées :

Monodimensionnels (linéaires ou ramifiés) car issus de monomères bivalents ; ou tridimensionnels, issus de la polymérisation de monomères dont la valence moyenne est supérieure à deux1, ou de la réticulation de polymères monodimensionnels.

On distingue les polymères synthétiques comme le polyéthylène2, par opposition aux polymères d'origine naturelle tels la cellulose et les artificiels (comme l'acétate de cellulose) qui sont préparés par modification chimique de polymères d'origine naturelle.

En industrie textile, la polymérisation est le processus chimique par lequel des résines ou des plastiques sont fixés à des matières textiles au moyen de la chaleur3.

I-9-2 Degré de polymérisation et masse moléculaire

Le degré de polymérisation (DP) définit la longueur d'une chaîne polymère. DP est le nombre d'unités monomères (unités répétitives) constitutives de cette chaîne. Le degré de polymérisation est directement proportionnel à la masse molaire du polymère

Un polymère peut être caractérisé par son degré de polymérisation ou sa masse moléculaire. Le degré de polymérisation est le nombre total de monomères contenus dans une macromolécule.

Lorsque ce degré de polymérisation (DP) est inférieur à 30, on parle d'oligomère et lorsqu'il est supérieur à 30, c'est un polymère.

Lorsqu'on observe un polymère de synthèse ou un polymère naturelle, il est souvent constitué d'un mélange de chaînes macromoléculaires de tailles différentes avec des degrés de polymérisation différents.

La masse moléculaire M d'un matériau polymère est calculée de deux façons :

Mw : est la masse moléculaire moyenne de toutes les macromolécules présentes dans le matériau.

Mn : est la masse moléculaire majoritaire dans le mélange.

I-9-3 Typologie

Les réactions de polymérisation peuvent être classées selon deux critères :

La formation ou non d'un coproduit de faible masse moléculaire lors de la polymérisation :

Polycondensations : ces réactions classiques de la chimie organique portent sur des monomères polyfonctionnels. Elles se font avec départ de petites molécules souvent éliminées au fur et à mesure de leur apparition dans le milieu pour déplacer l'équilibre réactionnel : H2O (souvent), HCl, NH3, etc. On emploie parfois les catalyseurs classiques utilisés avec les petites molécules. Le polymère résultant de la polycondensation est appelé polycondensat. Exemples : polyestérifications, polyamidifications ;

Polyadditions : ce sont des réactions de polymérisation ionique (anionique ou cationique) par ouverture de la double liaison d'un composé carbonylé ou par ouverture d'un hétérocycle. Elles se font sans élimination de petites molécules.

La distinction entre polycondensation et polyaddition a été introduite par Wallace Hume Carothers en 19294,5 ;

le mécanisme de réaction :

Polymérisations par étapes : réactions ayant lieu entre des groupes fonctionnels. La majorité des polymérisations par étapes se fait par polycondensation ;

Polymérisations en chaîne : réactions ayant lieu grâce à la formation de centres actifs comme des radicaux ou des ions. La majorité des polymérisations en chaîne se fait par polyaddition.

La distinction entre polymérisation par étapes et polymérisation en chaîne a été introduite par Paul J. Flory en 19536.

9-3-1 Polymérisation en chaîne

Le cas le plus important concerne la polymérisation des monomères vinyliques (CH2=CHR) ou de formule CH2=CR1R2.

Les réactions de polymérisation en chaîne comportent trois étapes successives :

Amorçage, qui permet de créer des centres actifs, de nature radicalaire [résultant par exemple de la décomposition thermique d'un peroxyde ou de l'AIBN (amorceurs)], ionique (anionique ou cationique) ou organométallique (cas de la polymérisation coordinative) ;

propagation, durant laquelle les espèces actives permettent la création de chaînes qui croissent par fixation de monomères sur les centres actifs. Dans ce cas, la croissance d'une chaîne polymère résulte exclusivement de réaction(s) entre monomère(s) et site(s) réactif(s) de la chaîne. L'étape de propagation est environ cent mille fois plus rapide que la précédente ; terminaison/transfert : le centre actif finit à un moment par être détruit, entraînant l'arrêt de la croissance de la chaîne. Exemples de réactions de terminaison ou de transfert : en polymérisation radicalaire : couplage (ex. : fixation de l'amorceur), dismutation, transfert au monomère, au solvant (de type hydrocarboné ou hydrohalogéné), au polymère, à un agent ajouté, à une petite molécule présente, à l'amorceur, ramification, pontage (peu probable), en polymérisation cationique : déprotonation, fixation d'un nucléophile, en polymérisation anionique : absence, sauf accident (présence de dioxygène, protons, impuretés). Voir Polymérisation vivante.

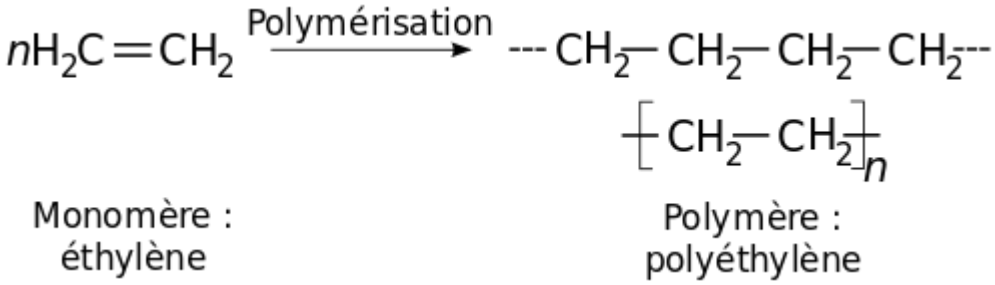
La polymérisation radicalaire et la polymérisation ionique non coordinnée ne sont pas stéréospécifiques.

9-3-2 Réaction d'inhibition

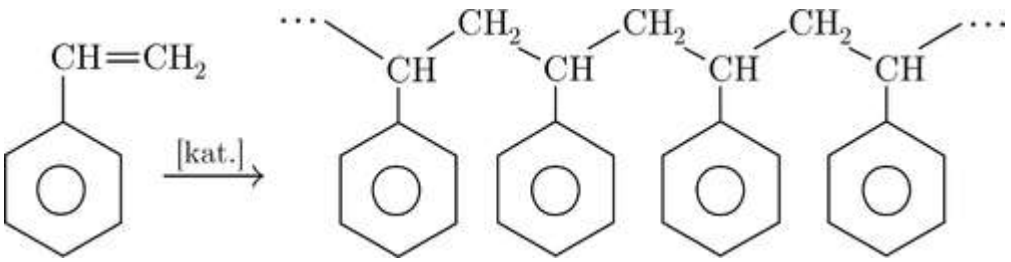
Un inhibiteur (ex. : polyphénols) est une molécule qui se fixe sur les centres actifs en produisant des composés incapables de se fixer sur le monomère. Cette réaction arrête la croissance de la chaîne. Les inhibiteurs sont utilisés durant le transport ou le stockage du monomère pour éviter sa polymérisation. Les inhibiteurs actifs à la température de polymérisation doivent être éliminés (par distillation, lavage) avant de réaliser la polymérisation.

Exemples

- Polymérisation de l'éthylène, pour former du polyéthylène :



- Polymérisation du styrène, pour synthétiser du polystyrène :



9-4 Polymérisation par étapes

Dans ce cas, on peut former des dimères, des trimères, etc., qui peuvent réagir entre eux, et les masses molaires croissent progressivement. Pour fabriquer des polymères de degré de polymérisation élevé, il est nécessaire que la réaction soit totale. Deux types de polymérisations par étapes sont à distinguer :

- la plupart des polymérisations par étapes sont des *polycondensations*, qui peuvent être schématisées par :

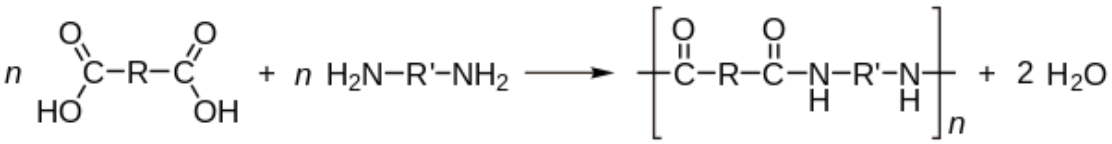
A- Xm-B+A-Xn-B=A-Xm+n-B+AB

Avec

les molécules réactives A-Xm-B et A-Xn-B portant les fonctions antagonistes Aet B m et n =1.2.3…..m ou n

Exemples :

- polymérisation des diamines primaires et des diacides carboxyliques (molécules bifonctionnelles et bivalentes[7]) qui conduit à des polyamides et à de l'eau :



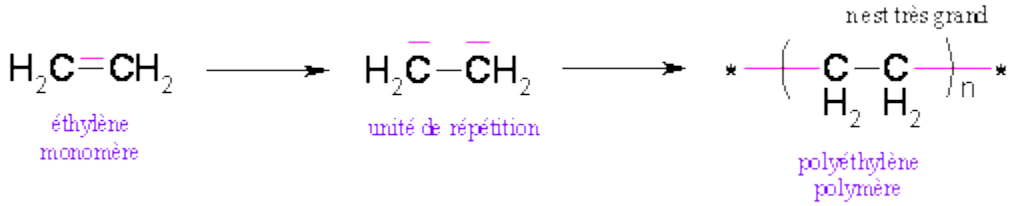
- prépolycondensation d'une résine aminoplaste, phénoplaste, polyester insaturée, etc., suivie d'une polymérisation complète dans le moule, pour produire un polymère tridimensionnel ;
il existe aussi certaines polymérisations par étapes qui sont des polyadditions : par exemple, polymérisation des diols sur les diisocyanates qui conduit aux polyuréthanes.

Le choix des matières premières est très vaste et permet une large variété de combinaisons conduisant à des propriétés et des applications différentes. Les polymères obtenus contiennent souvent des hétéroatomes caténaires (sur la chaîne principale).

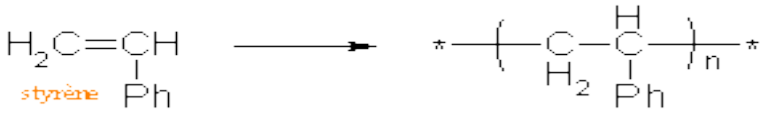
I-10 Types de polymère

Un polymère est une macromolécule formée de l'enchaînement covalent d'un très grand nombre d'unités de répétition qui dérivent d'un ou de plusieurs monomères (qui sont également appelés motifs) et préparée à partir de molécules appelées monomère.

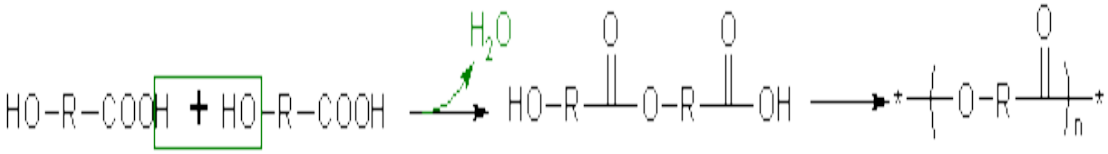
Exemple :



Tout monomère comporte au minimum deux sites réactifs. La polymérisation sur la double liaison du monomère correspond à l'ouverture de la double liaison [1].



Il n'y a pas que des doubles liaisons qui forment des polymères :



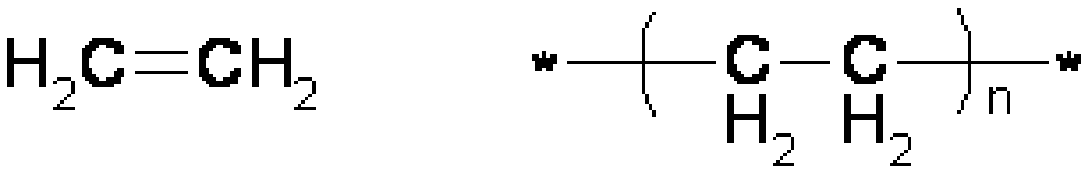
10-1 Exemple de polymères usuels.

a) Le polyéthylène (PE)



Figure (I.1): Le polymère polyéthylène

Le polymère le plus utilisé est le polyéthylène

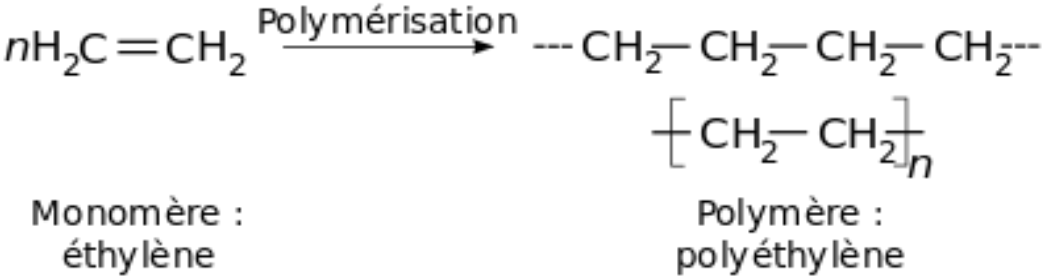


***Définition**

Le PE qui appartient à la famille des polyoléfines est un important polymère de synthèse de la pétrochimie avec le polypropylène (PP), le PVC et le polystyrène (PS). Sa température de transition vitreuse est très basse (voisine de −110 °C) et son point de fusion peut selon les grades atteindre 140 °C, mais sa résistance mécanique fléchit nettement dès 75 à 90 °C. Contrairement au polypropylène, la température d'utilisation ne peut excéder le point d'ébullition de l'eau. Sa nature paraffinique explique sa grande inertie chimique. Il existe différents types de polyéthylènes dont les homopolymères à basse densité (LDPE) et à haute densité (HDPE), et des copolymères (LLDPE, plastomères, par exemple).

Sa combustion dégage différents gaz (plus de 200, potentiellement7, dont certains sont toxiques : furanes, acétaldéhyde, hydrocarbures insaturés ou aromatique (benzène), acide acétique ou propanoïque8, mais aussi monoxyde d'azote, monoxyde de carbone et CO2, considérés comme des polluants atmosphériques9.

***Production**



Son nom vient du fait qu'il est obtenu par polymérisation des monomères d'éthylène (CH2=CH2) en une structure complexe de formule générique -(CH2-CH2)n-.

Le polyéthylène est la seule polyoléfine qui puisse être préparée par voie radicalaire.

Le polyéthylène est surtout issu de la pétrochimie. En juin 2007, la compagnie brésilienne Braskem a annoncé la certification d'un *polyéthylène vert*, polymérisé à partir d'éthylène issu d'éthanol lui-même obtenu par fermentation de canne à sucre.

***Classification**

Les polyéthylènes peuvent être

- linéaires ou branchés (ou ramifiés), et dès lors classés selon :

o leur densité qui dépend du nombre et de la longueur des ramifications présentes sur les chaînes moléculaires

o leur masse molaire :

▪ polyéthylène à masse molaire très basse (ULMWPE ou PE-WAX, *ultra low molecular weight polyethylene*) ;

▪ polyéthylène à masse molaire élevée (HMWPE, *high molecular weight polyethylene*) ;

▪ PE-UHPM, polyéthylène de masse molaire très élevée (UHMWPE, *ultra-high-molecular-weight polyethylene* ou PE-UHMW selon la norme EN ISO 1043-1)

***Propriétés**

Le polyéthylène est un polymère thermoplastique, translucide, chimiquement inerte (il est plus résistant aux oxydants forts que le polypropylène), facile à manier et résistant au froid.

Les trois principales familles de PE sont le HDPE (PE haute densité), le LDPE (PE basse densité) et le LLDPE (PE à basse densité linéaire).

Le LDPE est plus ramifié que le HDPE, ce qui signifie que les chaînes s'assemblent moins bien entre elles. Les forces intermoléculaires de type van der Waals sont donc plus faibles. Il en résulte un taux de cristallinité moindre[14], une plus faible densité, une malléabilité et une résistance aux chocs plus élevées. En revanche, le HDPE est plus rigide.

- Le LDPE est obtenu par polymérisation radicalaire vinylique sous très haute pression, et possède une masse molaire de l'ordre de 200 000 à 500 000 $g \cdot mol^{-1}$ (mais elle peut être beaucoup plus élevée).

- Les autres PE peuvent être obtenus par une méthode de synthèse plus complexe et plus chère : la polymérisation coordinative par catalyse Ziegler-Natta.

***Utilisation**

Le polyéthylène est un polymère de synthèse très employé. Il compose notamment la moitié des emballages plastiques (films à usage alimentaire, agricole, etc.).

L'utilisation la plus visible du polyéthylène sont les sacs plastiques :

- Lorsque le sac se froisse facilement sous la main, avec un bruit craquant, un touché « mécanique », et revient plus ou moins spontanément à sa forme d'origine, il s'agit du HDPE (PE haute densité)

- Lorsque le toucher est plus « gras », que le plastique se froisse sans bruit, se perce facilement avec le doigt, il s'agit du LDPE (PE basse densité).

Les principales applications du HDPE sont des produits rigides : flacons (détergents, cosmétiques, etc.), bouteilles, boîtes type Tupperware, jerricans, réservoirs de carburant d'automobiles, etc.

Les principales applications du LDPE sont des produits souples : sacs, films, sachets, sacs poubelles, ruban adhésif, récipients souples (ketchup, crèmes hydratantes, etc.), etc.

Le polyéthylène réticulé (PER) montre une meilleure tenue thermique que le PE. Pour la fabrication de gaines de câbles électriques, la réticulation se fait en général après extrusion.

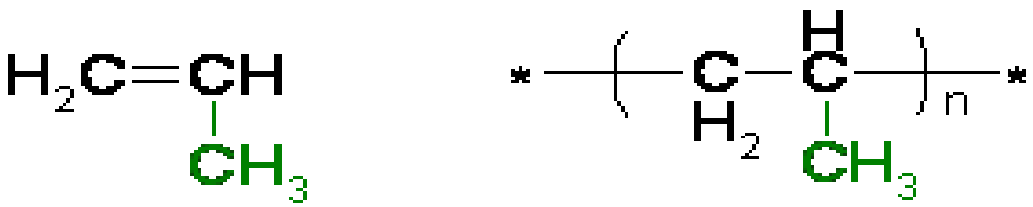
Le polyéthylène de masse molaire très élevée, tel le Dyneema, est utilisé pour ses hautes performances (un rapport résistance/masse 40 % supérieur à celui des aramides (Kevlar)). On le trouve dans les équipements sportifs (ski, snowboard, surf, cerfs-volants, etc.), le matériel de protection, notamment balistique (gilets pare-balles) ou moto (tenues à haute résistance à l'abrasion), les implants chirurgicaux, les plaques pour remplacer la glace des patinoires, etc. Son coût est très supérieur à celui des autres polyéthylènes.

b) Le polypropylène (PP).



Figure (I.2): Le polymère polypropylène

-. Le deuxième polymère fort utilisé est le polypropylène



***Définition**

Le polypropylène (ou polypropène) isotactique, de sigle PP (ou PPi) et de formule chimique $(-CH_2-CH(CH_3)-)_n$, est un polymère thermoplastique semi-cristallin de grande consommation.

Le polypropylène isotactique est une polyoléfine résultant de la polymérisation coordinative des monomères propylène [(CH_2=CH-CH_3)] en présence de catalyseurs, suivant principalement la catalyse de Ziegler-Natta.

***Propriétés**

- Module de Young : 1,1 à 1,6 GPa
- Retrait : 1 à 2,5 %

Le polypropylène de grade « injection » est très facilement recyclable ; le PP de grade « film » est au contraire beaucoup plus délicat à recycler, surtout s'il est imprimé.

Le polypropylène est translucide à opaque, hydrophobe, dur, semi-rigide et très résistant à l'abrasion.

Pour augmenter ses propriétés mécaniques, il est courant qu'il soit chargé en fibre de verre, à hauteur de 10 à 30 % en général.

Le polypropylène expansé, de sigle EPP en anglais ou PP-E selon la norme EN ISO 1043-1, est une mousse blanche ressemblant au polystyrène expansé, mais avec une mémoire de forme lui permettant de se déformer sans casser et de conserver sa structure.

Le propylène peut former des homopolymères (polypropylène), des copolymères statistiques ou des copolymères « bloc ». Le comonomère le plus utilisé est l'éthylène pour donner des polyoléfines élastomères comme l'éthylène-propylène (EPR ou EPM) et l'éthylène-propylène-diène monomère (EPDM).

***Application**

On trouve de nombreuses pièces moulées en polypropylène pour la construction automobile, notamment les pare-chocs, les tableaux de bord, l'habillage de l'habitacle et les réservoirs d'essence et de liquide de frein. Le polypropylène est souvent utilisé pour les emballages alimentaires pour sa résistance à la graisse (ex. : emballages de beurre) et son aspect brillant. Il est également utilisé pour la fabrication de tissus d'ameublement, de vêtements professionnels jetables (combinaisons de peinture, charlottes, masques chirurgicaux, etc.), de sacs tissés à haute résistance, de géotextiles et de géomembranes ;

on le trouve aussi sous forme de fibres dans les cordages et les tapis synthétiques. Des pailles à boire sont également fabriquées en polypropylène.

En longueur nominale de 6 à 18 mm, la fibre de polypropylène est l'adjuvant idéal au béton pour diminuer le retrait plastique, les fissurations et les lézardes, et augmenter les propriétés de surface. Les fibres ne remplacent pas le renforcement structurel traditionnel en acier ou les procédés habituels de bonne prise du ciment, mais il est très souvent possible de remplacer les treillis par ces fibres.

Plusieurs pays ont émis des billets de banque en polypropylène, dont le Canada, Singapour, l'Australie, le Mexique et Israël.

Pour l'alléger tout en renforçant sa rigidité, il peut être moulé comme du carton ondulé ; appelé polypropylène alvéolaire (PPA). Il peut aussi avoir une structure en nid d'abeille (*honeycomb* en anglais).

Le polypropylène expansé est utilisé en aéromodélisme pour construire les petits modèles (moins d'un mètre d'envergure). Grâce à ses propriétés mécaniques (légèreté, souplesse et mémoire de forme), il permet de créer des modèles très résistants aux chocs, et faciles à réparer (collage rapide à la colle cyanoacrylate).

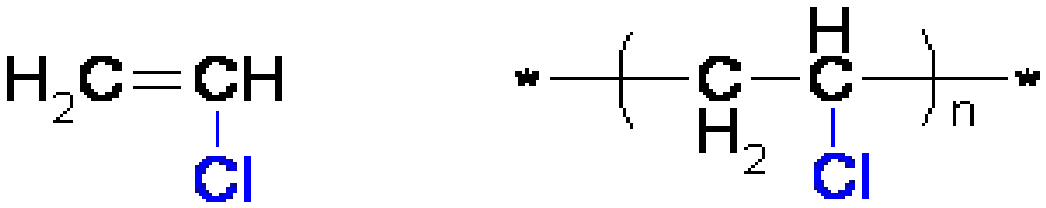
Dans les domaines de l'électrotechnique et de l'électronique, le polypropylène a de nombreuses applications. Par exemple comme isolant dans les transformateurs, pour les gaines des fils et câbles et en tant que diélectrique de condensateurs à films plastiques et de condensateurs de puissance.

c) Le polychlorure de vinyle (PVC).





Figure (I.3):le polymère polychlorure de vinyle



***Définition**

Le poly (chlorure de vinyle), connu sous le sigle PVC (sigle venant de l'appellation anglaise polyvinyl chloride), est un polymère thermoplastique de grande consommation, amorphe ou faiblement cristallin, principal représentant de la famille chloropolymères.

Il est préparé à partir de deux matières premières : à 57 % de sel de mer (NaCl) et à 43 % de pétrole ; c'est la seule matière plastique constituée par plus de 50 % de matière première d'origine minérale.

Le PVC rigide est surtout utilisé pour la fabrication de profilés et tubes par extrusion. Le PVC souple (ou PVC plastifié) sert par exemple dans l'industrie des vêtements et des tapisseries.

***Formulation**

Certains additifs permettent d'améliorer sa stabilisation chimique, face aux ultraviolets, à la chaleur, aux chocs, etc., et stabiliser sa couleur et son aspect. Par exemple, des stabilisateurs dits « Hals » (pour *Hindered Amines Light Stabilizers*) le rendent plus résistant à la lumière en inhibant l'activité des radicaux libres.

Le PVC peut intégrer de nombreuses charges, qui sont surtout des minéraux tels que le carbonate de calcium naturel ou précipité, le talc, le kaolin, ou des métaux destinés à améliorer ses propriétés mécaniques, son état de surface et aussi à en diminuer le prix de revient[réf. nécessaire]. En moyenne, le PVC contient 10 % d'additifs.

Le PVC doit résister à la chaleur ou au feu. Or il est combustible et libère naturellement à 170-180 °C du chlorure d'hydrogène et dès 70 °C, du chlorure d'hydrogène lors d'une réaction auto-entretenue une fois qu'elle est amorcée. Des additifs stabilisants empêchent ou limitent cette libération :

- stéarates de cadmium et laurates de cadmium : très toxiques et autrefois très utilisés, ils ne sont plus utilisés dans quinze pays de l'Union européenne depuis 2001 et depuis 2007 pour les vingt-sept pays de l'UE où le taux de cadmium du PVC destiné à la construction ne doit plus dépasser 0,1 %, car il est difficile de l'éliminer quand on utilise du PVC recyclé[14] ;

- sulfates de plomb, stéarates de plomb et phtalates de plomb : toxiques, ils sont maintenant interdits dans les emballages, et tendent ailleurs à diminuer dans l'UE de 2007 à 2012, et ne doivent plus être utilisés depuis 2015 ;

- calcium et zinc sous forme de carboxylates : ils sont utilisés comme alternative aux produits précédents (cadmium, plomb hautement toxiques)[14]. Les emballages PVC doivent

en contenir moins de 0,2 % et les autres PVC devraient ne plus en contenir plus de 0,5 % ; en Europe de l'Ouest (Turquie comprise), leur usage a augmenté (passant de 18 000 t en 2000 à 80 000 t en 2011) ;

- carboxylates de baryum : comme certains carboxylates de zinc, ils sont un composant (0,1 % environ) des PVC souples (mais interdits dans les emballages alimentaires) ;

***Transformation**

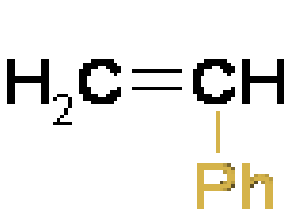
Le PVC est le plus souvent mis en forme par des procédés *en continu* (extrusion, enduction). L'extrusion est utilisée notamment pour la fabrication des profilés des fenêtres et des tubes en PVC. L'injection est moins utilisée en raison des risques de dégagement d'acide chlorhydrique, mais de nombreux articles sont cependant produits industriellement : pièces de canalisation, équipements électriques, etc. Pour assembler différentes pièces en PVC, les méthodes les plus couramment utilisées sont le collage et différentes techniques de soudage, notamment le thermosoudage.

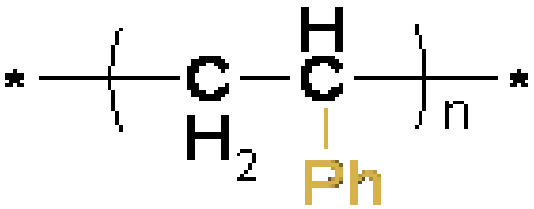
d) Le polystyrène (PS).





Figure (I.4) :le polymère polystyrène





***Caractéristiques**

L'application connue du grand public est le polystyrène expansé, souvent nommé mousse de polystyrène ou styromousse et très couramment utilisé en emballage. C'est une sorte de matériau composite particulier, une matrice plastique rigide, emprisonnant de toutes petites bulles de gaz en grande quantité. Mais ce matériau n'est qu'un des aspects de ce plastique ; on le trouve aussi souvent non expansé, dense, rigide, transparent et peu épais, mais aussi d'autres formes d'expansé ou mélangé avec d'autres plastiques et additifs.

Ses formes courantes sont :

- la plus commune transparente est dite « cristal », sigle PS, l'(homopolymère) précité ;

- l'expansé, la plus connue, à cellules fermées, de sigles PSE (EPS pour *Expanded polystyrene*) ou PS-E selon la même norme (densité très faible, rigide, blanc, bon amortisseur de choc, économique) (appelé « frigolite » en Belgique, « Sagex » en Suisse et « Styromousse » au Canada) ;

- l'extrudée à cellules fermées, sigle PSX (ou XPS = eXtruded PolyStyrene en anglais). C'est un matériau commercialisé en plaque de faible épaisseur (quelques millimètres), facile à couper, à percer, thermoformable ; sa forme est translucide, blanc-laiteux (surnommé parfois opaline), dans la gamme Styroglass;

- le « choc », de sigles SB, HIPS (HI pour *High-impact* en anglais) ou PS-HI selon la norme EN ISO 1043-1 ;

***Propriétés et application**

- **Résistance aux chocs** :

o Articles de décoration ou matériel de bureau en PS cristal injecté : double-décimètres, équerres et rapporteurs d'écolier.

o Logistique - Calages en PSE : transport de produits fragiles (électroménager, lave-linge, ordinateur, sèche-linge, réfrigérateur, four, etc.)

o Maquettisme (maquette) : pièces moulées de PSE à peindre, carte plastique en PS choc. Le côté cassant de ce type de polystyrène est souvent très atténué pour permettre un maximum de manipulation.

o Maison de disques - PS cristal : boîtiers de CD.

- **Isolation thermique** :

o Bâtiment/constructions - Panneaux et blocs en PSE : cloisons isolantes - plancher (isolation sous dalle, isolation sous chape, entrevous) - toitures - coffrages (ils permettent d'ériger des murs en béton armé isolés en une seule opération).

- Froid - Parois en PSE : camions frigorifiques, glacières chambres frigorifiques.

- **Résistance à la compression** :

- Emballage en PSE : barquettes alimentaires de produits frais, caisses marées et cales.

- Travaux publics et génie civil - Blocs en PSE : remblayage de routes et autoroutes - Talus - Murs anti-bruit - Culées de ponts - Protection de conduits enterrés - Pontons.

- **Imperméabilité / Nettoyabilité** :

- Alimentaire - Emballage (pots de yaourt, crème fraiche, etc.) et vaisselle à usage unique (gobelets, couverts) en PS choc blanc thermoformé - Vaisselle à usage unique en PS cristal injecté (gobelets, verrines, etc.).

- Hématologie - Matériel en PS cristal (plaque de laboratoire, flacon)

- **Densité - Très faible absorption d'eau** :

- Ouvrages flottants sur blocs en PSE : pontons - jardins - maisons (Pays-Bas)

- Nautisme - Flotteurs en PSE (balises, ligne d'eau), planches de funboard.

- Logistique - Réduire le poids des emballages (feuille allégée en XPS)

- De 16 à 1 060 $kg \cdot m^{-3}$, écart dû à l'addition de divers matériaux comme le béton armé

- **Propriété électrostatique** :

- Médecine - traitement des hyperkaliémies par résine échangeuse de cations en polystyrène de sodium ou Kayexalate.

***Utilisations militaires :**

- Le polystyrène est un des composants du napalm moderne (« napalm-B »), où il sert de gélifiant.

- Il entre également dans la constitution de la bombe à hydrogène : il maintient en suspension les éléments de la bombe avant son utilisation, et se transforme en plasma au moment de la mise à feu.

e) Polycarbonate PC

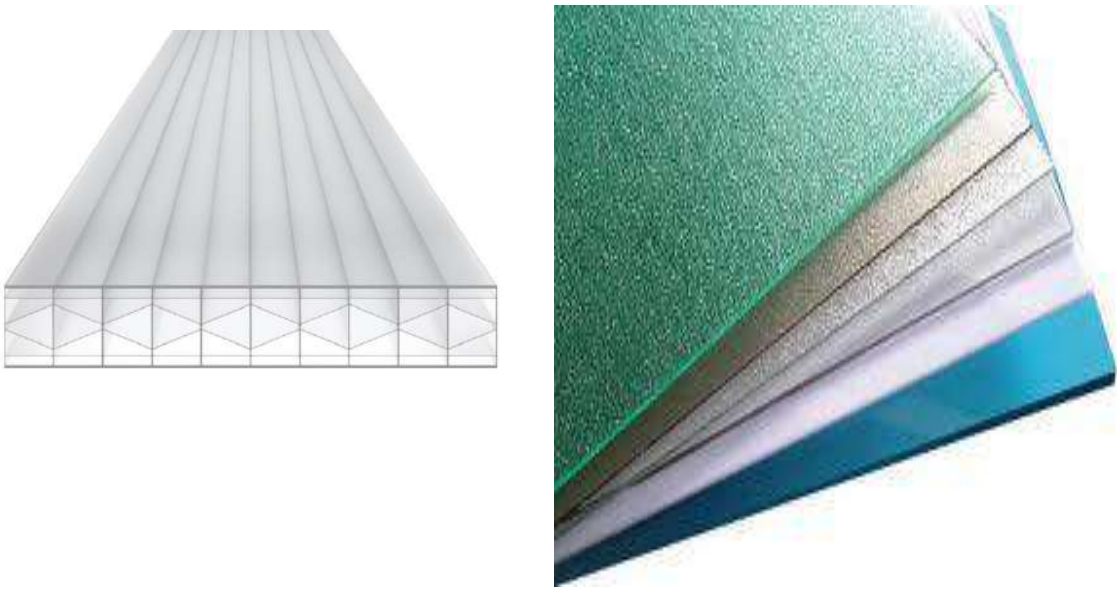


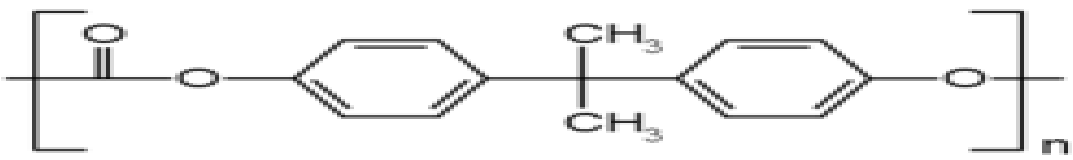
Figure (I.5) : le polymère polycarbonate

***Définition**

Le **polycarbonate** est une matière plastique disposant d'excellentes propriétés mécaniques et d'une résistance thermique permettant une utilisation entre −100 °C et 120 °C[3]. Ce polymère est issu de la polycondensation du bisphénol A (BPA) et d'un carbonate ou du phosgène, ou par transestérification.

Le matériau a été découvert en 1953 par trois chercheurs travaillant pour Bayer AG, Schnell, Bottenbruch et Krimm. Sa première mise sur le marché date de 1958. Il est commercialisé sous plusieurs noms : Makrolon de Covestro, Lexan de Sabic[5], Hammerglass, Xantar de Mitsubishi engineering plastics ou Durolon d'Unigel plasticos

.



***Propriétés et application**

La très grande transparence de cette matière est exploitée pour la fabrication de verres optiques, des CD et DVD, des lentilles de caméras thermiques (caméras infrarouge) ou encore de vitres de phares automobiles. En forte épaisseur, il possède une légère teinte jaune.

Son excellente résistance aux chocs[3] en fait un matériau très approprié pour la fabrication de casques de moto ou de boucliers de police, mais aussi de mobilier ou de coques de smartphones.

L'innocuité physiologique du polycarbonate[réf. nécessaire] permet son utilisation dans le domaine médical pour la fabrication de matériel ou de prothèses. Sa sensibilité aux agents chimiques et aux ultraviolets limite toutefois son utilisation. On doit faire particulièrement attention lors de contacts prolongés avec l'eau, surtout à des températures supérieures à 60 °C, qui exposent au risque d'une forte hydrolyse.

À 20 °C, il est incompatible avec l'acétaldéhyde, l'acétate d'éthyle, l'acétone, l'acide acétique glacial, l'acide fluorhydrique à 48 %, l'acide nitrique à 70 %, l'acide perchlorique, l'acide sulfurique à 98 %, l'anhydride acétique, l'ammoniac, l'ammoniaque à 30 %, le benzène, le chloroforme, la diéthylamine, le diméthylsulfoxyde, l'éther éthylique, l'hydrazine, le nitrobenzène, le nitrométhane, le perchloroéthylène, la potasse concentrée, la soude à 50 %, le sulfure de carbone, le tétrachlorure de carbone, le trichloroéthane, le trichloroéthylène, l'urée, le xylène.

Le polycarbonate est mal adapté aux fours à micro-ondes car il absorbe la chaleur.

Son indice de réfraction (dans le visible) est de 1,591.

f) ACRYLONITRILE BUTADIÈNE STYRÈNE (ABS)



Figure (I.6): ACRYLONITRILE BUTADIÈNE STYRÈNE

***Définition**

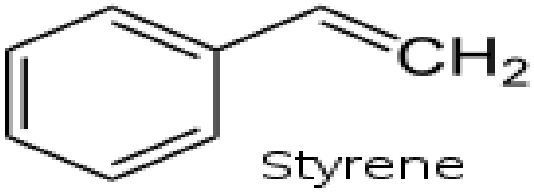
L'ABS est un thermoplastique produit à partir de trois monomères différents, soit l'acrylonitrile, le butadiène et le styrène (Yu et al., 2009). Ces monomères sont assemblés en paires, entre eux, pour former des copolymères (Yu et al., 2009). La structure de l'ABS est constituée à partir de deux groupes de copolymères, soit le styrène-acrylonitrile et le styrène-butadiène, formant un équilibre entre les propriétés mécaniques performantes et une luisance extérieure importante (Yu et al., 2009). Ce thermoplastique a été développé vers 1950, environ 10 ans après la découverte des copolymères qui forment la structure du polymère (Yu et al., 2009). Ce dernier est utilisé, entre autres, pour la production des pièces de LEGO, de certaines pièces automobiles ainsi que par l'industrie électrique et de l'électronique (Yu et al., 2009). Les concentrations des différents monomères varient énormément en fonction de l'utilisation recherchée, en plus de la synthèse de nombreux copolymères avec, entre autres, le PC, le PVC et le PP (Mark, 2009).



Acrylonitrile



1,3-Butadiene



Styrene

***Propriétés**

L'ABS est composé de trois monomères distincts à différentes concentrations, l'acrylonitrile, le butadiène et le styrène (Yu et al., 2009). Chaque monomère contribue à l'expression de certaines caractéristiques du polymère, que ce soit la résistance aux chocs, à la température ou encore une apparence brillante et nette (Yu et al., 2009). Ce thermoplastique possède des caractéristiques lui permettant d'être utilisé dans le milieu de l'ingénierie industrielle et pour la fabrication de produits de consommation domestique (Yu et al., 2009). À noter que l'échantillon d'ABS utilisé pour ces tests est composé de 30 % d'acrylonitrile, de 20 % de butadiène et de 60 % de styrène (Yu et al., 2009).

les propriétés principales de l'ABS qui possède une densité de 1,05 et une dureté de 102 sur l'échelle de Rockwell. L'ABS démontre une forte résistance aux produits chimiques, à la chaleur et à l'humidité, avec une absorption maximale de 0,1 % de son poids total. La résistance à la tension et la résistance à la flexion du polymère sont respectivement de 45 et 75 MPa, soit les valeurs les plus élevées chez les plastiques pétrosourcés présentés. Néanmoins, la valeur du module d'élasticité est de 2,5 GPa, signifiant que l'ABS est au contraire le plastique pétrochimique présenté ayant la plus faible élasticité. Finalement, la température de transition vitreuse chez l'ABS se situe autour de 110 °C, la résistance au test Charpy est de 20 kJ/m^2 et l'allongement à la rupture est de 30 %, confirmant la forte résistance et la faible élasticité du polymère.

***Résumé de l'ABS**

L'ABS est donc un polymère avec une structure plus complexe que les autres thermoplastiques présentés précédemment. Il est mis en forme à une température plus élevée et possède une densité plus élevée que le PP et le PEHD. Tel qu'exposé dans le tableau 7.2, il possède une forte résistance à la tension et à la flexion et une faible élasticité.

L'ABS possède des caractéristiques performantes, mais spécifiques à certaines utilisations. Néanmoins, ce polymère affiche la valeur la plus élevée des thermoplastiques pétrosourcés présentés au niveau des émissions de GES reliées à sa production, du besoin énergétique et de son prix.

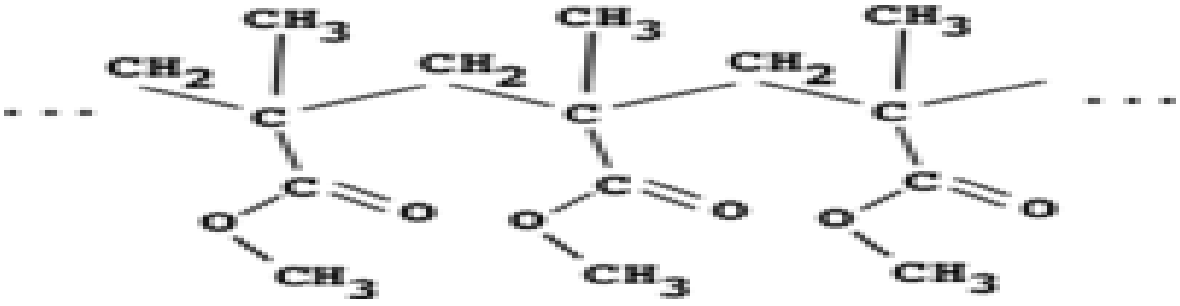
g) Le poly méthacrylate de méthyle (PMMA).




Figure (I.7) : le polymère poly méthacrylate de méthyle

***Définition**

Le poly(méthacrylate de méthyle) (souvent abrégé en PMMA, de l'anglais *poly(methyl methacrylate)*)[9] est un polymère thermoplastique transparent obtenu par polyaddition dont le monomère est le méthacrylate de méthyle (MMA). Ce polymère est plus connu sous son premier nom commercial de Plexiglas, marque déposée utilisée dans le langage courant[10] comme antonomase, même si le leader global du PMMA est Altuglas International[11] du groupe Arkema, sous le nom commercial Altuglas. Il est également vendu sous les noms commerciaux *Lucite*, *Crystalite*, *Hésalite*, *Perspex* ou *Nudec*.



***Propriétés**

Sa température de transition vitreuse (T_v) est comprise entre 46 °C pour un PMMA isotactique (les groupes ester sont alignés du même côté de la chaîne)

et 159 °C pour un PMMA syndiotactique (les groupes ester sont alternés autour de la chaîne)[12]. La majorité des PMMA sur le marché actuellement est atactique, avec une T_v comprise entre 90 °C et 105 °C. La modification du groupe ester induit également un abaissement de T_v (ex. : éthyle : 65 °C, *n*-butyl : 20 °C). Le PMMA peut également être modifié par copolymérisation avec d'autres monomères tels que des acrylates, des acrylonitriles, des styrènes et butadiènes.

Liste :

- très grande transparence, très limpide avec un aspect brillant ;
- propriété optique exceptionnelle (transmission lumineuse supérieure à celle du verre jusque dans le proche UV, transparence, limpidité, brillance). Indice de réfraction de 1,49 ;
- aspect de la surface très lisse et brillant ;
- excellente résistance aux agents atmosphériques ;
- excellente tenue aux rayons ultraviolets et à la corrosion ;
- légèreté : masse volumique de 1,19 $g \cdot cm^{-3}$ (beaucoup plus léger que le verre) ;
- coefficient de dilatation thermique : $70\text{-}77 \times 10^{-6}$ K^{-113} ;
- usage dentaire : sensible à long terme (plusieurs mois) à la présence de la salive (le matériau devient cassant), de chlorhexidine (désinfectant buccal) ou de certains colorants alimentaires (colorations) ;
- conductivité thermique à 23 °C : 0,17-0,19 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-113}$;
- coefficient élevé de dissolution en solution aqueuse.

***Utilisation**

On distingue :

- enseignes, bandeaux lumineux, panneaux signalétiques et publicitaires ;
- PLV, présentoir, gravure, ameublement, agencement de magasin, décoration ;
- pièces industrielles ;
- accessoires de sécurité ;
- balle de contact ;
- prothèse dentaire ;
- implant en ophtalmologie ;
- membranes pour hémodialyseurs… ;
- fibres optiques ;

- lentilles d'appareils photographiques économiques (jetables) - la polymérisation en masse permet l'obtention de pièces sans contraintes internes, possédant donc un indice de réfraction constant et isotrope ;
- support d'impression directe avec encres UV pour les tableaux photographiques[17] ;
- instruments de musique : certains modèles de batteries (Ludwig et Tamburo, entre autres) ;
- réservoir de cigarettes électroniques.
- kits de batterie (comme la Pearl Crystal Beat, ou la Ludwig Vistalite, batterie emblématique de John Bonham)

h) Polyéthylène haute densité HDPE



Figure (I.8) : Polyéthylène haute densité

***Definition**

Le polyéthylène haute densité (PE-HD)[2] est un polyéthylène qui a été synthétisé en 1953 par le chimiste et prix Nobel allemand Karl Ziegler.

Le polyéthylène HDPE est un matériau blanc ou coloré, conforme aux normes sanitaires FDA (naturel) et avec une bonne résistance aux produits chimiques. Disponible dans un fini luisant ou autre, il se caractérise par sa rigidité, sa soudabilité et ses propriétés thermoformables.

***Propriétés**

- Polyoléfine semi-cristalline
- Température maximale d'emploi : 105 °C ; température de fragilisation : −50 °C
- Compatible aux micro-ondes
- Bonne flexibilité

- Très bonne résistance aux acides, alcools aliphatiques, aldéhydes, hydrocarbures aliphatiques et aromatiques
- Faible résistance aux agents oxydants, qui peuvent alors faciliter l'installation d'un biofilm indésirable.

Il est régénéré et recyclé sous forme de granulés.

***Caractéristiques**

Vous vous demandez surement pourquoi les entreprises se penchent vers les matériels en pehd. Sachez que le matériel en polyéthylène à haute densité présente un très grand avantage financièrement. Comme le pehd est plus léger, 30 fois plus léger qu'un matériel en béton, il sera plus rentable à transporter. Au lieu d'engager 2 voitures pour le transport des matériels, une seule voiture suffit. Et pour le déchargement, pas besoin d'engager plusieurs ouvriers. Un produit léger est toujours moins couteux à transporter. Plusieurs experts ont démontré que la présence de l'option pehd assure des économies pour un projet. Ce polymère est une solution très rentable. De plus, l'utilisation du polyéthylène à haute densité garantit un meilleur rapport qualité-prix. Car les matériaux en pehd sont plus résistants. Les produits en polyéthylène sont également plus faciles à manipuler. Il y a moins de risques sur les chantiers.

***Utilisez le pehd pour préserver l'environnement**

Le plus grand challenge des usines est de fabriquer des matériels qui ne nuisent pas à l'environnement. Un matériel qui a moins d'impact sur la planète. Pour réussir leurs défis, la majorité des grandes firmes ont misé sur le polyéthylène haute densité. Sachez que ce polymère de la famille de polyoléfines est l'alternative la plus écologique. Le pehd est d'ailleurs considéré comme un matériau intelligent, car son impact sur la planète est faible. Il est également disponible en abondance. Grâce à l'avancée technologique, vous pouvez obtenir du pehd plastique à partir de la canne à sucre et d'autres ressources non fossiles. Une bonne méthode pour utiliser toutes les ressources qu'offre la nature. De plus ce polymère de la famille de polyoléfines est recyclable à 100 %. Vous pouvez recycler le pe-hd dans des domaines sans pression. Les écologistes encouragent l'utilisation du pehd. Dans l'approvisionnement en eau, l'utilisation des matériels en PEHD tels que les tuyaux en pe hd est un choix très judicieux. Car l'installation est sans tranchée. Il y a moins de perturbation du sol. Au lieu d'avoir recours aux systèmes traditionnels nécessitant

l'excavation d'un fossé, vous pouvez utiliser une machine directionnelle horizontale. Cet engin perce un trou dans le sol et le tuyau est tiré à travers. Côté production, il est important de connaitre que la fabrication des matériels en pe hd utilise également moins d'énergie. Si vous voulez améliorer l'image de votre entreprise, l'utilisation de ce polymère est une bonne solution. Car rien ne vaut une société respectueuse de l'environnement. Optez pour un matériau recyclable comme le pe-hd pour vous différencier de vos concurrents [1]

.

Polymères	Date de première production	Applications
PS	1933 : mise en production en Allemagne par le docteur Wulff	Isolant pour poste TSF, stylos, capsules pour tubes, éléments de masques à gaz…
PE	1939 : première usine en Allemagne, production de quelques centaines de tonnes par an.	Isolation des câbles à haute fréquence des radars. En 1944 premier tube pour canalisation d'eau en Grande Bretagne.
PVC	1935 : première production à Ludwigshafen (Allemagne)	Isolation des câbles aux Etats-Unis
PP	1956 : Hoechst met en service le premier pilote de production du PP en Allemagne	En 1962 il est utilisé comme ficelle et film agricole en France. En 1963 production des premières pièces injectées (bouchons, peignes,…)
PUR	1940 : mise en production en Allemagne.	Isolation des sous marins et avions de combats.

Tableau (I.4): Date de commercialisation des principaux plastiques et exemples d'applications

Monomère	Polymère	Nom IUPAC	Nom courant	Abréviation
$H_2C=CH_2$	$\cdot\!\left(CH_2-CH_2\right)_n\!\cdot$	polyméthylène	polyéthylène	PE
$H_2C=CH(CH_3)$	$\cdot\!\left(CH_2-CH(CH_3)\right)_n\!\cdot$	poly(1-méthyléthylène)	polypropylène	PP
$H_2C=CH(Cl)$	$\cdot\!\left(CH_2-CH(Cl)\right)_n\!\cdot$	polychloroéthylène	Polychlorure de vinyle	PVC
$H_2C=CH(C_6H_5)$	$\cdot\!\left(CH_2-CH(C_6H_5)\right)_n\!\cdot$	poly(1-phényléthylène)	polystyrène	PS

Tableau (I.5): Représentation et dénomination des quatre polymères synthétiques les plus utilisés.

I-11-Additifs et adjuvants

Ce sont des composés qui sont introduits dans les polymères afin d'améliorer les propriétés physiques (mécaniques, thermiques…), les propriétés chimiques et leurs mise en œuvre.

Les composés incorporés à moins de 5% sont appelés « *adjuvants* ». Ceux incorporés à plus de 5% sont appelés « *additifs* »

Les adjuvants sont :

- Les colorants ou pigments
- Les anti-ultraviolets (anti UV)
- Les ignifugeants (évite la combustion)
- Les antis oxydants
- Les lubrifiants
- Les antistatiques
- Les agents gonflants (anti retassure)
- Les fongicides (évite la formation de bactéries)

Les additifs sont :

- Les charges
- Les renforts
- Les plastifiants
- Les agents gonflants (structure allégé)

Remarque :

Toute incorporation de plus de 1% d'un produit quelconque dans un polymère est susceptible de modifier ses caractéristiques mécaniques, thermiques, son retrait ainsi que sa fluidité. De plus, ce produit additionnel devra :

- Etre compatible
- Posséder une tenue à long terme
- Avoir un rapport prix / performance

I-11-1 Les adjuvants

- Dans l'industrie, des adjuvants (ou additifs) sont utilisés :

o dans la composition des bétons un adjuvant est utilisé pour améliorer les caractéristiques du matériau à l'état frais ou à l'état durci. Selon la norme EN NF 934-2, un adjuvant est incorporé lors du malaxage du béton à un dosage inférieur à 5 % des éléments fins (ciment, fumées de silice et billes de laitier, etc.). Il existe onze familles d'adjuvants. Certains adjuvants, tels le chlorure de calcium ou des agents entraîneurs d'air, sont employés dans la construction par temps froid. Il existe aussi des retardateurs de prise et des réducteurs d'eau, des plastifiants , etc. ou additifs,

o dans la composition des peintures, vernis, etc., où ils renforcent certaines propriétés recherchées ou en ajoutent (force tensioactive, couleur, brillance, résistance aux UV, à la corrosion, etc.).

o dans la coloration des tissus en complément de plantes tinctoriales, pour obtenir différentes couleurs. Par exemple, quand on ajoute des cendres au polygonum, on obtient du violet à la place du bleu d'origine.

o dans la composition de produits pétroliers, un adjuvant est utilisé pour améliorer un carburant.

- En **littérature**, un **adjuvant** (ou auxiliaire) est un personnage, une chose ou un événement qui aide le personnage principal à accomplir l'action.

- **Les colorants ou pigments** Les colorants sont des substances organiques solubles dans la matrice polymère. Du faite de leurs solubilités, on a une mauvaise résistance au solvant organique. De plus, ils sont sensibles aux températures élevées de transformation, ce qui peut entraîner un changement de couleur. Grâce à leur solubilité, on peut réaliser des produits colorés transparents.

Les pigments sont des composés minéraux ou organiques sous forme polyvalent insoluble dans la matrice polymère. Ils sont caractérisés par une bonne stabilité à long terme et une bonne tenue aux températures de transformation dans le cas de pigments minéraux.

Remarque :

certains colorants peuvent influencer la viscosité de la matière ainsi que le retrait

- **Les anti UV** Ces produits sont utilisés lorsque l'on a besoin de proteger la pièce des rayons UV afin dééviter une décomposition photochimique des chaînes macromoléculaires.

Pour éviter ces phénomènes, on peut utiliser le noir de carbone qui transforme les UV en chaleur. Les pièces seront de couleurs noires.

Les absorbeurs sont des molécules qui absorbent les UV en se mettant à vibrer. On peut également envisager, pour des protections plus faibles, des produits réflechissants.

Une protection chromage fera barrière aux UV

- **Les ignifugeants** Sous l'action de la chaleur, le produit se décompose en émettant un gaz qui fait écran entre la matière et l'oxygène de l'air, empêchant ou retardant la combustion.

Ces produits peuvent être des dérivés halogénés, phosphatés… Ils sont souvent toxiques et opaques.

Note : Les recherches actuelles tendent vers la création de polymère répondant aux normes, sans apport d'ignifugeant et dégageant peu ou pas de gaz toxiques.

- **Les antis oxydants** Ils permettent de retarder l'oxydation thermique au cours de la transformation et de l'utilisation. Ce sont des molécules qui réagissent avec l'oxygène à la place du polymère.

- **Les lubrifiants** Deux types de lubrifiants peuvent être incorporés aux polymères : les lubrifiants ointernes ou externes. Les plus utilisés sont internes. Ils améliorent l'écoulement du polymère et peuvent améliorer le démoulage des pièces.

- **Les antistatiques** Les matières plastiques ayant une grande résistivité électrique, on aura une accumulation d'électricité statique au moment du démoulage. Cette électricité statique entraîne la fixation de la poussière ainsi que des décharges électriques.

Les antistatiques sont des molécules conductrices destinées à augmenter la conductivité électrique en surface pour réduire la tendance à l'accumulation des charges.

- **Les agents gonflants** Ils sont utilisés pour apporter une structure cellulaire aux pièces moulées, connues sous le nom de pièces allégées.

Les agents gonflants se décomposent sous l'action de la chaleur ou par réaction chimique en donnant un dégagement gazeux qui empêchera la rétractation de la matière et dimunuera la densité du matériau moulé.

- **Les fongicides** Ils sont destinés à inhiber l'attaque des polymères par les organismes vivants.

I-11-2 Les additifs

Pour augmenter les qualités du polymère, faciliter la polymérisation et la mise en forme et lui donner des propriétés spécifiques, des additifs sont ajoutés soit aux monomères de départ, soit au moment de la mise en forme .On peut citer :

-Les plastifiants Ils augmentent la souplesse en diminuant la température de transition vitreuse. On utilise principalement les phtalates, les huiles parafiniques ou du tricrésylphosphate.

En augmentant le volume libre entre les molécules, la température de transition vitreuse diminue. Pour qu'il y ait une bonne adéquation entre polymère et plastifiant, il faut que leurs paramètres de solubilité soient assez proches. On utilise un minimum de 10% de plastifiant en masse dans la composition, sinon le matériau durcit.

- **Les stabilisants thermiques** Sous l'effet de la chaleur, le PVC dégage de l'acide chlorhydrique HCl et devient très cassant. On utilise alors des pièges à HCl pour stopper cette réaction. On se sert généralement des métaux lourds (Pb, sels de Cd) ou des huiles époxydées qui sont moins toxiques .

- **Les stabilisants UV** Un photon UV a une longueur d'onde comprise entre 0,28 et 0,40 . Ce qui correspond à une

énergie de 71 à 101 Kcal/mol. Cette énergie est suffisante pour casser une liaison d'un carbone tertiaire. Pour éviter de fragiliser le polymère, on utilise le phénylsalicilate dont les

liaisons tertiaires sont particulièrement faibles. Ce sont celles-ci et non celles du polymère qui casseront.

- **Les charges** Ce sont des éléments organiques ou inorganiques. Il n'y a pas d'interactions entre eux et le polymère. Leur rôle est d'améliorer les propriétés électriques, la résistance à l'eau, tout en réduisant le coût. Parmi les charges, on peut citer la farine de bois, le latex, les débris cellulosiques.

- **Les antioxydants ou ignifugeants** Ils évitent la dégradation du polymère par l'oxygène. On utilise généralement du ditertiobutylparacrésol ; ils réduisent la vitesse de combustion du polymère.

- **Les Renforts** Ces éléments interagissent avec le polymère original ; ils servent à optimiser les propriétés (surtout mécaniques). On obtient comme produit final, un polymère composite[1].

I-12 Conclusion

Actuellement, le plastique est devenu l'un des matériaux les plus importants dans le domaine de la plasturgie et de manière significative dans tous les domaines, car il contient les propriétés physiques et mécaniques.

Chapitre 2

Matériaux étudié et technique expérimentale

II-1 Introduction

Le moulage par injection est une technique de fabrication de pièces en grande ou très grande série. Il concerne avant tout les matières plastiques et les élastomères (caoutchoucs) mais aussi divers métaux et alliages à point de fusion relativement bas : alliages d'aluminium, de zinc (Zamak) ou encore laitons. Par ailleurs, ce procédé est utilisable pour la mise en forme de pièces en céramique technique, si toutefois on prépare une sorte de barbotine avec un quelconque composant fondant à un point de température relativement bas, comme la paraffine ou le polyéthylène (PE).

On rencontre des composants moulés par injection dans de très nombreux produits manufacturés : automobile, électroménager, matériel informatique, mobilier, etc. Pour les pièces métalliques, les dimensions sont relativement limitées (les carters de boites de vitesses en aluminium sont moulés par injection), mais pour les matières plastiques, les pièces vont de quelques millimètres à plusieurs mètres (éléments de carrosseries automobiles, tables de jardin, par exemple) [1].



Figure (II.1) : Moulage par injection : une vieille presse d'injection plastique

II-2 Mise en œuvre des polymères

La mise en oeuvre des matières plastiques regroupe les procédés de transformations des polymères en produit fini ou semi-fini.

Le Centre de Ressource Mise en Œuvre mutualise nos équipements présents sur le site du Pimm ainsi que sur la plateforme de TP Pimm-Cnam et met à disposition un parc-machine innovant (rotomoulage réactif, et multicouche, extrusion multinanocouche ou micro-injection par exemple) pour le groupe de recherche Polymère et Composite.

Aujourd'hui, les moyens à notre disposition, dont certains quasi-industriels, couvrent une très large gamme des techniques utilisées dans ce domaine : injection, rotomoulage, extrusion, thermoformage, et même fabrication additive de polymères.



a) Injection

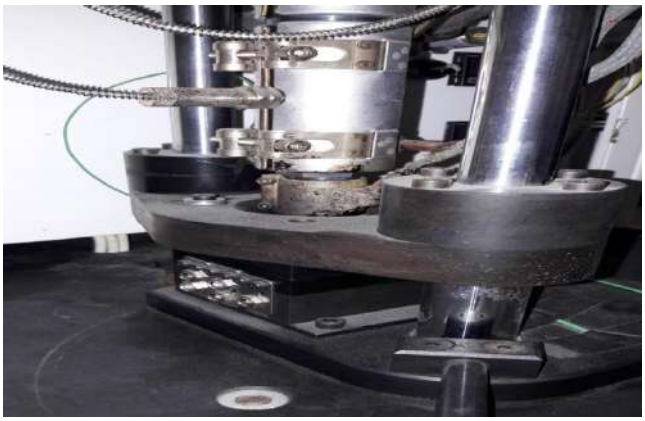


Figure (II.2) : les machines d’Injection

Lors de cette opération, la matière chauffée, comprimée et ramollie dans une presse à injecter est transfusée dans un moule qui lui donnera sa forme finale. Pour ce faire, les résines sont versées dans un réservoir (une trémie), amollies par le chauffage, et envoyées sous la pression d'une vis rotative (également appelée vis de plastification) vers le moule clos et refroidi, dont elles épouseront la forme en se solidifiant. A l'issue de ces étapes, la pièce est éjectée.

L'injection-soufflage, quant à elle, permet de réaliser des corps creux (bouteilles, flacons) en combinant – comme son nom l'indique – les techniques d'injection et de soufflage. Préformées dans une presse à injecter, les pièces sont dilatées et plaquées contre les parois d'un moule à l'aide d'un jet d'air comprimé. Ce moule sera ensuite refroidi, permettant l'extraction du corps creux final.

Couramment employé, le moulage par injection (également appelé injection plastique) permet donc de produire des pièces plus ou moins complexes en grande série, et destinées par exemple à l'industrie automobile. Les principales matières plastiques utilisées pour l'injection sont le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP) et le polychlorure de vinyle (PVC), toutes traitées post-consommation par Paprec Plastiques (et plus spécifiquement France Plastiques Recyclage pour le recyclage des bouteilles en plastique) dans ses usines de recyclage plastique.

En cas de recyclage en interne du plastique industriel (purges machines, carottes, chutes de fabrication), des broyeurs placés au pied des presses d'injection récupèrent et concassent les déchets plastiques produits par les machines et peuvent ainsi les réintroduire dans le process de mise en œuvre. Notons que le broyage fait également partie des nombreuses techniques utilisées par l'industrie du recyclage des plastiques pour recycler les déchets de ce type.



Figure (II.3) : Presse électrique de 55 tonnes de force de fermeture équipée d'un moule pour injection d'éprouvettes haltère ISO

II-3 Mise en forme des polymères

3-1 Définition

Des procédés de mise en forme des polymères permet de nos jours d'optimiser la forme des filières et des moules, ainsi que les paramètres du procédé. Dans le futur, la modélisation aura pour objectif de prévoir la structure des produits fabriqués et leurs propriétés. Cela requiert une bonne maîtrise de la rhéologie des polymères, des conditions aux limites cinématiques et thermiques, mais aussi une bonne description des phénomènes physiques. Dans cet article, un état de l'art des principaux procédés est présenté. Les bases d'une modélisation pertinente sont proposées, et le choix entre différentes méthodes de résolution numériques abordé. Plusieurs exemples d'application sont proposés : filières d'extrusion, moules d'injection, soufflage de corps creux.

Mise en forme des polymères a ainsi pour vocation d'en expliquer les éléments essentiels : compréhension des procédés, ordres de grandeur, bases pour l'utilisation des logiciels de conception...

Les notions physiques nécessaires telles que la mécanique des milieux continus, les comportements rhéologiques et leurs méthodes de mesure, la thermique et ses applications aux problèmes de chauffage-refroidissement ainsi que ses implications dans les écoulements sont analysées en détail dans les premiers chapitres. Une fois ces connaissances acquises et maîtrisées, sont abordés les différents procédés que sont l'extrusion monovis et les écoulements en filières, l'extrusion bivis et ses applications, l'injection, le calandrage et les procédés comportant un étirage.

3-2 Les procédés de mise en forme des matériaux polymères

Les procédés de mise en forme des polymères thermoplastiques et des composites correspondants sont directement dépendants des matériaux et des procédés de transformation existants dans l'industrie selon la production en petite, moyenne et grande série.

Les différents procédés de mise en forme des composites à matrice thermodurcissable :

- Moulage par injection base pression de résine liquide (RTM**),** La résine thermodurcissable est injectée sous basse pression (1 à 10 bars) entre le moule et le contre-moule. En fonction des cadences de production la polymérisation se fait à température ambiante ou par chauffage.

- Moulage par injection de résine réactive renforcée fibres longues **(**S-RIM)**,** Moulage du renfort sous forme de mats ou de tissus préalablement dans le moule chauffé (100 - 150 °C). Le système de résine à deux composants très réactifs est injecté sous pression (20 - 30 bars). Après durcissement (1 à 3 min), la pièce peut être démoulée.

- Moulage au contact, réalisé manuellement, l'imprégnation de la résine se fait à l'aide d'un rouleau adapté sur le drapage d'un renfort fibreux déposé sur un moule,. La polymérisation est effectuée à froid.

- Moulage par injection – réaction (R-RIM**)** : Les produits réactifs mélange d'un polyol et de fibres de verre (fibres coupées ou broyées) d'une part et d'un isocyanate d'autre part

incorporés dans un mélangeur et injectés (250 bars) aussitôt dans le moule de cuisson, chauffé à température de 65°C.

- Un film multimédia sur la mise en forme des thermoplastiques réalisé par le Centre de Développement Pédagogique pour la formation générale en science et technologie (CDP)

- Un film multimédia sur la mise en forme des composites à matrice thermodurcissable réalisé par le Centre de Développement Pédagogique pour la formation générale en science et technologie (CDP)

II-4 L'injection des polymères

4-1Introduction

L'injection est aujourd'hui l'un des procédés les plus utilisés pour la mise en forme des polymères avec l'extrusion et le soufflage (30% des polymères transformés). Il est généralement utilisé pour la production de très grandes séries pour l'automobile ou l'électroménager par exemple ou pour des séries plus réduites en aéronautique. Le procédé d'injection permet d'obtenir une productivité élevée avec une très bonne reproductibilité des pièces.

De ce fait, le principe du procédé de moulage par injection consiste à injecter et transformé une matière de polymères thermoplastiques, préalablement chauffée est injectée dans un moule. Le polymère se solidifiant dans le moule créera un solide épousant la forme et les dimensions de l'empreinte du moule.

L'objectif de ce chapitre est présenter le procédé d'injection des thermoplastiques, et leur déroulement de cycle d'injection plus les caractéristiques d'une presse et la construction de structure. Et la façon dont nous de contrôle dans les paramètres de procèdes d'injection.

4-2 Définition du procédé :

Le procédé d'injection est un procédé de mise en forme des thermoplastiques par moulage permettant la production de pièces minces jusqu'à quelques millimètres d'épaisseur. Ce procédé est très répandu pour les productions de grandes séries comme l'automobile, l'électroménager ou l'électricité.



Figure (II.6) : Machine professionnelle d'injection de moule

4-3 Principe du procède :

L'injection permet de fabriquer des pièces de géométrie complexe en grande série, suivant un principe simple de fonctionnement.

En effet, le polymère thermoplastique est chauffé afin de lui donner de cohésion d'un liquide visqueux. Ce liquide est ensuite injecté dans un moule, réalisé en plusieurs parties. Le polymère se refroidit jusqu'à l'état solide à la suite de quoi la pièce est extraite après ouverture de l'outillage.

Une nouvelle injection est réalisée quand l'outillage est à nouveau fermé.

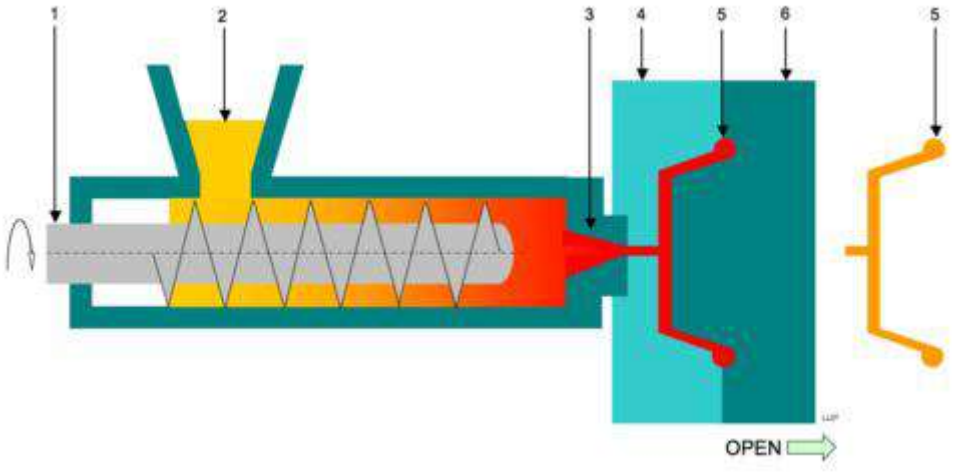


Figure (II.7) : Schéma de principe d'une presse à injecter.

1. Vis de plastification contrôlée par la presse
2. Trémie d'alimentation
3. Buse d'injection
4. Partie fixe du moule
5. Empreinte/pièce
6. Partie mobile du moule

1+2+3 = Cylindre de plastification (ensemble vis-fourreau).

4-4 Déroulement du cycle d'injection :

La presse d'injection constituée à deux parties important dans le cycle d'injection :

- Partie de vis d'injection est leur comportement
- Partie de moule

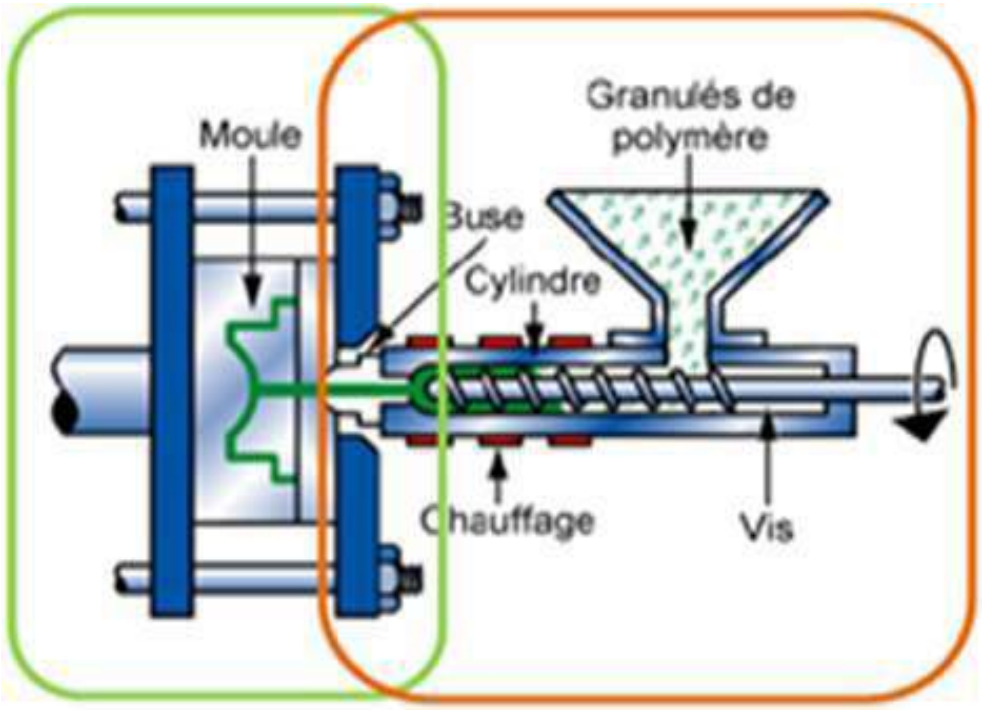


Figure (II.8) : presse d'injection

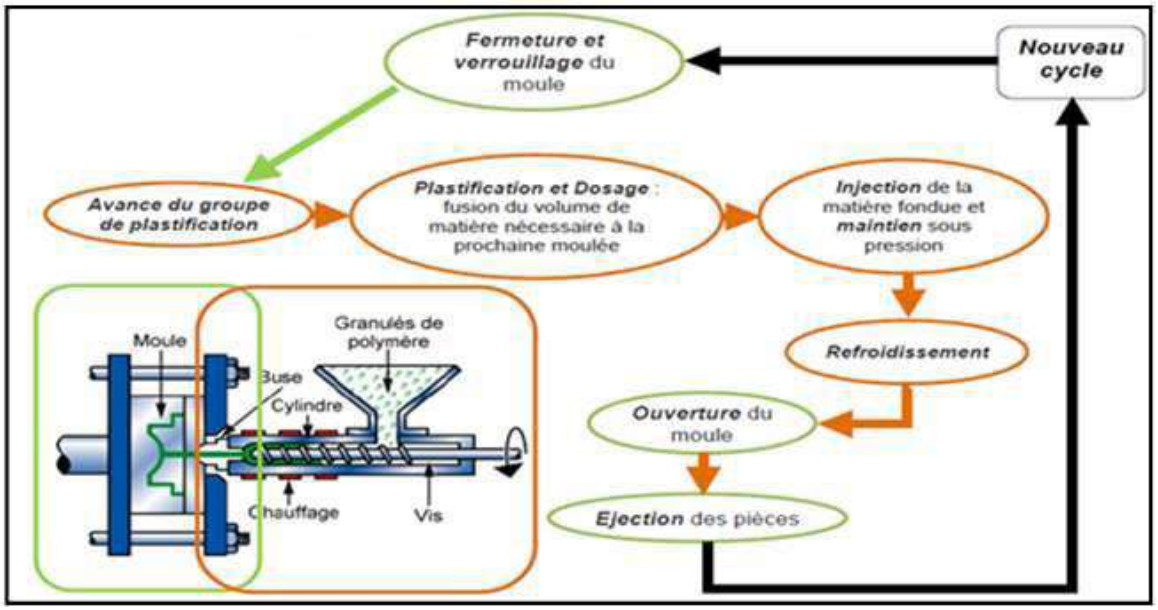


Figure (II.9) : Déroulement du cycle d'injection.

4-4-1. Phases de moulage par injection :

Le procédé de moulage par injection est très répandu dans le domaine de la plasturgie car ilpermet de fabriquer des pièces techniques de manière contrôlée et avec des cadences élevées. Lors d'une opération de moulage par injection, la fabrication de chaque pièce passe par quatre phases principales:

a) La phase de plastification:

La phase de plastification a pour objectif de faire passer le polymère de l'état initial (Sous forme de granulé) à l'état fondu. On peut dire que cette transformation commence au début par l'ensemble vis fourreau dont la fonction est de broyer et de chauffer le granulé pour l'amener peu à peu à l'état fondu. Pour cela, la vis de l'unité possède un mouvement de rotation pour permettre l'auto échauffement de la matière par malaxage, et de translation pour stocker à l'avant du fourreau la quantité de matière à injecter dans la cavité du moule Le dosage est contrôlé par la course de la vis qui recule, en s'appuyant sur la matière, pendant sa rotation. La matière plastifiée est transportée dans l'espace à l'avant de la vis .

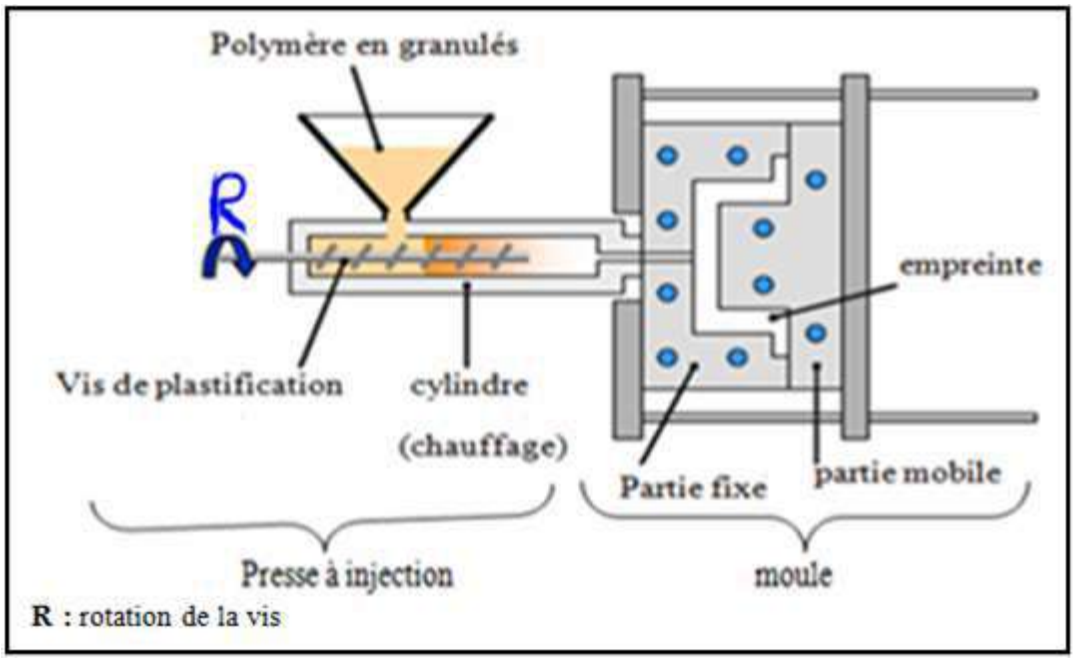


Figure (II.10) : phase de plastification

b) La phase de remplissage:

Une fois la matière accumulée en tête de fourreau, celleci est injectée dans l'empreinte de l'outillage par une avancée de la vis. Cette phase du cycle de transformation est appelée phase dynamique du remplissage (Fig.III.4). L'avancée de la vis est régulée en débit ou en pression pour maîtriser la vitesse d'injection du thermoplastique dans l'empreinte. Ce remplissage a une durée très courte, par rapport à celle de la phase de refroidissement.

Le débit d'injection est fonction du volume de remplissage sur la durée de remplissage correspondant à l'épaisseur de la pièce.

$$Q = \frac{n\mathrm{Vrt}}{Durée\ de\ remplissage} = \frac{[\,\mathrm{cm3}\,]}{[\,\mathrm{s}\,]} = \frac{[\,\mathrm{l}\,]}{[\,\mathrm{s}\,]}$$

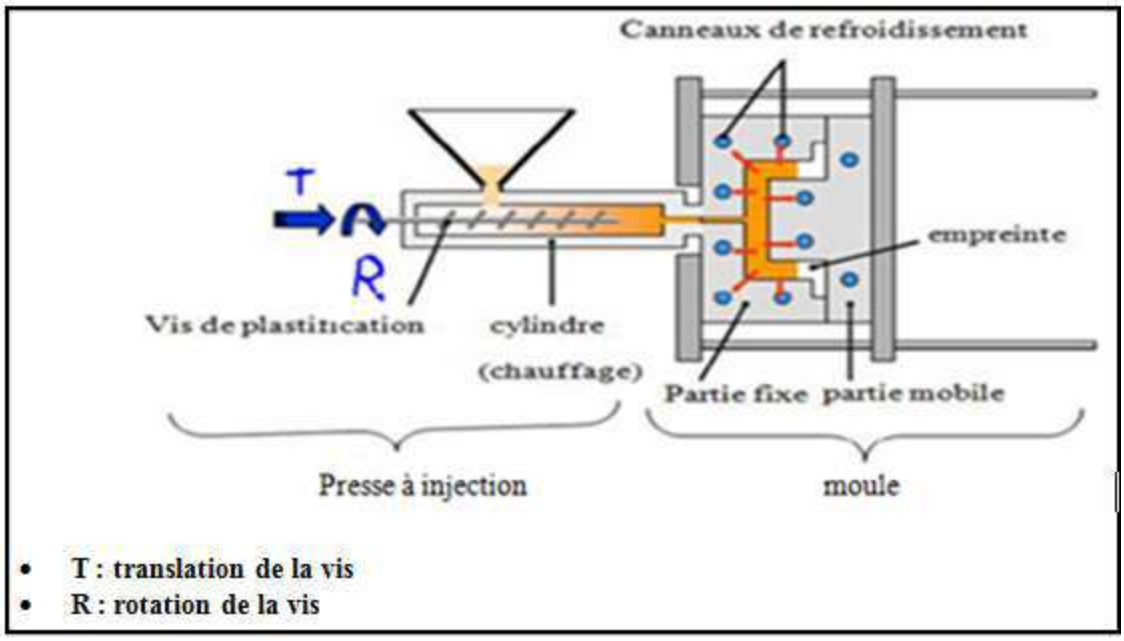


Figure (II.11) : phase de remplissage.

c) La phase de compactage :

Le compactage est l'instant clé du procédé d'injection. Il s'agit de l'instant de transition entre la phase de remplissage dynamique et la phase de maintien. A cet instant, le pilotage de l'injection passe d'une régulation en vitesse à une régulation en pression.

En général, on choisit de commuter au moment où l'empreinte est complètement remplie.

Cet instant est notifié par la présence d'un pic de pression d'injection prononcé. Cet événement est alors utilisé pour déclencher la commutation. Dès lors où la commutation est enclenchée, la presse applique au niveau du bloc d'injection une consigne de pression de maintien. Ceci a pour objectif de maintenir la matière dans la cavité pour compenser les phénomènes de retrait volumique dus au refroidissement de la matière (Fig.III.5).

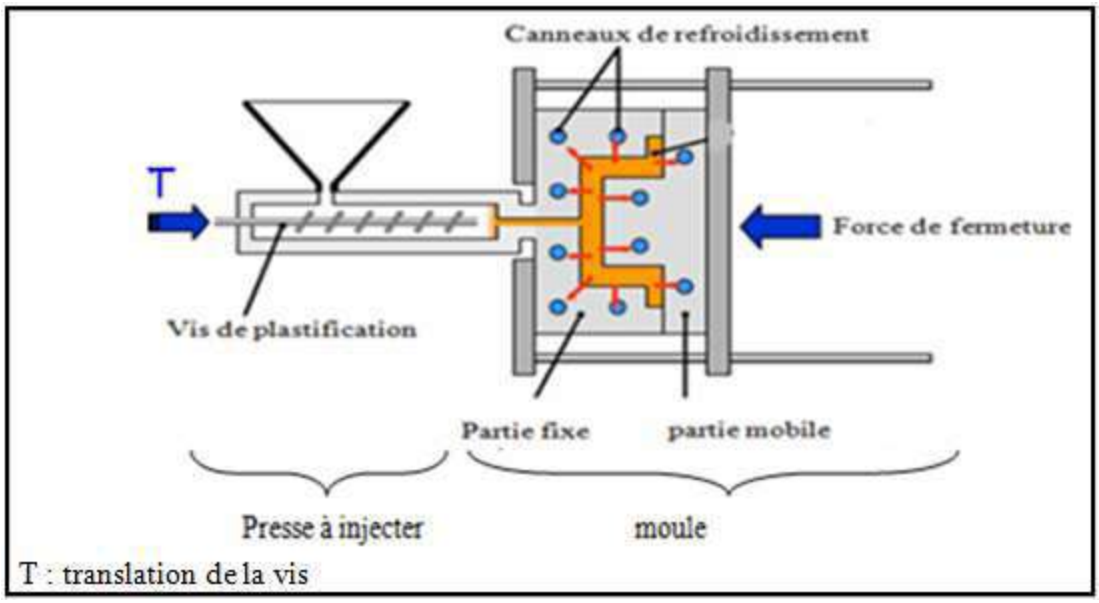


Figure (II.12) : phase de compactage.

d) La phase de refroidissement et d'éjection :

En parallèle de la phase de maintien, le polymère débute au contact de parois refroidies de l'outillage son retour à l'état solide. Cette phase appelée phase de refroidissement perdue jusqu'à ce que le polymère atteigne sa température de démoulage (Fig.III.6), après le refroidissement l'éjecteur pousser la pièce.

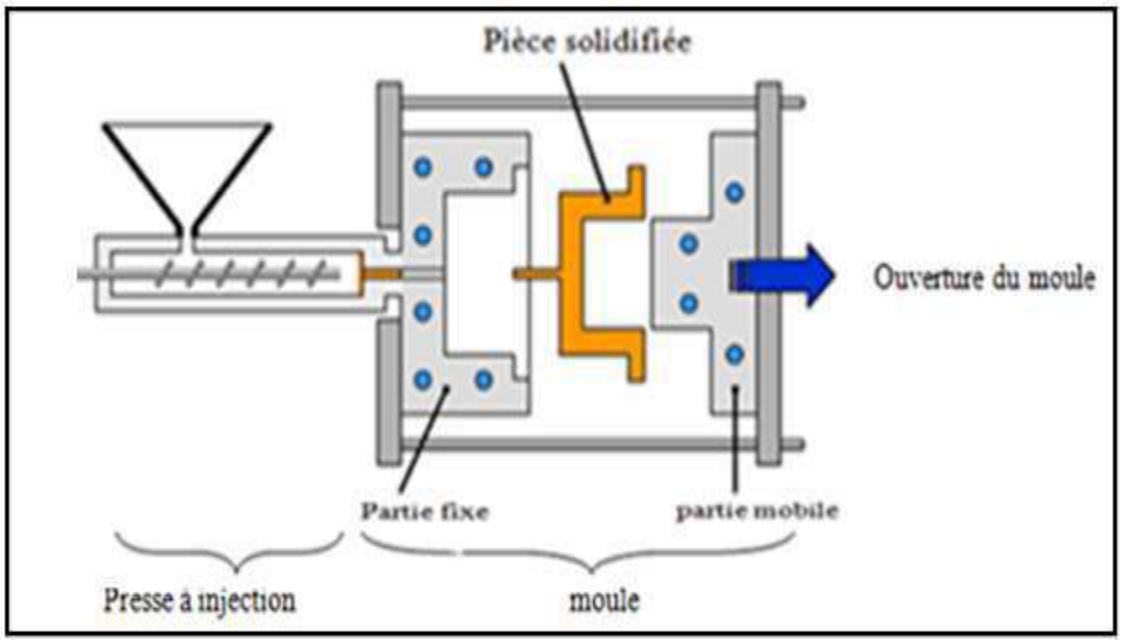


Figure (II.13) : Phase de refroidissement et d'éjection de la pièce

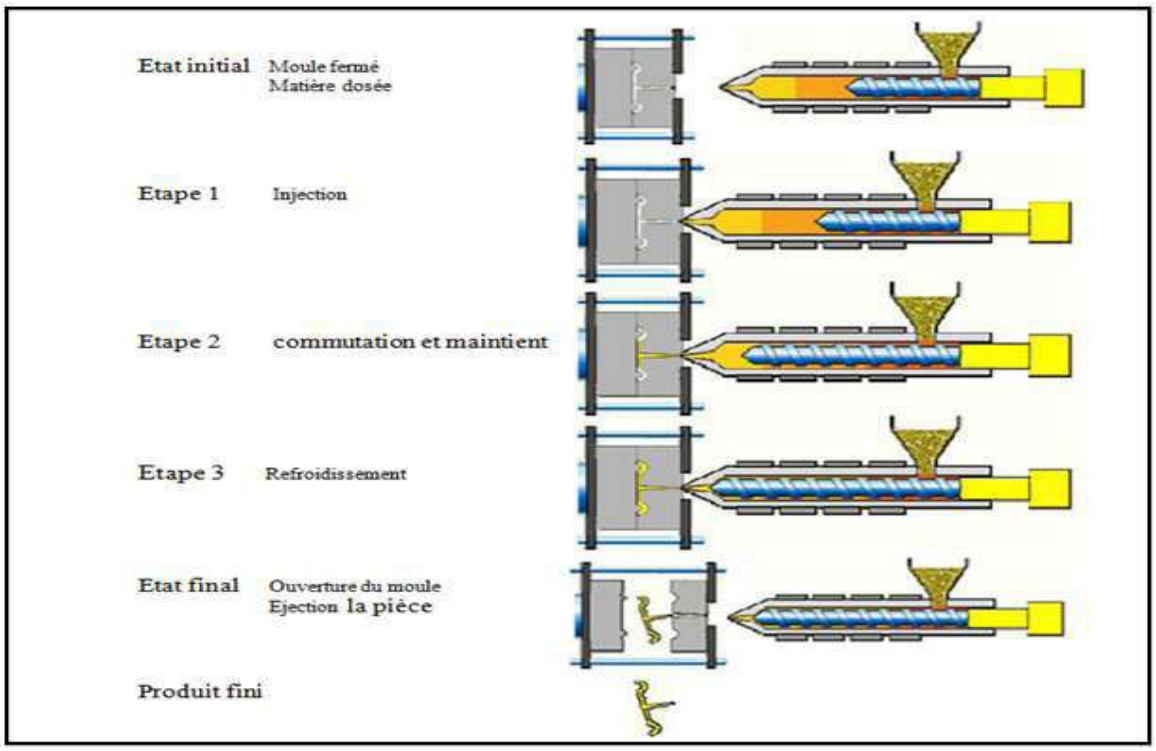


Figure (II.14) : Déroulement d'un cycle d'injection

Le cycle de moulage déroule de la façon suivante :

*Fermeture du moule.

*Dégazage et suppression de la pression de la vis piston.

*Fermeture finale et complément d'injection, éventuellement.

*Maintien en pression.

*Recul du groupe de plastification et mise en rotation de la vise pour le préchauffage de la dose suivante, durant cette, le moule s'ouvre et la pièce fabriquée est éjectée.

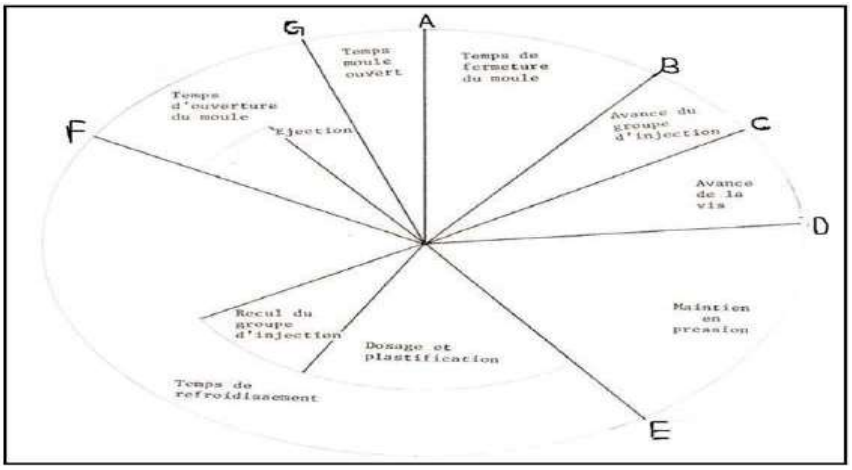
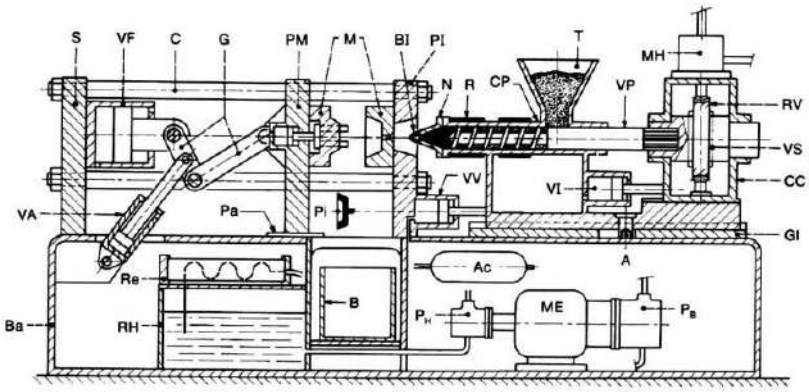


Figure (II.15) : Cycle du moulage par injection.

II-5 Etude de la Presse à injection :

La presse d'injection est une machine qui permet d'obtenir des pièces en plastique injecté sous pression dans un moule (monté sur la presse). L'injection du plastique se fait généralement à haute pression et à température supérieure à la température de transition vitreuse. A cet état la matière n'est plus solide mais n'est pas aussi liquide. Elle est à l'état visqueux entre les deux états liquide et solide. La matière peut être injectée dans le moule et la matière plastique prend la forme de l'empreinte du moule. Après refroidissement, la pièce est éjectée du moule. Le refroidissement se fait par circulation d'eau froide dans le circuit de refroidissement du moule.



A	axe de pivotement du bloc d'injection	G	genouillère	P_H	pompe haute pression	S	sommier
Ac	accumulateur	Gl	glissière	PI	plateau d'injection	T	trémie
B	bac de stockage des pièces moulées	M	moule	Pi	pièce moulée	VA	vérin d'approche
Ba	bâti ou châssis	ME	moteur électrique	PM	plateau mobile	VF	vérin de fermeture
BI	buse d'injection	MH	moteur hydraulique	R	résistance chauffante	VI	vérin d'injection
C	colonne	N	nez de cylindre	Re	refroidisseur	VP	vis de plastification
CC	carter coulissant	Pa	patin de frottement	RH	réservoir d'huile	VS	vis sans fin
CP	cylindre de plastification	P_B	pompe basse pression	RV	roue à vis sans fin	VV	vérin d'avance et de recul du bloc d'injection

Figure (II.16) : Presse à injecter les thermoplastiques.

5.1. Description d'une presse a injection :

Une presse à injecter, ou machine d'injection moulage, est constituée de deux unités principales : l'unité d'injection, ou de plastification, et l'unité de moulage (moule et système de fermeture) Le plus souvent, les différences notables entre les types de machines concernent l'unité de plastification. Notons qu'il existe des presses verticales bien que les presses horizontales soient les plus fréquentes. Parmi ce type de machines, deux grands groupes se distinguent : les presses hydrauliques et les presses électriques. Elles présentent chacune des particularités plus ou moins intéressantes et adaptées à certaines fabrications.

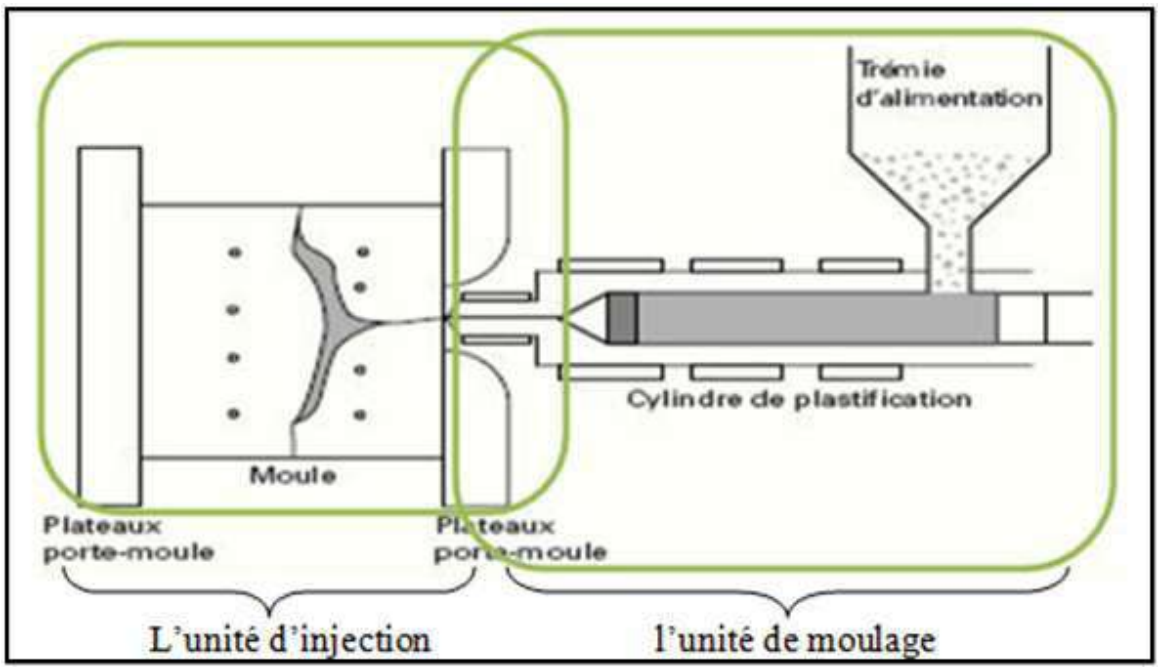
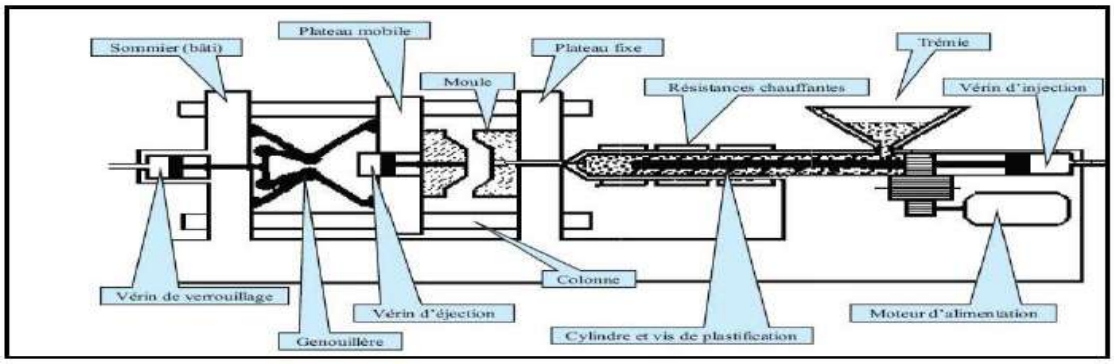


Figure (II.17) : Cylindre de plastification et moule.

5.2. La structure de presse d'injection:

Une machine d'injection-moulage comprend une unité de plastification, une unité de fermeture (dans laquelle est fixé le moule) et une unité de commande. L'unité de plastification, qui transforme les granulés solides en polymère fondue pour l'injecter en suite dans le moule. Et une unité de fermeture, à laquelle le moule est fixé. La (fig)

illustre les parties principales d'une presse à injection. Dans le cas des thermoplastiques, le moule est régulé généralement à une température voisine de la température ambiante afin de figer la matière plastique le plus vite possible.



La structure de presse d'injection.

5-3 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'une presse d'injection est le suivant : Dans l'unité de plastification, la vis est placée dans un fourreau cylindrique, chauffé par conduction. Elle peut être entraînée soit en rotation, soit en translation. Lorsqu'elle tourne, sa fonction est tout d'abord de faire le mélange des granulés de polymère, qui ont été chauffée par les colliers chauffant et de convoyer la matière à l'entrée de l'unité de fermeture. Ensuite, elle agit comme un piston pour injecter la matière fondue dans un moule. Ce dernier, généralement régulé à une température proche de la température ambiante va permettre de figer le plus rapidement possible le polymère. C'est ce qui se passe lorsque l'on transforme des thermoplastiques. Pour les polymères thermodurcissables ou des élastomères, en général, le mélange est tiède et injecté dans un moule chaud permettant l'initiation de la polymérisation

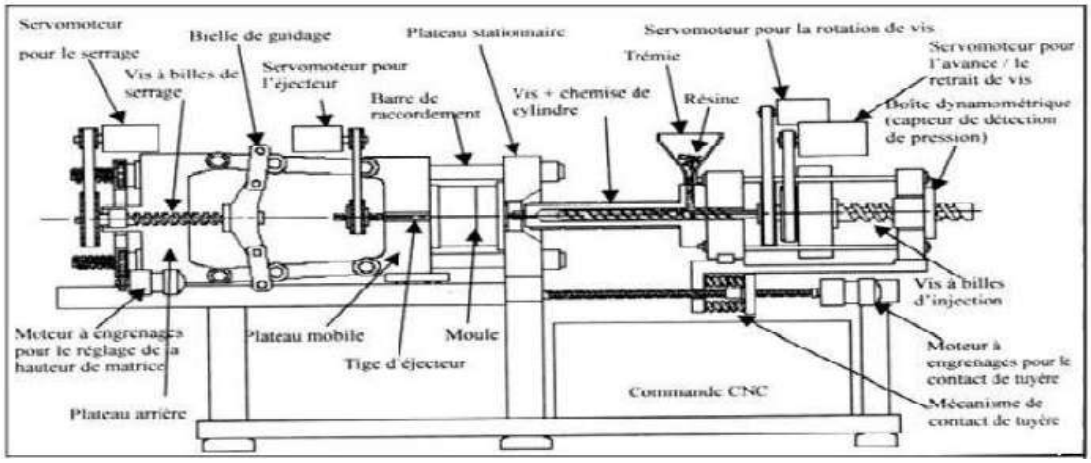


Figure (II.18) : Schéma d'une presse à injecter électrique à vis de plastification

5-4 Caractéristiques des presses :

Une machine d'injection (moulage) se caractérise généralement par sa capacité maximum d'injection et sa force de fermeture. La première caractéristique peut être donnée en masse de polymère ou en volume (cm3). La capacité d'injection réelle est comprise entre 30 et 70% de cette capacité maximale, ceci en fonction du comportement en phase fondue de la matière à transformer (étape de compactage). La force de fermeture est généralement exprimée en tonne, et correspond à la force de fermeture maximale du moule que peut maintenir la presse avant, pendant et après le remplissage du moule par la matière fondue. Toutefois, de nombreux autres critères peuvent être précisés pour définir au mieux une presse à injecter. Ils sont d'autant plus importants qu'ils seront nécessaires au choix d'une machine parfaitement adaptée à une gamme d'objets à fabriquer : par exemple les distances entre plateaux et entre colonnes doivent être de dimensions compatibles avec celles du moule.

III-6 Composants de la machine:

III-6-1 Le bâti :

C'est ce qui supporte l'ensemble des organes nécessaires, moteur électrique, pompe hydraulique, réservoir d'huile, les canalisations, toutes les électrovannes et les distributeurs**.** La forme et la position du bâti, on distingue trois types de presse:

*Presse horizontale,

*Presse verticale,

*Presse universelle

III.6.2. L'unité de plastification/injection:

Sous cette désignation on comprend la partie de l'unité d'injection, qui est en contact direct avec la matière plastique à transformer et avec le moule. Ses rôles sont de ramollir la matière plastique de l'homogénéiser de la doser et de l'injecter dans le moule 1 – Granulés, 2 – Vérin d'injection, 3 – Moteur de d'alimentation, 4 – Vis sans fin,

5 – Foureau chauffant, 6 – Buse d'injection, 7– Clapet, 8 – Trémie

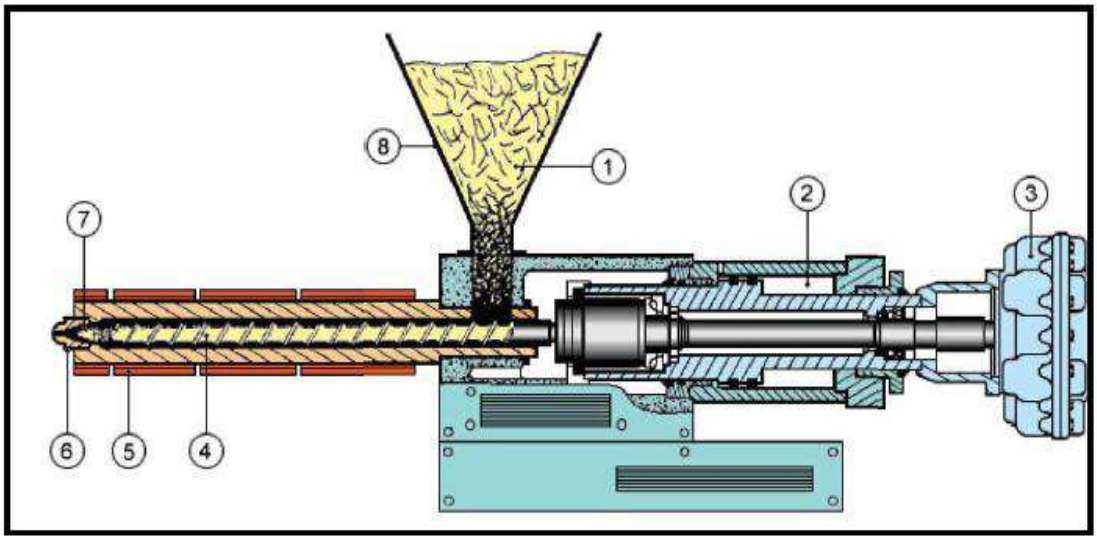


Figure (II.19) : L'unité de plastification

6-2-1 L'unité d'injection:

Le groupe d'injection comprend l'unité de plastification, le vérin d'injection, le groupe d'entraînement de la vis, la buse, l'unité est montée sur une glissière à colonnes pour un guidage précis, robuste et avec peu d'entretien. L'ensemble de la glissière est déplacé à l'aide de deux vérins produisent l'effort de contact buse/moule

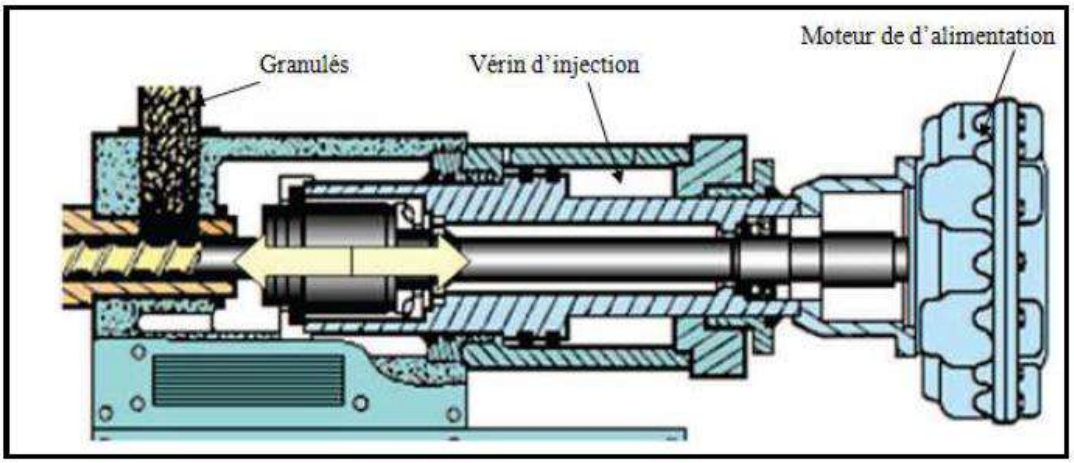


Figure (II.20) : L'unité d'injection

6-2-2 Pots d'injection :

Les presses à pot d'injection ont presque totalement disparu, sauf dans le cas des très faibles capacités d'injection (quelques grammes à 20 g), et elles sont alors très simplifiées, le dispositif de plastification se limitant à un cylindre chauffé, équipé d'un piston de refoulement Le pot d'injection avait comme rôle essentiel de diviser les masses de granulés à plastifier pour accélérer leur mise en température. En outre leur conception devait éviter les formes donnant des angles morts, favorisant la stagnation de la matière, celle-ci étant susceptible de se décomposer à la longue, et de se détacher des parois pour venir altérer l'aspect de surface des objets moulés. Il fallait rechercher un chauffage rapide : le démontage devait être aisé en vue de faciliter le nettoyage ; les pertes de charge devaient rester acceptables, mais étaient inévitablement importantes (50 à 70 % de la pression en bout de piston d'injection ou pression d'injection).

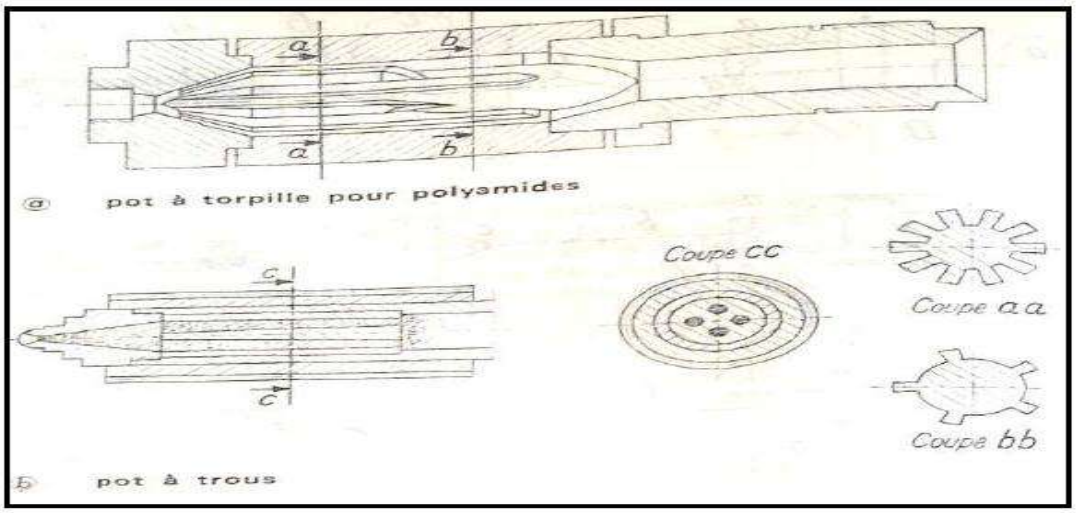


Figure (II.21) : pots d'injection

6-2-3 Les vis d'injection

Pour obtenir un rendement optimal, il serait souhaitable d'étudier la forme de la vis en fonction de chaque matière moulée Pour des raisons économiques la tendance est à la fabrication de vis plus ou moins universelles.

6.-2-4 Tracé de la vis

Dans un premier temps, la matière entrainée par la vis avance sans changement important de volume et l'on peut adopter un tracé avec noyau cylindrique (fig.) Lorsque la température du plastique croit, on entame la phase de compression et l'échauffement s'accélère ; l'on donne alors au noyau de vis une forme tronconique réduisant progressivement la section d'écoulement. Dans cette zone, l'air et les gaz véhiculés sont refoulés vers la trémie, grâce à l'élévation de la pression

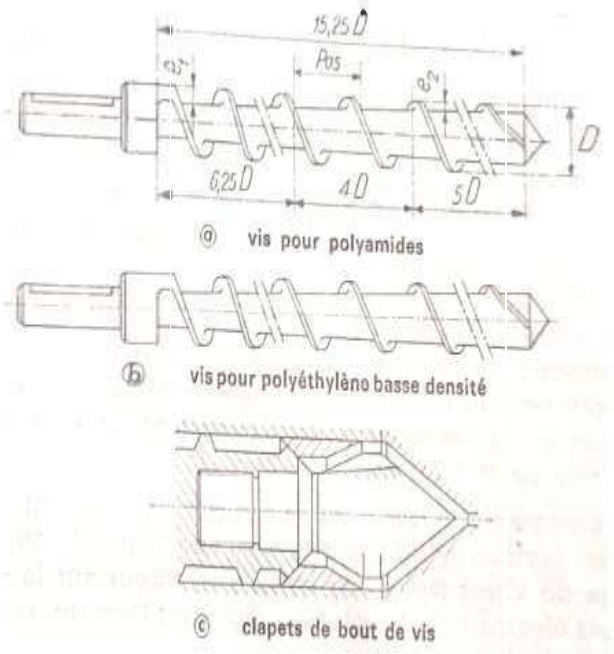


Figure (II.22) : Vis de plastification

6-2-5 Les différentes phases de transformation de polymère dans le système vis-fourreau :

Dans le système vis fourreau on a une transformation du granulé de l'état initial à l'étatproche en représenté comme suit :

La première fenêtre est située dans la zone d'alimentation de la vis, nous voyons bien les granulés de polymère gardant leurs formes solides. Le polymère commence à fondre à l'interface polymère – fourreau à partir de la seconde fenêtre, par conduction thermique et cisaillement entre le polymère et le fourreau. Bien que la qualité des images

ne soit pas parfaite, nous pouvons tout de même voir l'apparition d'un film très fin de polymère fondu collé aux parois de la fenêtre. Le lit solide du polymère a été filmé à la troisième et quatrième fenêtre.

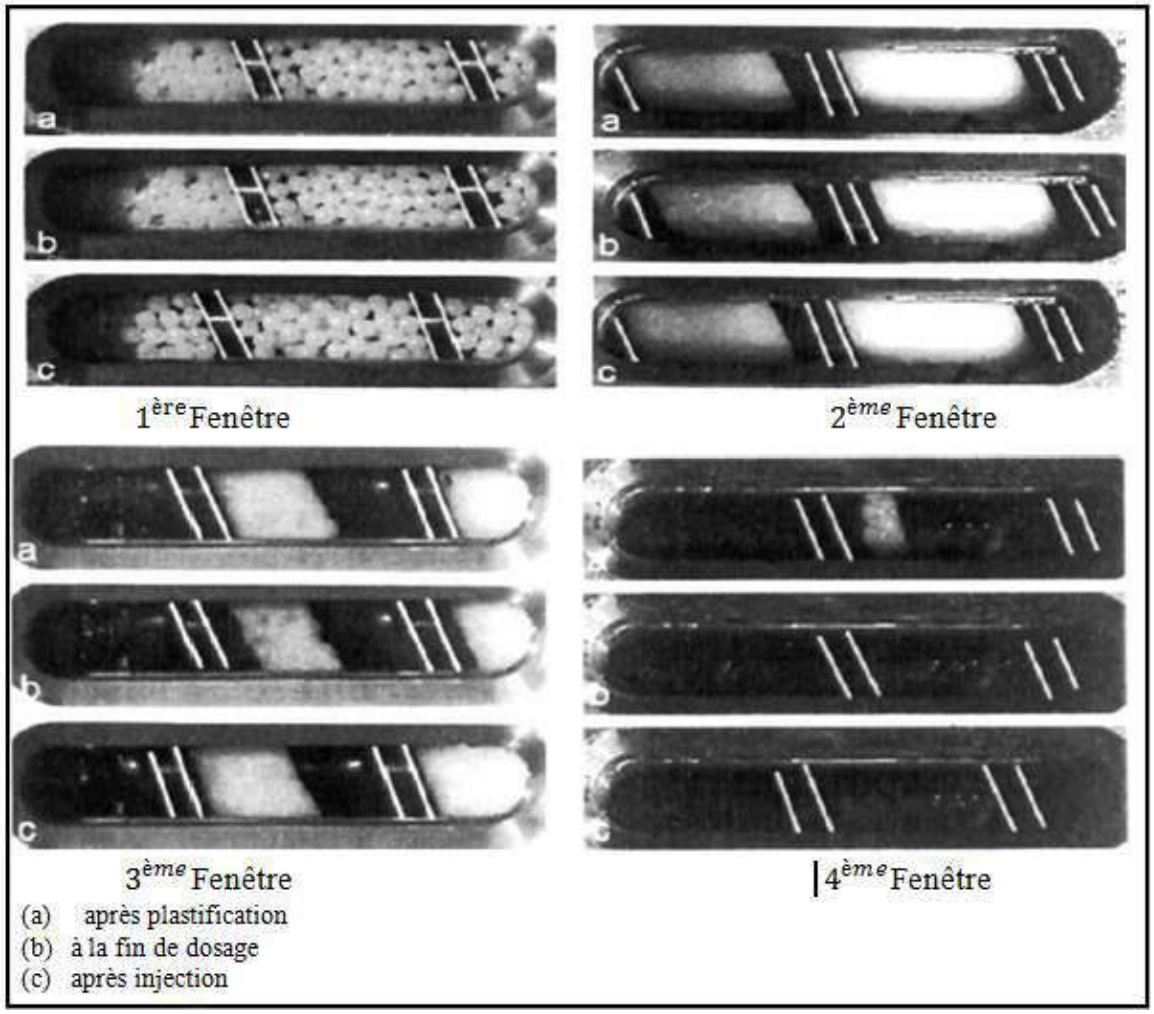


Figure (II.23) : les différentes phases de transformation de polymère dans le système vis fourreau

6-2-6 La buse:

Le refoulement de la matière plastique dans un moule relativement froid et à travers des sections d'écoulement relativement faible (afin de limiter les déchets) doit s'effectuer dans un temps relativement court, en vue d'éviter une solidification prématurée, cela exige l'emploi d'une pression élevée et l'on définit la pression d'injection comme étant la

pression maximale atteinte à l'extrémité du cylindre de plastification pendent que la vis piston refoule le plastique dans les cavités de moule.

Une fois plastifiée, la matière est introduite avec une très grande vitesse dans le moule.

A – Buse d'injection
B – Collier chauffant
C – Nez de presse
D – Clapet
E – Siège de clapet
F – Passage matière
G – Vis
H – Pointe clapet
I – Fourreau

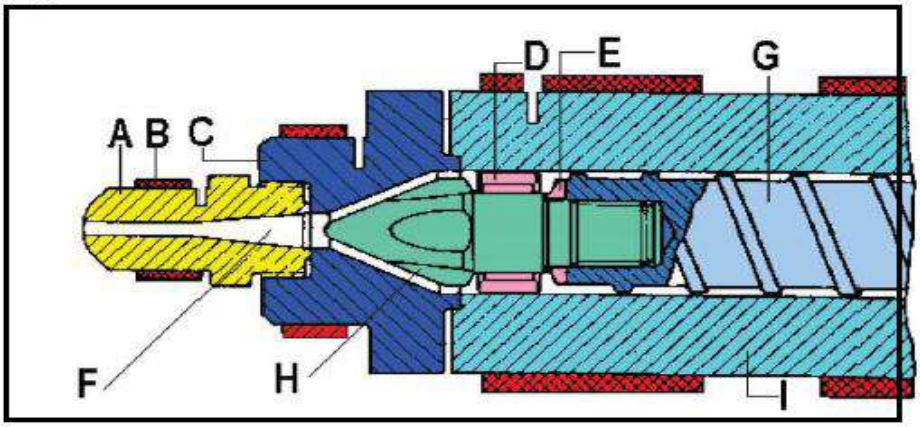
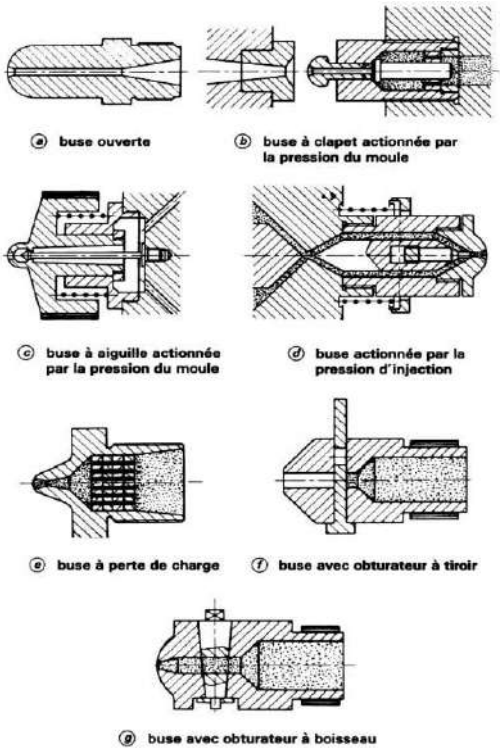


Figure (II.24) : la buse différente types des buses d'injection





II-7 Le moule

II-7-1 Définition :

Le moule est l'outil utilisé en injection des matières plastiques, qui remplit plusieurs fonctions et il a pour but de donner à la matière une forme finale nommée pièce ou article. Un moule est constitué principalement de composants illustrés par les figures suivantes :

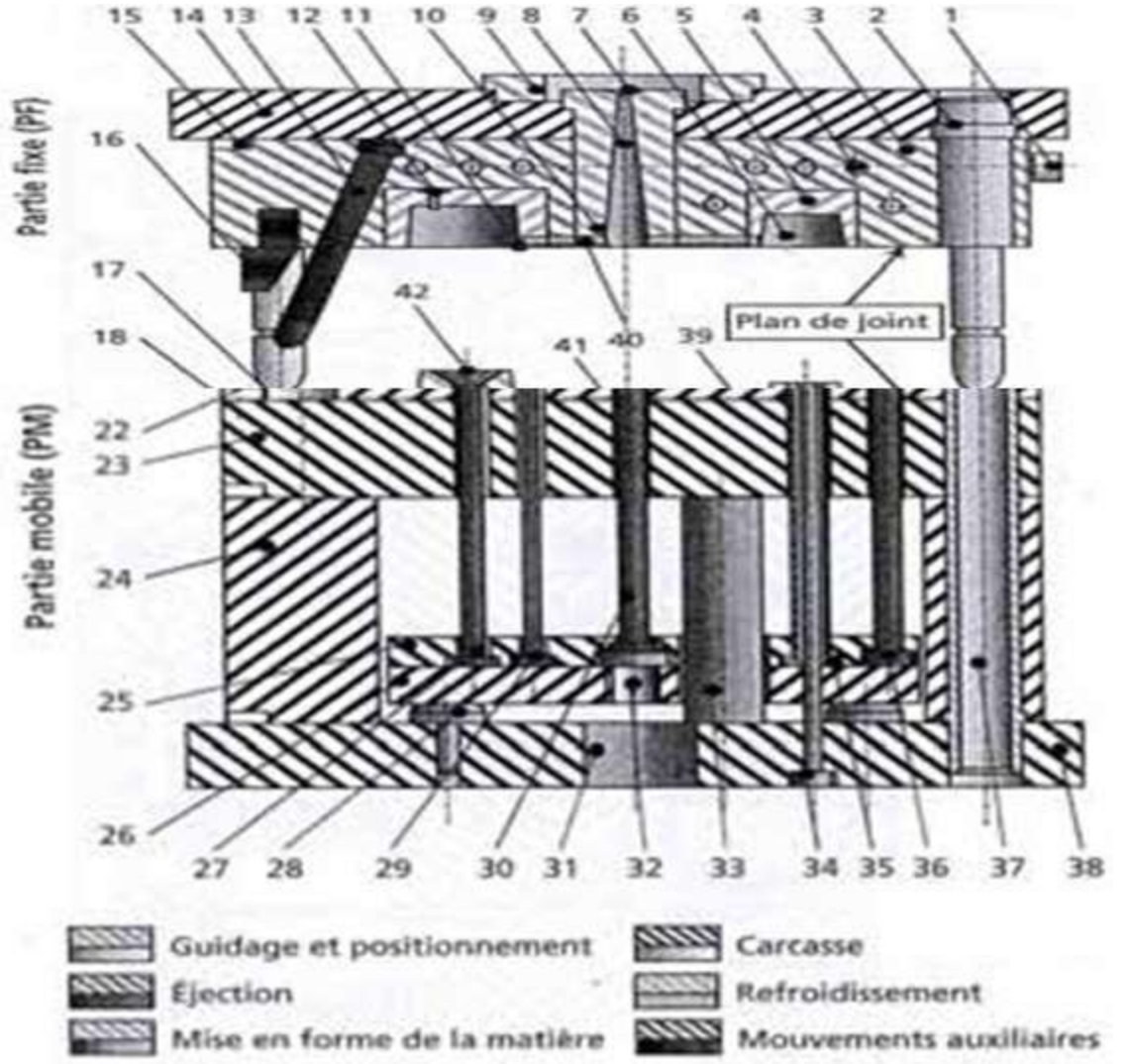
Le Corps et la cavité du moule sont chacun montés et partagés sur deux parties du moule mobile et fixe.

Les matériaux utilisés pour la fabrication des moules d'injection de thermoplastiques sont principalement des aciers choisis selon le procédé de fabrication retenu pour le moule et les conditions d'utilisation (sollicitations, interactions avec les polymères...).

La conductivité thermiques des aciers dépend de la composition et de la charge en éléments d'alliages [F] et varie environ entre 15 et 40W.m−1.K−1. Le choix des aciers pour moules d'injection ne doit cependant pas dépendre uniquement des propriétés thermiques mais aussi de la résistance mécanique et à la corrosion. L'augmentation des propriétés mécaniques se traduit par l'ajout d'éléments d'alliage qui peuvent être nuisibles aux propriétés thermiques (par exemple le chrome utilisé pour la résistance à la corrosion a tendance à faire diminuer la conductivité thermique).

A la fin de l'injection du polymère fondu dans la cavité du moule, on obtient la pièce sous sa forme complète. Pour l'éjecter, on doit actionner l'arbre d'éjection qui porte le plateau [2].

.



1. Embout de régulation (raccord rapide)
2. Colonne de guidage
3. Plaque porte-empreinte de partie fixe
4. Circuit de régulation
5. Bloc empreinte de partie fixe
6. Empreinte de partie fixe
7. Portée de buse moule
8. Cheminée de buse
9. Rondelle de centrage
10. Buse moule
11. Seuil d'injection
12. Broche
13. Doigt de démoulage
14. Plaque semelle de partie fixe
15. Prise de pince
16. Verrou de tiroir
17. Tiroir (ou chariot)
18. Plaquette d'usure du tiroir
19. Rainure de guidage du tiroir
20. Bonhomme à bille (ou verrou à bille)
21. Plaque porte-empreinte de PM
22. Bloc empreinte de partie mobile
23. Plaque intermédiaire de PM
24. Tasseau (ou entretoise)
25 et 26. Batterie d'éjection[1] : contre-plaque d'éjection (25) et plaque d'éjection (26)
27. Éjecteur porte-soupape
28. Repos d'éjection
29. Éjecteur
30. Éjecteur arrache-carotte
31. Passage d'éjection
32. Système d'attelage d'éjection
33. Pilier (ou chandelle)
34. Broche centrale d'éjecteur tubulaire
35. Éjecteur tubulaire
36. Rappel d'éjection (ou RAZ)
37. Douille de guidage
38. Plaque semelle de partie mobile
39. Joint torique
40. Canal d'alimentation
41. Arrache-carotte
42. Soupape d'éjection

Figure (II.25) : Présentation du moule

II-8 Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons étudié la presse d'injection avec indication de ses composants et son mode de fonctionnement. Nous avons découvert la procédure de fabrication des pièces plastiques, en notant le déroulement du cycle d'injection.

Chapitre III

Partie expérimentale

III.1 Matériau utilisé :

Choix du matériau : Le matériau choisit pour la réalisation de nos travaux est un polymère polypropylène

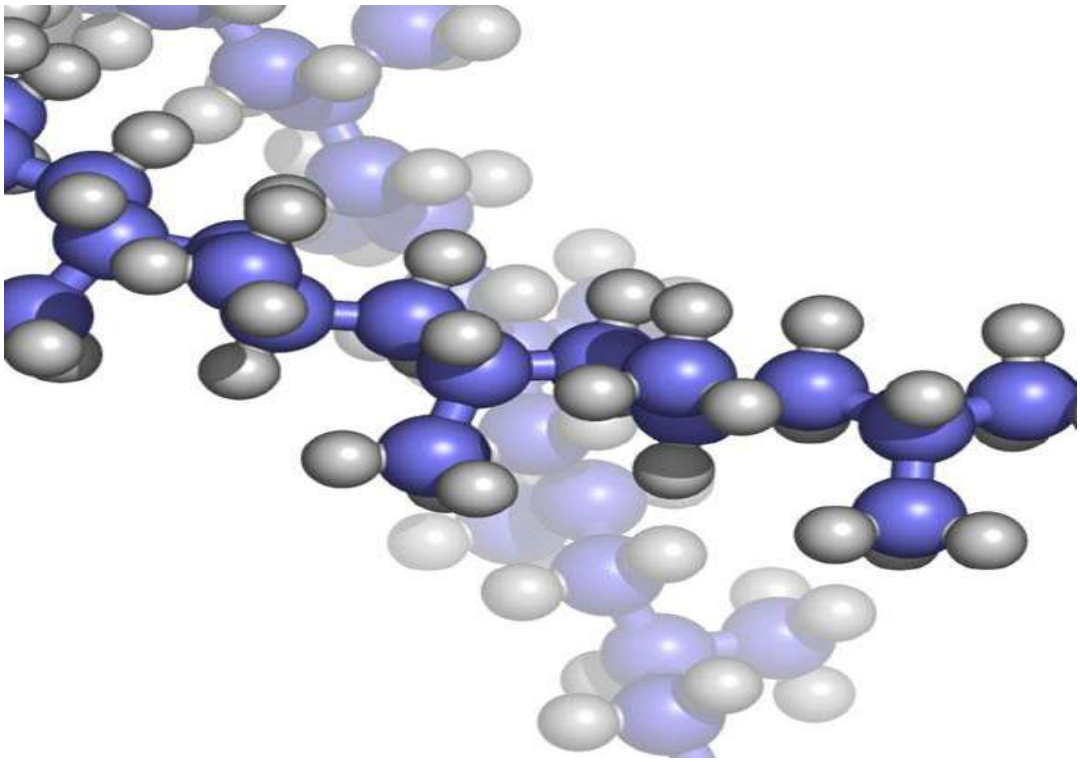


Figure (III.1) : structure 3D de PP

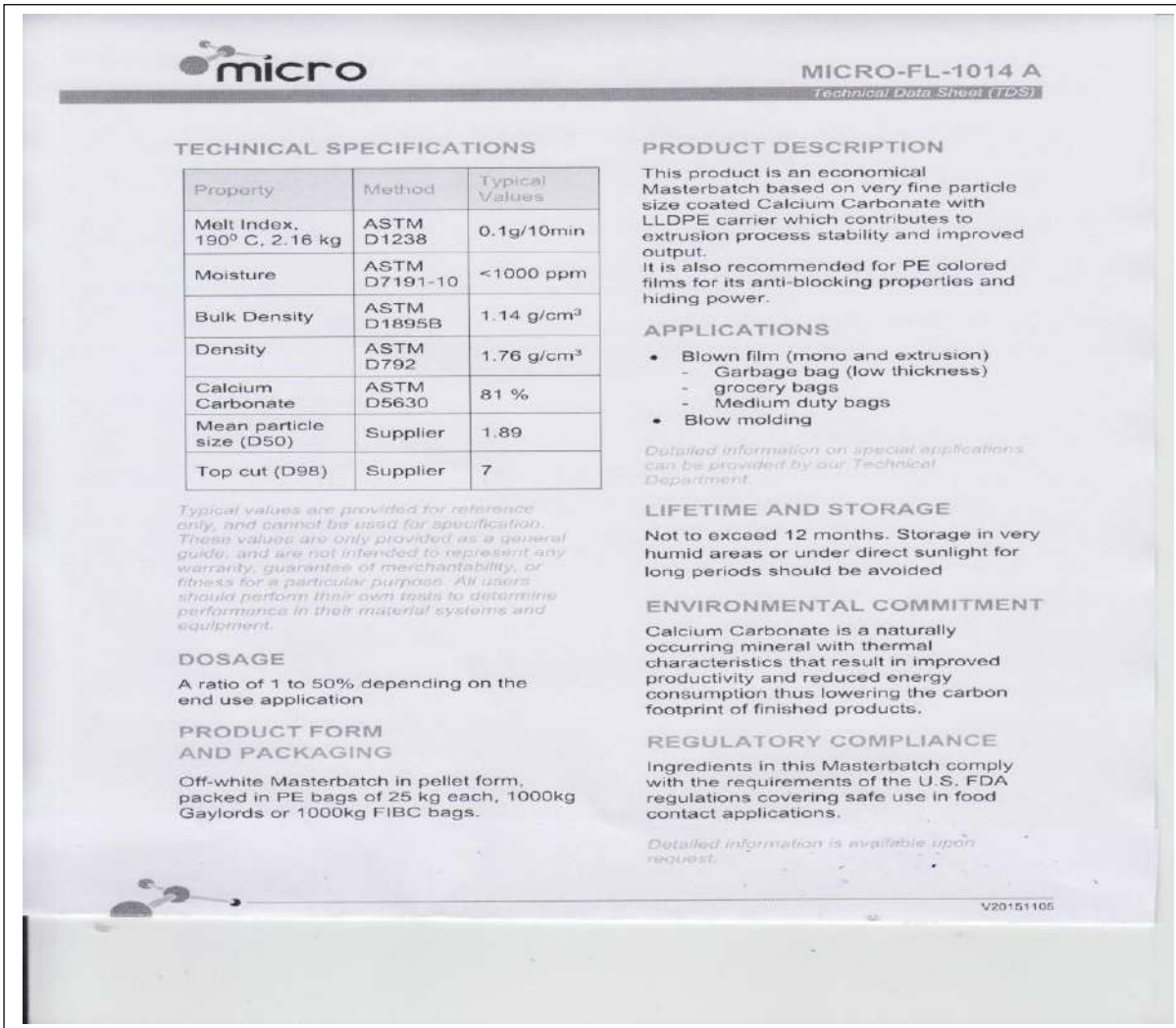
Après avoir visité l'usine de la société (**SARL KAMOPLAST**) reconnue ici à la wilaya de Médéa dans le domaine de transformation de plastique, c'est une société qui fabrique des produits de diverses formes en matières plastiques, avec de différèrent procédés, telles que l'injection, le soufflage et l'extrusion ...

Nous avons choisi la technique de transformation et de production de pièces plastique par le procédé injection. L'article ainsi choisi était un bouchon de bouteilles de yaourt fait avec du polypropylène comme matière première.

Notre travail consistait à ajouter à la matière première utilisée (PP vierge) dans un premier temps, de la charge (carbonate de calcium) avec de différents pourcentages et dans un

deuxième temps, de lui ajouter un pourcentage de matière Polypropylène broyée (PP broyée) et voir les l'influences de ces ajouts sur les propriétés physiques et mécaniques des produits ainsi réalisés.

Nous donnons les fiches techniques des matières utilisées (PP et charge), elles sont indiquées dans les deux figures suivantes :



micro

MICRO-FL-1014 A

Technical Data Sheet (TDS)

TECHNICAL SPECIFICATIONS

Property	Method	Typical Values
Melt Index, 190° C, 2.16 kg	ASTM D1238	0.1g/10min
Moisture	ASTM D7191-10	<1000 ppm
Bulk Density	ASTM D1895B	1.14 g/cm³
Density	ASTM D792	1.76 g/cm³
Calcium Carbonate	ASTM D5630	81 %
Mean particle size (D50)	Supplier	1.89
Top cut (D98)	Supplier	7

Typical values are provided for reference only, and cannot be used for specification. These values are only provided as a general guide, and are not intended to represent any warranty, guarantee of merchantability, or fitness for a particular purpose. All users should perform their own tests to determine performance in their material systems and equipment.

DOSAGE

A ratio of 1 to 50% depending on the end use application

PRODUCT FORM AND PACKAGING

Off-white Masterbatch in pellet form, packed in PE bags of 25 kg each, 1000kg Gaylords or 1000kg FIBC bags.

PRODUCT DESCRIPTION

This product is an economical Masterbatch based on very fine particle size coated Calcium Carbonate with LLDPE carrier which contributes to extrusion process stability and improved output.
It is also recommended for PE colored films for its anti-blocking properties and hiding power.

APPLICATIONS

- Blown film (mono and extrusion)
  - Garbage bag (low thickness)
  - grocery bags
  - Medium duty bags
- Blow molding

Detailed information on special applications can be provided by our Technical Department.

LIFETIME AND STORAGE

Not to exceed 12 months. Storage in very humid areas or under direct sunlight for long periods should be avoided

ENVIRONMENTAL COMMITMENT

Calcium Carbonate is a naturally occurring mineral with thermal characteristics that result in improved productivity and reduced energy consumption thus lowering the carbon footprint of finished products.

REGULATORY COMPLIANCE

Ingredients in this Masterbatch comply with the requirements of the U.S. FDA regulations covering safe use in food contact applications.

Detailed information is available upon request.

V20151105

Figure III 2 : Fiche technique de la charge utilisée



SABIC® PP 5707N

POLYPROPYLENE HOMOPOLYMER FOR INJECTION MOLDING

DESCRIPTION

SABIC® PP 5707N is a PP homopolymer grade with antistatic and nucleated agents. It is suitable for producing injection molded applications with good flow properties, good dimensional stability, high stiffness and good clarity comparing to the regular PP homopolymer grades.

TYPICAL APPLICATIONS

SABIC® PP 5707N can be used for housewares, thin-walled packaging, caps & closures.

TYPICAL PROPERTY VALUES

Revision 20171030

PROPERTIES	TYPICAL VALUES	UNITS	TEST METHODS
POLYMER PROPERTIES			
Melt Flow Rate			
at 230°C and 2.16kg	24	g/10 min	ASTM D1238
Density			
at 23°C	905	kg/m³	ASTM D792
MECHANICAL PROPERTIES			
Flexural Modulus (1% Secant) (1)	1700	MPa	ASTM D790 A
Izod Impact Strength			
notched, at 23°C	33	J/m	ASTM D256
Rockwell Hardness, R-Scale	95	-	ASTM D785
FILM PROPERTIES			
Tensile Properties			
stress at yield	35	MPa	ASTM D638
strain at yield	10	%	ASTM D638
THERMAL PROPERTIES			
Vicat Softening Temperature	150	°C	ASTM D1525
Heat deflection temperature			
at 455kPa	90	°C	ASTM D648

(1) Based on injection molded specimens

© 2017 Copyright by SABIC. All rights reserved

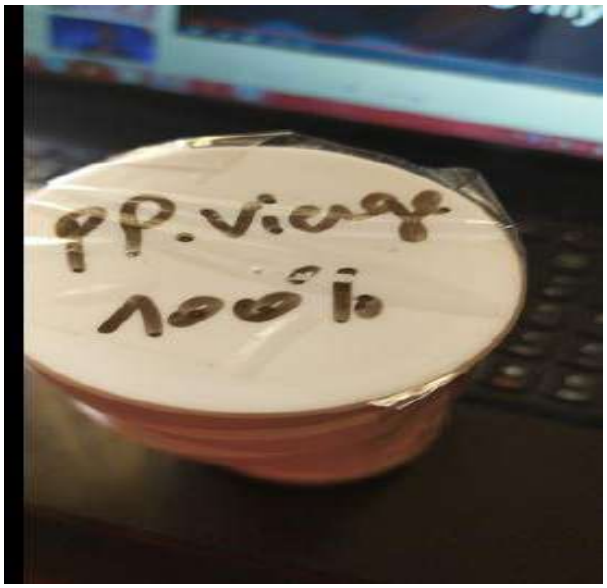
CHEMISTRY THAT MATTERS™

Figure III 3 : Fiche technique du PP utilisée

III.2 Production d'échantillons :

Les échantillons ont été réalisés avec de différents cas :

La première expérience :



* La matière première 100% = 500g

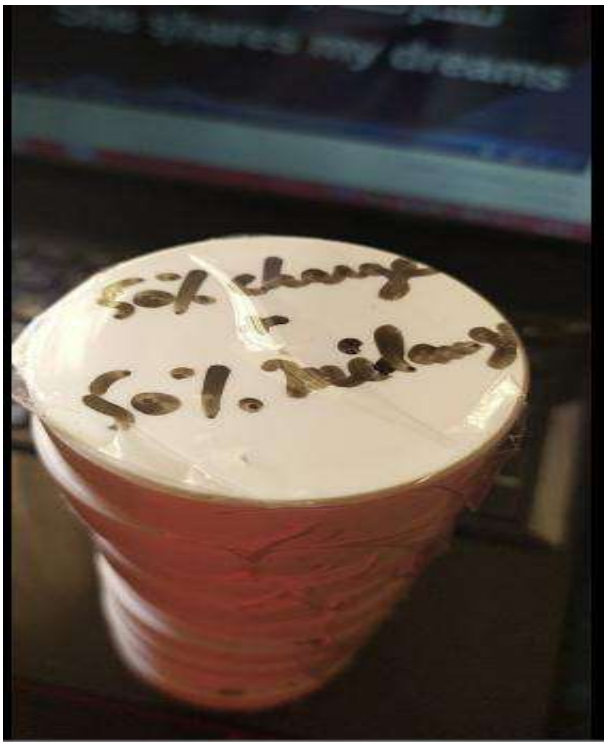
La deuxième expérience :

* Mélange 75 % = 50% vierge + 50% broyé = 500g

* La charge 25% = 125g



La troisième expérience :



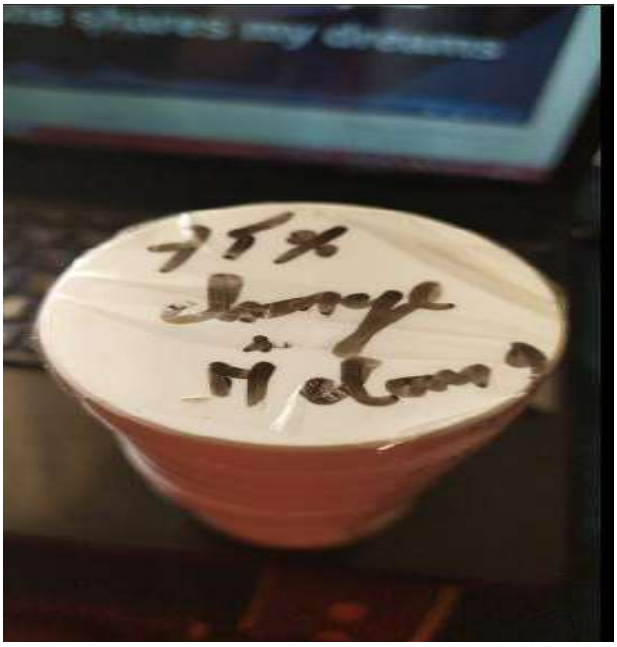
*Mélanger 50% = 50% vierge + 50% broyé = 500g

*La charge 50 % = 250g

Quatrième expérience :

Mélanger 25 % = 50 % vierge + 50% broyé = 500g

La charge 75 % = 375 g



III-3 Observation

Après le tirage de ces différents échantillons, nous voulions faire des expériences pour la caractérisation de ces différents produits et les comparer avec le produit fait avec 100% de matière première vierge, mais malheureusement, le problème que traverse notre pays et le monde entier, nous a empêché d'aboutir à notre but.

La comparaison serait faite sur les propriétés suivantes :

- La dureté,
- La résistance à la flexion.
- La résistance à la rupture.
- L'état de surface
- La forme du produit
- Et sa couleur

III-4 Conclusion

Ce travail a pour objectif d'étudier l'influence de l'ajout de la charge carbonate de calcium et de la PP broyée sur la production d'un bouchon fait en PP vierge par le procédé d'injection de plastique sous pression.

Les bouchons ont été réalisés avec succès, à première vue, les échantillons étaient semblables au produit d'origine. Avec quelques modifications dans la couleur.

C'est pour cela, nous demandons, pour des études à venir de continuer ce travail en complétant des essais adéquats pour aboutir à une comparaison réelle et significatif afin de donner un avis concret pour valoriser le travail ainsi réalisé.

Conclusion générale

Conclusion générale

A la fin de notre préparation de ce projet de fin d'étude ; on a divisé notre travail en deux parties « une partie Bibliographique et partie expérimentale »

En premier temps on a utilisé la matière première (PP) en la mélangeant avec la charge (carbonate de calcium) pour avoir un produit crédible et un prix de revient moins important que celui produit avec la matière vierge.

En deuxième temps on a utilisé la matière broyée mélangée avec la matière vierge avec des pourcentages variables.

Après la réalisation de différents produits (bouchons) ; on a remarqué suivant une observation visuelle que :

*Malgré l'augmentation de (CC) et de la matière broyée ; la qualité du produit reste presque la même.

*la couleur n'a pas changé.

* La machine d'injection n'a pas perdu sa cadence de production.

En fin de compte nous voulions étendre cette étude en appliquant d'autre essais telles que l'essai de : compression, traction pour obtenir le module d'Young E, la résistance à la traction et l'allongement et en raison de circonstances supérieur à notre désir ne nous avons pas pu y parvenir.

Références

Références bibliographiques

[1] Emilie LE GUEN, «Etude du procédé de soudage hybride laser/MAG :
Caractérisation de la géométrie et de l'hydrodynamique du bain de fusion et développement d'un modèle 3D thermique »THÈSE / UNIVERSITÉ DE BRETAGNE-SUD, 4 Novembre 2010

[2] Chainarong Srikunwong, « Modélisation du procède de soudage par points ». Mécanique [physics.med-ph]. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2005. Français.

[3] Chenafi Messaoud, «Etude de l'évolution des propriétés des fils tréfilés d'alliage AGS» mémoire de master, département de mécanique, université de Biskra, 2014.

[4] Eric Gildemyn. « Caractérisation des procèdes de fabrication de pièces de sécurité automobile. Optimisation multi objectifs de la mise en forme ». Sciences de l'ingénieur [physics]. Arts et Métiers Paris Tech, 2008. Français.

[5] Daniel Lepadatu. « Optimisation des procèdes de mise en forme par approche couplée plans d'expériences, éléments finis et surface de réponse ». Sciences de l'ingénieur [physics]. Université d'Angers, 2006. Français.

[6] Michel Colombié Jean-Pierre Cordebois et coll, «FABRICATION PAR USINAGE», 2e édition DUNOD, Paris, 2003,

[7] Christian Eloy, «fabrication en construction mécanique», collection (aide-mémoire) édition DUNOD.

[8] Technique de l'ingénieur, « méthode d'assemblage » DOC (A3755)

[9] DJABALLAH Abdelmalek, « Contribution à l'étude de la phase post remplissage du moulage par injection », mémoire de magister, département de mécanique, université de Biskra, 2012.

[10] HADEF Saddek, « Étude de l'influence des conditions d'injection sur la qualité des pièces injectées en matière plastique », mémoire de magister, département de mécanique, université de Biskra, 2012.

[11] HEDDAR Djamel Eddine, « ETUDE ET CONCEPTION A L'AIDE DE L'OUTIL CAO D'UN MOULE A INJECTION PLASTIQUE » mémoire de magister, département de mécanique, université de Biskra, 2014.

[12] Thomas Giroud. « Mesure et calcul des contraintes résiduelles dans les pièces injectées en thermoplastiques avec et sans fibres de renfort ». Mécanique [physics.med-ph]. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2001. Français

[13] Julien HUMBERT, « Conception, élaboration et production d'agrocomposite à partir de tourteau de tournesol : étude du procédé d'extrusion-formulation-granulation Et d'injection-moulage », DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, 2008 Français.

[14] AHMED HAMADI, « Conception générale des moules pour injection plastique », mémoire du diplôme d'ingénieur, département de mécanique, université de M'sila, 2003.

[15] Trotignon.P.J Et Dobraczynski.A – Piperaud.M. «Matières Plastiques: Structures-Propriétés, Mise en œuvre, Normalisation». Editions Nathan, Paris 1996

[16] Université de Bretagne-Sud, cite web.univ-ubs.fr/base du moule, 2005.

[17] J-P. Trotignon, J. Verdu, A. Dobracginsky, and M. Piperade. Précis de Matières plastiques : Structures-Propriétés, Mise en œuvre, Normalisation. AFNOR, 1996, FRA