

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University of M'sila
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique
MEMOIRE DE FIN D'ETUDE
En vue de l'obtention du diplôme de :
MASTER
En Génie Mécanique

Option : Génie des Matériaux
Présenté par :

KHODJA ES-SDDIK TOUNSI IMAD EDDINE

Thème

**Etude des propriétés mécaniques des polymères
thermoplastiques**

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
BENARIOUA Younes	Professeur	Président
BEDDA Abdelmalik	MAA	Encadreur
ZEMMAMOUCHE Radouane	MCA	Examineur

DÉDICACES

Je dédie ce travail à

Mes chers parents, pour leur soutien, leur patience et leurs encouragements tout au long de ma période d'études

À tous mes frères pour leurs conseils et orientations, ainsi qu'à mon collègue Imad et sa famille

Sans oublier mes grandes mères

Mes chers amis : Khalil, Muhammad Al-Hassan, Youssef, Hakim, Hisham, Tawfiq, Qatada, Hussein, Tariq

es-sddik

DÉDICACES

*Je profite de cette occasion pour rendre hommage aux personnes qui ont
largement contribué à mon succès :*

À mes chers parents ;

Au secret de ma réussite mes sœurs et frères.

À tous mes amis par leur nom ;

IMAD EDDINE

Résumé

Une matière **thermoplastique** désigne une matière qui se ramollit (parfois on observe une fusion franche) d'une façon répétée lorsqu'elle est chauffée au-dessus d'une certaine température, mais qui, au-dessous, redevient dure. Une telle matière conservera donc toujours de manière *réversible* sa thermoplasticité initiale. Cette qualité rend le matériau thermoplastique potentiellement *recyclable* (après broyage). Cela implique que la matière ramollie ne soit pas thermiquement dégradée et que les contraintes mécaniques de cisaillement introduites par un procédé de mise en forme ne modifient pas la structure moléculaire.

Les thermoplastiques représentent une diversité de propriétés selon leur structure, morphologie ainsi les méthodes de mise en œuvre. L'avantage que représente cette étude est de sélectionner un polymère selon les propriétés désirés.

Mots clés : Polymères, thermoplastiques, propriétés mécaniques, traction, flexion, dureté, Shore D, rowell, choc, compression.

Sommaire

Introduction	1
Chapitre I : Polymères thermoplastiques Généralités et propriétés	
I.1. Définition d'un thermoplastique	2
I.2. Types de thermoplastiques	3
I.3. Thermoplastiques classiques	3
I.3.1. Styréniques	3
I.3.1.1. Utilisations classiques des PS et ABS PS et PSC	4
I.3.1.2. Utilisations en développement	4
I.3.2. Vinyliques	5
I.3.2.1. Utilisations classiques des PVC	7
I.3.2.2. Utilisations en développement	8
I.3.3. Oléfiniques	9
I.3.3.2. Utilisations en développement	12
I.3.4. Acryliques	14
I.3.4.1. Utilisations types et applications nouvelles Plaque coulée Prépolymère de méthacrylate de méthyle coulé entre deux plaques de verre puis polymérisé en étuve	15
I.4. Thermoplastiques techniques (ou technoplastiques)	16
I.4.1. Polycarbonates, PC	16
I.4.1.1. Utilisations types et applications en développement	17
I.4.1.2. Applications en développement	17
I.4.2. Polyesters saturés	18
I.4.2.1. Utilisations types et applications en développement Electricité et électronique	18
I.4.3. Polyoxydes de phénylènes	19
I.4.3.1. Utilisations types et applications en développement	19
I.4.4. Polysulfurés	20
I.4.5. Polyacétals	21
I.4.5.1. Utilisations types et applications en développement	22
I.4.6. Polyamides	22
I.4.7. Polyfluorés	24
I.4.7.1. Caractéristiques particulières des dérivés	25
I.5. Thermoplastiques artificiels (ou cellulosiques)	26

CHAPITRE II. Essais mécaniques des plastiques

II.1. Préparation des éprouvettes et détermination des propriétés.....	28
Fabrication des éprouvettes et objets-types	28
II.2. Atmosphères de conditionnement et d'essai	31
II.3 Détermination du comportement mécanique	32
II.3.1. Essais de traction	32
II.3.1.1. Éprouvettes et systèmes d'encastrement.....	32
II.3.1.2 Détermination des efforts et des allongements	34
II.3.1.2. Machines spéciales	36
II.3.1.4 Expression des résultats	38
II.3.2. Essais de flexion	39
II.3.3. Essais de compression	42
II.3.4 Essais de cisaillement	43

CHAPITRE IV Interprétation des histogrammes min max des propriétés mécaniques

Propriétés en traction	44
Flexion	51
Compression	53
Résistances aux chocs	55
Duretés	56
Conclusion	57
Références bibliographiques	58
Annexes	59

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 Mode d'obtention des poudres (ou granulés) PVC utilisables par les transformateurs

Figure I.2 Structure des polyéthylènes

Figure I.3 Dérivés acryliques

Figure I.4 Les trois formes du TFE

Figure I.1 Mode d'obtention des poudres (ou granulés) PVC utilisables par les transformateurs

Figure I.2 Structure des polyéthylènes

Figure I.3 Dérivés acryliques

Figure I.4 Les trois formes du TFE

Figure I.5 Moules types pour l'injection d'éprouvettes en thermoplastiques (d'après norme ISO 294)

Figure I.6 Objet-type en résine thermodurcissable (d'après norme T 58-008)

Figure I.7 Influence du taux d'humidité sur la contrainte au seuil d'écoulement de polyamides renforcés (GF) ou non de fibres de verre

Figure II.1. Moules types pour l'injection d'éprouvettes en thermoplastiques (d'après norme ISO 294)

Figure II.2. Objet type en résine thermodurcissable (d'après norme T 58-008)

Figure II.3 Influence du taux d'humidité sur la contrainte au seuil d'écoulement de polyamides renforcés (GF) ou non de fibres de verr

Figure II.4. Géométrie des éprouvettes de traction selon la norme NF EN ISO 527

Figure II.5. Principe de la machine de traction biaxiale de films

Figure II.6. Courbes de traction types des plastiques

Figure II.7. Courbes de traction (plastiques)

Figure II.9. Principe de la flexion quatre points

Figure II.8.Répartition des contraintes normales et interlaminaires dans les éprouvettes de flexion trois points

Figure II.9. Principe de la flexion quatre points

Figure II.10. Dispositif de cisaillement par poinçonnage (d'après norme ASTM D 732)

Figure III.4 : Géométrie des éprouvettes de traction selon la norme NF EN ISO 527

Figure III.5 : Principe de la machine de traction biaxiale de films

Figure III.6 : Courbes de traction types des plastiques

Figure III. 7 : Courbes de traction (plastiques)

Figure III. 8 :Répartition des contraintes normales et interlaminaires dans les éprouvettes de flexion trois points

Figure III 9 :Principe de la flexion quatre points

Figure III.10 : Dispositif de cisaillement par poinçonnage (d'après norme ASTM D 732)

Figure III. 11 : Influence des concentrations de contraintes sur la résistance au choc Charpy (doc. Monsanto)

Figure IV.1 : Module d'élasticité en traction, selon NF T 51-034 ou norme équivalente, en GPa

Figure IV .2 : Contrainte de rupture en traction, selon NF T 51-034 ou norme équivalente, en MPa

Figure IV.3 : Allongement à la rupture en traction, selon NF T 51-034 ou norme équivalente, en %

Figure IV .4 : Contrainte au seuil d'écoulement haut en traction, selon NF T 51-034 ou norme équivalente, en MPa

Figure IV .5 : Allongement au seuil d'écoulement haut en traction, selon NF T 51-034 ou norme équivalente, en %

Figure IV.6 : Module de flexion, selon ISO 178 ou norme équivalente, en GPa

Figure IV .7: Contrainte de rupture en flexion, selon ISO 178 ou NF T 51-001 ou norme équivalente, en MPa

Figure IV .8 : Contrainte de rupture ou contrainte au seuil, en compression, selon ISO 604 ou norme équivalente, en MPa

Figure IV.9: Module en compression, selon la norme ASTM D 695, en GPa

Figure IV .10 : Résistance au choc Charpy avec entaille, selon ISO 179 ou NF T 51-035 ou analogue norme équivalente, en kJ/m^2

Figure IV .12 : Dureté Shore D, selon T 51-109 ou norme équivalente

Figure IV .13 : Dureté Rockwell M, selon ASTM D 785 ou norme équivalente

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau I.1** Caractéristiques générales des plastiques styréniques
 - Tableau I.2** Caractéristiques générales des PVC
 - Tableau I.3** Caractéristiques et usages des autres dérivés vinyliques
 - Tableau I.4** Par polymérisation des monomères éthylènes et propylènes
 - Tableau I.5** Caractéristiques générales des PE et PP classiques
 - Tableau I.6** Caractéristiques et usages des autres dérivés des polyolefines
 - Tableau I.7** Caractéristiques générales du PMM
 - Tableau I.8** Caractéristiques générales et utilisations types du PAN
 - Tableau I.9** Caractéristiques générales polycarbonates
 - Tableau I.10** Caractéristiques générales Polyester
 - Tableau I.11** Caractéristiques générales Polyoxydes de phénylènes
 - Tableau I.12** Caractéristiques générales du PSU
 - Tableau I.13** Caractéristiques générales du PPS
 - Tableau I.14** Caractéristiques générales Polyacétals
 - Tableau I.15** Caractéristiques générales (polymères classiques)
 - Tableau I.16** Propriétés et utilisations spécifiques des différents PA
 - Tableau I.17** Caractéristiques générales (TFE)
 - Tableau I.18** Information de Thermoplastiques artificiels
-

Tableau II.1 : Caractéristiques générales des plastiques styréniques

Tableau II.2 : Caractéristiques générales des PVC

Tableau II.3 : Caractéristiques et usages des autres dérivés vinyliques

Tableau II.4 : Par polymérisation des monomères éthylènes et propylènes

Tableau II.5 : Caractéristiques générales des PE et PP classiques

Tableau II.6 : Caractéristiques et usages des autres dérivés des polyolefines

Tableau II.7 : Caractéristiques générales du PMM

Tableau II.8 : Caractéristiques générales et utilisations types du PAN

Tableau II.9 : Caractéristiques générales polycarbonates

Tableau II.10 : Caractéristiques générales Polyester

Tableau II.11 : Caractéristiques générales Polyoxydes de phénylènes

Tableau II.12 : Caractéristiques générales du PSU

Tableau II.13 : Caractéristiques générales du PPS

Tableau II.15 : Caractéristiques générales (polymères classiques)

Tableau II.16 : Propriétés et utilisations spécifiques des différents PA

Tableau II.17 : Caractéristiques générales (TFE)

Tableau II.18 : information de Thermoplastiques artificiels

Tableau III.1 : Températures et durées d'essais préférentielles préférentielles (d'après norme T 51-000 ou ISO 3205)

- Tableau IV .1 : Module d'élasticité en traction, selon NF T 51-034 ou norme équivalente, en GPa
- Tableau IV . 2 : Contrainte de rupture en traction, selon NF T 51-034 ou norme équivalente, en MPa
- Tableau IV . 3 : Allongement à la rupture en traction, selon NF T 51-034 ou norme équivalente, en %
- Tableau IV .4 : Contrainte au seuil d'écoulement haut en traction, selon NF T 51-034 ou norme équivalente, en MPa
- Tableau IV .5 – Allongement au seuil d'écoulement haut en traction, selon NF T 51-034 ou norme équivalente, en %
- Tableau IV . 6 :Module de flexion, selon ISO 178 ou norme équivalente, en GPa
- Tableau IV . 7 : Contrainte de rupture en flexion, selon ISO 178 ou NF T 51-001 ou norme équivalente, en MPa
- Tableau IV . 8 : Contrainte de rupture ou contrainte au seuil, en compression, selon ISO 604 ou norme équivalente, en MPa
- Tableau IV . 9 : Module en compression, selon la norme ASTM D 695, en GPa
- Tableau IV . 10 : Résistance au choc Charpy avec entaille, selon ISO 179 ou NF T 51-035 ou analogue norme équivalente, en kJ/m^2
- Tableau IV .11 : Résistance au choc Izod avec entaille, selon ISO 180 A ou T 51-911 ou norme équivalente, en J/m
- Tableau IV .12 :Dureté Shore D, selon T 51-109 ou norme équivalente
- Tableau IV .13 :Dureté Rockwell M, selon ASTM D 785 ou norme équivalente

LISTE D'ABREVIATIONS

PET : (polyéthylène téréphtalate)

HDPE : (high-density polyethylene) and **LDPE** (low-density polyethylene)

PVC : (polyvinyl chloride)

PP : (polypropylene)

PS : (polystyrene or styrofoam)

LDPE: (low-density polyethylene)

PS : polystyrène homopolymère

PSC : polystyrène choc

SAN : copolymère

ABS : terpolymère

PVC : Le poly(chlorure de vinyle)

PVA : acétate de polyvinyle

APV : alcool polyvinylique

PVD : polyvinylidène

PEbd : Polyéthylène basse densité

PEhd : Polyéthylène haute densité

PC : Polycarbonates

PET : polyéthylène téréphtalate

PBT : polybutylène téréphtalate

PSU : polysulfone

PAS : polyarylsulfone

PES : polyéthersulfone

PPS : polyphénylène sulfone

POM : polyoxyméthylène

PTFE : polytetrafluoréthylène

PCFE : polytrifluorochloréthylène

F_R : force à la rupture (ou force maximale ou force à la limite de linéarité)

Y_R : flèche correspondante,

D : distance entre appuis,

b : largeur de l'éprouvette

h : épaisseur de l'éprouvette.

INTRODUCTION

Les polymères thermoplastiques et les matières plastiques (polymères une fois renforcés, formulés et/ou chargés) dont ils sont la base, comme tout matériau de structure, doivent présenter des caractéristiques mécaniques conformes à un cahier des charges, lui-même dicté par les conditions d'utilisation de la structure.

Le comportement mécanique des matières plastiques est caractérisé par une très grande diversité. En effet, dans cette famille de matériaux, coexistent un grand nombre de types de comportement que l'on qualifie, par habitude souvent, de viscoélastique, viscoplastique, hyperplastique, durcissant, adoucissant ou en dommageable.

Cette diversité se retrouve, pour un même polymère, si l'on fait varier certaines de ses caractéristiques, sa formulation ou simplement ses conditions d'utilisation. Il peut, ainsi, être rigide fragile, ductile ou élastique suivant le cas. Cela ne veut pas dire que le comportement du polymère est variable, voire incontrôlé, mais cela illustre que les paramètres contrôlant ses propriétés mécaniques ainsi que les processus élémentaires de déformation envisageables sont nombreux. En conséquence, le dimensionnement de pièces plastiques peut être à la fois riche en solutions et difficile à contrôler avec précision.

Le présent travail rentre dans le cadre d'une illustration des propriétés mécaniques d'une large série des thermoplastiques connues dans le monde des thermoplastiques industriels.

Trois parties ont été représentés

Dans la première partie ont a décrit les types de thermoplastiques de grande diffusion ainsi leur avantages et inconvénients. Cette démarche descriptive donne au lecteur une idée globale sur les propriétés physique et mécaniques d'une large gamme de polymères.

La deuxième partie est consacrée à décrire les essais des propriétés mécaniques tel que la traction, la flexion, la dureté et la résistance aux choc selon les différentes normes internationales. Cette partie peut renseigner les plasturgistes sur les méthodes d'études des propriétés mécaniques à savoir les types d'éprouvettes utilisés pour chaque essai ainsi les méthodes de préparations et le conditionnement pour chaque type de sollicitation.

Dans la troisième et dernière partie on a représenté les courbes **min-max** des propriétés mécaniques pour chaque type du comportement mécanique à savoir les propriétés de traction, de flexion, dureté et choc. Ce modèle de courbes révèle à être une meilleure présentation pour une étude comparative des propriétés des thermoplastiques utilisé dans l'industrie plastique (polymères thermoplastiques de grande diffusion)

Une interprétation qualitative des courbes tracées est indispensable pour adoucir la compréhension des propriétés des thermoplastiques selon la diversité des types ainsi la variabilité des propriétés selon la structure microscopiques et macroscopiques de polymères choisis.

CHAPITRE I

Chapitre I : Polymères thermoplastiques

Généralités et propriétés

Chapitre 1. Polymères thermoplastiques généralités et propriétés

Les polymères peuvent être classés dans les groupes des thermodurcissables, des élastomères, des thermoplastiques et des élastomères thermoplastiques en fonction de leur mobilité moléculaire. Les molécules des thermodurcissables et des élastomères sont liées par des liaisons chimiques covalentes et ne sont donc pas plastiquement déformables. Cependant, les thermoplastiques sont composés de macromolécules linéairement ramifiées et non chimiquement liées. Ainsi, les thermoplastiques possèdent un état thermoplastique possible. Les thermoplastiques peuvent être subdivisés en thermoplastiques amorphes et semi-cristallins [13]. Le terme amorphe décrit l'arrangement non ordonné, des macromolécules linéaires et ramifiées dans les thermoplastiques amorphes qui peuvent adoucir thermo-plastiquement et à des poids moléculaires élevés seulement thermo-élastiquement. L'adoucissement des thermoplastiques amorphes se produit autour de la température de transition vitreuse T_g de l'énergie élastique vitreuse à l'entropie élastique à l'état caoutchouteux et enfin à l'état visqueux comme une transition fluide. La température de transition du verre est plus une plage de température qu'une température distincte et, par conséquent, pas une transition de phase de premier ordre. Au-dessus des thermoplastiques amorphes T_g perdent leur stabilité mécanique, d'où leur température de service est inférieure à T_g et leur température de traitement supérieure à T_g

D'autre part, les thermoplastiques semi-cristallins possèdent, en plus des régions amorphes, des régions cristallines ordonnées. Un état thermoplastique n'existe qu'à des températures supérieures à la température de fusion T_m de ces régions cristallines. Ci-dessous T_m un thermoplastique semi-cristallin se comporte l'entropie élastique et T_m sépare distinctement l'état élastique visqueux et l'entropie. Quant aux thermoplastiques amorphes, le module de cisaillement, exemplaire pour les propriétés élastiques, des thermoplastiques semi-cristallins diminue en surpassant T_g mais conserve une partie de sa rigidité comme pour les cristaux. Au-dessus de T_m les cristaux se dégradent, provoquant un autre déclin du module de cisaillement. Les propriétés des polymères semi-cristallins dépendent largement de la cristallinité. La plage de température de service des thermoplastiques semi-cristallins est inférieure à T_m , la température de traitement supérieure à T_m

I.1. Définition d'un thermoplastique

Les matériaux thermoplastiques sont populaires en raison de leur traitement sûr et convivial, et ils peuvent être fondus, façonnés et refroidis en une pièce dimensionnellement stable en quelques secondes. Les températures de traitement commencent à environ 120 °C pour le polyéthylène, mais peuvent atteindre 345 °C pour les thermoplastiques techniques à haute performance tels que le poly(éther éther cétone) (PEEK). En raison de la viscosité élevée des

thermoplastiques, l'accent est mis sur les techniques de traitement des textiles pour préparer les matériaux précurseurs à la fabrication de composants composites.

I.2. Types de thermoplastiques

Principaux types de thermoplastiques Les thermoplastiques sont des plastiques qui peuvent être fondus et remodelés plusieurs fois. Ils ont une structure moléculaire à chaîne ouverte. Les plastiques dans les emballages sont facilement identifiés par un symbole estampillé sur la base de la bouteille ou sur l'emballage lui-même. Voici les principaux types :

- **PET (polyéthylène téréphtalate)**
- **HDPE (high-density polyethylene) and LDPE (low-density polyethylene)**
- **PVC (polyvinyl chloride)**
- **PP (polypropylene)**
- **PS (polystyrene or styrofoam)**

Les différents polymères sont examinés en détail par famille chimique, en donnant successivement pour chacun d'eux : les caractéristiques essentielles du point de vue qualitatif (atouts et handicaps), l'aspect quantitatif ayant été donné dans le chapitre précédant, puis l'énumération des applications les plus courantes et de celles qui ont tendance à se développer.

I.3. Thermoplastiques classiques

I.3.1. Styréniques

La famille issue du styrène monomère comporte essentiellement les polymères suivants

- Par polymérisation :

styrène → polystyrène homopolymère (PS)

styrène + butadiène (3 à 10 %) → dérivé : polystyrène choc (PSC)

styrène + acrylonitrile (20 à 30 %). → copolymère (SAN)

-Par polymérisation ou par greffage :

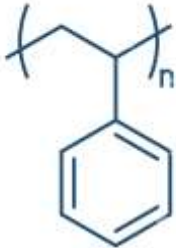
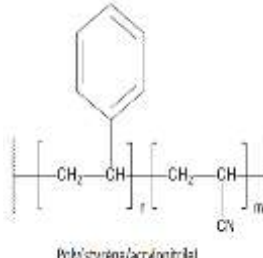
styrène + butadiène + acrylonitrile ..


styrène/butadiène et acrylonitrile..... → terpolymère (ABS)

Le tableau (1) donne les caractéristiques générales des styréniques. En fait, les ABS représentent un produit à part dans la famille des styréniques. On peut les comparer à des alliages et les propriétés sont fonction des proportions relatives des trois monomères les constituant. En règle générale, ceux-ci apportent ; acrylonitrile, l'aspect de surface ; butadiène, la résistance aux chocs (venant des élastomères) ; styrène, la facilité de mise en oeuvre et brillance. Un ABS courant comporte les proportions suivantes :

A = 20 % ; B = 30 % ; S = 50 %.

Tableau I.1 Caractéristiques générales des plastiques styréniques

	Avantages	Inconvénients	formule chimique
PS	<ul style="list-style-type: none"> • rigidité stabilité formes et dimensions • transparence cristal possible (transmission 90 %), brillance • résistance au climat tropical • excellente isolation électrique HF • alimentaire coût réduit • facilité de moulage et formage (large intervalle de température) • faible retrait (précision 1/10 mm) • collage, décoration et impression aisés • soudure par ultrasons 	<ul style="list-style-type: none"> • fragilité • mauvaise tenue thermique (60 à 70°C) combustibilité • électrostatique • coefficient de friction relativement élevé sensibilité aux hydrocarbures, huiles et solvants (trichloréthylène) • soufflage difficile 	<p>(C₈H₈)_n</p> 
PSC	<ul style="list-style-type: none"> • tenue aux chocs améliorée 	<ul style="list-style-type: none"> • rigidité et brillance atténuées • opacité 	
SAN	<ul style="list-style-type: none"> • résistance aux chocs et à la rayure • brillance • comportement meilleur à la fissuration sous contrainte • tenue aux hydrocarbures 	<ul style="list-style-type: none"> • transparence colorée seulement • reste fragile 	 <p>Poly(styrène/acrylonitrile)</p>
ABS	<ul style="list-style-type: none"> • rigidité (en particulier opposition avec PEHd et PP semi-rigides) 	<ul style="list-style-type: none"> • opacité • très électrostatique 	

	<ul style="list-style-type: none"> • stabilité dimensionnelle • aspect agréable (surfaces dures et brillantes) • bonne résistance aux chocs et aux rayures • assez bonne tenue à l'humidité et à la chaleur • bon comportement en présence de corps gras • alimentaire • moulage et formage aisés • facilité d'impression et de décoration par métallisation sous vide ou électroplacage 	<ul style="list-style-type: none"> • tenue chimique assez faible • mauvaise tenue au vieillissement à l'extérieur 	
--	--	---	---

I.3.1.1. Utilisations classiques des PS et ABS PS et PSC:

- emballage thermoformé (pots de yaourt, de crème, gobelets...) ou injecté (boîtage, quincaillerie, papeterie...).
- ameublement, armoires de toilette, diffuseurs d'éclairage, articles ménagers, cabines de douches.
- coffrets de radio, capotages arrière de TV.
- électroménager, bacs, cuves et contre-portes de réfrigérateurs domestiques.
- articles de bureau et de dessin, stylos à bille, talons de chaussures de femme, bobines de fils à coudre, jouets (maquette à monter).

SAN:

- articles ménagers, électroménager et sanitaire.
- feux de position et feux arrière de cycles.
- dessus de tourne-disque.

ABS :

- automobile (éléments de garnissage interne, calandres) ;
- électroménager (capotages, carters, cuves de réfrigérateurs isolés au PU...);
- appareils de radio, téléviseurs, appareils photo ;
- appareils téléphoniques ; - ameublement; - éléments de caravane ;
- bagagerie ; - dessus de ski (feuille colorée du décor);
- petites pièces chromées (bouchons, boutons, bougies, poignées...);
- jouets (LEGO).

I.3.1.2. Utilisations en développement

PS ou PSC

Ce polymère a l'avantage d'être, parmi les matériaux de bas prix relatif, le seul vraiment rigide

Chapitre 1. Polymères thermoplastiques généralités et propriétés

et transparent, permettant la réalisation de pièces précises et minces par injection (cette rigidité pouvant également exister dans une variante épaisse par le jeu des allégés). Plusieurs facteurs expliquent son expansion, nous en énumérerons quelques-uns.

- Le développement de l'emballage rigide alimentaire, en liaison avec des techniques de biorientation permettant de thermoformer un PS cristal, de coextrusion dans le cas des semi-conserves thermoformées.
- L'accroissement de l'emballage thermoformé et de la gobeletterie pour distributeur automatique de boissons (généralisation de l'emploi) et restauration rapide.
- La réalisation d'objets jetables : emballages, vaisselle embarquée (avion, train), crayons à bille, rasoirs.
- La croissance des loisirs entraînant une consommation de produits de grande diffusion : magasins de films, photo et vidéo, cassettes pour magnétophones et magnétoscopes.
- La possibilité de remplacement du bois par des grosses pièces de structure en PS allégé : ameublement (rangement), mobilier de bureau, carrosseries d'appareils de radio, téléviseurs, baffles de haut-parleur, souvent peintes (peinture astatique).

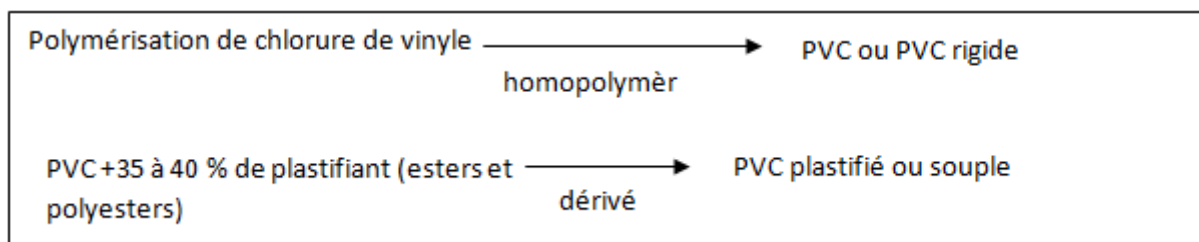
ABS

Pour des raisons économiques l'ABS a dû céder des places au PP qui demeure, en pièces moulées, son concurrent le plus direct. Ce polymère a perdu, pour des motivations fonctionnelles et économiques, le marché des calandres automobiles au bénéfice de conceptions intégrées en PP, PU ou SMC et celui des casques de motos ou le PC l'a supplanté. Cependant, l'ABS reste un matériau plus rigide que le PP (semi-rigide) et il garde en injection de bonnes possibilités de développement, par exemple dans la réalisation des produits suivants :

- capotages pour la bureautique (micro-ordinateurs, machines à écrire, minitels), calettes, téléviseurs portatifs, appareils de photo ou vidéo, tondeuses à gazon, motocycles ;
- éléments de carrosserie de mini-voiture (voitures), de caravanes, d'embarcations légères ;
- ameublement (injecté allégé ou thermoformé);
- boîtiers de montre (swatch).

I.3.2. Vinyliques

On distingue d'abord deux grandes classes de polyvinyles, les rigides et les souples, ainsi préparés :



Chapitre 1. Polymères thermoplastiques généralités et propriétés

Les produits suivants entrent également dans la famille des vinyliques : acétate de polyvinyle (PVA), acétochlorure de vinyle (PVA/PVC): copolymère de PVC (85 %) et d'acétate de vinyle (15 %) ; alcool polyvinylique (APV), polyvinylidène (PVD) ou (PVDC). Industriellement, la polymérisation du chlorure de vinyle peut être réalisée par les trois procédés classiques :

- émulsion : on obtient une granulométrie de 1 à 30 um qui est utilisée en enduction sous forme de plastisol ;
- suspension : la granulométrie est alors comprise entre 100 et 300 um et permet la réalisation de mélanges secs (dry blend) que l'on peut employer directement en extrusion ;
- masse : les résines ainsi préparées allient à une très grande pureté une faible absorption d'eau et sont fréquemment utilisées pour le calandrage et l'extrusion. Les transformateurs n'utilisent pas du PVC pur, mais des mélanges préparés par les producteurs sous forme de poudres ou de granulés, suivant le schéma de la figure (1)

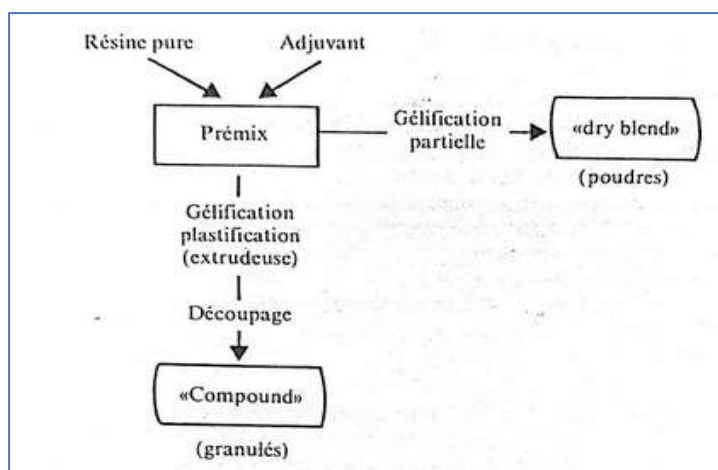


Figure I.1 Mode d'obtention des poudres (ou granulés) PVC utilisables par les transformateurs

Le tableau (I .2) donne les caractéristiques générales des PVC.

Tableau I.2 Caractéristiques générales des PVC

	Avantages	Inconvénients
PVC rigide	<ul style="list-style-type: none"> • rigidité, stabilité dimensionnelle . • résistance à l'abrasion • auto-extinguibilité • transparence possible (pour qualité suspension ou masse) • absorption d'eau pratiquement nulle 	<ul style="list-style-type: none"> • densité relativement élevée (1,4) • fragile à basse température • brunissement aux UV • précautions à prendre à l'injection (faible intervalle de température) • dégagement de vapeurs chloreuses en cas de décomposition

	<ul style="list-style-type: none"> • imperméabilité aux gaz et perméabilité relative à la vapeur d'eau (contraire du PE) • alimentaire • bon comportement aux agents chimiques (huile, graisse, ozone) • extrusion, formage, usinage 	<ul style="list-style-type: none"> • mauvaise tenue en présence de carburants
PVC souple	<ul style="list-style-type: none"> • souplesse comparable au caoutchouc • soudure HF aisée 	<ul style="list-style-type: none"> • tenue chimique réduite par l'adjonction de plastifiants • nécessité d'anti-oxydants (pour éviter l'oxydation des plastifiants) et d'agents de blocage (pour éviter la migration des plastifiants) • non alimentaire • collage difficile

I.3.2.1. Utilisations classiques des PVC

PVC rigide :

- tubes (adduction d'eau, bâtiment, assainissement, irrigation, drainage, gaine pour câble), raccords ;
- corps creux : bouteilles alimentaires (eau, huile, vin, vinaigre) ;
- emballages thermoformés (beurre, biscuits, confiseries, fruits, cachets pharmaceutiques...), blisters (conditionnement sur carte), couvercles ;
- profilés (volets roulants surtout) ;
- chaudronnerie (plaques) ;
- disques microsillon (avec acétochlorure) en régression ;
- cartes de crédit.

PVC souple :

- revêtements de sol (sur feutre, amiante ou vinylique en feuille et dalle), ces produits comportent environ 15 % de PVC enduit ;
- tissus enduits (sièges d'automobile et mobilier, maroquinerie, bagagerie, vêtements, chaussures) ;
- isolation de câbles et fils électriques ;
- profils souples et joints ;
- chaussures et semelles ;
- couvertures de classeurs et cahiers, trousse, housses ;
- "maroquinerie plastique", bagagerie souple ;
- nappes, rideaux ;
- objets gonflables publicitaires.

I.3.2.2. Utilisations en développement

PVC rigide

Il semble que l'on ait fait le plein avec la bouteille alimentaire. Ce matériau devrait par contre se développer dans le bâtiment où il demeure la seule matière naturellement auto-extinguible de bas prix, facilement transformable par extrusion (procédé en continu bien adapté à ce type de marché). La croissance du PVC rigide est donc liée à l'ouverture des marchés du bâtiment, en particulier pour les produits suivants : - encadrements de fenêtres avec l'essor du double vitrage (isolation) et de portes, voire portes intérieures complètes réalisées d'un seul tenant; - bordures et plinthes en PVC allégé (plus économiques que le bois avec les mêmes avantages de clouage); - gouttières, bardages. A noter encore que le développement de l'emballage thermoformé (blister, barquettes, plateaux à alvéoles), conditionnement éjectable pour produits pharmaceutiques, se poursuit. Des cartes d'identité en PVC rigide sont également à prévoir, ainsi qu'une extension de l'emploi des cartes de paiement.

PVC souple

On peut s'attendre à une quasi-stagnation relative du PVC plastifié à l'exception du revêtement mural. Les nouveaux produits restent rares. On peut citer néanmoins les conteneurs souples et les structures gonflables, mais leur développement reste faible (recouvrements de piscine, stockage, halls d'exposition, abris temporaires...)... En conclusion de ce paragraphe, nous donnerons avec le tableau(3) les caractéristiques et usages des autres dérivés vinyliques.

	Avantages	Inconvénients	Usages
Acétate de polyvinyle	<ul style="list-style-type: none"> • bon état de surface • transformation facilités 	<ul style="list-style-type: none"> • solubilité dans l'eau 	<ul style="list-style-type: none"> • additif, adhésif, peinture • colle, adhésif, additif
Acétochlorure de vinyle Alcool polyvinylique	<ul style="list-style-type: none"> • solubilité dans l'eau • insolubilité dans solvants organiques courants • imperméabilité aux gaz et vapeurs 		<ul style="list-style-type: none"> • dose de teinture • protection de semence • films de démoulage • complexes d'emballage
Butyral polyvinyle	<ul style="list-style-type: none"> • adhésif transparent 	<ul style="list-style-type: none"> • coût assez élevé 	<ul style="list-style-type: none"> • verre "triplex"
PVD polyvinylidène	<ul style="list-style-type: none"> • imperméabilité aux gaz vapeurs et arômes • bonne inertie chimique attaqué par ammoniac (acides, bases, huiles, graisses) 	<ul style="list-style-type: none"> • attaqué par ammoniac 	<ul style="list-style-type: none"> • étanchéité d'emballage (complexes)

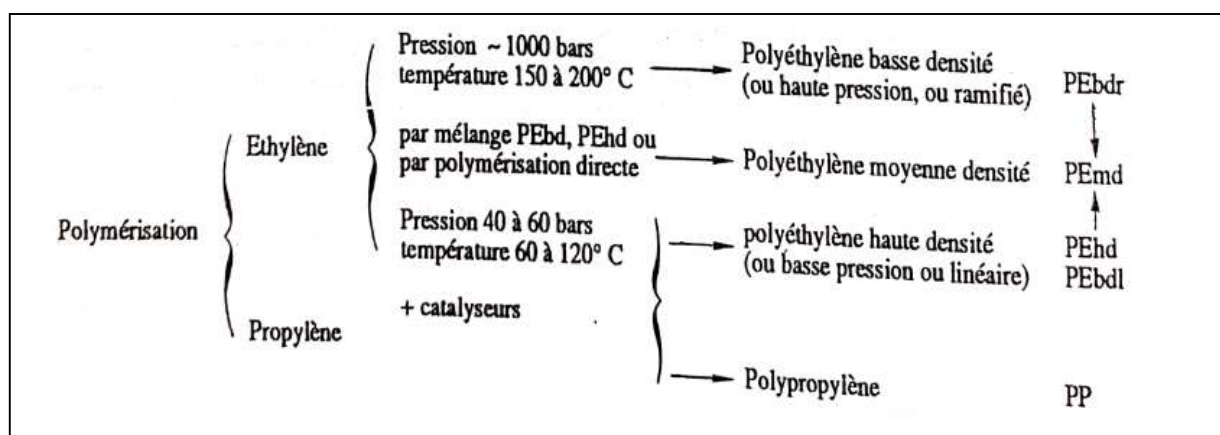
	<ul style="list-style-type: none"> • alimentaire • facilité d'entretien • thermorétractable 		
--	--	--	--

Tableau I.3 Caractéristiques et usages des autres dérivés vinyliques

I.3.3. Oléfiniques

Par polymérisation des monomères éthylènes et propylènes on obtient les produits indiqués dans le tableau 4

Tableau I.4 Par polymérisation des monomères éthylènes et propylènes



Par copolymérisation, on peut obtenir également les polyoléfines du tableau (5)

— Ethylène et propylène	→	Copolymère PP-PE
— Ethylène et acétate de vinyle (20 à 35%)	→	Copolymère EVA
— <u>Ethylène</u> et alcool <u>polyvinyle</u>	→	Copolymère EVOH
— <u>Ethylène</u> , acide acrylique et oxydes métalliques	→	<u>Ionomères IO</u>
(Ca, Na, ...) Ba, Ca, Mg, Zn) réticulation ionique		

On peut obtenir également un polyéthylène de masse moléculaire très élevée (de l'ordre du million), le PEhpm. Les polyéthylènes peuvent être réticulés chimiquement (péroxydes) ou physiquement (irradiation), cf. figure (2). On établit ainsi des liaisons tridimensionnelles au sein de la matière et le produit n'est alors plus un thermoplastique. On produit aussi un PE basse densité par un procédé basse pression : PEbd linéaire. L'amélioration essentielle concerne

la tenue mécanique, d'où la possibilité de réaliser des épaisseurs plus faibles pour une même fonction (gain de matière), avec cependant, un inconvénient : fluage élevé.

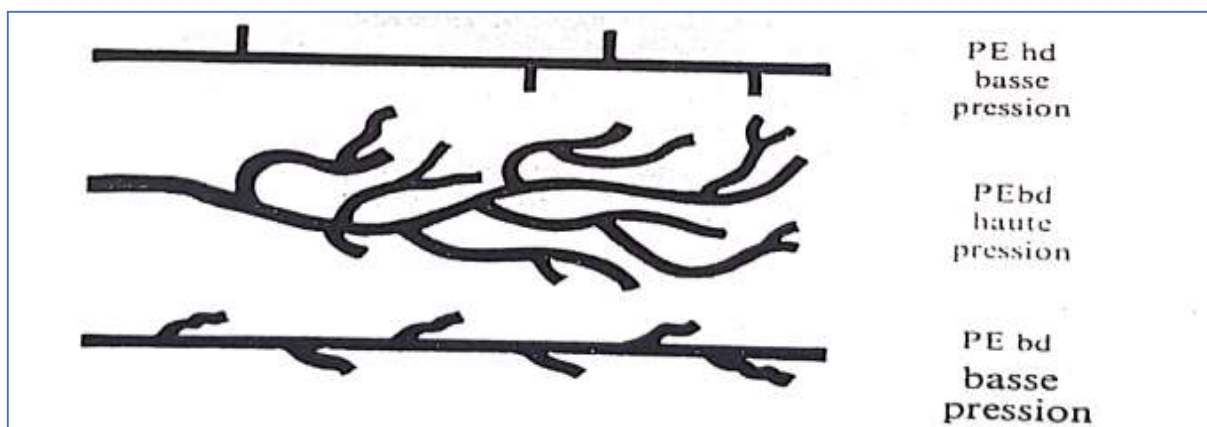


Figure I.2 Structure des polyéthylènes

Les caractéristiques générales des PE et PP classiques sont données par le tableau (6)

Tableau I .5 Caractéristiques générales des PE et PP classiques

	Avantages	Inconvénients
PEbd	<ul style="list-style-type: none"> • souple (sans plastifiant) • tenue aux chocs (presque incassable) • inertie chimique (en particulier résistance à l'acide fluorhydrique qui attaque verres et métaux) • imperméabilité à l'eau • alimentaire • coût réduit • moulage et extrusion faciles (large intervalle de température) • isolation électrique 	<ul style="list-style-type: none"> • sensibilité à la fissuration sous contrainte • faible tenue thermique, inflammable • oxydation aux UV (sauf coloration noire "carbon black"). • perméabilité aux gaz (02,00) destruction par les rongeurs (sauf qualité spéciale) • retrait différentiel au moulage • nécessité de traitement préalable avant impression • collage difficile, soudure HF impossible
PEhd	<ul style="list-style-type: none"> • caractéristiques améliorées du PEbd • rigidité (ou semi-rigidité) • tenue en température (stérilisable) et au froid (-80°C) • anti-adhérence 	<ul style="list-style-type: none"> • Combustible • oxydation aux UV • retrait non homogène

	<ul style="list-style-type: none"> • stabilité chimique et tenue aux radiations • moindre sensibilité à la fissuration sous tension • alimentaire 	
PP	<ul style="list-style-type: none"> • bonne tenue mécanique, rigidité, résistance à l'abrasion • excellente résistance à la flexion (réalisation de charnières minces supportant des millions de manœuvres) • tenue en température élevée (environ 110° C) et conservation de ses propriétés jusqu'à la température de ramollissement • propriétés électriques • bel aspect, brillance rayure difficile • alimentaire • faible densité (0,90) 	<ul style="list-style-type: none"> • les mêmes que PEnd avec en plus : - fragilité à basse température, on pallie ceci par : utilisation du copolymère - formage plus difficile - nécessité de conformateur pour grosse pièce

I.3.3.1. Utilisations classiques des PE et PP PEbd

- emballage sous forme de gaine ou film : sachets et sacs pour produits alimentaires ou industriels, sacs cabas, sacs poubelles, sacs GC (contenance 50 kg : engrais, farine, sucre, sel...), complexes alimentaires avec papier ou aluminium, films rétractables et étirables pour fardelage ou palettisation, capsules de bouchage, tubes souples de crème .
- films pour bâtiment ou TP et agriculture (ensilage, paillage, serres-tunnels);
- produits ménagers (scaux, poubelles), fleurs artificielles ;
- jouets souples ;
- tuyaux, revêtements de câbles téléphoniques.

PEhd:

- casiers à bouteilles, caisses de manutention ;
- flacons de détergent et produits d'entretien, bouteilles de lait stérilisé;
- bidons d'huile pour moteur, "jerrycans", fosses septiques ;
- films minces (sac "sortie de caisse", emballage de viande, de poisson, pochette interne de disque);
- coques de canot, semelles de ski, cartouches de chasse. PP :
- ficelles et cordages ;
- bandelettes tissées pour sacs TGC (contenance 100 kg: pommes de terre, charbon, sable, ...) et pour support de tapis moquette (backing);

Chapitre 1. Polymères thermoplastiques généralités et propriétés

- feuillards de cerclage ;
- complexes d'emballage ;
- films d'aspect (biscottes, chips, confiserie, ... bonnetterie) et pelliculage (couvertures de livres et de pochettes de disque);
- coques de siège de plein air ou terrasse ;
- pièces techniques pour l'électroménager (machines à laver, sèchecheveux, aspirateurs) et pour l'automobile (chauffage, filtres à air, bacs d'accumulateur, buses d'aération...);
- boîtage à charnière intégrée (étuis à lunettes, stylos, ... poudre, fard..., boîtiers de pile, malettes...);
- accessoires de salle de bains ;
- crayons feutre, cartouches d'encre ;
- seringues à jeter ;
- chaudronnerie (plaques).

I.3.3.2. Utilisations en développement

PEbd radicalaire

Ce matériau est essentiellement lié au marché du film où il rentre en concurrence avec le PEbdl, on peut penser à une croissance dans :

- le film agricole pour les besoins croissants de la plasticulture et le film de TP (sous-couche routière);
- le film dégradable, en particulier pour le film agricole ;
- le sac poubelle pour villes à affluence saisonnière et centre des villes anciennes ;
- le film rétractable, et surtout étirable ;
- l'application "complexe", le PEbd étant le support le plus utilisé.

PEbd linéaire :

- films étirables, sacherie, câblerie.

PEhd

On peut prévoir d'une façon générale une croissance du soufflage de corps creux, mais, corrélativement, une concurrence du PP dans tous les domaines de l'injection, Dans le détail, on peut noter les développements ci-après:

- les films minces d'emballage ou de protection (sacherie, pochettes) qui concurrencent le papier ;
- isolation de câble électrique (particulièrement PEhd réticulé);
- tubes, de gros diamètre (surtout pour l'assainissement) et de moyen diamètre pour l'alimentation en gaz domestique (réseau GDF);
- tubes pour eau chaude, chauffage par le sol ou mural ;
- palettes et caisses-palettes de manutention ;
- poubelles urbaines, de collecte hermétique et mécanisée, pour ordures ménagères ;
- gros soufflage de fûts industriels 150 à 250 l, réservoirs d'essence de véhicules automobiles ;
- ;

Chapitre 1. Polymères thermoplastiques généralités et propriétés

- déligneurs pour routes et autoroutes.

PP

D'une façon globale, on constate :

- une très forte croissance du moulage par injection (reprises sur les autres matériaux PS, ABS et PEhd),

- un développement considérable du film PP dans l'emballage d'aspect, avec deux types de produits : le PP non orienté, qui prend des places sur le PEbd dans la sacherie de bonne transparence ; le PP biorienté, qui a remplacé la pellicule cellulosique.

Mais la versatilité du PP doit lui permettre de prendre encore des marchés dans les domaines suivants :

- éléments de carrosserie interne d'automobile : garnissage, siège, ... obtenus par emboutissage ;

- pare-chocs : par association PP - élastomère EPDM :

- soubassements et tambours de machine à laver. Il faut noter aussi pour toutes les polyoléfinés (PE et PP) la possibilité de constituer des supports d'impression (notices techniques, cartes géographiques, annuaires, documents administratifs, etc.). Les caractéristiques et usages des autres dérivés des polyoléfinés sont donnés par le tableau (7).

Tableau I.6 Caractéristiques et usages des autres dérivés des polyoléfinés

	Avantages	Inconvénients	Usages
PEmd PEhpm PP copolymère	<ul style="list-style-type: none"> propriétés intermédiaires entre PEbd et PEhd tenuue chimique qualités du PP, avec tenue au froid 	<ul style="list-style-type: none"> difficile à transformer (compression, frittage) 	<ul style="list-style-type: none"> bouteille de lait pasteurisé pièce de glissement et de tenue en atmosphère agressive (concurrence aux fluorés), corps creux volumineux pièce technique d'automobile coque de valise (pour soute d'avion)
EVA	<ul style="list-style-type: none"> élasticité supérieure aux PE tenuue au froid (- 60° C) résistance à l'ozone et aux UV alimentaire 	<ul style="list-style-type: none"> peu de résistance mécanique sensible à la chaleur plus perméable que PE 	<ul style="list-style-type: none"> doigtier de gynécologie bouchon non tissé, reliure enduction pour emballage (complexe), film étirable adhésif ("hot melt")
EVOH	<ul style="list-style-type: none"> imperméabilité O₂ et CO₂ rétenon saveur, parfums tenuue huiles, solvants brillance 	<ul style="list-style-type: none"> affecté par l'humidité (doit être protégé) 	<ul style="list-style-type: none"> couche imperméable pour complexes alimentaires
Ionomère	<ul style="list-style-type: none"> résistance à la déchirure et au "stress cracking" revêtement exempt de piqûre tenuue aux graisses alimentaires soudure résistante impression facile 	<ul style="list-style-type: none"> mauvaise tenuue aux UV 	<ul style="list-style-type: none"> additif de coextrusion film d'emballage pour objet dur et pointu

I.3.4. Acryliques

On distingue dans cette famille les produits suivants.

- Le méthacrylate qui, par polymérisation catalytique sans élévation de température, donne le polyméthacrylate de méthyle, PMM, utilisé généralement sous forme solide (cf. tableau 8 pour les caractéristiques générales).
- L'acrylate, donnant des polymères mis en oeuvre sous forme d'émulsion ou de dissolution (peintures).
- L'acrylonitrile, produit de base de la fabrication de fibres textiles. L'acrylonitrile donne aussi des copolymères à haute teneur en nitrile, le PAN (cf. tableau 8 pour les caractéristiques générales).

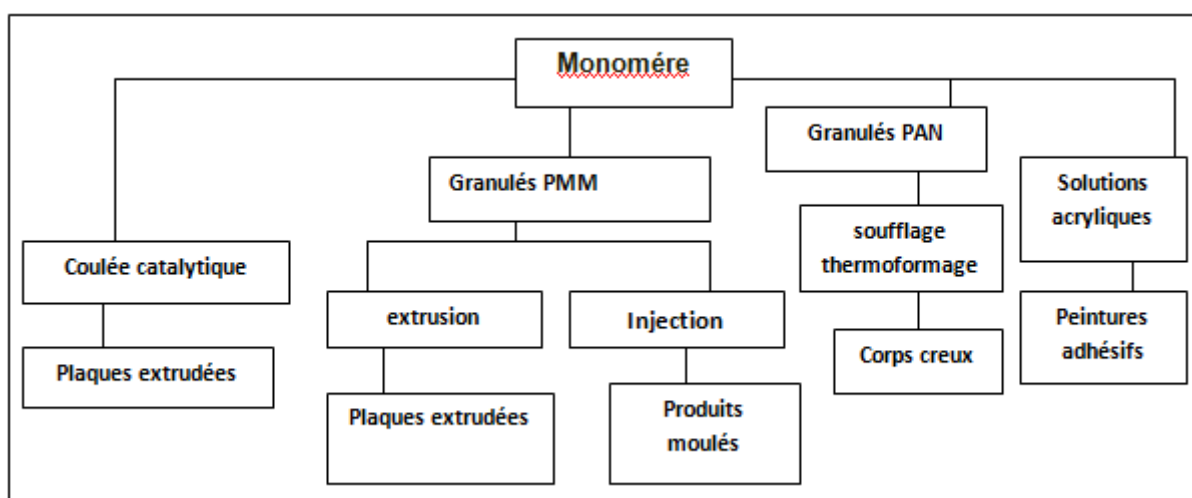


Figure I.3 Dérivés acryliques

Tableau I.7 Caractéristiques générales du PMM

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • transparence normale supéricurc au verte ordinaire même sous forte épaisseur (transmission = 92% pour les épaisseurs couramment utilisées) • facilité de coloration (diffusant ou opaque) • excellente tenue aux UV, bon vieillissement (garantie décennale) • surface dure, lisse et brillante • faible absorption de l'eau • propriété de conduction de la lumière (éclairage d'un point éloigné de la source lumineuse) • facilité de formage et d'usinage à sec 	<ul style="list-style-type: none"> • fragilité • sensibilité à la rayure (possibilité de repolir) • électrostatique • faible tenue en température • combustibilité (brûle sans émission de fumée) • résistance chimique faible (sensible aux supercarburants et solvants) • nécessité de recuit sur les plaques épaisses pour éviter le fendillement

I.3.4.1. Utilisations types et applications nouvelles Plaque coulée Prép polymère de méthacrylate de méthyle coulé entre deux plaques de verre puis polymérisé en étuve

(épaisseur < 200 mm). Les utilisations sont les suivantes :

- dômes, lanterneaux (bâtiment);
- ameublement (tables et sièges design);
- hublots et cockpits d'avion (PMM étiré); - enseignes (unitaires) ;
- aquariums, maquettes (par usinage) ;

Plaque extrudée Généralement mise en oeuvre par thermoformage (épaisseur ≤ 56 mm):

- signalisation routière lumineuse ;
- enseignes de station-service (séries) ;
- diffuseurs de lumière (bâtiment);
- agencement de magasins et publicité (PLV).

Moulage :

- automobile : feux arrières et de position, catadioptres, plafonniers, "verrière de bord", écussons et marques ;
- appareils de radio et téléviseurs (cadres, dessus du tourne-disque, protection d'écran); - éclairage (globes, luminaires);
- divers : instruments de dessin et de mesure, volant de robinet (sanitaire), "verres" de montre et de réveil, "verres" de contact.

Applications nouvelles

- Lentilles pour appareils photo d'amateur et téléviseurs de surveillance (ne nécessite pas de finition par meulage).
- Baignoires (avec renforcement en verre/polyester).
- Bases acryliques également : dents artificielles, fibres optiques.

Tableau I.8 Caractéristiques générales et utilisations types du PAN

Avantages	Applications
<ul style="list-style-type: none">• transparence (mais inférieure à PMM)• résistance aux chocs• bon comportement aux solvants• imperméabilité aux gaz et parfums	<ul style="list-style-type: none">• corps creux : pour cosmétiques (vernis à Longles), pour liquide effaceur• complexes d'emballage• possibilités pour boissons carbonatées, épices, aromes

I.4. Thermoplastiques techniques (ou technoplastiques)

I.4.1. Polycarbonates, PC

Le monomère de base est un diester de l'acide carbonique et le polymère est fabriqué à partir d'une réaction entre le phosgène et le bisphénol A. Pour protéger le PC des rayures, on peut le recouvrir d'un vernis transparent à base de mélamine ou de silicone que l'on dépose par trempage. Les caractéristiques des polycarbonates sont données par le tableau 9.

Tableau I.9 Caractéristiques générales polycarbonates

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • excellentes propriétés mécaniques et électriques • transparence • ténacité, durcté, résistance aux chocs (on peut le clouct) • stabilité dimensionnelle sous température (-100 à +130° C), stérilisable .auto-extinguible • tenue aux UV • imperméabilité à la vapeur d'eau • ne se laisse pas décolorer par les produits ménagers (thé, café, jus de fruit) et le rouge à lèvres • bonne tenue aux urines • alimentaire 	<ul style="list-style-type: none"> •résiste mal aux supercarburants • attaqué par les lessives et les solvants, décomposé par les bases • mauvaise tenue à l'hydrolyse • sensibilité à la fissuration, à la rayure et à l'abrasion • nécessité d'étrvage des granulés avant transformation

I.4.1.1. Utilisations types et applications en développement

- Appareillage électrique et électronique (qualités électriques).
- Luminaires, feux de signalisation de carrefour, lanternerie automobile : haut de gamme (transparence à chaud).
- Boucliers de police, vitrages de guichets de banque, vitrages d'engin de TP (tenue aux chocs et transparence), casques de sécurité (moto et sports violents), visières de casques, dessus de tourne-disque, protections pour machine-outil.
- Instruments et bacs chirurgicaux, boîtiers de dialyse, seringues, biberons (stérilisation), cages pour élevage de rats de laboratoire (tenue urine).
- Plaques à double parois pour serre et véranda.

1.4.1.1. Applications en développement

- Vitrage de protection ou "anti-vandale" : autocars, voitures pour transport de fonds ou de personnalités, vitrines, guichets de banque (antiballes), lampadaires pour grands ensembles, isolation de périphériques routiers.
- Carcasses de machines de bureau (allégé), appareils photo, caméscopes.
- "Verre" de phare automobile (avec revêtement protecteur).
- Aménagement interne d'avion de lignes.
- Mobilier urbain : panneaux Decaux, colonnes Morris.
- Disques compacts.

1.4.2. Polyesters saturés

Ce sont des polyesters linéaires, qui ne doivent pas être confondus avec les polyesters non saturés, lesquels sont des résines thermodurcissables que nous retrouverons plus loin. On distingue deux types de polymères : le polyéthylène téréphtalate (PET) et le polybutylène téréphtalate (PBT). Leurs caractéristiques sont données par le tableau 10.

Tableau I 10 Caractéristiques générales Polyester

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">• rigidité, résistance à l'abrasion, ténacité• bonnes propriétés mécaniques (module d'élasticité élevé) et électrique• tenue à la fatigue• stabilité dimensionnelle, hydrophobie• faible coefficient de frottement• auto-extinguibilité• bon comportement à la fissuration sous tension• Stabilité chimique, tenue à l'essence et solvants.. bon intervalle de tenue en température (-60 à + 100°C, puis fluage, mais tenue possible jusqu'à 200°C)• aptitude à la métallisation ,• prix relativement faible pour un technopolymère	<ul style="list-style-type: none">• densité relativement élevée• sensibilité à l'hydrolyse (eau ~70°C).• attaqué par bases et acides forts• nécessité de séchage avant transformation• sensible aux UV

Spécificité de chaque polymère

PET : plus rigide, meilleure résistance mécanique (+ 30 à 60 %), température de déflexion plus élevée (+ 20°C), meilleur aspect de surface, aptitude au soufflage, métallisation.

PBT : tenue aux hydrocarbures supérieure, bon comportement à la fissuration sous tension, résistance aux chocs, mise en oeuvre plus facile.

I.4.2.1. Utilisations types et applications en développement Electricité et électronique :

- interrupteurs miniatures, prises HT, fusibles industriels ; porte-balais de moteurs électriques.

- Commutateurs, barrettes de connexion, multibroches pour informatique.

Electroménager:

- poignées de sèche-cheveux, carters de bouilloires, embases de machines à café, détendeurs de bouteilles de gaz domestique.

Automobile :

- connecteurs de bougie, éléments d'allumeur et de bobines d'allumage. Pour le PET spécifiquement. - Fibres : habillement, tissus industriels. org

- Films : rubans magnétiques pour audio et vidéo, disques souples et disquettes (informatique) ; rubans supports pour marquage à chaud ; isolants d'encoches de moteur électrique, diélectriques de condensateur ; calques pour dessins industriels ; emballage sous vide (complexes).

Applications en développement

- Bouteilles pour boissons carbonatées et jus de fruits (voire bière et vin); flacons pour parfumerie et pharmacie ; minidoses d'alcool (transports aériens);

- boîtes de conserves (en complexes);

- barquettes pour four micro-ondes (plats à réchauffer).

I.4.3. Polyoxydes de phénylènes

L'homopolymère est difficile à mouler, mais on obtient toute une gamme de PPO modifiés par mélange mécanique avec du PS en proportions variables (en moyennes 40 %) permettant une transformation facile. Cf. tableau 11 pour les caractéristiques.

Tableau I .11 Caractéristiques générales Polyoxydes de phénylènes

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">• rigidité, tenue aux chocs, résistance à la rayure, brillance• stabilité dimensionnelle (faible absorption d'eau)• bonnes propriétés électriques• large gamme de tenue en température (supporte les stérilisations répétées) et bonne résistance mécanique• auto-extinguibilité• résistance à l'hydrolyse (eau chaude et	<ul style="list-style-type: none">• opacité• coefficient de frottement relativement élevé (grippage)• fragilité en grande pièce• faible tenue aux UY• mauvaise tenue aux aromatiques, supercarburants et solvants• possibilité de coloration limitée

savon de synthèse)	
<ul style="list-style-type: none"> • collage et impression facile, métallisation • soudable par ultrasons 	

REMARQUE. - Il ne faut pas confondre l'homopolymère, dont la plage d'utilisation en température peut aller de -55 à 190°C, avec ses dérivés limités à 110 - 130°C. Toutefois, ces derniers (chargés en PS) sont moins onéreux et offrent toujours des caractéristiques intéressantes auxquelles s'ajoutent parfois celles du PS (collage, impression).

I.4.3.1. Utilisations types et applications en développement

Tenue à l'hydrolyse et comportement à chaud :

- robinetterie, éléments de pompe, compteurs d'eau chaude, pièces de machine à laver (linge et vaisselle);
- éléments de cafetière, sèche-cheveux, radiateurs soufflants ;
- éléments d'aérotherme et pièces "chaudes" pour automobile, boîtes à eau de radiateur.

Stabilité dimensionnelle :

- déflecteurs de téléviseurs ;
- pièces d'horlogerie et de micromécanismes, d'électronique ;
- plaquettes de programmeur de machine à laver.

Applications en développement

On exploite les propriétés électriques et l'auto-extinguibilité et le fait que la gamme des PPO modifiés joue le rôle de super ABS (bonne définition des formes).

- Profils pour automobile.
- Robinetterie, roues centrifuge de pompe à eau.
- Micromécanismes pour électricité et électronique.
- Carters pour matériel de bureautique et télélectronique (concurrence à l'ABS pour le haut de gamme).

I.4.4. Polysulfurés

Il s'agit d'une nouvelle famille de plastiques techniques en développement qui comporte en particulier les polymères suivants : polysulfone (PSU), polyarylsulfone (PAS), polyéthersulfone (PES), polyphénylène sulfone (PPS). Seuls deux d'entre eux (PSU et PPS) connaissent déjà un bon essor commercial.

Tableau I.12 Caractéristiques générales du PSU

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • excellente résistance au suage sous Us température • stabilité dimensionnelle élevée 	<ul style="list-style-type: none"> • sensibilité à la fissuration sous tension • mauvaise tenue aux hydrocarbures et aux solvants

Chapitre 1. Polymères thermoplastiques généralités et propriétés

<ul style="list-style-type: none"> • résistance au rayonnement • large gamme de tenue en température (-100 + 150° C) et température de fléchissement élevée • bon comportement à l'hydrolyse • auto-extinguibilité • transparence jaune possible • retrait constant • métallisation électrolytique excellente (supérieure à ABS) 	<ul style="list-style-type: none"> • nécessité d'étuvage avant transformation • transformation délicate • prix élevé
--	---

Utilisations types

- Pièces techniques pour l'aéronautique, l'électricité et l'électronique.
- Supports de circuits intégrés, connecteurs, voyants.
- Robinetterie, pièces de trayeuse à lait. - Eléments de sèche-cheveux, radiateurs soufflants, four micro-ondes (brasseur et cache). - Pièces de distributeur de boissons chaudes (café, thé).

Tableau I.13 Caractéristiques générales du PPS

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • rigidité • stabilité dimensionnelle • tenue à chaud (260°C) en particulier au bain de soudure, et au froid • bon comportement au sluage . • résistance chimique (tenue aux solvants jusqu'à 200°C) • résistance à l'hydrolyse • tenue aux UV • auto-extinguibilité • bon accrochage sur les métaux 	<ul style="list-style-type: none"> • coût élevé • injection sous forte pression • coloration difficile cassant au choc

On reconnaît ce polymère par le bruit métallique qu'il émet lors d'un choc. Utilisations types

- Pièces techniques (électronique, télécommunications).
- Eléments de pompes, compresseurs, compteurs d'eau chaude, circuits de chauffage central.
- Fiches, connecteurs, douilles de projecteurs, circuits imprimés, portebalais, bobines de solénoïdes. - Matériel chirurgical stérilisable.
- Revêtement sur métaux.
- Encapsulation de composants électroniques.

I.4.5. Polyacétals

Ce polymère est issu de la formaldéhyde, on l'appelle polyacétal ou polyoxyméthylène (POM). Il existe deux produits : l'homopolymère et son copolymère. D'une façon générale, le premier est plus résistant mécaniquement et plus apte à l'effet ressort. Le second est moins rigide, mais plus résilient ; il vieillit mieux et sa transformation est plus facile. On notera encore que ces matériaux peuvent s'estamper (petites pièces) et que la possibilité de réaliser des assemblages rapides par encliquetage est très utile (gain de temps au montage).

Tableau I 14 Caractéristiques générales Polyacétals

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">• surface dure et lisse• rigidité, résilience, résistance à la fatigue (conservé à l'usage) .module d'élasticité élevé• excellente stabilité dimensionnelle• faible coefficient de frottement• effet ressort (possibilité d'emboîtements élastiques)• qualité diélectrique• bonne tenue à l'eau chaude• stabilité aux carburants, graisses, savons, solvants• bon comportement au gaz de ville	<ul style="list-style-type: none">• densité élevée (1,4) et opacité (jamais transparent)• sensible aux UV (mais protection possible)• attaqué par lessives et acides• combustible et peu résistant à la chaleur continue• température de transformation proche de celle de décomposition (dégagement de vapeur de formaldéhyde si on la dépasse)• retrait différentiel et parfois nécessité de recuit (pour assurer une bonne stabilité dimensionnelle)

I.4.5.1. Utilisations types et applications en développement

- Pièces techniques pour la mécanique (éléments de machine...), l'automobile (engrenages, douilles, poignées, ...), le cycle (dérailleurs), l'électricité, l'électronique, l'électroménager (cames de programmeur), l'industrie alimentaire (Cléments de convoyeur) et le bâtiment (pièces de serrurerie et huisserie).

- pièces à emboîtements élastiques et dispositifs de fixation rapide (rivets type "Fastex") résistants à la fatigue, boutons-pression.

Application en développement

Elles s'appuient sur les excellentes propriétés dimensionnelles des POM. On apprécie de plus la qualité de silence et d'absence de graissage à l'huile dans les micromécanismes.

Applications :

d'imprimantes, d'horlogerie ;

- robinetterie sanitaire, valves aérosol, valves de chambre à air ;

- serrurerie, boucles de ceinture de sécurité.

- pièces de compteurs,

I.4.6. Polyamides

Ces polymères sont obtenus par polyaddition à partir d'amino-acides, ou par polycondensation à partir de diamines et de diacides. Ces produits sont désignés par deux chiffres qui représentent le nombre d'atomes de carbone contenu dans la diamine ou le diacide, ou par un seul chiffre si le monomère est un amino-acide.

La famille des polyamides -technopolymères les plus diffusés- s'est élargie. Elle comporte les types de polymères suivants : de polyaddition : PA 6, PA 11, PA 12

- cristallin (le plus classique) de polycondensation : PA 6/6, PA 6/10, PA 6/12

- amorphe : peu affecté par l'humidité,

-aromatique : apportant une bonne tenue en température associé à une meilleure rigidité (polyaramide, polyarylamide, polyamide-imide)

Notons aussi les blocs amide avec séquences élastomériques PE-BA.

Tableau I .15 Caractéristiques générales (polymères classiques)

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • tenue aux chocs, a la fatigue et fissuration sous charge • résistance à l'abrasion, insensible au rayage • faible coefficient de frottement • résistance mécanique et thermique • peu électrostatique • auto-extinguibilité • bonne tenue aux hydrocarbures et aux solvants • translucidité possible • alimentaire 	<ul style="list-style-type: none"> • teneur en eau non négligeable (sauf PA 11 et 12), • perméabilité à la vapeur d'eau • mauvaise tenue à la chaleur humide (vapeur, eau bouillante) et en atmosphère desséchée (fragile). • nécessité de préséchage des granulés avant transformation (PA base 6)

Les produits, issus de polycondensation, ont une teneur en eau non négligeable qui se traduit comme suit :

<ul style="list-style-type: none"> - PA 6 : 10 à 12 % - PA 6-6 : 9 à 10 % - PA 11 : 2 % 	} saturation	<ul style="list-style-type: none"> 1,9 à 3,3 % 0,4 à 1,5 % 0,5 à 1 % 	} état normal
--	--------------	---	---------------

A l'ambiance la teneur en eau des PA 6 et 6-6 s'autorégule entre 2 et 3 %. Cette eau leur est nécessaire pour assurer leurs caractéristiques. En atmosphère humide, les propriétés sont amoindries. En cas de dessiccation, les produits deviennent fragiles. Cf. tableau 17 pour les

propriétés et utilisations spécifiques des divers PA.

I.4.6.1. Utilisations types et applications en développement

- Roues dentées (essuie-glaces, compteurs, mixers, rasoirs électriques, projecteurs de cinéma...).
- Paliers lisses de roulements : on notera à ce sujet que l'on peut faire tourner un arbre métallique dans une douille en polyamide sans graissage, mais lorsqu'on fait tourillonner une matière plastique sur une autre matière plastique il faut marier les familles par exemple PA/POM ou le contraire, sinon les pièces se fendillent et cassent.
- Poignées, charnières, ventilateurs, hélices, galets de roulement, cages de roulements à billes, serrurerie.
- Eléments de pompe à essence et de carburateur, cartouches de briquets jetables, filtres, valves d'aérosols.
- Boîtes à eau de radiateur d'automobiles.
- Ebauches pour usinage (planches, plaques, jets, barres, disques, bagues, hexagones, tubes).
- Films, bandes "Velcro", poils de brosses et pinceaux.

Applications en développement

- Micromécanismes, moulinets de canne à pêche, serrurerie.
- Automobile : enjoliveurs de roues, réflecteurs de phare, sièges baquets, couvercles de boîte de vitesses, couvre-culasse, canalisations d'essence.
- Cycle : roues (by-cross), jantes, pédaliers.
- Crosses de fusil (militaire). - Attaches isolantes de rails (TGV). Et de nombreuses pièces fonctionnelles et structurelles réalisées en PA renforcé de fibre de verre (substitution aux alliages légers).

Polymères	Propriétés spécifiques	Usages spécifiques
PA – 6	• résistance aux chocs accrue	• roulettes de chariot
PA - 6/6	•meilleure tenue en température (100°C en service continu)	• le plus utilisé : fibres textiles et pièces industrielles d'applications courantes en électro-mécanique
PA - 6/10	• bonne translucidité sous faible épaisseur • stabilité dimensionnelle meilleure que PA - 6 et 6/6	• films, pièces industrielles
PA – 11	• teneur en eau réduite, stabilité dimensionnelle en milieu humide mais brûle lentement • bon comportement chimique et au choc à froid	• canalisation de frein à air comprimé et d'outillage pneumatique, conduite d'essence, films, poudres de revêtement pour protection d'éléments métalliques, pièces industrielles pour applications plus difficiles

PA – 12	• propriétés analogues à PA - 11 (mais origine minérale)	(automobile)
---------	--	--------------

Tableau I.6 Propriétés et utilisations spécifiques des différents PA

I.4.7. Polyfluorés

On distingue essentiellement quatre types de polymères dans cette famille issue du fluor : polytetrafluoréthylène (PTFE ou TFE), polytrifluorochloréthylène (PCFE ou CFE), éthylène propylène fluoré (EPF), polyvinylidène fluoré (PVDF). Le PTFE est le plus connu et le plus utilisé, on peut le trouver sous les trois formes indiquées par la figure 4, ses caractéristiques sont données par le tableau 17.

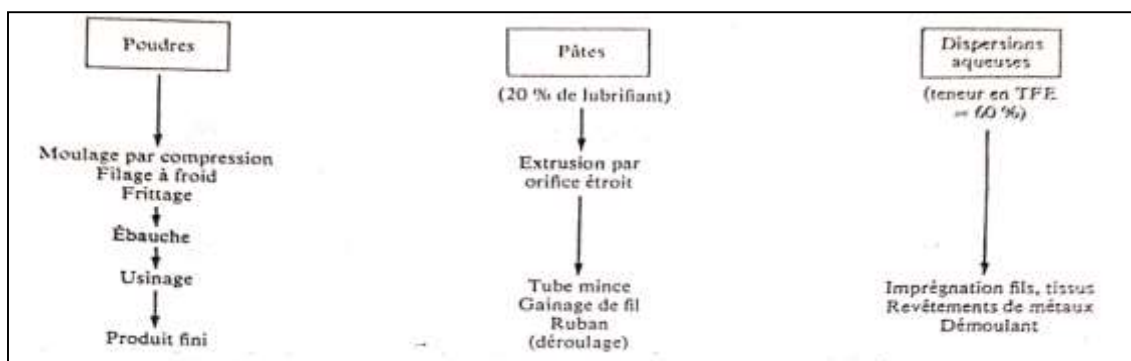


Figure I.4 Les trois formes du TFE

Tableau I.17 Caractéristiques générales (TFE)

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • très forte inertie chimique (altérable seulement par fluor et liquides alcalins) • large gamme de tenue en température (- 270 à + 300°C, en permanent - 80 à + 250° C) • très faible coefficient de frottement ($f < 0,1$), anti-adhérent, auto-lubrifiant ($f = 0,04$ inchangé jusqu'à 100° C) . ne se rafe pas, ne s'écorche pas. • hydrophobe (absorption d'eau = 0) • insensible aux UV • incombustible • sans effets nocifs pour le corps humain 	<ul style="list-style-type: none"> • densité élevée (2,1 à 2,2) • fluage • décomposition à 327° C avec émission de vapeurs fluoreuses • très coûteux • mise en oeuvre difficile (compression, frittage) • retrait différentiel • se soude et se colle difficilement (pas de solvant) • électrostatique

I.4.7.1. Caractéristiques particulières des dérivés

CFE : possibilité de mise en oeuvre par les méthodes classiques de transformation, moins bonne tenue aux solvants que TFE.

EPF: injectable et soudable, grande stabilité thermique.

Chapitre 1. Polymères thermoplastiques généralités et propriétés

PVDF : intachable et soudable, résistance au vieillissement et à l'hydrolyse, meilleure rigidité, facilité de transformation, coût volumique moins élevé.

Utilisations types des fluorés

- Anti-corrosion : tuyauterie et robinetterie en contact avec des produits corrosifs (industrie chimique), étanchéité par joint ou ruban utilisé comme filasse.
- Lubrification : paliers autolubrifiés pour graissage à vie (électroménager, automobile, micromécanique, caméras et projecteurs), lubrification non contaminante (alimentaire, pharmaceutique, papier, textile), lubrification à température élevée, en milieu humide ou poussiéreux, segments de pistons de compresseurs.
- Glissement : revêtements de poêle à frire, de grill, de moules à pâtisserie et confiserie, de semelles de fer à repasser, de transporteurs pour produits alimentaires, de mâchoires de soudeuses thermiques, aérosols de démoulage industriel.
- Isolation électrique (pas de reprise d'humidité), gainage de câbles électriques d'avion, pièces techniques pour composants électroniques. Le développement des fluorés suit celui de l'industrie chimique, la tendance étant d'utiliser le PTFE pour de l'enrobage ou les petites pièces et le PVDF (injectable) pour des formes moulées.

I.5. Thermoplastiques artificiels (ou cellulosiques)

Il s'agit de polymères artificiels (issus de végétaux), c'est-à-dire en quelque sorte repolymérisés par la nature. Du point de vue historique, ce furent les premières matières plastiques connues.

Tableau I.18 Information de Thermoplastiques artificiels

	Avantages	Inconvénients	Usages
Nitrocellulose	<ul style="list-style-type: none">• ténacité• stabilité dimensionnelle• collage et impression faciles	<ul style="list-style-type: none">• ténacité• stabilité dimensionnelle• collage et impression faciles• inflammable• mauvaise tenue à la lumière (jaunissement)• dissout par de nombreux solvants non injectable	<ul style="list-style-type: none">• autrefois support d'émulsions photographiques• balles de ping-pong• décors (guitare)• propergols• colles et vernis
Cellulose régénérée	<ul style="list-style-type: none">• imperméabilité aux gaz, odeurs et aux corps gras• bonne transparence et	<ul style="list-style-type: none">• perméable à la vapeur d'eau• attaqué par les	<ul style="list-style-type: none">• pellicules d'emballage (aspect, fardelage)

Chapitre 1. Polymères thermoplastiques généralités et propriétés

	brillance • imperméabilité aisée	rongeurs • faible longévité • non scellable à chaud sans enduction • absorption d'eau	• complexe • ruban adhésif • éponge
Triacétate de cellulose	• qualité mécanique • stabilité dimensionnelle		• support d'émulsion photo et cinéma
Propionate de cellulose	• dureté, résistance aux chocs • grande plasticité • absorption buée		• enduction • emballage • veris • lunettes de ski
Ethylcellulose			• protection d'outils coupants • veris

CHAPITRE II

Essais mécanique des plastiques

CHAPITRE II. Essais mécaniques des plastiques

II.1. Préparation des éprouvettes et détermination des propriétés

Fabrication des éprouvettes et objets-types

Les éprouvettes d'essai peuvent être obtenues par moulage, découpage ou usinage. Les conditions de moulage par injection ou compression sont susceptibles d'influencer les propriétés des éprouvettes moulées et les valeurs de mesures obtenues au moyen des divers essais mécaniques. Il est par conséquent fondamental de définir de manière exacte les principaux paramètres technologiques inhérents au processus de moulage, tels que les conditions de mise en œuvre (pressions, températures, vitesses, durées de cycle), la géométrie des éprouvettes, etc., et ceci, en tenant compte des interactions possibles avec les propriétés du matériau. Les conditions de refroidissement et l'épaisseur des éprouvettes ont ainsi une influence importante sur le taux, la géométrie et la répartition des cristallites dans les polymères semi-cristallins ou sur la morphologie de phase des thermoplastiques hétérogènes ; la position et la géométrie du point d'injection sont des facteurs d'anisotropie venant modifier l'orientation des molécules ou des charges des polymères [1], l'existence de contraintes résiduelles gelées dans les éprouvettes moulées [2] ou la dégradation thermique du polymère pendant le moulage peuvent également induire des effets similaires. La figure 1 reproduit les géométries des moules pour éprouvettes à usages multiples (selon ISO 3167, moule ISO de type A) et pour barreaux de $80 \times 10 \times 4$ mm (moule ISO de type B) préconisées par la norme ISO 294-1. Des moules mixtes combinant barreaux plats, barreaux en forme d'haltères et disques peuvent parfois être utilisés. L'installation optionnelle d'inserts peut aussi être considérée pour l'injection de barreaux entaillés (moule ISO de type B). De la même manière la norme ISO 294-2 traite de l'injection de petits barreaux de traction (moule ISO de type C) et la norme ISO 294-3 de l'injection de plaques (moule ISO de type D) de dimensions 60×60 mm et d'épaisseur 1 mm (type D1) ou 2 mm (type D2). Dans ce dernier cas, l'installation d'inserts appropriés (simples ou multiples) dans les cavités permet d'étudier les effets des lignes de soudure sur les propriétés mécaniques [3]. Il est à noter que les quatre types de moule précédents peuvent être équipés d'un système de plaques porte-empreintes interchangeables sur une presse à injecter classique.

Il convient de signaler également que par souci d'homogénéité et d'économie ont été mises au point des éprouvettes dont la géométrie permet de mesurer plusieurs propriétés (éprouvettes à usages multiples selon NF EN ISO 3167 et ASTM D 5936). L'éprouvette initiale en forme d'haltère peut en effet être réusinée et convenir aux essais de traction, flexion, compression, fluage, choc (Charpy, Izod, traction), fissuration sous contrainte, dureté, ramollissement (Vicat, fléchissement sous charge)... en garantissant des

conditions de moulage analogues

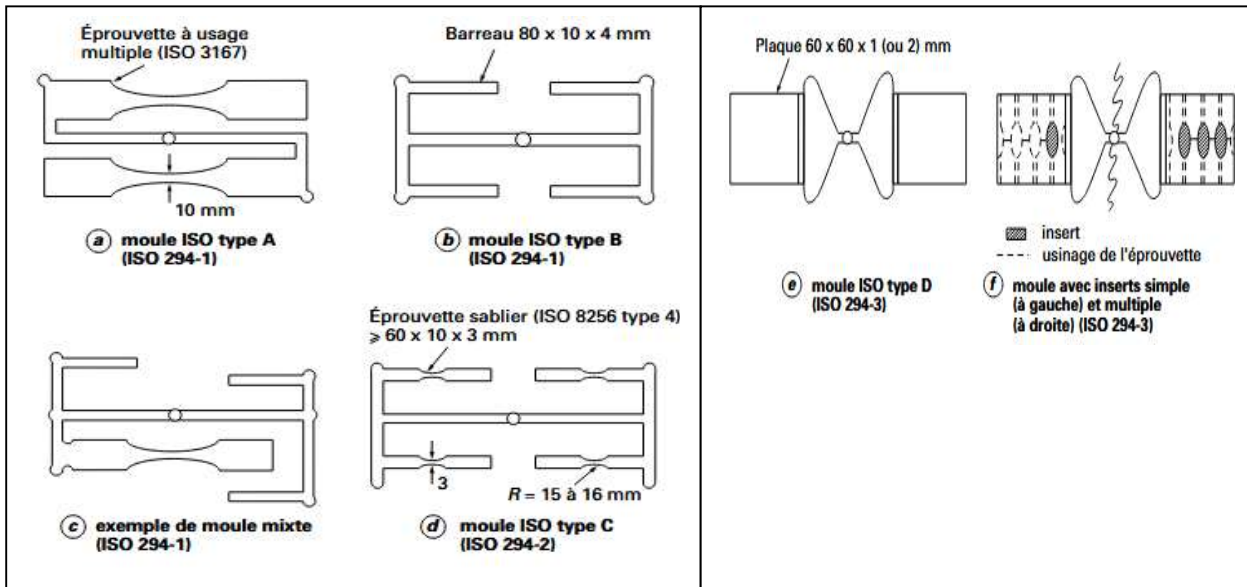


Figure II.1. Moules types pour l'injection d'éprouvettes en thermoplastiques (d'après norme ISO 294)

Lorsque les éprouvettes sont obtenues par découpage ou usinage dans des plaques ou des objets, le mode de prélèvement est fondamental quant à l'incidence qu'il peut avoir sur la signification des résultats d'essais. Il nécessite un outillage approprié qui n'entraîne pas de défauts (amorces de rupture, échauffements locaux, etc.) susceptibles de fausser les résultats. Suivant les matériaux et la géométrie des éprouvettes, différents types d'outillages sont utilisés :

- meule diamantée ou scie circulaire avec refroidissement pour les matériaux rigides (thermodurcis en général, PMMA [poly (méthacrylate de méthyle)], etc.) pour les éprouvettes rectangulaires ;
- trépan à couronne abrasive ou tour pour les disques ;
- emporte-pièce pour les éprouvettes curvilignes en matériaux souples ;
- fraiseuse à reproduire pour les éprouvettes curvilignes en matériaux rigides ;
- outils à raboter ou à brocher ou fraiseuse pour les éprouvettes entaillées ;
- scie à ruban.

Les conditions d'usinage (géométrie de l'outil, vitesses de rotation, de coupe, d'avance, profondeur de passe, type de refroidissement) sont définies par la norme NF EN ISO 2818 en fonction de la nature du matériau, du mode de prélèvement retenu et de la géométrie de l'éprouvette. Des ouvrages généraux [4] ainsi que les fiches techniques des producteurs fournissent en outre des recommandations complémentaires, classées par familles de polymères, sur les différents types d'usinages possibles (sciage, tournage, fraisage, perçage, alésage, filetage, taraudage, limage, rabotage, ébavurage, meulage, ponçage, sablage, polissage).

Les éprouvettes d'essai précédemment évoquées permettent d'analyser l'évolution du comportement mécanique en fonction de l'orientation du polymère, des conditions de mise en œuvre (cycle de pression, température du polymère, température du moule), des lignes de soudure des flux de matière... suivant les différentes méthodes d'essais classiques exposées dans la suite de cet article. Les objets-types sont en revanche des objets moulés pour étudier soit des propriétés du matériau, soit la moulabilité et les propriétés de la pièce, la géométrie étant fonction de l'application

La géométrie de l'objet-type présente le maximum d'accidents de forme représentatifs d'une application donnée et susceptibles d'engendrer des défauts de moulage. Les propriétés mesurées sont la présence effective de polymère dans les zones d'alimentation difficile, le retrait et le post-retrait, le gauchissement, l'aspect et l'état de surface, la fragilité des zones de jonction des flux de matière, la masse, le nombre de cycles de moulage pour atteindre un régime permanent... Les normes T 58-007 et T 58-008 définissent deux objets-types respectivement en matières thermoplastique et thermodurcissable pour la caractérisation du moulage par injection. Les géométries retenues s'appliquent principalement aux pièces électriques telles que boîtiers, coffrets et supports de jonctions. La figure 2 donne une représentation de l'objet-type selon la norme T 58-008 et les observations possibles, sachant que des essais mécaniques de compression, de choc... et autres peuvent être effectués sur l'objet.

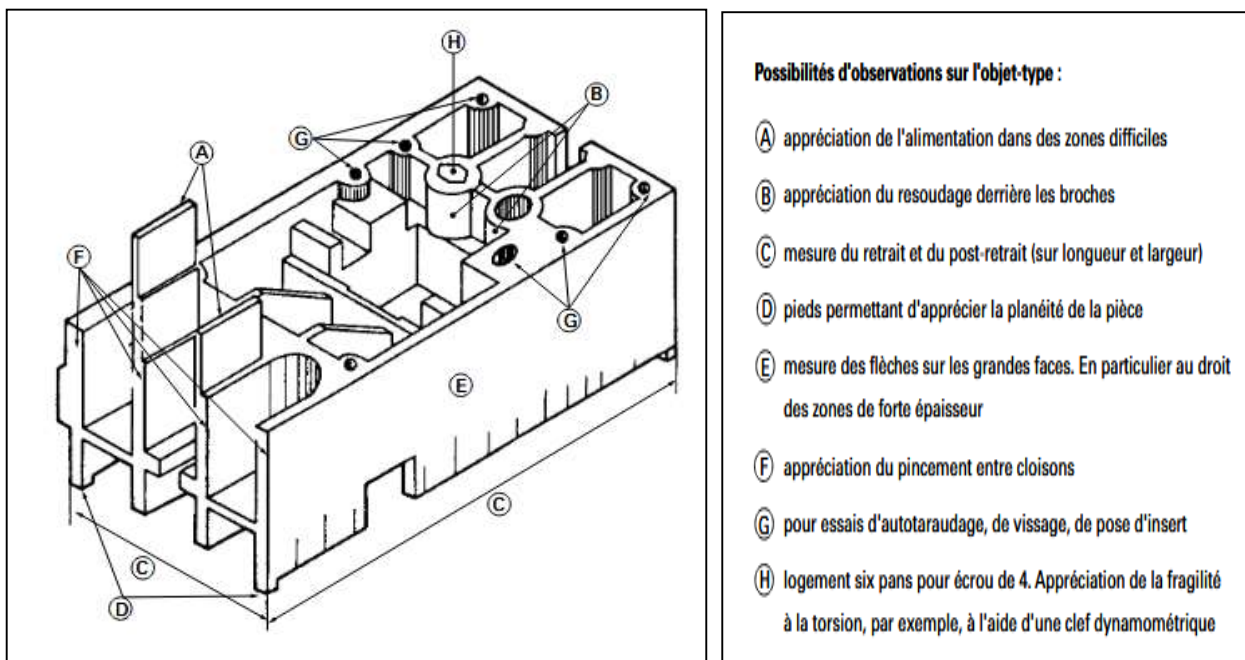


Figure II.2.Objet-type en résine thermodurcissable (d'après norme T 58-008)

La moulabilité et les propriétés d'une pièce résultant à la fois de la technologie de mise en forme, des propriétés du matériau fondu et solide et de la géométrie, un objet-type peut par exemple permet- tre au

transformateur de :

- faire un choix de matière en recherchant les conditions de mise en œuvre les plus favorables ;
- comparer différents lots de la même matière dans des conditions spécifiées de transformation. L'objet-type est en fait un complément à la caractérisation des matériaux sur éprouvettes normalisées, sans néanmoins remplacer un prototype de pièce industrielle.

II.2. Atmosphères de conditionnement et d'essai

À l'exception des cas particuliers d'atmosphères spéciales applicables à certains essais ou simulant des environnements spécifiques, il est recommandé de conditionner avant essai les éprouvettes au moins 88 heures dans une atmosphère de référence à 23 °C et 50 % d'humidité relative de manière à disposer d'échantillons parfaitement stabilisés (NF EN ISO 291, ASTM D 618). Il s'agit là d'une étape primordiale dans la mesure où les facteurs température et humidité sont susceptibles d'influencer considérablement les valeurs des propriétés mécaniques mesurées, les variations pouvant par exemple atteindre des proportions de 1 à 4 pour le polyamide selon le taux d'humidité absorbé (figure 3) [5].

Dans le cas de matériaux qui n'atteignent l'équilibre avec leur atmosphère de conditionnement qu'après une longue période de temps, il est possible de sécher le matériau à une température élevée mais n'engendrant pas de modification de structure permanente : une température de 50 °C est souvent acceptable (NF EN ISO 291). Pour les polyamides, dont les propriétés sont particulièrement sensibles à la reprise d'humidité mais dont les vitesses de reprise d'humidité sont extrêmement faibles, on retiendra les conditionnements accélérés préconisés par les normes T 51-051 et ISO 1110, qui permettent d'atteindre rapidement un équilibre hygro-

métrique en conjuguant les actions de la température (95 °C) et de l'humidité (50 % d'humidité relative). Les propriétés mécaniques mesurées ainsi à sec ou après conditionnement accéléré pourront différer fortement de celles obtenues après un conditionnement dans une atmosphère normale (23 °C, 50 % HR) jusqu'à équilibre. Sauf spécification contraire, les essais sont réalisés dans la même atmosphère que celle adoptée pour les conditionner. Dans le cas d'essais réalisés à chaud ou à froid, la norme T 51-114 définit les méthodes à suivre afin de garantir un équilibre thermique satisfaisant lors de la détermination de caractéristiques mécaniques de plastiques, présentant ou pas de fortes inerties thermiques, dans une enceinte thermorégulée. Les temps et températures d'essais sont à choisir préférentiellement selon les normes T 51-000 et ISO 3205 (tableau 1). En général les temps courts s'appliquent aux températures extrêmes et les temps longs aux températures proches de la température normale.

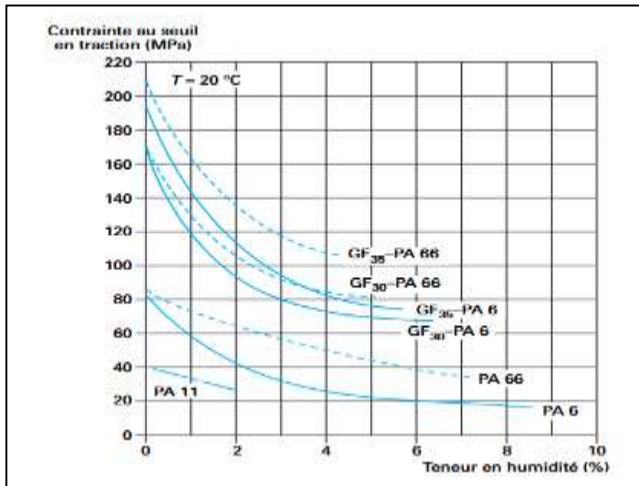


Figure II.3 Influence du taux d'humidité sur la contrainte au seuil d'écoulement de polyamides renforcés (GF) ou non de fibres de verre

Échelles de durées	
Heures	1 2 4 8 16 24 48 96
Semaines	..... 1 2 4 8 16 26 52 78
Années	..... 1 1,5 2 3 4 5
Échelles de températures et tolérances	
- 269 ; - 196 ; - 161 °C	
- 70 ; - 55 ; - 40 ; - 25 ; - 10 °C	
± 2 °C	
0 ; 5 ; $\frac{20}{23}$; $\frac{25}{27}$; 40 ; 55 ; 70 ; 85 ; 100 ; 105 °C	
± 3 °C	
T° normale T° tropicale	
125 ; 150 ; 175 ; 200 °C	
± 3 °C	
225 ; 250 ; 275 ; 300 ; 350 ; 400 °C	
± 5 °C	

Tableau II .4 Températures et durées d'essais préférentielles préférentielles (d'après norme T 51-000 ou ISO 3205)

II.3 Détermination du comportement mécanique

Un minimum de cinq éprouvettes est en général requis afin de pouvoir estimer statistiquement une valeur moyenne, une dispersion, un intervalle de confiance, etc. Conditions expérimentales, éprouvettes, expression des résultats sont, avec l'appareillage, les composantes des méthodes d'essais qui pour la plupart sont normalisées et caractérisées par leur répétabilité et leur reproductibilité. Les essais présentés par la suite s'appliquent aux polymères en général. Pour certains matériaux modifiés (plastiques renforcés, alvéolaires, etc.) ou demi-produits (tubes, films, sandwiches, etc.), des essais spécifiques complémentaires sont souvent nécessaires : il s'agit le plus souvent d'une adaptation des méthodes générales d'essais (type de sollicitation, géométrie des éprouvettes, etc.) en fonction de la géométrie et du comportement du produit analysé. On notera aussi la sortie récente d'une série de normes spécifiques à certains matériaux polymères précisant les méthodes de préparation des éprouvettes et les modes opératoires de détermination des propriétés des matériaux concernés. Sont en particulier indiquées les références des normes à appliquer, les dimensions recommandées pour les éprouvettes et les paramètres d'essai.

II.3.1. Essais de traction

II.3.1.1. Éprouvettes et systèmes d'encastrement

Une éprouvette de géométrie parfaitement définie est encastrée à ses deux extrémités dans des mors ou des mâchoires. L'un de ces mors, fixe, est relié pour la mesure des efforts, à un système dynamométrique par une rotule, de telle sorte que l'axe des efforts appliqués soit confondu avec celui de l'éprouvette ; l'autre mors, mobile, est relié à un système d'entraînement à vitesse de déplacement, ou plus rarement de charge, constante. Les mors (ou mâchoires) sont à serrage direct par vis (pneumatiques ou autoserrants) ou à serrage sur empreinte. Leur choix dépend essentiellement de la forme de l'éprouvette et de la consistance de la matière. Les mâchoires pneumatiques ou autoserrantes sont recommandées dans la

CHAPITRE II. Essais mécaniques des plastiques

Type d'éprouvette		1 A	1 B	1 BA	1 BB	5 A	5 B	2	4	5
Longueur totale	L_3	≥ 150	≥ 150	≥ 75	≥ 30	≥ 75	≥ 30	≥ 150	152	≥ 115
Longueur partie calibrée	L_1	80 ± 2	$60 \pm 0,5$	$30 \pm 0,5$	$12 \pm 0,5$	25 ± 1	$12 \pm 0,5$			33 ± 2
Rayon	r	20 à 25	≥ 60	≥ 30	≥ 12					
Petit rayon	r_1					$8 \pm 0,5$	$3 \pm 0,1$		22	14 ± 1
Grand rayon	r_2					$12,5 \pm 1$	$3 \pm 0,1$		25,4	25 ± 2
Distance initiale entre mâchoires	L	115 ± 1	$L_2 \begin{smallmatrix} +5 \\ 0 \end{smallmatrix}$	$L_2 \begin{smallmatrix} +2 \\ 0 \end{smallmatrix}$	$L_2 \begin{smallmatrix} +1 \\ 0 \end{smallmatrix}$	50 ± 2	20 ± 2	100 ± 5	73,4	80 ± 5
Distance entre parties larges à faces parallèles	L_2	104 à 113	106 à 120	58 ± 2	23 ± 2					
Largeur aux extrémités	b_2	$20 \pm 0,2$	$20 \pm 0,2$	$10 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$	$12,5 \pm 0,1$	$6 \pm 0,5$	10 à 25	38	25 ± 1
Largeur partie étroite	b_1	$10 \pm 0,2$	$10 \pm 0,2$	$5 \pm 0,2$	$2 \pm 0,2$	$4 \pm 0,1$	$2 \pm 0,1$		$25,4 \pm 0,1$	$6 \pm 0,4$
Épaisseur recommandée	h	$4 \pm 0,2$	$4 \pm 0,2$ ou ≤ 1	≥ 2	≥ 2	≥ 2	≥ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Longueur de référence	L_0	$50 \pm 0,5$	$50 \pm 0,5$	$25 \pm 0,5$	$10 \pm 0,2$	$20 \pm 0,5$	$10 \pm 0,2$	$50 \pm 0,5$	$50 \pm 0,5$	$25 \pm 0,25$
Norme ISO		527-2	527-2 (537-3)	527-2	527-2	527-2	527-2	527-3	527-3	527-3
Recommandations particulières		Moulées usages multiples	Usinées (feuilles rigides)	Proportionnel type 1B 1:2	Proportionnel type 1B 1:5	Proportionnel type 5				Feuilles souples et/ou résistance élevée
		Recommandées		Petites éprouvettes			Recommandées			

Vitesse = 1 % (L_0)/min
Les cotes sont en millimètres.

II.3.1.2 Détermination des efforts et des allongements

Les déterminations dynamométriques (mesure des efforts) se font à l'aide de capteurs électroniques, constitués en général d'un élément élastique (poutre, anneau, etc.) de haute rigidité, dont on mesure la faible déformation due à l'effort appliqué avec un système électrique (jauges de déformation, inductances variables, capacités, etc.). Ces dispositifs sont les plus précis dans la gamme de vitesses utilisées. La gamme d'efforts utilisable va de 1 N à 100 kN.

Les machines standards, soit hydrauliques soit électromécaniques, permettent d'appliquer des vitesses de déplacement allant en moyenne de 0,2 à 600 mm/min, avec une course importante allant jusqu'à 1 m. Les vitesses recommandées dépendent du type d'éprouvette, de la mesure faite (module ou résistance) et de l'allongement du matériau, sachant qu'il est préférable de prendre en compte les vitesses d'allongement relatif et non les vitesses d'allongement absolues, peu significatives physiquement. Pour les plastiques moulés ou extrudés, la vitesse choisie pour la détermination du module doit correspondre à un taux de déformation de la longueur de référence de l'ordre de 1 %/min (une vitesse de déplacement de 1 mm/min est souvent préconisée dans ce cas). Dans le cas d'essais sur films des vitesses de 5, 50, 100, 200, 300 ou 500 mm/min sont usuellement retenues.

La déformation de l'éprouvette peut être enregistrée entre les mors ou mieux, entre deux repères sur la

CHAPITRE II. Essais mécaniques des plastiques

partie calibrée. Dans les machines électromécaniques, le mors mobile est entraîné par une vis sans fin dont la rotation est assurée par un ensemble moteur- réducteur avec variateur électronique. Un renvoi monté sur la vis entraîne un tambour enregistreur par l'intermédiaire d'un système de réduction. On a ainsi la possibilité d'enregistrer l'allongement global de l'éprouvette (entre mors) avec des taux d'amplification différents (1/2 à 20). Il ne faut cependant jamais oublier que la grandeur fournie est la somme de l'allongement de la partie calibrée, de la déformation dans les mors et dans les congés, et des différents jeux. L'erreur que l'on commet en utilisant l'allongement entre mors est d'autant plus importante que l'allongement du matériau est faible (200 à 300 % d'erreur sur le module). Néanmoins pour les polymères thermoplastiques à grand allongement ($> 200\%$), cette méthode peut être retenue bien que, si l'on change de forme d'éprouvette, on puisse trouver des résultats différents (dans des proportions pouvant excéder 50 %). Lorsque l'on désire une certaine précision sur l'allongement, il est nécessaire d'utiliser des jauges de déformation, en veillant à choisir des adhésifs et des techniques de préparation de surface adaptés au matériau testé, ou encore d'effectuer la mesure entre deux repères tracés sur l'éprouvette. On peut utiliser :

- une règle graduée pour les allongements importants ($> 50\%$) ;
- des extensomètres électroniques pour des allongements plus faibles ($< 50\%$) ;
- des extensomètres optiques.

Les extensomètres électroniques pincent l'éprouvette au niveau des repères et le déplacement relatif des pinces est

transformé en grandeur électrique par un système approprié (induction, capacité, etc.). Ils présentent, dans certains cas, des inconvénients dus à leur poids supporté par l'éprouvette et au serrage des pinces qui entraînent des concentrations de contraintes locales, donc des amorces de rupture possibles ; ils ne conviennent pas par conséquent aux essais sur films. L'amplification peut aller jusqu'à 2 500, mais les déplacements sont limités (de 1 à 20 mm). Des extensomètres bidirectionnels peuvent être utilisés lorsqu'une mesure simultanée est requise dans les directions longitudinale et transversale de l'éprouvette, par exemple pour la mesure d'un coefficient de Poisson.

Les extensomètres optiques sont certainement les mieux adaptés, dans la mesure où ils enregistrent sans contact, en continu, le déplacement relatif de deux repères qui définissent la longueur de référence. Ils permettent des mesures à différentes températures par visée à travers la vitre d'une enceinte thermostatée. Le pouvoir de résolution s'étend suivant l'objectif de quelques micromètres à plusieurs centimètres. Ces équipements restent cependant encore très onéreux.

II.3.1.2. Machines spéciales

Les machines de traction à grandes vitesses sont de véritables machines d'essais de choc qui imposent avec rigueur une vitesse de sollicitation de plusieurs mètres par seconde. Utilisées en laboratoire, elles

CHAPITRE II. Essais mécaniques des plastiques

connaissent peu de développement industriel. Pour affiner l'analyse du comportement au choc, on préfère encore, probablement pour des questions de prix, adapter à cet usage des moutons-pendules malgré toutes les incertitudes physiques qu'ils présentent. Les vitesses supérieures à 600 mm/min ne sont obtenues qu'avec des machines spéciales de type oléopneumatique, à explosion de poudre, à volant ou hydraulique. Il est possible de balayer une gamme de vitesses allant de quelques centimètres par seconde à 30 m/s au maximum. La difficulté réside surtout dans l'enregistrement des efforts et des déformations, qui nécessitent des capteurs, des ponts de mesure et des enregistreurs à très faible constante de temps, étant donné le temps de rupture de l'ordre de quelques millisecondes.

D'une manière générale les machines de traction précédemment évoquées ne permettent qu'une détermination des lois de comportement des matériaux sous sollicitations uni-axiales. Le développement des procédés de bi-étirage et des marchés des films bi-orientés a cependant conduit à la mise au point de véritables machines de traction biaxiale, permettant de mesurer des lois de comportement biaxiales. Un cadre de bi-étirage prototype instrumenté est actuellement en développement à l'École des Mines de Douai.

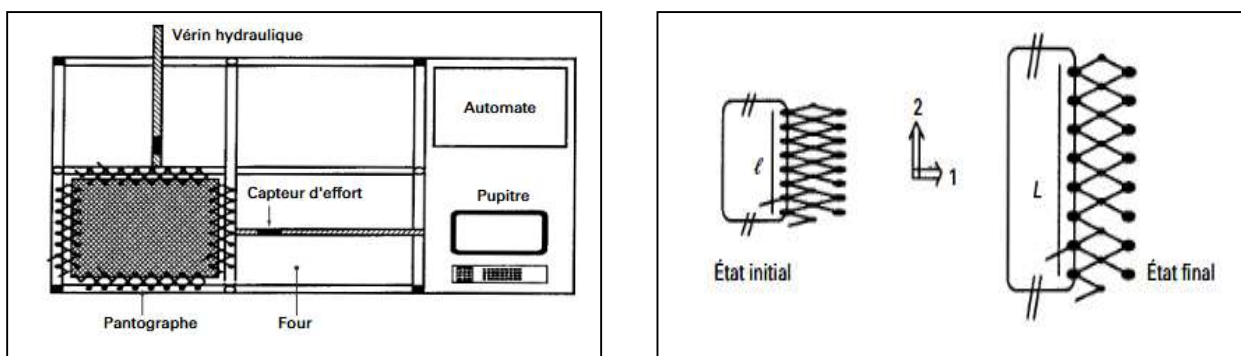


Figure II.5. Principe de la machine de traction biaxiale de films

Le principe est d'appliquer à un échantillon de film ou de feuille carré de dimensions 110 x 110 mm une déformation de traction dans deux directions perpendiculaires par l'intermédiaire de deux bras de pantographe instrumentés de capteurs d'effort et actionnés de manière indépendante afin d'autoriser soit un bi-étirage simultané soit un bi-étirage séquentiel (figure 5). Les échantillons sont maintenus par 40 petits vérins (10 par côté). Les vitesses de déplacement peuvent varier de 0,1 à 4 m/min et les taux de déformation maximaux atteignent 700 % dans chaque direction. Les essais sont réalisés dans une enceinte thermostatée à des températures pouvant atteindre 170 °C.

II.3.1.4 Expression des résultats

Les courbes (force F – allongement ΔL) fournies par la machine peuvent être transformées en courbes (contraintes σ – allongements relatifs ϵ) en se rapportant à la section initiale A_0 et à la longueur de référence L_0 de l'éprouvette avant essai. Il s'agira d'images de la loi de comportement conventionnelle du matériau, puisque l'on ne se rapporte pas à la section et à l'allongement réels à chaque instant. Dans la suite du texte on parlera toujours d'allongement en sous-entendant allongements relatifs. En pratique, on se contente le plus souvent de relever quelques éléments des courbes expérimentales (rupture, maximum de la courbe, tangente à l'origine). Les courbes de traction peuvent être de quatre types (figure 6) selon la nature du polymère considéré (figure 7) ou les paramètres d'essai (température, vitesse) [10].

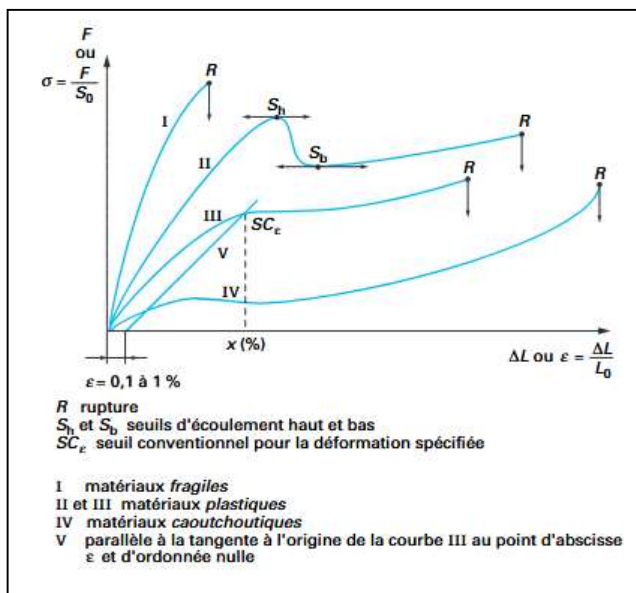


Figure II.6. Courbes de traction types des plastiques (plastiques)

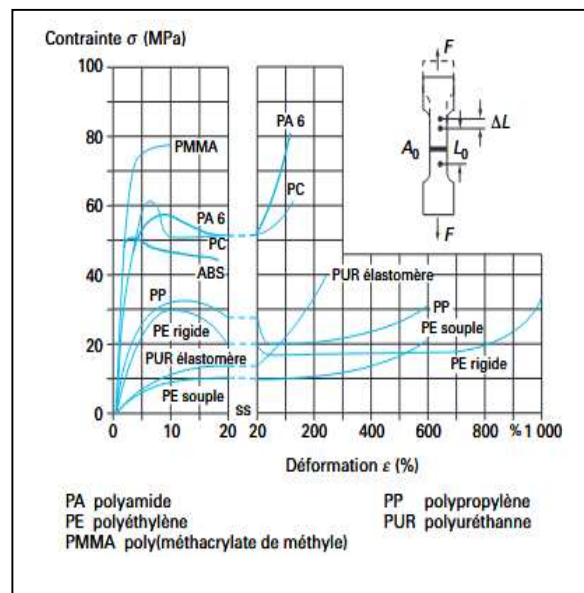


Figure II.7. Courbes de traction

b) Courbes du type II (matériaux ductiles avec seuil d'écoulement) : un grand nombre de matières thermoplastiques présentent ce type de loi de comportement au voisinage de la température ambiante : le maximum ou seuil d'écoulement haut (S_h) correspond à l'apparition du phénomène de striction. Une réduction de section pouvant aller jusqu'à 1/3 pour les matériaux semi-cristallins s'amorce et se propage ensuite, au seuil d'écoulement bas (S_b) à charge quasiment constante, jusque dans les têtes d'éprouvettes, avant d'atteindre la rupture pour des allongements pouvant atteindre 1 000 %. Cet étirage se traduit par une très forte orientation moléculaire. Le seuil d'écoulement est quelquefois baptisé à tort seuil de fluage ou limite élastique. La limite élastique, ou mieux, limite de linéarité, correspond au point de

CHAPITRE II. Essais mécaniques des plastiques

décollement de la tangente à l'origine et de la courbe de comportement.

c) Courbes du type III (matériaux ductiles sans seuil d'écoulement) : certains polymères cristallins présentent ce comportement plastique sans seuil très marqué, typique des polymères résilients. Outre les paramètres de rupture, est défini un seuil conventionnel SC_ϵ soit à l'intersection de la droite parallèle à la tangente à l'origine de la courbe III à partir d'une déformation spécifiée (0,1 à 1 %) d'après la norme ASTM D 638, soit à l'intersection de la perpendiculaire à l'axe des abscisses pour une déformation prescrite (x %) d'après la norme NF EN ISO 527

d) Courbes du type IV (matériaux caoutchoutiques) pour ce type de comportement caractéristique des élastomères et obtenu avec les polymères amorphes au-dessus de leur température de transition vitreuse, on détermine la contrainte et l'allongement à la rupture, et souvent un module sécant à 100 ou 200 % d'allongement (NF T 46-002).

Quel que soit le type de courbe, on peut calculer le module d'Young, qui correspond à la pente à l'origine de la courbe contrainte – allongement obtenue à faible vitesse (1 mm/min), ou plus précisément, à la pente de la droite passant par deux points de la loi de comportement correspondant à deux valeurs de déformation prescrites (0,25 % et 0,5 %) si l'on se réfère à la norme NF EN ISO 527 : cette nouvelle méthode permet une mesure plus précise et plus reproductible du module que celle, traditionnelle du module tangent initial. Un essai spécial doit être effectué pour la mesure de cette caractéristique qui nécessite en effet une forte amplification (supérieure à 100) de la courbe au voisinage de l'origine.

II.3.2. Essais de flexion

L'essai de flexion est très souvent pratiqué pour mesurer des caractéristiques telles que le module d'Young et la résistance en flexion, la flèche maximale... Il nécessite des charges plus faibles que la traction et les mesures de flèches posent moins de problèmes que les mesures d'allongement. La déformation d'un barreau rectangulaire reposant sur deux appuis par l'intermédiaire d'un poinçon (ou panne) appliqué à égale distance des appuis et se déplaçant à vitesse constante, est la méthode la plus couramment rencontrée. Elle fait l'objet des normes NF EN ISO 178, ASTM D 790, D 5934 et D 5943 et s'appuie sur un matériel et un mode opératoire simples (figure 8). Cette simplicité ne conduit cependant à des résultats acceptables que si certaines conditions sont respectées. L'éprouvette, dont les dimensions moyennes normalisées sont de $80 \times 10 \times 4$ mm, est placée sur un montage spécifique adapté à une machine de traction, avec une distance entre appuis D égale à 16 fois l'épaisseur h . La vitesse v du

CHAPITRE II. Essais mécaniques des plastiques

poinçon est faible, de l'ordre de 2 mm/min ; elle engendre une vitesse relative de déformation

$$\sigma_R = \frac{3F_R D}{2bh^2} \quad \varepsilon_R = \frac{6hY_R}{D^2}$$

du matériau dans la fibre la plus tendue égale à $6hv/D^2$, exprimée en min^{-1} , soit environ 1,2 %/min pour l'éprouvette normalisée. Lorsqu'il n'est pas possible d'utiliser l'éprouvette recommandée précédemment, il convient de respecter un rapport longueur/épaisseur L/h de 20 et de choisir une vitesse de sollicitation aussi proche que possible de 1 %/min parmi les vitesses suivantes : 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 ou 500 mm/min. Expérimentalement, on enregistre la courbe force F-flèche Y à partir de laquelle il est possible de calculer la contrainte à la rupture σ_R (ou une contrainte pour un effort F_R particulier) et le module d'Young en flexion E_f . Les contrainte et déformation dans la fibre extrême ont pour valeur :

$$\sigma_R = \frac{3F_R D}{2bh^2} \quad \varepsilon_R = \frac{6hY_R}{D^2}$$

F_R force à la rupture (ou force maximale ou force à la limite de linéarité)

Y_R flèche correspondante,

D distance entre appuis,

b largeur de l'éprouvette

h épaisseur de l'éprouvette.

Le module d'Young E peut être calculé à partir de la pente F/ Y de la tangente à l'origine de la courbe force F-flèche Y, suivant la relation :

$$E_t = \frac{D^3 F}{4bh^3 Y}$$

En fait, cette caractéristique n'est pas toujours très significative ; elle est en pratique inférieure de 10 à 25 % au module de traction, l'écart étant fonction du matériau et des conditions opératoires. Sur le plan métrologique, la flèche est très souvent assimilée au déplacement du poinçon solidaire du système d'entraînement de la machine. Une telle mesure englobe donc, outre la déformation de l'éprouvette, la déformation de l'anneau dynamométrique, les jeux et le poinçonnage aux appuis. L'influence relative de ces différents paramètres dépend de la rigidité de l'éprouvette et de la dureté du matériau. On a pu montrer en particulier que l'affaiblissement apparent du module était d'autant plus important que la dureté était faible

CHAPITRE II. Essais mécaniques des plastiques

Dans l'ensemble on retrouve en flexion les lois de comportement décrites en traction. Le caractère fragile est facile à analyser ; en revanche, les matériaux plastiques présentent un maximum au-delà duquel la mesure n'est plus significative, la notion de rupture n'apparaît donc pas. Les résistances mesurées en flexion sont en général supérieures de 10 à 25 % aux valeurs mesurées en traction. On notera aussi que pour une sollicitation en flexion trois points, l'effort tranchant engendre non seulement des contraintes normales de traction-compression, mais également des contraintes de cisaillement τ avec une répartition parabolique (figure 9), et un maximum dans le plan de symétrie de l'éprouvette (axe neutre). τ et τ_m sont données par les relations :

$$\tau = \frac{3F}{4bh} \left(1 - 4 \frac{z^2}{h^2} \right)$$

$$\tau_m = \frac{3F}{4bh}$$

L'influence des contraintes de cisaillement sur la déformation de l'éprouvette et sur la rupture est notable, surtout pour les plastiques renforcés : cette caractéristique est d'ailleurs exploitée dans la méthode de flexion trois points sur appuis rapprochés utilisée pour mesurer la résistance au délaminage des composites [11].

La flexion quatre points (figure 11) pour laquelle l'effort tranchant est nul dans la zone de l'éprouvette située entre les deux points d'application de la charge est parfois utilisée, principalement pour les stratifiés mais plus rarement pour les plastiques pour éliminer les contraintes de cisaillement. Dans cette méthode, l'effet de poinçonnage aux points d'application des charges est réduit, mais le calcul des contraintes est plus complexe en raison des flèches importantes qui imposent de prendre en compte la composante horizontale de la réaction aux appuis. La norme ASTM D 790 donne les dimensions des éprouvettes et les modes opératoires à suivre

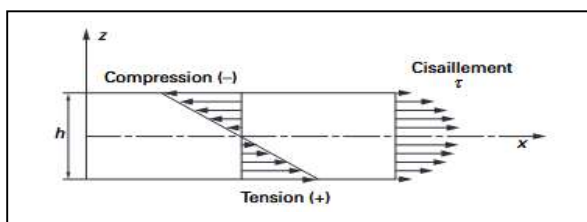


Figure II.8. Répartition des contraintes normales et interlaminaires dans les éprouvettes de flexion trois points

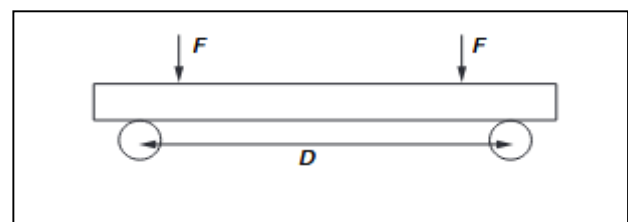


Figure II.9. Principe de la flexion quatre points

III.3.3. Essais de compression

Des dispositifs inverseurs ou des plateaux peuvent être montés sur les machines de traction pour solliciter une éprouvette en compression, afin de déterminer des caractéristiques telles que module de compression, contraintes et déformations relatives aux points singuliers (seuils d'écoulement, rupture) ou conventionnels, ces derniers étant définis de la même manière qu'en traction. Les éprouvettes doivent avoir la forme d'un prisme droit, d'un cylindre ou d'un tube. Leurs dimensions doivent être telles que leur déformation reste inférieure à la déformation critique de flambage, c'est-à-dire selon la norme NF EN ISO 604 respecter la condition suivante :

$$\varepsilon_c = 0.4 \left(\frac{x}{h} \right)^2$$

où h est la hauteur de l'éprouvette, parallèle à l'axe de compression et x le diamètre (extérieur) du cylindre (ou du tube) ou l'épaisseur (plus petit côté de la section transversale) d'un prisme. En général le rapport dimensionnel $x/h > 0.4$ est recommandé, correspondant à une déformation en compression maximale de 6 %. Pour la détermination du module de compression, un rapport de est préférable. Les dimensions des éprouvettes recommandées sont de (10 ou 50) x 10 x 4 mm, la hauteur h étant fixée par la norme internationale à 10 mm pour la détermination de la résistance et à 50 mm pour la mesure du module. Des variantes sur petites éprouvettes ($h = 6$ ou 35 mm) sont également autorisées. La norme ASTM D 695 continue quant à elle à imposer un rapport d'effilement λ de 11 à 16 pour une hauteur h moyenne de 25 à 50 m. Le rapport d'effilement est donné par la relation :

$$\lambda = h\sqrt{A/I}$$

où A est la section droite de l'éprouvette et I le plus petit moment de giration de la section A , $\sqrt{I/A}$ représentant quant à lui le plus petit rayon de giration. L'utilisation d'un dispositif de support latéral est également recommandée dans le cas d'éprouvettes de faible épaisseur La vitesse de compression, correspondant conventionnellement à la vitesse de rapprochement des plateaux de la machine fonctionnant à vide, doit être faible. La norme NF EN ISO 604 fixe par exemple, pour les éprouvettes recommandées, une valeur de 0,02 h pour le mesurage de modules, exprimée en mm/min et où h est la hauteur de l'éprouvette en mm, 0,1 h pour la détermination des résistances des matériaux fragiles et 0,5 h pour celle des résistances des matériaux ductiles (c'est-à-dire avec seuils d'écoulement). Pour la mesure des faibles déformations et le calcul du module d'Young, est utilisé un extensomètre. Une mesure du déplacement du plateau mobile nécessite une correction de déformation du dynamomètre

CHAPITRE II. Essais mécaniques des plastiques

compte tenu de la valeur importante de la rigidité des éprouvettes. Pour ce faire, la déformation du système est enregistrée en fonction de la charge en l'absence d'éprouvette. Pour les matériaux rigides, cette correction peut atteindre plusieurs dizaines de pour-cent.

II.3.4 Essais de cisaillement

Les essais de cisaillement sont rarement pratiqués sur les plastiques non renforcés, moins sensibles à ce mode de sollicitation que les composites pour lesquels existent de nombreuses méthodes expérimentales conduisant à la détermination des caractéristiques de déformation et de rupture en cisaillement plan et inter-laminaire [11]. La résistance au cisaillement des plastiques peut néanmoins être mesurée en utilisant une méthode de poinçonnement décrite par la norme ASTM D 732. Les éprouvettes utilisées présentent une épaisseur de l'ordre de 0,13 à 13 mm, une géométrie carrée (de 50 mm de côté) ou circulaire (de 50 mm de diamètre) et sont percées d'un trou de diamètre 11 mm en leur centre. Elles sont encastrées dans un dispositif d'essai spécifique adaptable à une machine de traction conventionnelle (figure 10). L'effort de cisaillement est appliqué lors de la descente du poinçon central de diamètre 25 mm à une vitesse de l'ordre de 1,3 mm/min. La résistance au cisaillement peut être déterminée en divisant la force nécessaire pour cisailier l'échantillon par la surface cisailée, assimilée au produit de l'épaisseur de l'éprouvette par le périmètre du poinçon. On notera cependant que les valeurs ainsi obtenues ne peuvent en toute rigueur être considérées comme des caractéristiques du matériau, dans la mesure où cette méthode ne prend pas en compte les éventuels effets de concentrations de contraintes, de vitesses de cisaillement, d'épaisseur. Une comparaison de différents matériaux testés dans les mêmes conditions reste néanmoins possible.

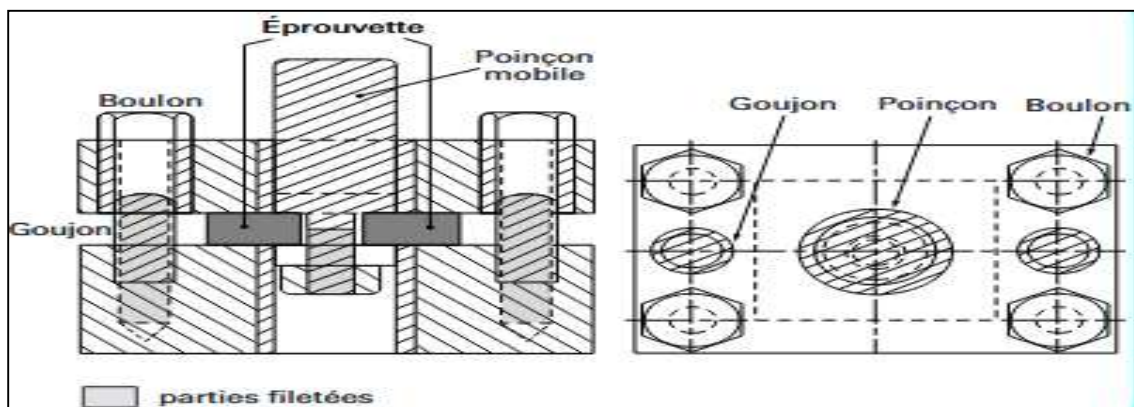


Figure II.10. Dispositif de cisaillement par poinçonnement (d'après norme ASTM D 732)

II.3.5 Essais de choc

Le choc résulte de l'application d'une sollicitation mécanique à grande vitesse (plusieurs mètres par seconde) et à énergie élevée, engendrant la rupture d'une éprouvette en une fraction de seconde. Il permet de juger, dans des conditions expérimentales données, de la fragilité d'un ensemble matériau-éprouvette, la fragilité étant davantage synonyme de faible allongement que de faible énergie de rupture. Il permet au-delà de définir et de qualifier la zone de transition ductilité-fragilité (brusque ou progressive), lorsque varient les conditions d'utilisation par exemple. Ce type de comportement peut être analysé dans la continuité des essais de traction ou de flexion, sous réserve de disposer de machines spéciales qui, compte-tenu de leurs coûts d'achat et de fonctionnement sont encore peu répandues. Ce mode d'analyse est certainement le plus précis, car il permet d'étudier l'évolution des lois de comportement contraintes-déformations en fonction de la vitesse. Tous les équipements actuels de laboratoire et les méthodes normalisées associées découlent directement de l'étude des métaux ; ils correspondent à l'application d'une énergie par percussion (pendule ou chute de masse) et à la mesure, dans le meilleur des cas, de son affaiblissement après rupture. Si les matériels sont simples et peu onéreux, les possibilités en revanche sont très limitées. Deux matériaux, l'un fragile, l'autre ductile, peuvent avoir la même énergie de rupture ; cela dépend de la loi de comportement, et le mode de sollicitation est trop complexe pour maîtriser l'influence de paramètres tels que :

- la vitesse de sollicitation donc de déformation
- la géométrie de la pièce ou de l'éprouvette ;
- les défauts de surface (entailles) ou de volume (porosités)
- la température et l'hygrométrie ;
- les conditions de fixation (appuis simples, encastements...) ;
- le type de sollicitation axiale ou biaxiale (traction, flexion...).

L'entaille habituellement introduite comme amorce de rupture pour fragiliser les éprouvettes lisses qui fléchissent sans se rompre ou pour apprécier la sensibilité à des défauts générateurs de concentrations de contraintes, introduit de multiples paramètres par sa géométrie, par son rayon de courbure, sa largeur, sa profondeur et ses conditions de réalisation. Ces effets sont, pour partie, illustrés sur la figure 11, où est donnée la variation de l'énergie de choc Charpy en fonction de l'inverse du facteur de concentration de contrainte k induite par une entaille de profondeur c et de rayon r pour différents matériaux, sachant qu'en première approximation pour un barreau entaillé k peut s'exprimer par la relation

$$K = 1 + 2(C/r)^{1/2}$$

CHAPITRE II. Essais mécaniques des plastiques

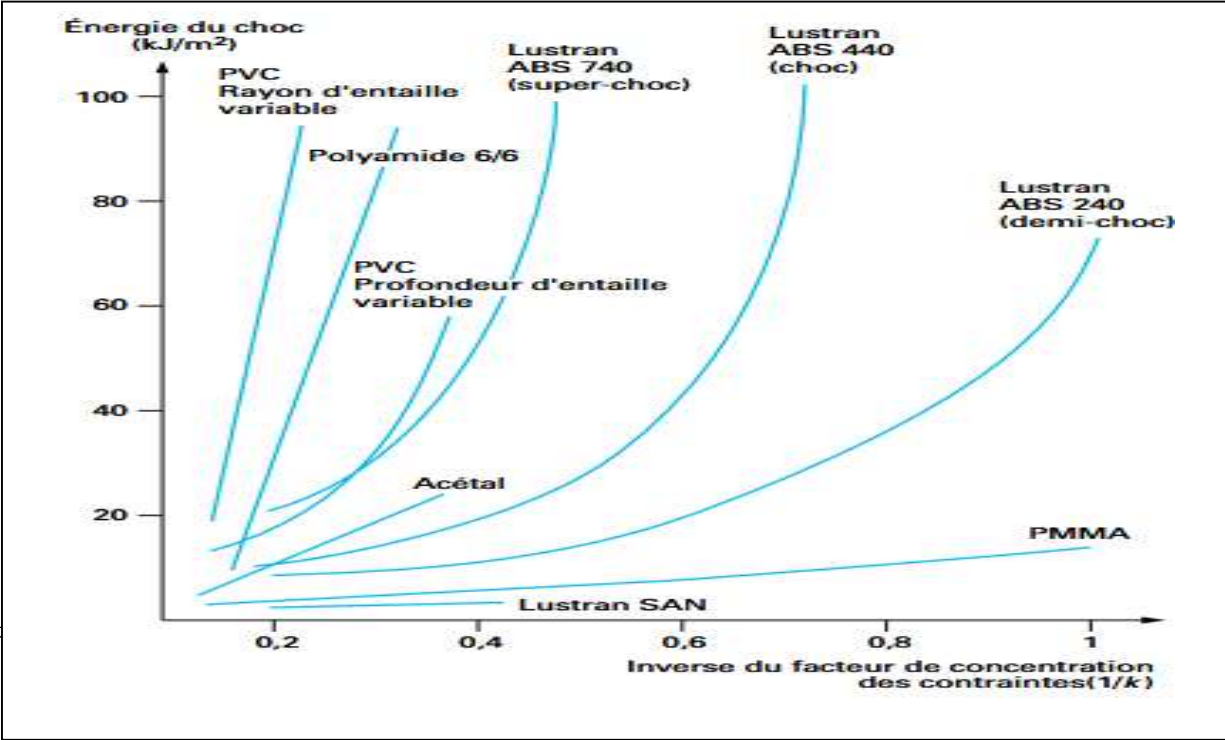
Une faible valeur de $1/k$ (c'est-à-dire une forte concentration de contraintes) correspond, par exemple, à une entaille de faible rayon et les pentes des courbes indiquent la sensibilité du matériau à l'entaille. En pratique, les concentrations de contraintes peuvent être induites par des bossages, des angles vifs ou des variations de section. On conçoit donc que ces techniques aient donné lieu à d'innombrables travaux de commissions de normalisation, s'appuyant sur des essais, modifiant les éprouvettes, les entailles, les supports, etc, en s'efforçant vainement de trouver la méthode physique fiable et reproductible avec un mode d'expression universel. De nombreuses méthodes ont ainsi été normalisées. Elles diffèrent par la géométrie des éprouvettes et des entailles, le positionnement des éprouvettes, le mode de sollicitation, etc. et conduisent, pour un même matériau, à des caractéristiques différentes sans corrélations simples et qui, par suite, ne peuvent pas être appliquées à la prévision de comportement d'un objet fini. Sous réserve de maintenir constants l'ensemble des paramètres et les conditions de préparation des échantillons, elles peuvent cependant être utilisées en contrôle comparatif. Pour affiner la mesure ont été développés des équipements instrumentés avec des capteurs permettant ainsi de mieux apprécier la loi de comportement sous forme de courbes contraintes-temps et déformations-temps avec les difficultés expérimentales liées à la brièveté du phénomène (quelques millisecondes). Il est également possible de faire appel à la mécanique de la rupture (Essais mécaniques des plastiques. Caractéristiques à long terme et ténacité) pour l'expression et l'analyse des résultats en terme d'amorçage et de propagation de fissure.

La notion de résilience est alors remplacée par la notion de ténacité indépendante de la géométrie. Néanmoins, cette démarche reste encore très éloignée des préoccupations des laboratoires de contrôle industriel. Les deux principaux types d'essais pratiqués en milieu industriel et différant par l'appareillage et le mode de sollicitation sont développés ci-après :

- les méthodes pendulaires pour sollicitations uni-axiales ;
- les méthodes par chutes de masses pour sollicitations multiaxiales.

Le lecteur se reportera néanmoins pour le détail expérimental exact aux nombreuses normes en vigueur qui, si elles sont analogues dans leur principe, présentent des divergences opératoires qu'il convient de respecter.

CHAPITRE II. Essais mécaniques des plastiques



CHAPITRE IV

Interprétation des histogrammes min max des propriétés mécaniques

CHAPITRE IV. RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Propriétés en traction

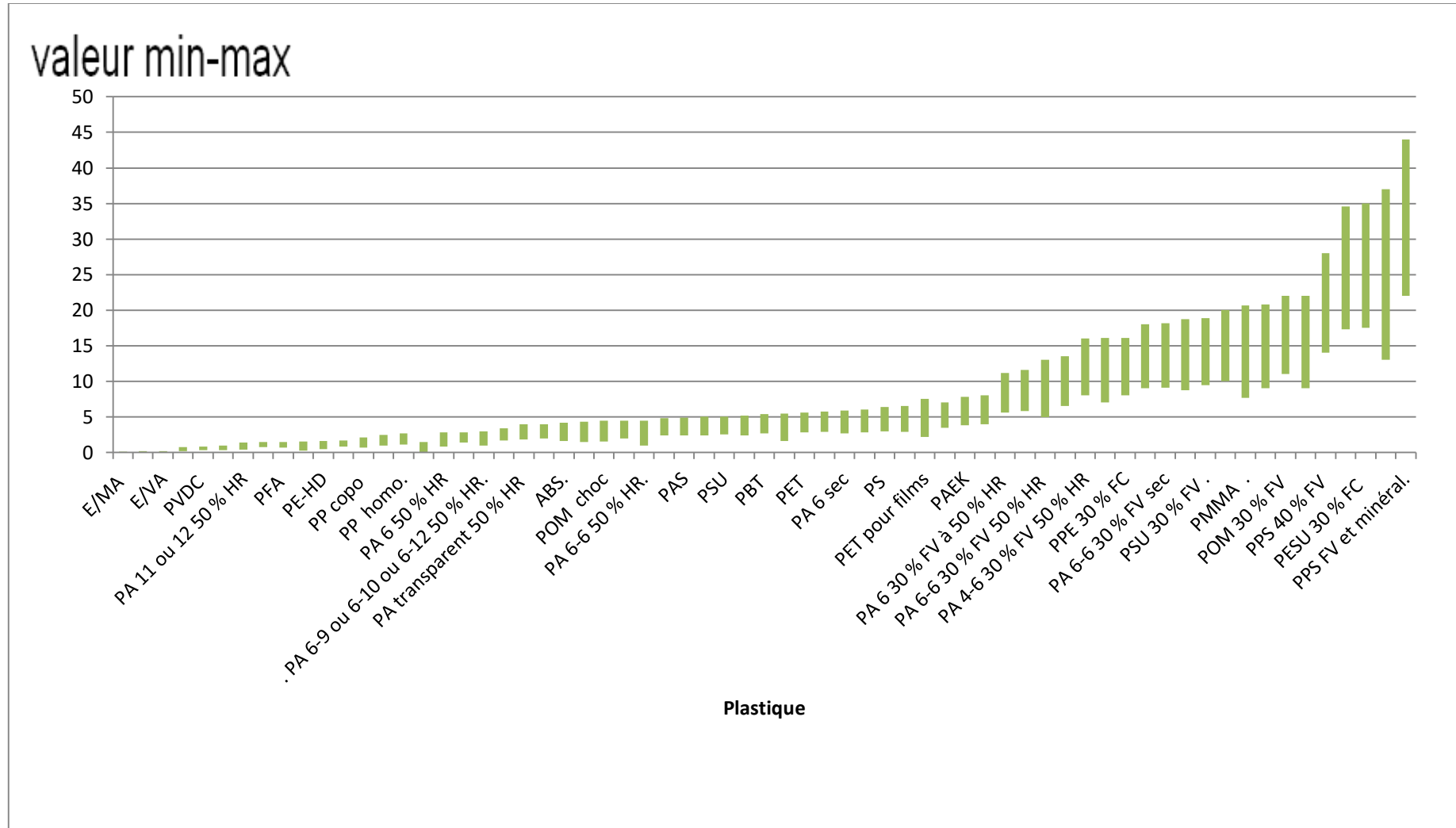


Figure III.1 : Module d'élasticité en traction, selon NF T 51-034 ou norme équivalente, en GPa

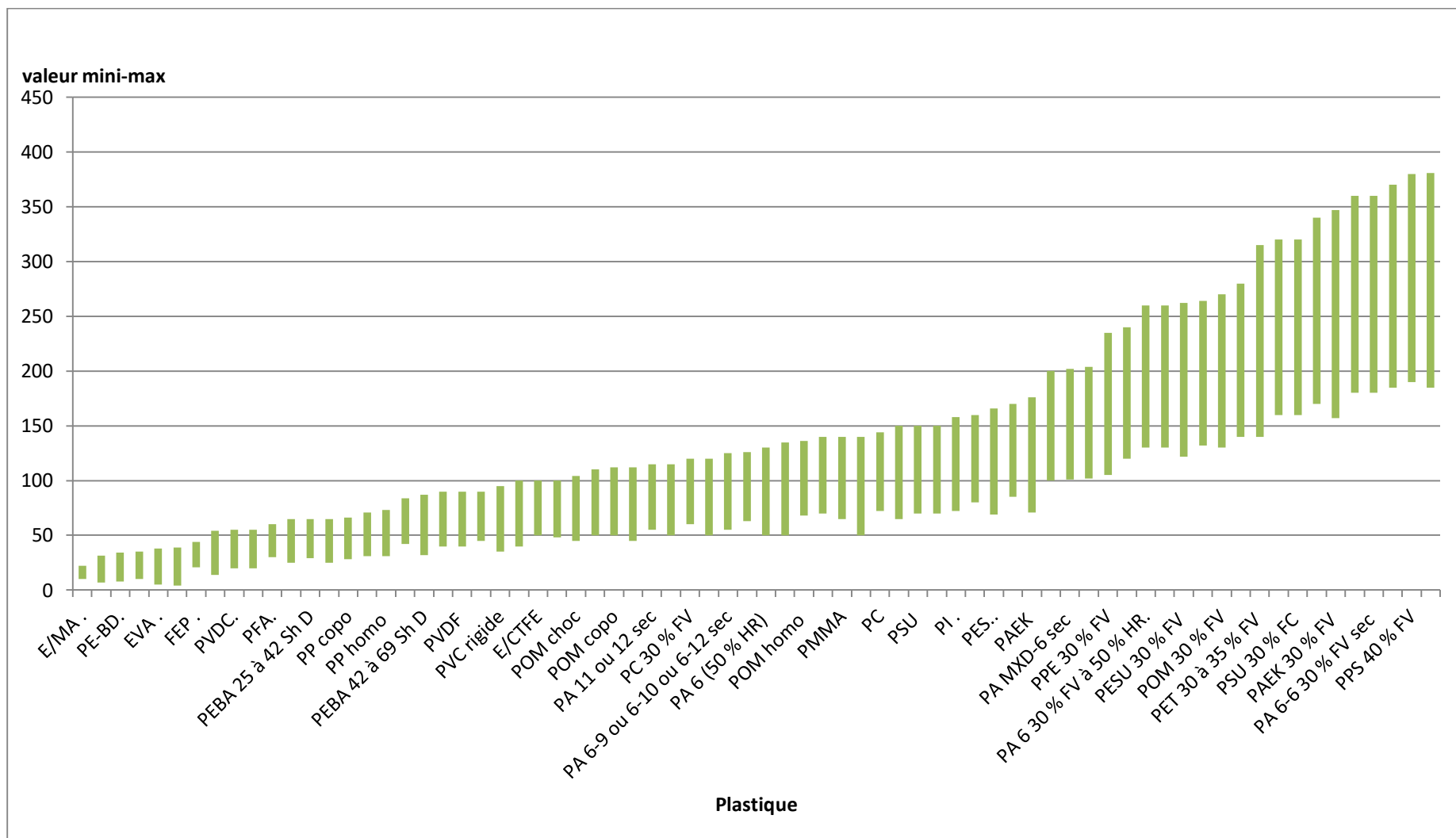


Figure III .2 : Contrainte de rupture en traction, selon NF T 51-034 ou norme équivalente, en MPa

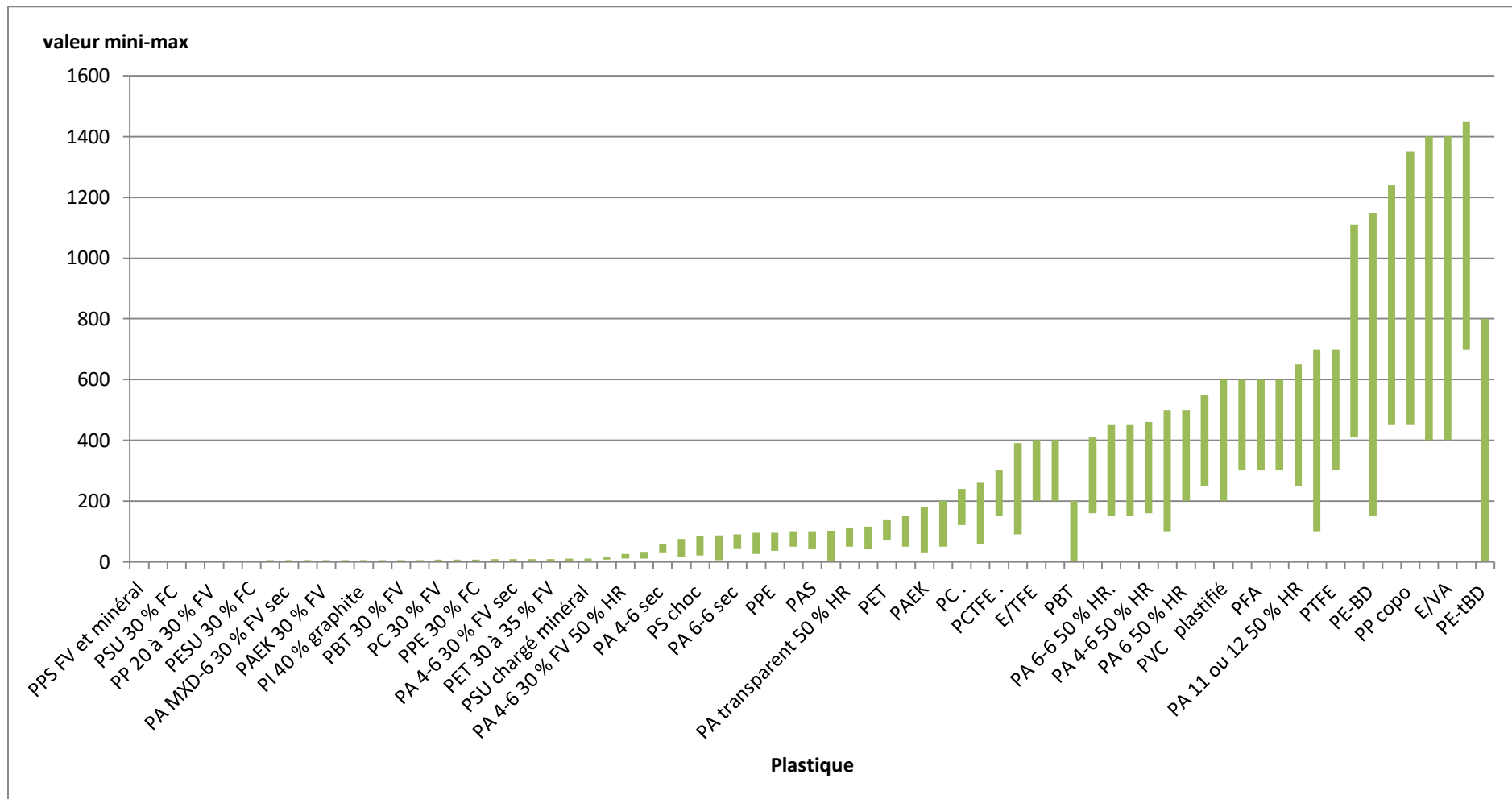


Figure III.3 Allongement à la rupture en traction, selon NF T 51-034 ou norme équivalente, en %

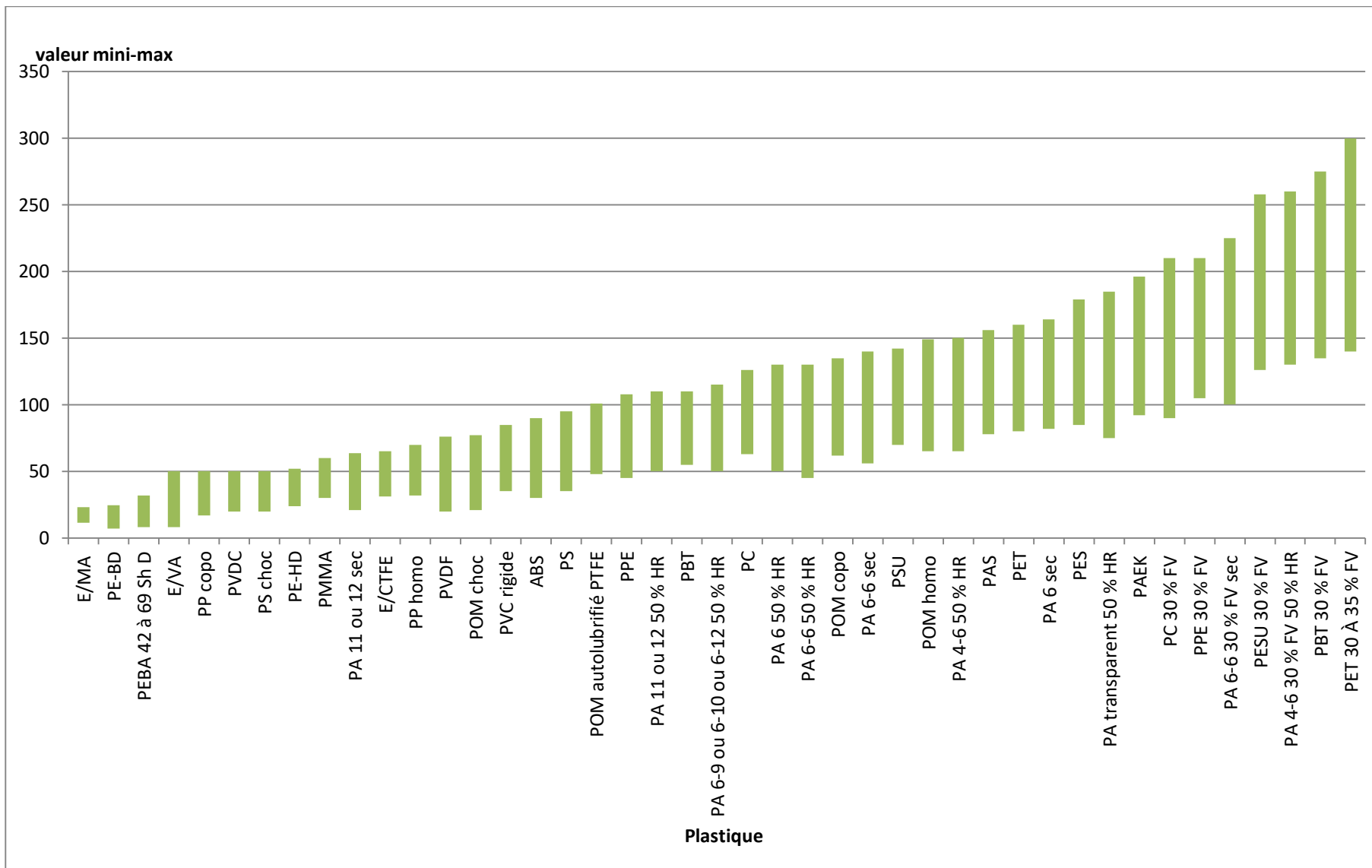


Figure III .4 Contrainte au seuil d'écoulement haut en traction, selon NF T 51-034 ou norme équivalente, en MPa

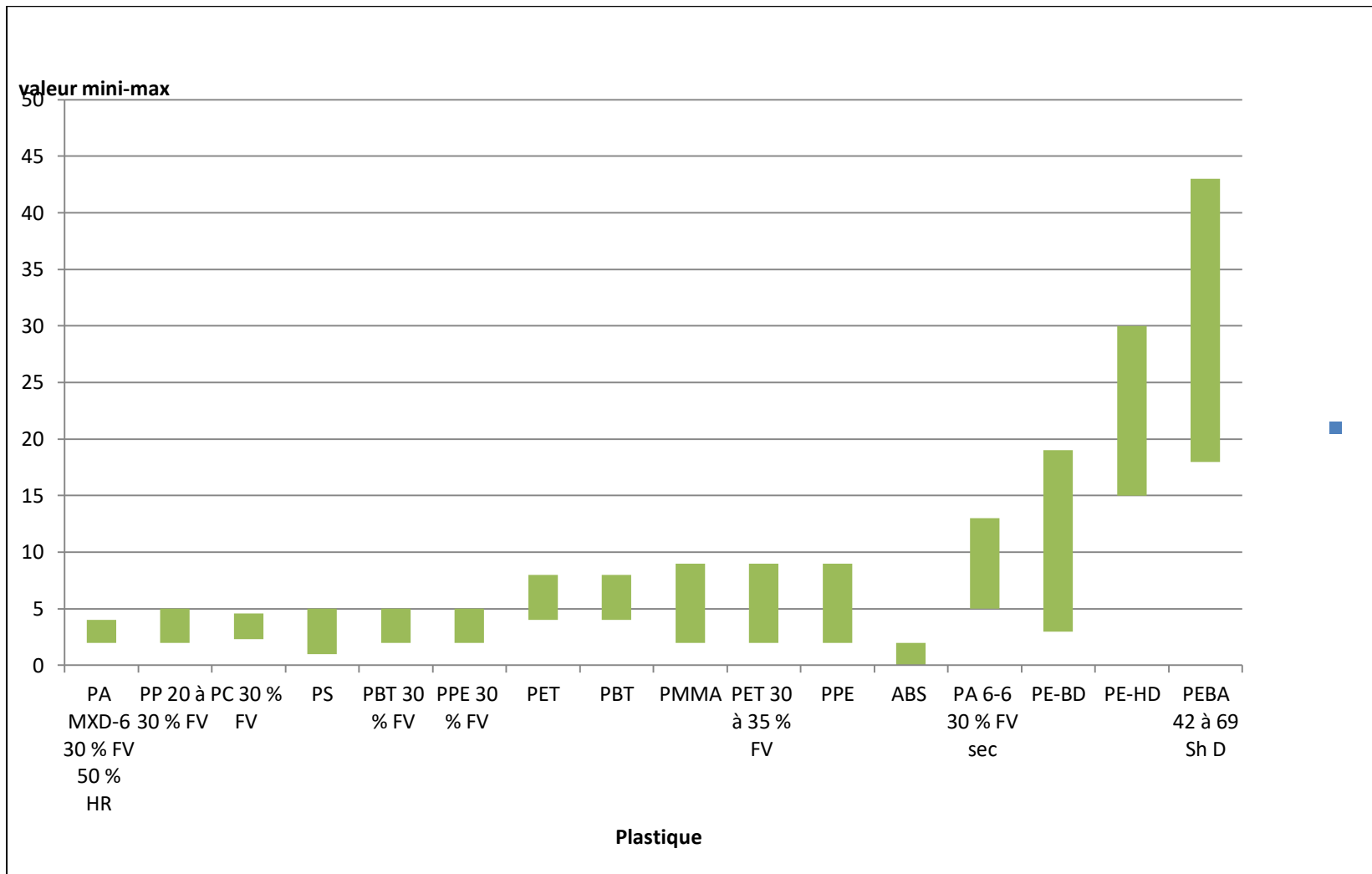


Figure III.5 Allongement au seuil d'écoulement haut en traction, selon NF T 51-034 ou norme équivalente, en %

IV.2. Flexion

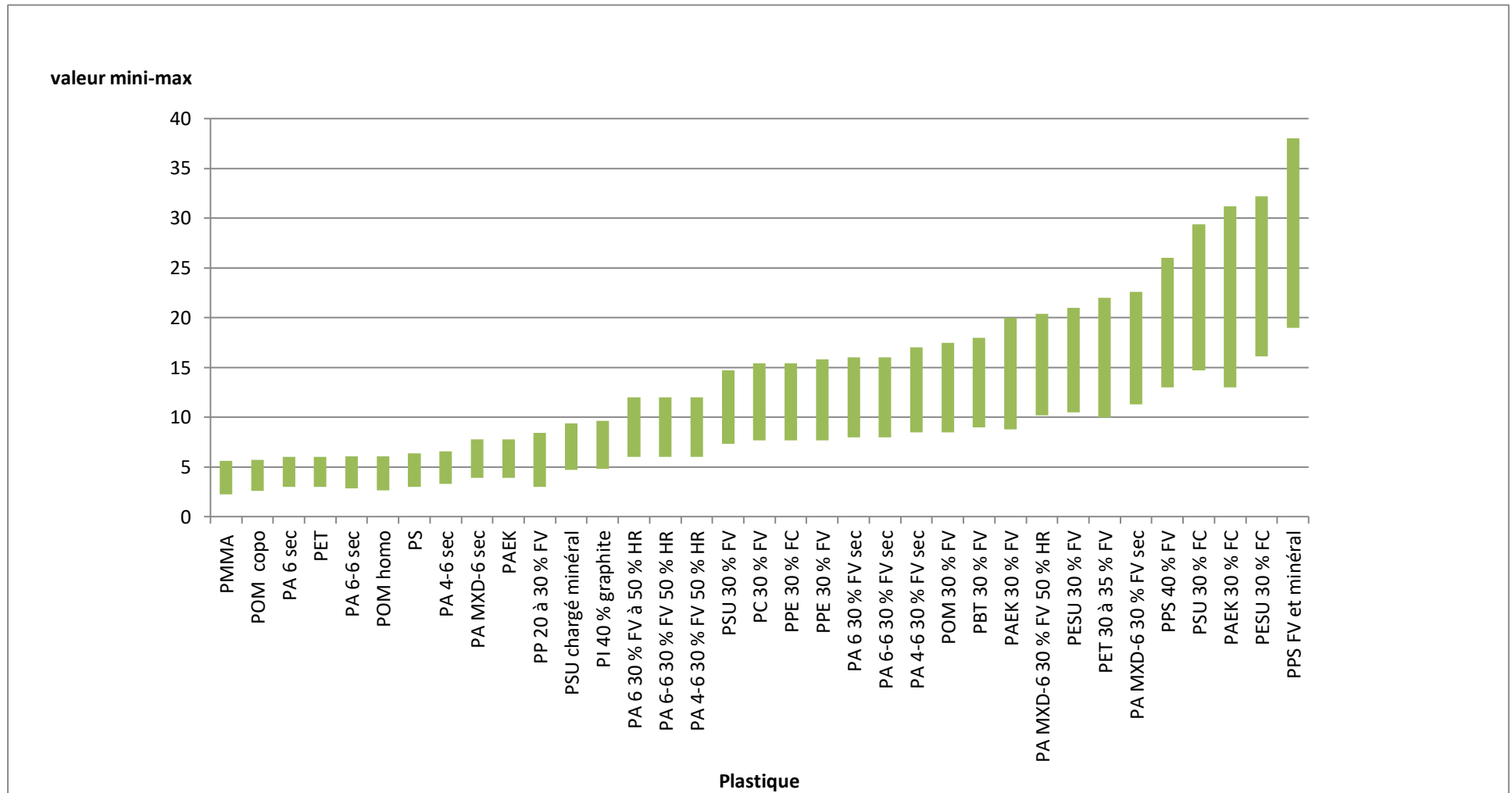


Figure III.6 Module de flexion, selon ISO 178 ou norme équivalente, en GPa

Tableau IV .7 : Contrainte de rupture en flexion, selon ISO 178 ou NF T 51-001 ou norme équivalente, en MPa

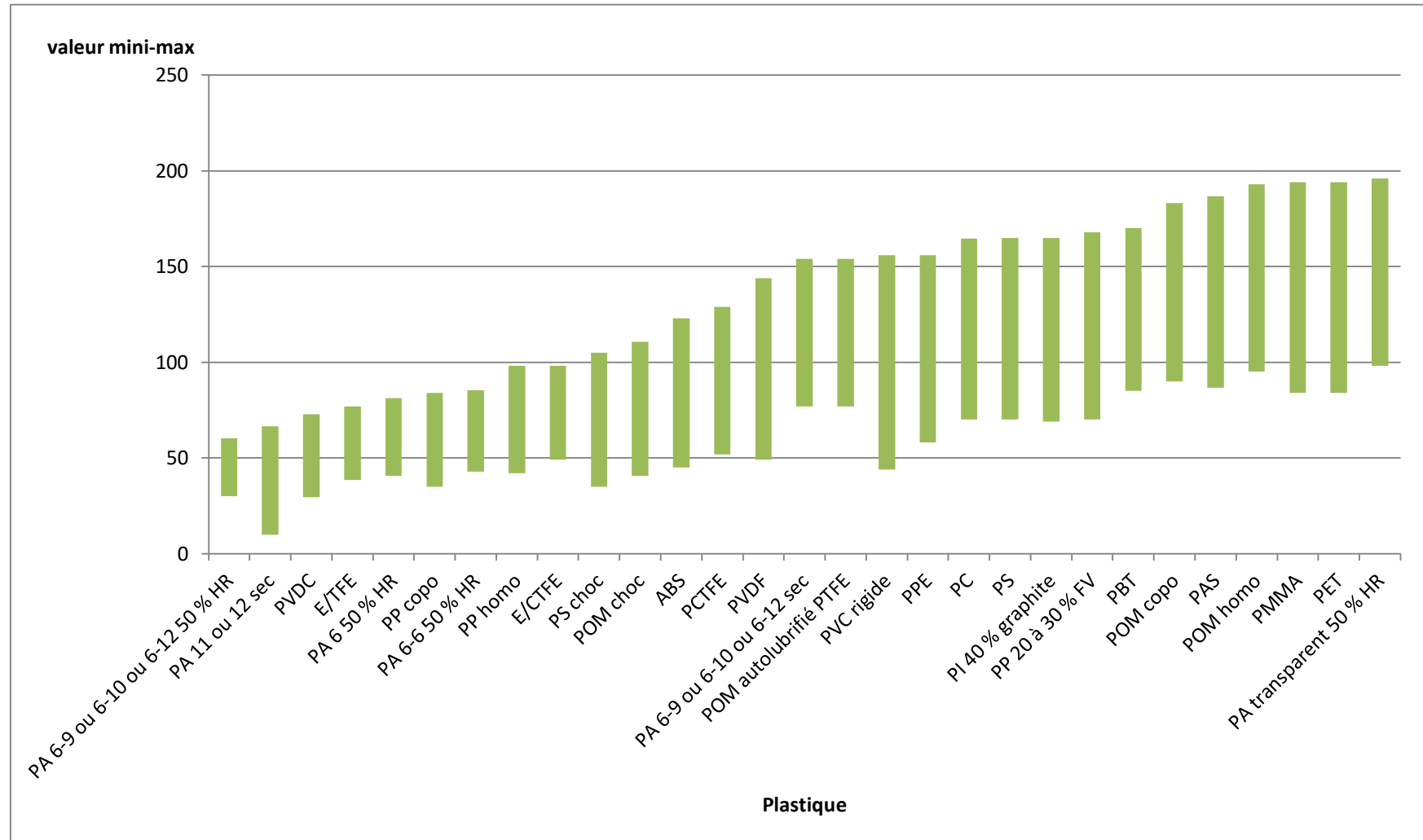


Figure III.7. Contrainte de rupture en flexion, selon ISO 178 ou NF T 51-001 ou norme équivalente, en MPa

IV.3. Compression

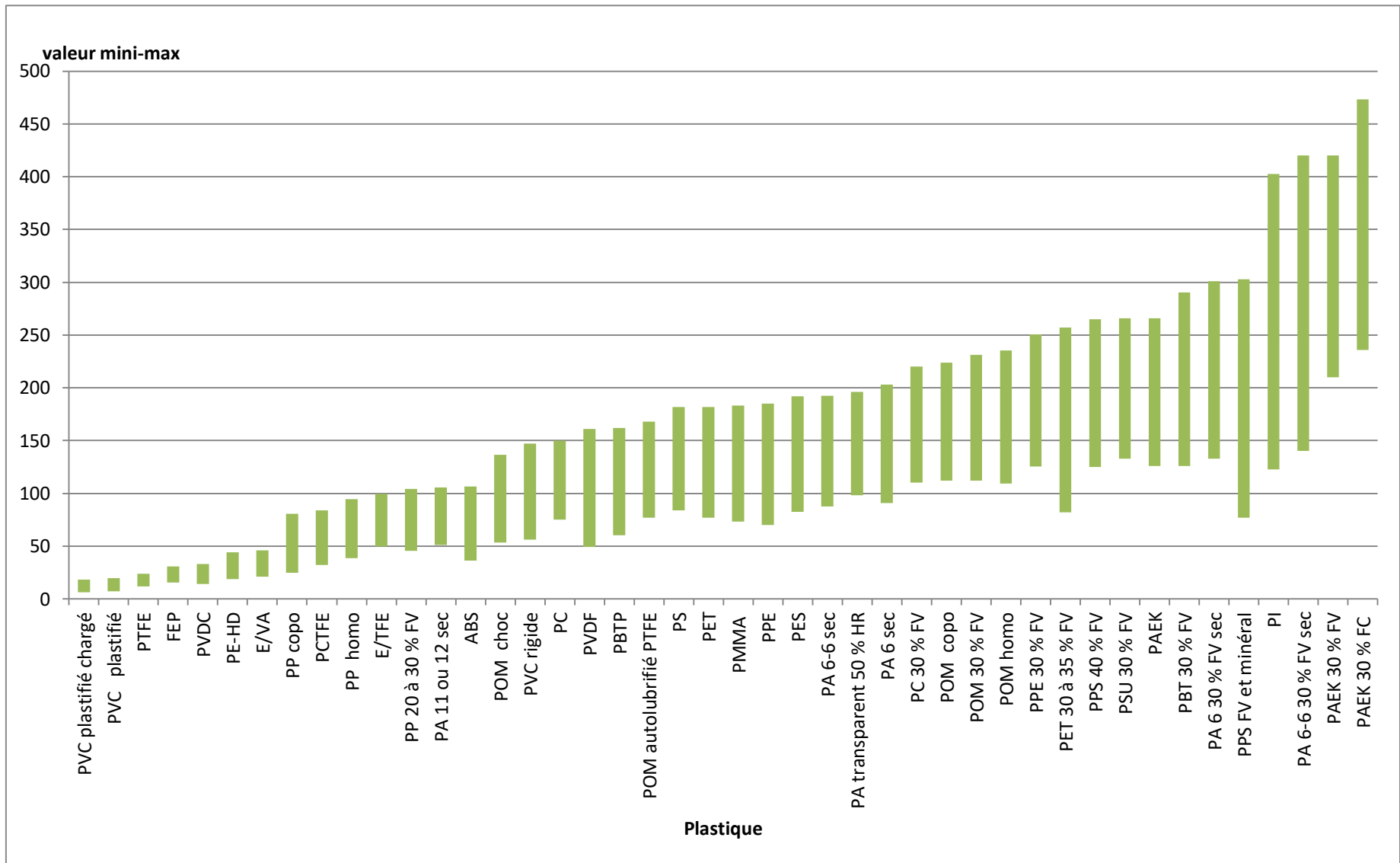


Figure III.8 Contrainte de rupture ou contrainte au seuil, en compression, selon ISO 604 ou norme équivalente, en MPa

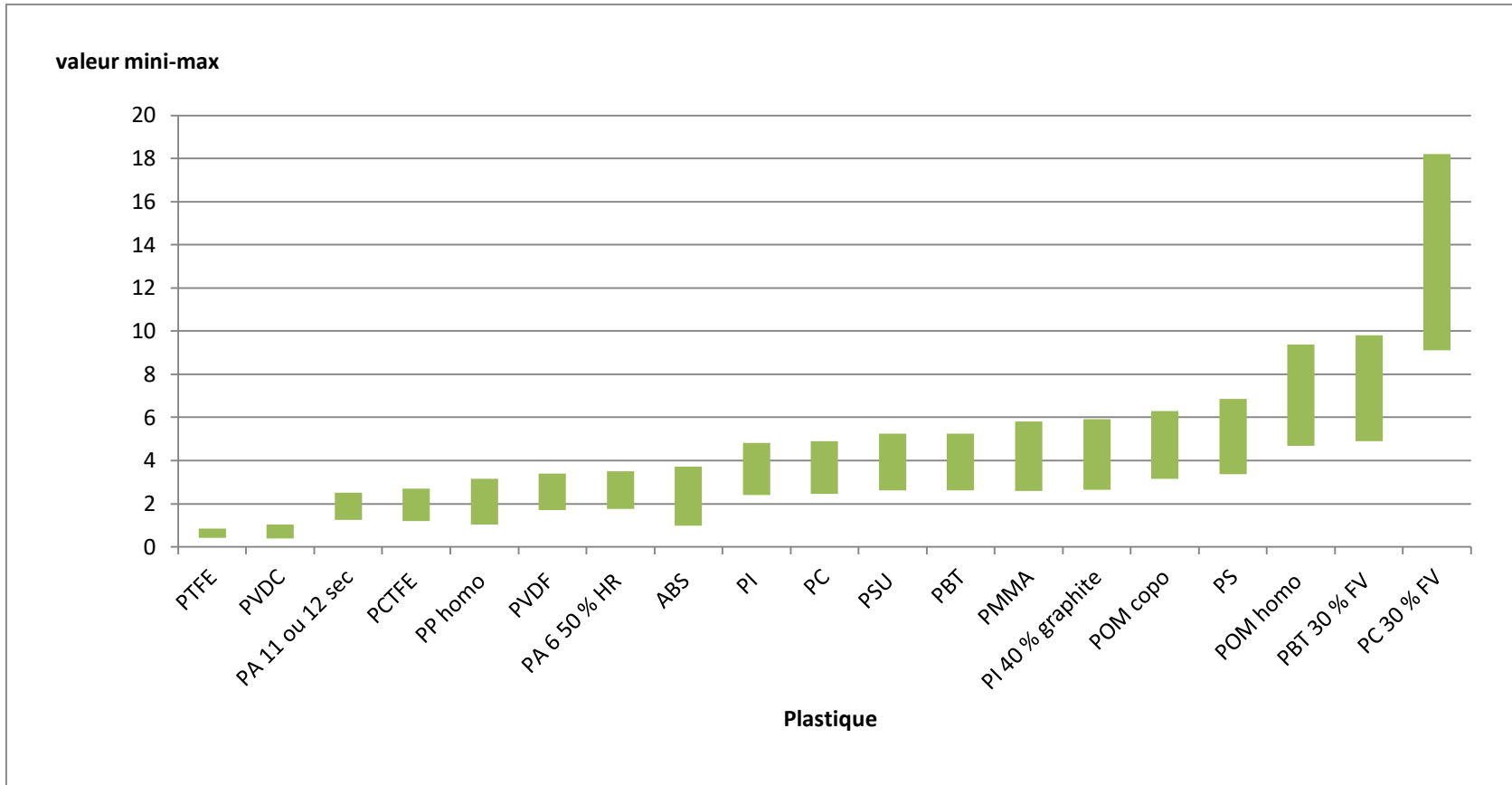


Figure III.9 Module en compression, selon la norme ASTM D 695, en GPa

IV.4. Résistances aux chocs

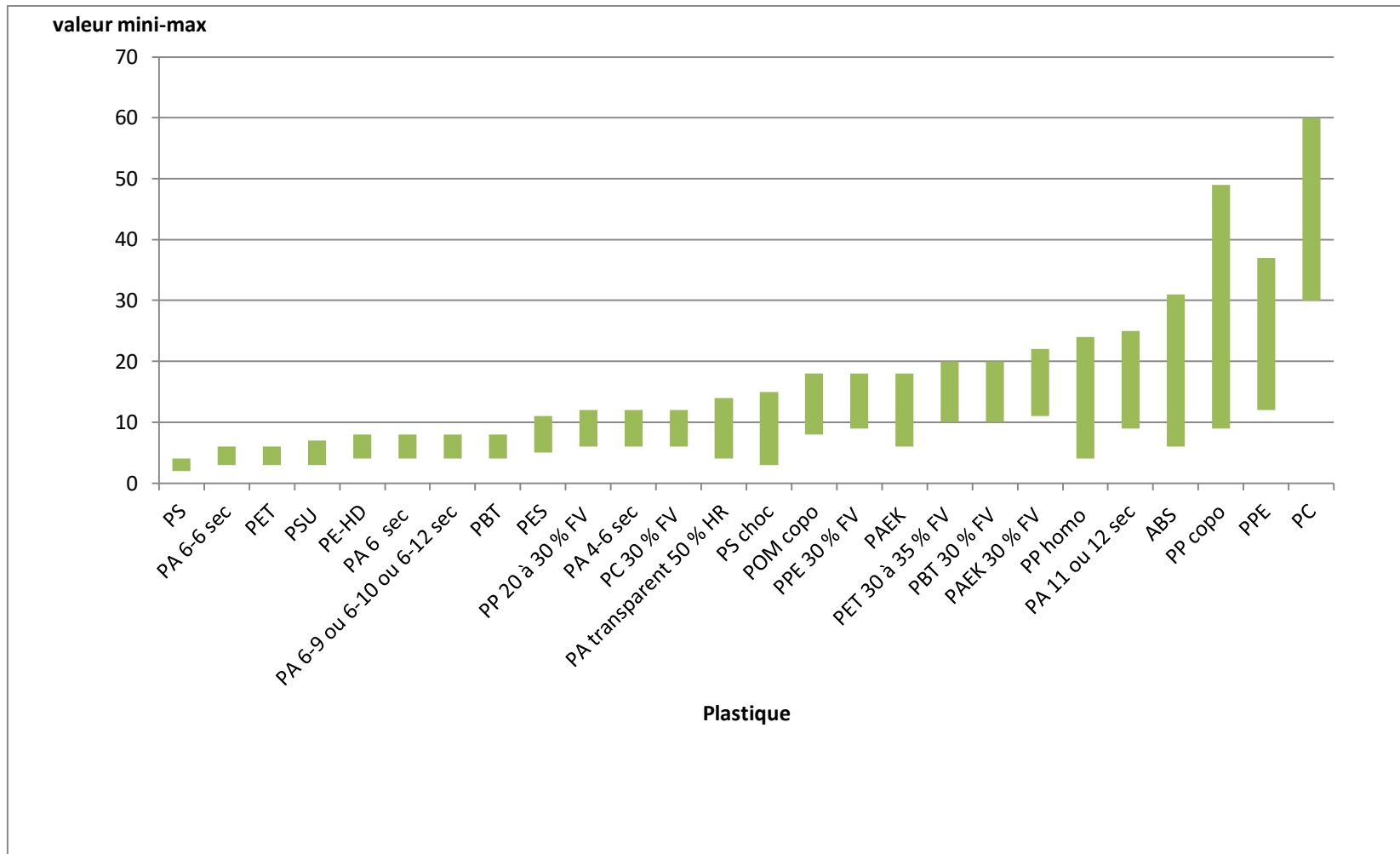


Figure III .10 Résistance au choc Charpy avec entaille, selon ISO 179 ou NF T 51-035 ou analogue norme équivalente, en kJ/m^2

IV.5. Duretés

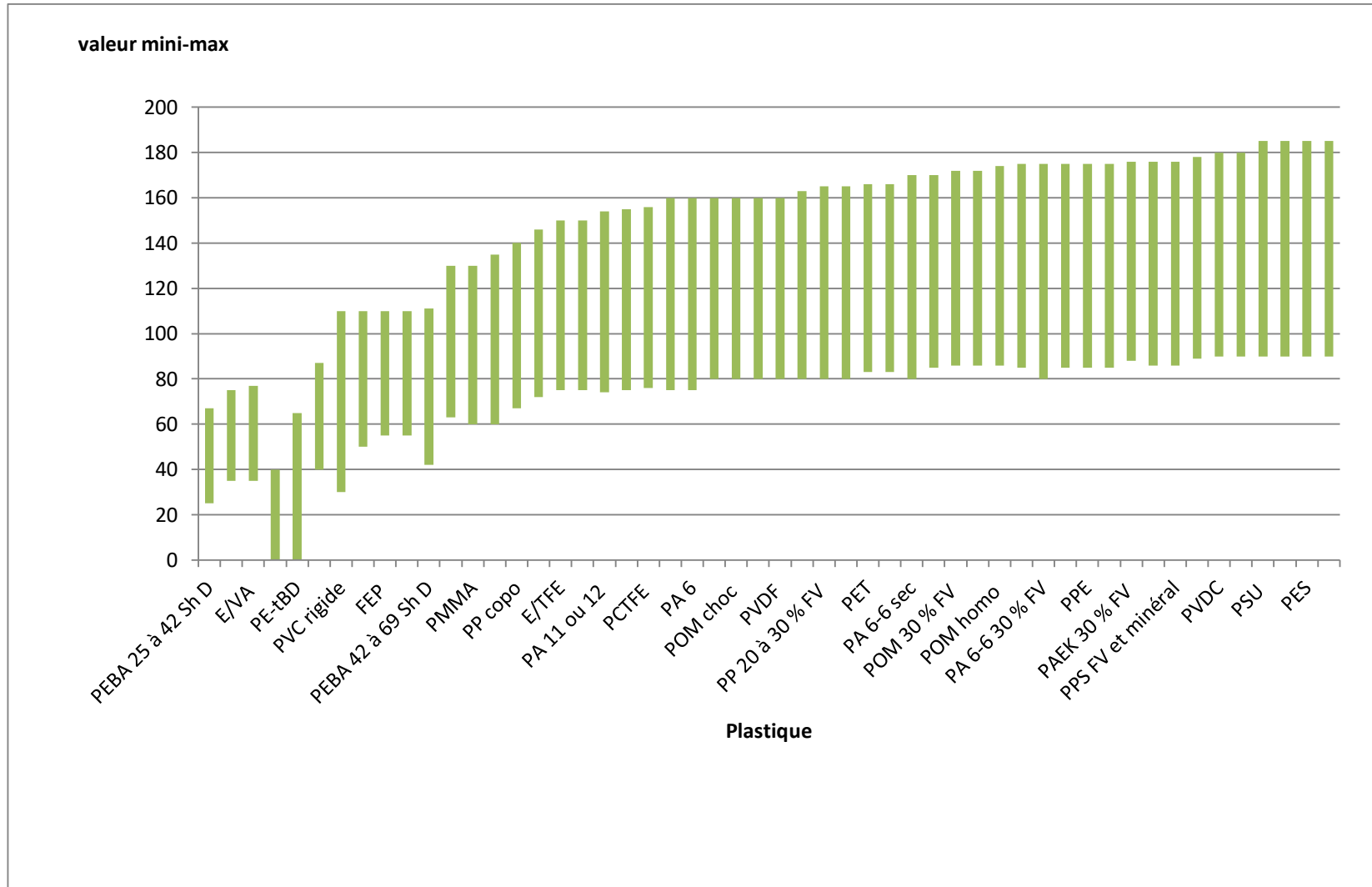


Figure III.11. Dureté Shore D, selon T 51-109 ou norme équivalente

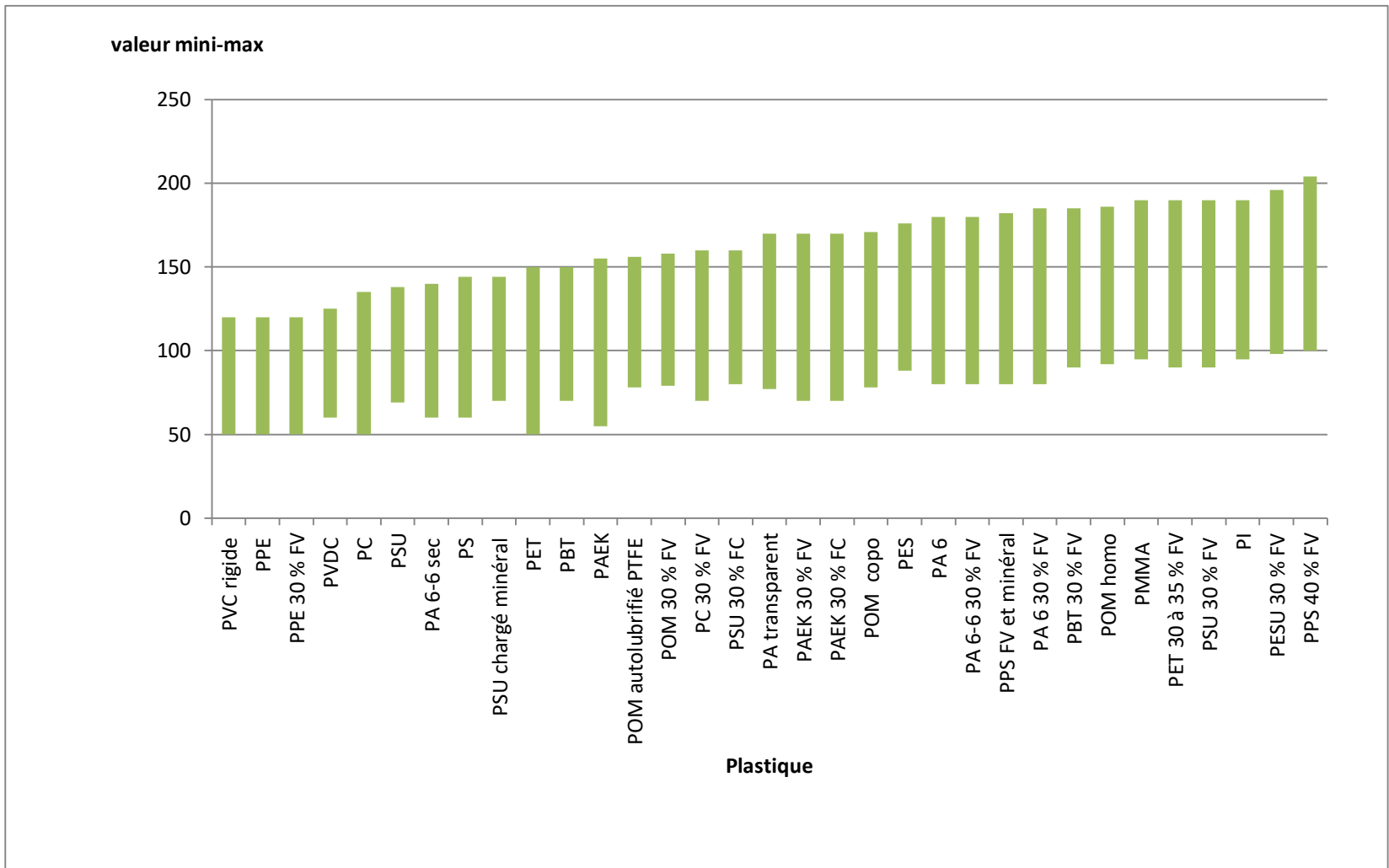


Figure III.12 Dureté Rockwell M, selon ASTM D 785 ou norme équivalente

Catégorie	Tracti on	Flexi on	Compression	Choc	Dureté
Polymères vinyliques	+	++	++++	+	+
Polymères stériniques	++	+++	+++	++	+++
Polymères techniques	+	++	++++	++	+++
Polymères acryliques	+++	+	++	+++	++
Polyoléfines	+	++++	++	++++	+
Polymères fluorés	+++	++	++	++	+++

+ Faible ++ Moyenne forte +++ forte ++++ très fortes

Conclusion

On peut conclure que les polymères thermoplastique présentent des propriétés mécaniques variables selon la structure de chacun des matériaux et selon la famille à laquelle il appartient :

Ainsi

Les polymères vinyliques présentent des meilleures propriétés en compression modérée en flexion et faible pour les autres sollicitations

Les polymères styriniques sont bons en flexion, compression et dureté et moyenne pour la traction et chocs ?

Les polymères techniques sont faibles en traction moyennes en flexion et chocs et forts en compression et dureté.

Pour les polymères acryliques sont fort en traction et moyennement fort pour le reste de propriétés.

Les polyoléfinés sont faibles en traction et en duretés en présentent des propriétés meilleures en flexion et choc.

Les polymères fluorés ont de bonnes propriétés en traction et en dureté et moyennement bon pour la flexion, compression et choc.

Perspectives

On suggère d'étudier la sélection des matériaux thermoplastiques selon des critères structure-propriétés pour chacun des types de thermoplastiques présenté dans ce thème.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

[1] GERARD (P.). – Maîtrise et optimisation de l'anisotropie et de l'hétérogénéité des polymères thermoplastiques renforcés de fibres de verre courtes, moulés par injection. Thèse de Doctorat, Lille I / École des Mines de Douai, oct. 1998.

[2] LAFRANCHE (E.). – Influence de l'histoire thermomécanique locale sur les précision et stabilité dimensionnelles de pièces injectées en thermoplastique. Thèse de Doctorat, Lille I / École des Mines de Douai, déc. 1996.

[3] DEBONDUE (E.). – Les mécanismes de formation des défauts en moulage par injection des polymères et leur incidence sur le comportement des pièces : Application aux lignes de soudure de flux d'écoulement. Thèse de Doctorat, Lille I / École des Mines de Douai, oct. 1997.

[4] DESSARTHE (A.) et CARAYOL (M.). – Usage des matières plastiques, des matériaux composites et des élastomères. Centre Technique des Industries Mécaniques, Nantes, 140 p., 1996.

[5] OBERBACH (K.). – Kunststoff-Kennwerte für Konstrukteure (Grandeurs caractéristiques des plastiques pour la conception). Carl Hanser Verlag, München (Allemagne), 240 p., 1980.

[6] G'SELL (C.). – Les essais mécaniques à pilotage vidéométrique. Journée technique spécialisée Apollor, Nancy, 01 oct. 1992.

[7] PABIOT (J.). – Les fonctions caractéristiques rhéologiques des hautes polymères. Plastiques Modernes et Élastomères, n° 1, jan-fév. 1970 (F).

[8] GRUEL (G.), RAVET (A.) et BOUCHER (W.). – Intercomparaison de chocs multiaxiaux :

[9] Analyse statistique (Parties 1 et 2), Rapport LNE (Laboratoire National d'Essais), juin-sept. 1996.

[10] BATISSE (D.). – Rupture sous sollicitations dynamiques d'assemblages collés. Thèse de Doctorat, Université de Haute Alsace, fév. 1995

[11] CHATAIN (M.). – Comportements physique et thermodynamique en relation avec la structure. Traité Plastiques et Composites, AM 3110 et s., 1993

KRAWCZAK (P.). – Essais de plastiques renforcés. Traité Plastiques et Composites AM 5405, 1997.

Michel BIRON Ingénieur de l'Institut national supérieur de chimie industrielle de Rouen (INSCIR) et de l'Institut français du caoutchouc (IFC) Consultant

Annexes

Annexe1. Traction

Annexe.1.1 Module d'élasticité en traction, selon NF T 51-034 ou norme équivalente, en GPa

Plastique (1)	Mini	Maxi
E/MA	0,06	0,06
PE-tBD	0,01	0,145
E/VA	0,013	0,2
PE-BD	0,19	0,6
PVDC	0,35	0,5
FEP	0,3	0,7
PA 11 ou 12 50 % HR	0,4	1
PTFE	0,75	0,75
PFA	0,7	0,8
PA 11 ou 12 sec	0,25	1,3
PE-HD	0,5	1,1
E/TFE	0,825	0,825
PP copo	0,7	1,4
PP 4-6 50 % HR	1	1,5
PP homo.	1,1	1,6
PVC plastifié chargé	....	1,5
PA 6 50 % HR	0,8	2
PCTFE	1,4	1,4
. PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 50 % HR.	1	2
E/CTFE	1,7	1,7
PA transparent 50 % HR	1,8	2,2
PVDF	2	2
ABS.	1,6	2,6
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 sec	1,5	2,8
POM choc	1,53	2,96
PS choc	2	2,5
PA 6-6 50 % HR.	1	3,5
PC	2,4	2,4
PAS	2,43	2,43
PPE	2,38	2,66
PSU	2,52	2,52
PES	2,4	2,8
PBT	2,7	2,7
PA 6-6 sec	1,6	3,85
PET	2,8	2,8
POM autolubrifié PTFE	2,87	2,87
PA 6 sec	2,66	3,2
POM copo	2,8	3,25
PS	3	3,4
POM homo	2,9	3,6
PET pour films	2,2	5,3
PVC rigide	3,5	3,5
PAEK	3,8	4
PSU chargé minéral	4	4
PA 6 30 % FV à 50 % HR	5,6	5,6
PC 30 % FV	5,8	5,8
PA 6-6 30 % FV 50 % HR	5	8
PP 20 à 30 % FV	6,5	7
PA 4-6 30 % FV 50 % HR	8	8
PPE 30 % FV	7	9,1
PPE 30 % FC	8,05	8,05

PBT 30 % FV	9	9
PA 6-6 30 % FV sec	9,1	9,1
PA 6 30 % FV sec .	8,75	10
PSU 30 % FV .	9,45	9,45
PESU 30 % FV.	10	10
PMMA .	7,7	13
PET 30 à 35 % FV.	9	11,8
POM 30 % FV	11	11
PAEK 30 % FV	9	13
PPS 40 % FV	14	14
PSU 30 % FC	17,3	17,3
PESU 30 % FC	17,5	17,5
PAEK 30 % FC .	13	24
PPS FV et minéral.	22	22

Annexe.1.2 Contrainte de rupture en traction, selon NF T 51-034 ou norme équivalente, en MPa

Plastique (1)	Mini	Maxi
E/MA .	10	12
PVC plastifié chargé	7	24,5
PE-BD.	8	26
PVC plastifié	10	25
EVA .	5	33
PE-tBD	4	35
FEP .	21	23
PE-HD..	14	40
PVDC.	20	35
PS choc.	20	35
PFA.	30	30
ABS .	25	40
PEBA 25 à 42 Sh D	29	36
PTFE	25	40
PP copo	28	38
PCTFE	31	40
PP homo	31	42
PET	42	42
PEBA 42 à 69 Sh D	32	55
PBT	40	50
PVDF	40	50
E/TFE	45	45
PVC rigide	35	60
PS	40	60
E/CTFE	50	50
PI 40 % graphite	48	52
POM choc	45	59
PA 11 ou 12 (50 % HR)	50	60
POM copo	50	62
PPE	45	67
PA 11 ou 12 sec	55	60
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 (50 % HR)	50	65
PC 30 % FV	60	60
POM autolubrifié PTFE	50	70
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 sec	55	70
PAS	63	63
PA 6 (50 % HR)	50	80
PA 6-6 (50 % HR)	50	85
POM homo	68	68
PP 20 à 30 % FV	70	70
PMMA	65	75
PA transparent (50 % HR)	50	90

PC	72	72
PA 4-6 (50 % HR)	65	85
PSU	70	80
PSU chargé minéral	70	80
PI .	72	86
PA 6 sec .	80	80
PES..	69	97
PA 6-6 sec	85	85
PAEK	71	105
PA 4-6 sec	100	100
PA MXD-6 sec	101	101
PSU 30 % FV	102	102
PPE 30 % FV	105	130
PA 4-6 30 % FV 50 % HR	120	120
PA 6 30 % FV à 50 % HR.	130	130
PA 6-6 30 % FV 50 % HR	130	130
PESU 30 % FV	122	140
PPE 30 % FC	132	132
POM 30 % FV	130	140
PBT 30 % FV	140	140
PET 30 à 35 % FV	140	175
PA MXD-6 30 % FV 50 % HR	160	160
PSU 30 % FC	160	160
PPS FV et minéral	170	170
PAEK 30 % FV	157	190
PA 6 30 % FV sec	180	180
PA 6-6 30 % FV sec	180	180
PA MXD-6 30 % FV sec	185	185
PPS 40 % FV	190	190
PESU 30 % FC	185	196

Annexe.1.3 Allongement à la rupture en traction, selon NF T 51-034 ou norme équivalente, en %

Plastique (1)	Mini	Maxi
PPS FV et minéral	1,4	1,4
PSU 30 % FV	1	2
PSU 30 % FC	1	2
PPS 40 % FV	1,7	1,7
PP 20 à 30 % FV	1	3
PA MXD-6 sec	2	2
PESU 30 % FC	1	3
PS	1	4
PA MXD-6 30 % FV sec	2,5	2,5
POM 30 % FV	2	3
PAEK 30 % FV	2	3
PAEK 30 % FC	1	4
PI 40 % graphite	2,5	3
PA 6 30 % FV sec	3	3
PBT 30 % FV	3	3
PESU 30 % FV	2	4
PC 30 % FV	3,5	3,5
PPE 30 % FV	2	5
PPE 30 % FC	2	5
PA 6-6 30 % FV sec	4	4
PA 4-6 30 % FV sec	4	4
PMMA	2	7
PET 30 à 35 % FV	2	7
PA 6-6 30 % FV 50 % HR	4	7
PSU chargé minéral	2	9
PI	7,5	8

PA 4-6 30 % FV 50 % HR	11	15
POM autolubrifié PTFE	10	22
PA 4-6 sec	30	30
ABS	15	60
PS choc	20	65
PES	6	80
PA 6-6 sec	45	45
POM homo	25	70
PPE	35	60
PA 6 sec	50	50
PAS	40	60
PVC rigide	2	100
PA transparent 50 % HR	50	60
POM copo	40	75
PET	70	70
PSU	50	100
PAEK	30	150
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 sec	50	150
PC .	120	120
POM choc.	60	200
PCTFE .	150	150
PET pour films	90	300
E/TFE	200	200
E/CTFE	200	200
PBT		200
PVDC	160	250
PA 6-6 50 % HR.	150	300
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 50 % HR.	150	300
PA 4-6 50 % HR	160	300
PVC plastifié chargé	100	400
PA 6 50 % HR	200	300
PA 11 ou 12 sec	250	300
PVC plastifié	200	400
FEP	300	300
PFA	300	300
PVDF	300	300
PA 11 ou 12 50 % HR	250	400
PP homo	100	600
PTFE	300	400
PEBA 42 à 69 Sh D	410	700
PE-BD	150	1 000
PEBA 25 à 42 Sh D	450	790
PP copo	450	900
PE-HD	400	1 000
E/VA	400	1 000
E/MA	700	750
PE-tBD		800

Annexe.1.4 Contrainte au seuil d'écoulement haut en traction, selon NF T 51-034 ou norme équivalente, en MPa

Plastique (1)	Mini	Maxi
E/MA	11,5	11,5
PE-BD	7	17,5
PEBA 42 à 69 Sh D	8	24
E/VA	8	42
PP copo	17	33
PVDC	20	30
PS choc	20	30
PE-HD	24	28

PMMA	30	30
PA 11 ou 12 sec	21	42,7
E/CTFE	31	34
PP homo	32	38
PVDF	20	56
POM choc	21	56
PVC rigide	35	50
ABS	30	60
PS	35	60
POM autolubrifié PTFE	48	53
PPE	45	63
PA 11 ou 12 50 % HR	50	60
PBT	55	55
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 50 % HR	50	65
PC	63	63
PA 6 50 % HR	50	80
PA 6-6 50 % HR	45	85
POM copo	62	73
PA 6-6 sec	56	84
PSU	70	72
POM homo	65	84
PA 4-6 50 % HR	65	85
PAS	78	78
PET	80	80
PA 6 sec	82	82
PES	85	94
PA transparent 50 % HR	75	110
PAEK	92	104
PC 30 % FV	90	120
PPE 30 % FV	105	105
PA 6-6 30 % FV sec	100	125
PESU 30 % FV	126	132
PA 4-6 30 % FV 50 % HR	130	130
PBT 30 % FV	135	140
PET 30 À 35 % FV	140	160

Annexe.1.5 Allongement au seuil d'écoulement haut en traction, selon NF T 51-034 ou norme équivalente, en %

Plastique (1)	Mini	Maxi
PA MXD-6 30 % FV 50 % HR	2	2
PP 20 à 30 % FV	2	3
PC 30 % FV	2,3	2,3
PS	1	4
PBT 30 % FV	2	3
PPE 30 % FV	2	3
PET	4	4
PBT	4	4
PMMA	2	7
PET 30 à 35 % FV	2	7
PPE	2	7
ABS		2
PA 6-6 30 % FV sec	5	8
PE-BD	3	16
PE-HD	15	15
PEBA 42 à 69 Sh D	18	25

Annexe 2. Flexion

Annexe 2.1 Module de flexion, selon ISO 178 ou norme équivalente, en GPa

Plastique (1)	Mini	Maxi
PEBA 25 à 42 Sh D	0,02	0,09
PEBA 42 à 69 Sh D	0,09	0,43
PE-BD	0,25	0,74
PA 6 50 % HR	0,98	
PVDC	0,385	0,665
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 50 % HR	0,52	0,70
FEP	0,65	0,65
PFA	0,70	0,70
PTFE	0,6	1,00
PP copo	0,42	1,40
PE-HD	1,25	1,25
PCTFE	1,27	1,27
PA 6-6 50 % HR	1,295	1,295
PA 11 ou 12 sec	1,20	1,45
PVC plastifié	< 1,5	< 1,5
PVC plastifié chargé	< 1,5	< 1,5
E/TFE	1,37	1,37
PP homo	1,19	1,75
POM choc	0,84	2,10
E/CTFE	1,70	1,70
PVDF	1,90	1,90
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 sec	2,00	2,40
PS choc	1,60	2,90
ABS	1,70	2,80
PC	2,31	2,38
PBT	2,50	2,50
POM autolubrifié PTFE	2,38	2,66
PPE	2,27	2,80
PA transparent 50 % HR	2,20	2,90
PES	2,55	2,55
PAS	2,55	2,8
PSU	2,73	2,73
PI	2,48	3,10
PVC rigide	2,10	~ 3,5
PMMA	2,28	3,32
POM copo	2,59	3,15
PA 6 sec	3,00	3,00
PET	3,00	3,00
PA 6-6 sec	2,87	3,20
POM homo	2,66	3,43
PS	3,00	3,40
PA 4-6 sec	3,30	3,30
PA MXD-6 sec	3,90	3,90
PAEK	3,90	3,90
PP 20 à 30 % FV	3,00	5,46
PSU chargé minéral	4,70	4,70
PI 40 % graphite	4,82	4,82
PA 6 30 % FV à 50 % HR	6,00	6,00
PA 6-6 30 % FV 50 % HR	6,00	6,00
PA 4-6 30 % FV 50 % HR	6,00	6,00
PSU 30 % FV	7,35	7,35
PC 30 % FV	7,70	7,70
PPE 30 % FC	7,70	7,70
PPE 30 % FV	7,70	8,10
PA 6 30 % FV sec	8,00	8,00
PA 6-6 30 % FV sec	8,00	8,00

PA 4-6 30 % FV sec	8,50	8,50
POM 30 % FV	8,50	9,00
PBT 30 % FV	9,00	9,00
PAEK 30 % FV	8,80	11,20
PA MXD-6 30 % FV 50 % HR	10,20	10,20
PESU 30 % FV	10,50	10,50
PET 30 à 35 % FV	10,00	12,00
PA MXD-6 30 % FV sec	11,30	11,30
PPS 40 % FV	13,00	13,00
PSU 30 % FC	14,70	14,70
PAEK 30 % FC	13,00	18,20
PESU 30 % FC	16,10	16,10
PPS FV et minéral	19,00	19,00

Annexe 2.2 Contrainte de rupture en flexion, selon ISO 178 ou NF T 51-001 ou norme équivalente, en MPa

Plastique (1)	Article	Mini	Maxi
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 50 % HR	.....	30,1	30,1
PA 11 ou 12 sec	A 3 360	9,8	56,7
PVDC	A 3 335	29,4	43,4
E/TFE	A 3 390	38,5	38,5
PA 6 50 % HR	.....	40,6	40,6
PP copo	A 3 320	35	49
PA 6-6 50 % HR	.....	42,7	42,7
PP homo	A 3 320	42	56
E/CTFE	A 3 390	49	49
PS choc	A 3 340	35	70
POM choc	A 3 385	40,6	70
ABS	A 3 345	45	78
PCTFE	A 3 390	51,8	77
PVDF	A 3 390	49	95
6-10 ou 6-12 sec	A 3 360	77	77
POM autolubrifié PTFE	A3385	77	77
PVC rigide	A3325	44	112
PPE	A3387	58	98
PC	A3381	70	94,5
PS	A3340	70	95
PI 40 % graphite	A3397	69	96
PP 20 à 30 % FV	A3320	70	98
PBT	A3370	85	85
POM copo	A3385	90	93
PAS	A3393	86,8	100
POM homo	A3385	95	98
PMMA	A3350	84	110
PET	A3370	84	110
PA transparent 50 % HR	A3360	98	98
PSU chargé minéral	A3393	105	105
PSU	A3393	108	108
PA 6 sec	A3360	109,9	109,9
PI	A3397	96	131
PAEK	A3395	110	130
PES	A3393	125	125
PC 30 % FV	A 3 381	135	135
PSU 30 % FV	A 3 393	140	140
PA 6 30 % FV à 50 % HR	.....	147	147
PPE 30 % FV	A 3 387	140	160
POM 30 % FV	A 3 385	130	200
PPE 30 % FC	A3 387	168	168
PA 6-6 30 % FV 50 % HR	.....	150	203

PESU 30 % FV	A3 393	180	190
PBT 30 % FV	A3 370	210	210
PSU 30 % FC	A3 393	230	230
PET 30 à 35 % FV	A3370	210	260
PPS 40 % FV	A3396	240	240
PPS FV et minéral	A3396	240	240
PA 6 30 % FV sec	A3360	238	252
PA 6-6 30 % FV sec	A3360	210	280
PESU 30 % FC	A3393	260	260
PAEK 30 % FV	A3395	230	290
PAEK 30 % FC	A3395	280	330

Annexe 3. Compression

Annexe 3.1 Contrainte de rupture ou contrainte au seuil, en compression, selon ISO 604 ou norme équivalente, en MPa

Plastique (1)	Article	Mini	Maxi
PVC plastifié chargé	.....	6,3	11,9
PVC plastifié	.....	7	12,6
PTFE	A 3 390	11,9	11,9
FEP	A 3 390	15,4	15,4
PVDC	A 3 335	14	18,9
PE-HD	A 3 315	18,9	25,2
E/VA	A 3 310	21	25,2
PP copo	A 3 320	24,5	56
PCTFE	A 3 390	32,2	51,8
PP homo	A 3 320	38,5	56
E/TFE	A 3 390	49,7	49,7
PP 20 à 30 % FV	A 3 320	45,5	58,8
PA 11 ou 12 sec	A 3 360	51,1	54,6
ABS	A 3 345	36,4	70
POM choc	A 3 385	53,2	83,3
PVC rigide	A 3 325	56	91
PC	A 3 381	75	75
PVDF	A 3 390	49	112
PBTP	A 3 370	60,2	101,5
POM autolubrifié PTFE	A 3 385	77	91
PS	A 3 340	84	98
PET	A 3 370	77	105
PMMA	A 3 350	73	110
PPE	A 3 387	70	114,8
PES	A 3 393	82,6	109,2
PA 6-6 sec	A 3 360	87,5	105
PA transparent 50 % HR	A 3 360	98	98
PA 6 sec	A 3 360	91	112
PC 30 % FV	A 3 381	110	110
POM copo	A 3 385	112	112
POM 30 % FV	A 3 385	112	119
POM homo	A 3 385	109,2	126
PPE 30 % FV	A 3 387	125,3	125,3
PET 30 à 35 % FV	A 3 370	82	175
PPS 40 % FV	A 3 396	125	140
PSU 30 % FV	A 3 393	133	133
PAEK	A 3 395	126	140
PBT 30 % FV	A 3 370	126	164,5
PA 6 30 % FV sec	A 3 360	133	168
PPS FV et minéral	A 3 396	77	226
PI	A 3 397	122,5	280
PA 6-6 30 % FV sec	A 3 360	140	280
PAEK 30 % FV	A 3 395	210	210
PAEK 30 % FC	A 3 395	236	237

Annexe 3.2 Module en compression, selon la norme ASTM D 695, en GPa

Plastique (1)	Article	Mini	Maxi
PTFE	A 3 390	0,42	0,42
PVDC	A 3 335	0,385	0,665
PA 11 ou 12 sec	A 3 360	1,26	1,26
PCTFE	A 3 390	1,2	1,5
PP homo	A 3 320	1,05	2,1
PVDF	A 3 390	1,7	1,7
PA 6 50 % HR	.....	1,75	1,75
ABS	A 3 345	0,98	2,73
PI	A 3 397	2,41	2,41
PC	A 3 381	2,45	2,45
PSU	A 3 393	2,62	2,62
PBT	A 3 370	2,625	2,625
PMMA	A 3 350	2,59	3,22
PI 40 % graphite	A 3 397	2,65	3,275
POM copo	A 3 385	3,15	3,15
PS	A 3 340	3,36	3,5
POM homo	A 3 385	4,69	4,69
PBT 30 % FV	A 3 370	4,9	4,9
PC 30 % FV	A 3 381	9,1	9,1

Annexe 4. Résistances aux chocs

Annexe 4.1 Résistance au choc Charpy avec entaille, selon ISO 179 ou NF T 51-035 ou analogue norme équivalente, en kJ/m²

Plastique (1)	Article	Mini	Maxi
PS	A 3 340	2	2
PA 6-6 sec	A 3 360	3	3
PET	A 3 370	3	3
PSU	A 3 393	3	4
PE-HD	A 3 315	4	4
PA 6 sec	A 3 360	4	4
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 sec	A 3 360	4	4
PBT	A 3 370	4	4
PES	A 3 393	5	6
PP 20 à 30 % FV	A 3 320	6	6
PA 4-6 sec	A 3 360	6	6
PC 30 % FV	A 3 381	6	6
PA transparent 50 % HR	A 3 360	4	10
PS choc	A 3 340	3	12
POM copo	A 3 385	8	10
PPE 30 % FV	A 3 387	9	9
PAEK	A 3 395	6	12
PET 30 à 35 % FV	A 3 370	10	10
PBT 30 % FV	A 3 370	10	10
PAEK 30 % FV	A 3 395	11	11
PP homo	A 3 320	4	20
PA 11 ou 12 sec	A 3 360	9	16
ABS	A 3 345	6	25
PP copo	A 3 320	9	40
PPE	A 3 387	12	25
PC	A 3 381	30	30

Annexe 4.2 Résistance au choc Izod avec entaille, selon ISO 180 A ou T 51-911 ou norme équivalente, en J/m

Plastique (1)	Article	Mini	Maxi
PA MXD-6 sec	A 3 360	20	20
PS	A 3 340	20	25
PET pour films	A 3 375	10	35
PET	A 3 370	15	40
PSU chargé minéral	A 3 393	30	30
PVDC	A 3 335	20	50
PP homo	A 3 320	20	65
PBT	A 3 370	35	55
PA 6 sec	A 3 360	50	50
PA 6-6 sec	A 3 360	50	50
POM autolubrifié PTFE	A 3 385	37	64
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 sec	A 3 360	50	60
PSU 30 % FV	A 3 393	58	58
PVC rigide	A 3 325	20	110
PAEK	A 3 395	50	85
PSU	A 3 393	69	69
PMMA	A 3 350	10	130
PA MXD-6 30 % FV sec	A 3 360	70	70
PBT 30 % FV	A 3 370	50	90
PPE 30 % FC	A 3 387	70	70
PPS FV et minéral	A 3 396	70	70
POM copo	A 3 385	54	90
POM 30 % FV	A 3 385	53	95

PA MXD-6 30 % FV 50 % HR	.....	75	75
PC 30 % FV	A 3 381	75	75
PESU 30 % FC	A 3 393	75	75
PESU 30 % FV	A 3 393	64	90
PES	A 3 393	74	84
PA 6 30 % FV sec	A 3 360	80	80
PA 6-6 30 % FV sec	A 3 360	80	80
PSU 30 % FC	A 3 393	80	80
PI	A 3 397	80	80
PAEK 30 % FC	A 3 395	60	110
PPS 40 % FV	A 3 396	85	85
PA transparent 50 % HR	A 3 360	60	120
PPE 30 % FV	A 3 387	80	100
PS choc	A 3 340	45	140
POM homo	A 3 385	64	122
PA 6-6 50 % HR	.....	50	150
PA 4-6 sec	A 3 360	100	100
PA 6 30 % FV à 50 % HR	.....	100	100
PA 6-6 30 % FV 50 % HR	.....	100	100
PP 20 à 30 % FV	A 3 320	45	160
PA 6 50 % HR	.....	50	160
PE-HD	A 3 315	9	200
ABS	A 3 345	10	200
PAEK 30 % FV	A 3 395	70	140
PA 4-6 30 % FV sec	A 3 360	110	110
PAS	A 3 393	85	200
PET 30 À 35 % FV	A 3 370	80	230
PA 11 ou 12 sec	A 3 360	120	200
PA 4-6 30 % FV 50 % HR	.....	190	190
PCTFE	A 3 390	200	200
PVDF	A 3 390	200	200
PPE	A 3 387	60	500
PA 4-6 50 % HR	.....	100	500
PTFE	A 3 390	350	500
POM choc	A 3 385	90	900
PP copo	A 3 320	120	1 000
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 50 % HR	.....	70	NC
PA 11 ou 12 50 % HR	.....	120	NC
E/MA	A 3 310	365	NC
PC	A 3 381	800	800
E/VA	A 3 310		NC
PE-BD	A 3 310	NC	NC
PEBA 25 à 42 Sh D	A 3 360	NC	NC
PEBA 42 à 69 Sh D	A 3 360	NC	NC
FEP	A 3 390	NC	NC
PFA	A 3 390	NC	NC
E/TFE	A 3 390	NC	NC
E/CTFE	A 3 390	NC	NC

Annexe 5. Duretés

Annexe 5.1 :Dureté Shore D, selon T 51-109 ou norme équivalente

Plastique (1)	Article	Mini	Maxi
PEBA 25 à 42 Sh D	A 3 360	25	42
E/MA	A 3 310	35	40
E/VA	A 3 310	35	42
PVC plastifié chargé	.....	< 40	40
PE-tBD	A 3 310	< 25	65
PE-BD	A 3 310	40	47
PVC rigide	A 3 325	30	80
PTFE	A 3 390	50	60
FEP	A 3 390	55	55
PFA	A 3 390	55	55
PEBA 42 à 69 Sh D	A 3 360	42	69
PE-HD	A 3 315	63	67
PMMA	A 3 350	60	70
PS choc	A 3 340	60	75
PP copo	A 3 320	67	73
PP homo	A3 320	72	74
E/TFE	A3 390	75	75
E/CTFE	A3 390	75	75
PA 11 ou 12	A3 360	74	80
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12	A3 360	75	80
PCTFE	A3 390	76	80
ABS	A3 345	75	85
PA 6	A3 360	75	85
PBT	A3 370	80	80
POM choc	A3 385	80	80
POM autolubrifié PTFE	A3 385	80	80
PVDF	A3 390	80	80
PA transparent	A3 360	80	83
PP 20 à 30 % FV	A3 320	80	85
POM copo	A 3 385	80	85
PET	A3 370	83	83
PBT 30 % FV	A3 370	83	83
PA 6-6 sec	A3 360	80	90
PA 4-6	A3 360	85	85
POM 30 % FV	A 3 385	86	86
PAEK	A3 395	86	86
POM homo	A3 385	86	88
PS	A3 340	85	90
PA 6-6 30 % FV	A3 360	80	95
PC	A3 381	85	90
PPE	A3 387	85	90
PPE 30 % FV	A3 387	85	90
PAEK 30 % FV	A3 395	88	88
PPS 40 % FV	A3 396	86	90
PPS FV et minéral	A3 396	86	90
PET 30 à 35 % FV	A3 370	89	89
PVDC	A3 335	90	90
PC 30 % FV	A3 381	90	90
PSU	A3 393	90	95
PSU 30 % FV	A3 393	90	95
PES	A3 393	90	95
PESU 30 % FV	A3 393	90	95

Annexe 5.2 Dureté Rockwell M, selon ASTM D 785 ou norme équivalente

Plastique (1)	Article	Mini	Maxi
PP 20 à 30 % FV	A 3 320	NA	50
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12	A 3 360	34	78
POM choc	A 3 385	40	79
PS choc	A 3 340	NA	< 60
PVC rigide	A 3 325	50	70
PPE	A 3 387	50	70
PPE 30 % FV	A 3 387	50	70
PVDC	A 3 335	60	65
PC	A 3 381	50	85
PSU	A 3 393	69	69
PA 6-6 sec	A 3 360	60	80
PS	A 3 340	60	84
PSU chargé minéral	A 3 393	70	74
PET	A 3 370	50	100
PBT	A 3 370	70	80
PAEK	A3 395	55	100
POM autolubrifié PTFE	A3 385	78	78
POM 30 % FV	A3 385	79	79
PC 30 % FV	A3 381	70	90
PSU 30 % FC	A 3 393	80	80
PA transparent	A3 360	77	93
PAEK 30 % FV	A3 395	70	100
PAEK 30 % FC	A3 395	70	100
POM copo	A3 385	78	93
PES	A3 393	88	88
PA 6	A3 360	80	100
PA 6-6 30 % FV	A3 360	80	100
PPS FV et minéral	A3 396	80	102
PA 6 30 % FV	A3 360	80	105
PBT 30 % FV	A 3 370	90	95
POM homo	A3 385	92	94
PMMA	A3 350	95	95
PET 30 à 35 % FV	A3 370	90	100
PSU 30 % FV	A3 393	90	100
PI	A3 397	95	95
PESU 30 % FV	A3 393	98	98
PPS 40 % FV	A3 396	100	104

ABSTRACT

Une matière **thermoplastique** désigne une matière qui se ramollit (parfois on observe une fusion franche) d'une façon répétée lorsqu'elle est chauffée au-dessus d'une certaine température, mais qui, au-dessous, redevient dure. Une telle matière conservera donc toujours de manière *réversible* sa thermoplasticité initiale. Cette qualité rend le matériau thermoplastique potentiellement *recyclable* (après broyage). Cela implique que la matière ramollie ne soit pas thermiquement dégradée et que les contraintes mécaniques de cisaillement introduites par un procédé de mise en forme ne modifient pas la structure moléculaire.

Les thermoplastiques représentent une diversité de propriétés selon leur structure, morphologie ainsi les méthodes de mise en œuvre. L'avantage que représente cette étude est de sélectionner un polymère selon les propriétés désirés.

Mots clés : Polymères, thermoplastiques, propriétés mécaniques, traction, flexion, dureté, Shore D, rokwell, choc, compression.

ملخص

مادة اللدائن الحرارية مادة تتميز (أحياناً يُلاحظ ذوبان صريح) بطريقة متكررة عندما يتم تسخينها فوق درجة حرارة معينة، ولكنها، أدناه، تصبح صلبة مرة أخرى. لذلك فإن هذه المادة ستحتفظ دائماً بشكل عكسي باللدونة الحرارية الأولية. هذه الجودة تجعل مادة اللدائن الحرارية قابلة لإعادة التدوير (بعد الطحن). هذا يعني أن المادة المخففة لا تتحلل حرارياً وأن الإجهادات الميكانيكية التي يتم إدخالها بواسطة عملية التشكيل لا تعدل البنية الجزيئية.

تمثل اللدائن الحرارية مجموعة متنوعة من الخصائص اعتماداً على هيكلها وتشكلها وطرق تحويلها. تتمثل ميزة هذه الدراسة في اختيار المادة البلاستيكية وفقاً للخصائص المرغوبة.

الكلمات الرئيسية: البوليمرات، اللدائن الحرارية، الخواص الميكانيكية، الشد، الانحناء، الصلابة، **Shore D**، **rokwell**، الصدمة، الضغط