

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERRI DE TIZI OUZOU

FACULTÉ DE GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



MEMOIRE

De fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master
En Génie Mécanique

Option : Construction Mécanique

Thème :

**Élaboration et caractérisation mécanique des mélanges
polymériques à base de PMMA-ABS**

(ABS recyclé et vierge)

Encadré par :

Mr FERHOUM Rabah

Co encadré par :

M^r AMIRAT Boukhalfa

Réalisé par :

M^{lle} REBBAH Zakia

Soutenu le 28/10/2017 devant le jury :

Mr SALHI Ahmed

M^{me} MOUHLBI Fadhila

<< 2016/2017 >>

Remerciements

Avant de remercier mon promoteur, Co promoteur, collègues et amis, j'aimerais exprimer ma très grande satisfaction d'avoir pu réaliser ce mémoire de fin d'étude en vue d'obtention du diplôme de 2^{ème} année Mastère académique 2016/2017, sur ce sujet passionnant, qui est :

« **Élaboration et caractérisation mécanique des mélanges polymériques à base de PMMA-ABS recyclé et vierge** », ce travail m'a permis d'approfondir mes connaissances en mécanique et science des polymères, grâce notamment à la coopération entre la faculté du génie de la construction, les laboratoires LECMM, SDM de génie mécanique, et l'entreprise nationale du plastique et caoutchouc (ENPC Draa-AL-Mizane).

Monsieur **FERHOUM Rabah**, je vous remercie tout particulièrement de nous avoir donné la chance de suivre ce travail, et de nous avoir fait confiance pour ce sujet pluridisciplinaire et à forte composantes scientifiques.

Monsieur **AMIRAT Boukhalfa**, je tiens à vous exprimer ma profonde gratitude pour la confiance que vous m'avez accordée pour réaliser ce travail ainsi que pour vos multiples et précieux conseils scientifiques et professionnels, ainsi qu'à votre soutien, orientation et encadrement notamment pour la réalisation des essais.

Madame, Monsieur, le membre de jury ; je vous suis très reconnaissante d'avoir accepté de juger mon travail, et d'avoir pris le temps de rapporter ce mémoire.

Un grand merci au PDG de l'ENPC de Draa-El-Mizen **Monsieur KERKOUR**, pour son accueil, ainsi qu'à tout le corps de l'entreprise partant des agents de sécurité, au service des ressources humaines, allant jusqu'aux ouvriers passant par le service technique qui a beaucoup contribué au bon déroulement des essais. Un remerciement spécial qu'on doit à **M^{me} BOUAZIZ Karima** pour son aide précieuse, son accompagnement son orientation et surtout sa gentillesse, sans oublier **M^{er} TAAKILT** et **M^{me} DELHOUM** et toutes l'équipe de l'ENPC.

Nos vifs remerciements vont aussi à, Monsieur **MAKHLOUF Said**, **HANOU Ghiles**, **ZAROKI Marzak**, **SIDHOUM Zohra**, **Professeur ALMANSBA Madjid**, **Professeur OUELD-OUALI** pour leur disponibilité, leurs conseils, encouragements, et leur aide précieuse.

Nous exprimons aussi toute notre gratitude à Monsieur **SETBEL Idir**, Madame **Setbel Milliada**, Monsieur **AHMED ZAID**, personnels du laboratoire science des matériaux de Génie mécanique, pour leur disponibilité, présence, et encouragement.

Mes très chers amis (es), **Nassir HADJOUR, DAHMOUH Adel, Mme DAHMOUH Kmilia, SMAILI Moh, GOUMGHAR Amiroche, TIFAOUI Yacin, SIKADIR Adel, Tawes, Laila, Djidji,** merci tout simplement d'être là.

Yimma, Vava, Houria, Dalila, Rachida, Hakima, Hassiba, Mouhsaid Nagh, Nacer Nagh, Mina, Zakia (2), Rahim Touloum, Mezian Boudif, Chaban Said, Massinissa Sebai, mes petits et nièces, qu'aurais-je fait sans vous ? Quelles qu'en étaient mes décisions, vous m'avez toujours soutenu, vous êtes le « bio » carburant de mon moteur, mon point de repère ma source intarissable de bien être
...Merci du fond du cœur.

En fin, un grand merci à toutes et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicaces

A ma très chère Maman, à ma famille ;

À l'âme de ma défunte sœur « Fazia »

que DIEU l'accueille en son

vaste paradis.

Liste des Figures

Figure I.1	représente un ensemble de monomère formant un polymère.....	1
Figure I.2	Polymères naturels	2
Figure I.3	Polymères synthétiques	2
Figure I.4	Représentation schématique des différentes architectures macromoléculaires d'un polymère monodimensionnel: (A) Polymère linéaire, (B) polymère ramifié, (C) polymère réticulé	2
Figure I.5	polymérisation par adition du polythène.....	4
Figure I.6	polymérisation du plastic par condensation.....	5
Figure I.7	polymérisation par adition et condensation	5
Figure I.8	Schéma idéalisé de la structure cristalline orthorhombique du polyéthylène	8
Figure I.9	trois types de comportement contraint déformation des polymères.....	10
Figure. I.10	Courbe contrainte-déformation (essai de traction) d'un thermoplastique semi cristallin et représentation schématique d'une éprouvette de traction dans les différentes zones	13
Figure. I.11	influence de la vitesse et de la température sur le module	14
Figure II.1	Le Poly méthacrylate de méthyle (PMMA)	23
Figure II.3	brique de construction et jouets de Danois Lego	27
Figure II.4	sportyk2 et casque de moto fabriqué à base d'ABS	28
Figure II.5	Formule de l'ABS	30
Figure.II.6	Morphologie d'un ABS au MET	31
Figure.II.7	Les étapes du procédé d'injection-moulage des thermoplastiques.....	35
Figure.III.1	préparation des mélanges	40
Figure.III.2	pesage des mélanges	40
Figure.III.3	étuvage.....	40

Figure III.4	température d'étuvage.....	41
Figure III.5	la différence entre une éprouvette réalisé avec du PMMA étuvé (A) et une autre réalisé avec du PMMA non étuvé (B)	41
Figure III.6	l'extrusion des mélanges PMMA/ABS avec l'extrudeuse DELMONICO	42
Figure III.7	broyage des mélanges après extrusion	43
Figure. III.8	presse d'injection Arburg.....	44
FigureIII.9	Polisseuse	44
FigureIII.10	Machine de traction	45
FigureIII.11	Machine de compression	45
FigureIII.12	Micro Duromètre	46
Figure III.13	Eprouvette de traction à section circulaire	47
Figure. III.14	Propriétés mécaniques issues de la déformation d'un matériau soumis à une contrainte	48
Figure III.15	Machine de traction MTS Criterion (model 42)	49
Figure III.16	Eprouvette plate standard.....	50
Figure III.17	éprouvette de compression	50
Figure III.18	Machine de compression IBERTEST.....	53
Figure III.19	mesure de la micro dureté avec un duromètre ZWICK/ROELL.....	54
Figure.III.20	a) Microduromètre ; b) Empreinte Knoop.....	55
Figure IV.1	montre la courbe contrainte vraie σ_v en fonction de la déformation vraie ϵ_v en traction uni axiale d'une éprouvette réalisé avec du 100% PMMA.....	58
Figure IV.2	Courbe contrainte vraie- déformation vraie du polymère 100% PMMA cas de traction	58

FigureIV.2	Courbe contrainte déformation du polymère 100% PMMA cas de compression	58
FigureIV.3	Courbe contrainte vraie- déformation vraie du polymère 100% ABS (VG) cas de traction	59
Figure IV.4	Courbe contrainte vraie- déformation vraie du polymère 100% ABS (R) cas de traction	60
Figure IV.5	Superposition des courbes contrainte déformation des polymères 100% PMMA, 100% ABS (VG) et 100% ABS(R) cas de traction	61
Figure IV.6	Courbe contrainte déformation du polymère 100% ABS (VG) cas de compression	62
Figure IV.7	Superposition des courbes contrainte vraie-déformation vraie des polymères 100% PMMA ,100% ABS (R) et ABS (VG) cas de compression	63
Figure IV.8	contraints - déformations 10%ABS(R)	64
Figure IV.9	contraints - déformations 10%ABS(R)	64
Figure IV.10	contraints/déformation 20%ABS(R)	64
Figure IV .11	contraints/ déformation 20%ABS(R)	64
Figure IV.12	contraints/déformation 20%ABS(VG)	64
Figure IV. 13	contraints/ déformation 20%ABS(VG)	64
Figure IV.14	contraints/ déformation 30%ABS(R)	65
Figure IV.15	contraints/ déformation 30%ABS(R)	65
Figure IV.16	contraints/ déformation 40%ABS(R)	65
Figure IV.17	contraints/ déformation 40%ABS(R)	65
Figure IV.18:	contraints/ déformation 50%ABS(R)	65
Figure IV.19	contraints/ déformation 50%ABS(R)	65

Figure IV.20	contraints/deformation 50% ABS(Vg)	66
Figure IV.21	contraints/déformation 50% ABS(Vg)	66
Figure IV.22	Superposition des courbes des mélanges PMMA/ ABS recyclé en traction.....	66
Figure IV.23	Superposition des courbes des mélanges PMMA/ ABS vierge en traction.....	67
Figure IV.24	Superposition des courbes des mélanges PMMA/ l'ABS recyclé en compression.....	68
Figure IV.25	superposition des courbes des mélanges PMMA/ ABS vierge en compression.....	69
Figure IV.25	courbe du module de Yong des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS recyclé obtenue par compression.....	70
Figure IV.26	courbe du module de Yong des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS vierge obtenue par compression	71
Figure IV.27	Superposition des courbes E (%ABS) cas d'ABS (R) et ABS (VG) en compression.....	72
Figure IV.28	courbe du module de Yong des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS broyé, obtenue par essai de traction	73
Figure IV.29	courbe du module de Yong des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS vierge obtenue par essai de traction	74
Figure IV.30	Superposition des courbes E (%ABS) cas d'ABS (R) et ABS (VG) en traction.....	74

Figure IV.31	courbe de la contrainte à la limite élastique σ_e des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS vierge obtenue par essai de traction	75
Figure IV.32	courbe de la contrainte à la limite élastique σ_e des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS recyclé obtenue par essai de traction.....	76
Figure IV.33	Superposition des courbes σ_e (%ABS) cas d'ABS (R) et ABS (VG) en traction.....	77
Figure IV.34	courbe de la contrainte à la limite élastique σ_e des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS recyclé obtenue par essai de compression	78
Figure IV.35	courbe contrainte élastique σ_e en fonction du % d'ABS (VG) en compression.....	79
Figure IV.36	superposition des courbes contrainte à la limite élastique σ_e des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS recyclé et vierge obtenue par essai de compression...	80
Figure IV.37	courbe contrainte limite à la rupture σ_r en fonction du % ABS(VG) cas de traction	81
Figure IV.38	courbe contrainte limite à la rupture σ_r en fonction du % ABS(R) cas de traction.....	82
Figure IV.39	superposition des courbes contrainte à la limite élastique σ_r des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS recyclé et vierge obtenue par essai de traction	83
Figure IV.41	courbe deformation à la rupture ϵ_r % en fonction du % ABS(R) cas de traction.....	84
Figure IV.42	superposition des courbes déformations à la rupture ϵ_r en fonction du % d'ABS recyclé et vierge obtenue par essai de traction	85
Figure IV.43	courbe de la micro-dureté HK en fonction du %d'ABS recyclé.....	86
Figure IV.44	courbe de la micro-dureté HK en fonction du %d'ABS vierge	87
Figure IV.45	superposition des courbes de la micro-dureté des mélanges PMMA/ABS en fonction du pourcentage % d'ABS.....	88

Liste des tableaux

Tableau I.1	caractéristiques mécaniques de quelques polymères.....	11
Tableau II.1	Fiche technique du PMMA	26
Tableau II.2	Propriétés physiques de l'ABS.....	28
Tableau II.3	Monomères styrène et acrylonitrile, copolymère SAN et polybutadiène	29
Tableau III.1	Fiche technique du PMMA IG 840	39
Tableau IV.1	Variation du module de Yong des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS recyclé obtenue par compression	70
Tableau IV.2	variation du module de Yong des mélanges PMMA/ABS (VG) en fonction du % d'ABS vierge obtenue par compression.....	71
Tableau IV.3	valeurs du module de Young des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS vierge et recyclé obtenue par compression	72
Tableau IV.4	variation du module de Yong des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS recyclé en traction.....	73
Tableau IV.5	variation du module de Yong des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS vierge obtenue par essai de traction	73
Tableau IV.6	variation de la limite élastique σ_e des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS vierge obtenue par essai de traction	75
Tableau I.V.7	variation de la contrainte à la limite élastique σ_e des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS recyclé obtenue par essai de traction.....	76
Tableau IV.8	valeurs de la contrainte élastique σ_e des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS recyclé et vierge obtenue par essai de traction.....	77

Tableau IV.9	variation de la limite élastique σ_e des mélanges PMMA/ABS en fonction du %d'ABS recyclé obtenue par essai de compression	78
Tableau IV.10	variation de la limite élastique σ_e des mélanges PMMA/ABS en fonction du %d'ABS vierge obtenue par essai de compression.....	79
Tableau IV.11	valeurs de la contrainte élastique σ_e des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS recyclé et vierge obtenue par essai de compression.....	80
Tableau IV.1	variation de la contrainte à la rupture σ_r des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS recyclé obtenue par essai de traction	81
Tableau IV.13	courbe contrainte à la rupture σ_r en fonction du % ABS(R) cas de traction.....	82
Tableau IV.14	variation de la déformation à la rupture ϵ_r des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS recyclé obtenue par essai de traction.....	84
Tableau IV.15	variation de la déformation à la rupture ϵ_r des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS recyclé obtenue par essai de traction.....	84
Tableau IV.16	valeurs de la micro dureté HK à différents pourcentage proportionnelle d'ABS recyclé	86
Tableau IV.17:	valeurs de la micro dureté HK à différents pourcentage proportionnelle d'ABS vierge	87

Symboles

PMMA : Poly-méthacrylate de méthyle acrylique ;

ABS : Acrylonitrile Butadiène styrène ;

(R) : recyclé ;

(VG) : vierge ;

σ : contraint en MPa ;

ε : déformation ;

E : module de Young en MPa;

σ_e : contraint à la limite élastique en MPa ;

σ_r : contraint à la rupture en MPa ;

σ_v : Contrainte vraie MPa ;

ε_n : déformation nominal ;

ε_e : déformation élastique ;

ε_v : déformation vraie;

ASTM : American Society for Testing and Materials (essai normalisé) ;

PS : Polystyrène ;

SAN :	Styrène Acrylonitrile ;
SB :	Polystyrène Choc ;
PC :	polycarbonate ;
PVC :	Polychlorure de vinyle
PE :	Polyéthylène
PP :	Polypropylène
PEHD :	Polyéthylène haute densité
T_{df} :	Température de transition ductile-fragile ;
T_g :	Température de transition vitreuse ;
T_f :	Température de fusion ;
S₀ :	Section initiale de l'éprouvette. mm ²
F :	La force appliquée N
ΔL/L₀ :	Taux de déformation %
HK :	dureté KNOOP

SOMMAIRE

Remerciements	I
Dédicaces	II
Listes des figures	III
Liste des tableaux	VIII
Introduction générale	X

Chapitre I : Généralités sur les polymères

Introduction	1
I.) structure de la macromolécule :	2
II. : Elaboration des polymères	3
II.1. Polymérisation	3
II.1.A. Polymérisation par addition	3
II.1.B. Polycondensation	4
III : Classification des polymères	6
III.A) Selon leur origine.....	6
III.B) Selon la composition chimique de leur chaîne squelettique	6
III.C) Selon leur masse molaire moyenne	7
III.D) Selon leurs propriétés thermomécaniques	7
IV. 4) Principaux adjuvants	9
V) Comportement des polymères	9
V.1) Comportement contrainte déformation	10
V.2) Facteur influençant sur les propriétés mécaniques des polymères	11

SOMMAIRE

V.2.1) Masse molaire	12
V.2.2) Degré de cristallinité des polymères	13
V.2.3) Température	13
V.2.4. a) État vitreux $T < T_g$	14
V.2.4. b) État caoutchoutique $T_g < T < T_f$ ou T_d	14
V.2.4. c) État fluide $T_f < T < T_d$	15

Chapitre II : Mélanges de Polymères

1^{ère} partie : Généralités sur les mélanges de polymères

Introduction	16
II.1 : Intérêt des mélanges polymériques	16
II.1.1- Intérêt du mélange PMMA-ABS	16
II.2 : Aspect thermodynamique de la miscibilité	17
II.3 : Les méthodes d'obtention de mélanges	18
II.3.1 : Mélange à l'état fondu	18
II.3.2 : Mélange en solution	18
II.4 : Paramètres qui affectent le mélange	19
II.5 : Effet des conditions de mise en œuvre	20
II.6 : Principales propriétés des mélanges polymériques	21
II.6.1 : Propriétés thermiques	21
II.6.2 : Propriétés mécaniques	22
II.6.3: Propriétés physiques	22
II.7. : Utilisations des mélanges polymériques dans l'industrie	22
2^{ème} partie: Elaboration du mélange PMMA-ABS	
II.8 : Poly méthacrylate de méthyle (PMMA) : propriétés et comportement	23

SOMMAIRE

II.8.1 : Définition	23
II.8.2 : Les propriétés du méthacrylate de méthyle	24
II.8.2.A : Propriétés physiques	24
II.8.2.B : Propriétés mécaniques	24
II.8.3 : Dégradation du PMMA	24
II.8.4 : Description du produit utilisé : PMMA IG840.....	25
II.9 : Le polymère d'Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS)	26
II.9.1 : Définition.....	26
II.9.2 : Propriétés de l'ABS	28
II.9.3 : Synthèse de l'ABS.....	29
II.9.4 : Microstructure de l'ABS	30
II.9.5 : Mises en œuvre de l'ABS	31
II.10 : Extrusion des polymères.....	31
II.10.1 : Principe	31
II.10.2 : Matières extrudées.....	32
II.10.3 : Domaine d'application et techniques dérivées	32
II.11 : Le procédé d'injection – moulage	33
II.12: Conclusion	35

Chapitre III : techniques et procédures expérimentales

Introduction	37
III.1 : Les matériaux utilisés.....	38
III.1.A : le PMMA IG840.....	38
III.1.B : l'ABS HI121H	39
III.2: Elaboration des mélanges.....	39
III.2.1: Principe du travail.....	39

SOMMAIRE

III.2.2: Déroulement du travail	40
III.3 : Préparation du mélange utilisé	40
III.3.1 : l'étuvage	40
III.3.2: Etape de l'extrusion.....	42
III.3.3: le broyage de la matière extrudé.....	43
III.3.4: injection de la matière broyée	43
III.4: caractérisation de la matière obtenue	44
III.4.1: Principe de l'essai de traction	45
Le module d'Elasticité E (MPa)	46
La contrainte associée à la résistance à la rupture (σ_r)	50
La déformation à la rupture	50
III.4.2: Essai de compression	50
III.4.2.A: Principe de l'essai de compression	51
III.4.2.B : Courbes contrainte déformation	51
III.4.2.C : Contrainte et déformation nominale	52
III.4.2.E: Contrainte vraie-déformation vraie	53
III.5 : Conditions expérimentales des essais de compression.....	53
III.5.1: Machine de compression	54
III.6: Dureté Knoop	54
III.6.1: Le microduromètre	54
III.6.1: Conditions expérimentales des essais de dureté.....	55
III.7 : Conclusion.....	55

CHAPITRE IV : résultats et discussions

1^{ère} partie : comportement mécanique des mélanges

Introduction57

IV.1 : Caractérisation Mécanique57

IV.1.1.Courbes Contrainte-Déformation57

 Polymère 100% PMMA57

 Polymère 100% ABS59

 Polymère 100% ABS (VG)59

 Polymère 100% ABS (R)60

 La superposition des deux courbes 100% PMMA et 100%, ABS (VG) et 100% ABS(R) cas de traction61

 La superposition des deux courbes 100% PMMA et 100% ABS (R) et ABS (VG) cas de compression62

IV.2 : Comportement mécanique des copolymères à base de PMMA et ABS63

2^{ème} partie : caractéristiques mécaniques des mélanges

IV.3 : Tracée des courbes de caractéristiques mécanique des mélanges 70

IV.3.1 : Tracée de la courbe du Module de Yong en fonction du pourcentage % d'ABS cas de compression70

 ABS recyclé..... 70

 ABS vierge 71

 Superposition des courbes E (%ABS) cas d'ABS (R) et ABS (VG) en compression. 72

V.3.2 : Tracée de la courbe du Module de Yong en fonction du pourcentage % d'ABS en traction..... 73

 ABS (R) 73

 Superposition des courbes E (%ABS) cas d'ABS (R) et ABS (VG) en traction..... 74

IV.3.3: tracée de la courbe de la limite élastique σ_e des mélanges PMMA/ABS en fonction du pourcentage % d'ABS en traction 75

SOMMAIRE

ABS vierge	75
ABS recyclé.....	76
Superposition des courbes σ_e (%ABS) cas d'ABS (R) et ABS (VG) en traction	77
IV.3.4.2) Cas de compression	78
ABS (R)	78
ABS (VG)	79
Superposition des courbes σ_e (%ABS) cas d'ABS (R) et ABS (VG) en compression.....	80
IV.3.5) tracée de la courbe de la contrainte à la rupture σ_r des mélanges PMMA/ABS en fonction du pourcentage % d'ABS.....	81
IV.3.5.1) Cas de traction.....	81
ABS vierge	81
ABS recyclé.....	82
Superposition des courbes σ_r (%ABS) cas d'ABS (R) et ABS (VG) en traction.....	83
IV.3.6 : Tracé de la courbe de la déformation à la rupture σ_r des mélanges PMMA/ABS en fonction du pourcentage % d'ABS	83
IV.3.6.1 : Cas de traction.....	83
ABS (VG)	83
ABS (R)	84
Superposition des courbes ε_r (%ABS) cas d'ABS (R) et ABS (VG) en traction	85
IV.3.7) Tracé de la courbe de la micro-dureté des mélanges PMMA/ABS en fonction du pourcentage % d'ABS.....	86

SOMMAIRE

Superposition des courbes de la micro-dureté des mélanges PMMA/ABS en fonction du pourcentage % d'ABS	88
IV.4 : Conclusion	88
Conclusion générale	89
Bibliographie	90

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Résumé

Dans ce travail, nous exposerons le procédé de la caractérisation mécanique du mélange des deux polymères PMMA (matériau de base) et l'ABS (recyclé et vierge).

Ce procédé s'étale sur plusieurs étapes de mélange à différents pourcentages proportionnellement ordonnés, ou la composition du mélange a été modifiée sur une large gamme d'ABS d'un incrément de 10%.

En passant par l'étuvage, le broyage, l'extrusion, l'injection, et au final nous avons procédé à des essais mécaniques afin de caractériser nos matériaux, par le contrôle et la vérification de la contrainte élastique, le module d'élasticité et la déformation élastique, ainsi que la contrainte et la déformation à la rupture, pour finir par la micro-dureté.

Abstract

In this work, we will expose the process of the mechanical characterization of the mixture of the two polymers PMMA (base material) and ABS (recycled and virgin).

This method is spread over several mixing steps at different proportionally ordered percentages, or the composition of the mixture has been modified over a wide range of ABS by an increment of 10%.

By passing through the parboiling, grinding, extrusion, injection, and finally we proceeded to mechanical tests to characterize our materials, by the control and the verification of the elastic stress, the modulus of elasticity and elastic deformation, as well as stress and strain at break, and finally micro-hardness.

Introduction générale

Bien que le concept de mélanges de polymères ne soit pas nouveau, ces dernières années, l'intérêt pour les mélanges de polymères a à nouveau surgi en raison de la demande croissante de plastiques techniques et de polymères spéciaux. Lorsque les propriétés souhaitées pour une demande spécifique peuvent être réalisées par mélange physique de deux ou plusieurs polymères, il existe un avantage économique évident, et il devient plus évident quand il y a possibilité d'utiliser un polymère recyclé. Ceci est dû d'un côté au fait que le temps requis pour développer un nouveau mélange est généralement la moitié de celui requis pour développer de nouveaux matériaux plastiques, et à la disponibilité des polymères recyclés et leur coût minimal d'un autre côté. Ainsi, le concept de mélange physique de deux ou plusieurs polymères existants pour obtenir de nouveaux produits ou pour résoudre des problèmes suscite un intérêt généralisé et une utilisation commerciale.

La comparaison des propriétés mécaniques du PMMA et d'ABS montre que chacun de ces polymères a ses propres avantages qui ne sont pas disponibles pour l'autre, par exemple le PMMA a une résistance à la compression et une dureté supérieures tandis que l'ABS a une résistance aux chocs et une résistance à la rupture plus élevées.

Sur la base de ces notes, l'idée de faire des mélanges PMMA-ABS a été développée pour obtenir les avantages des deux systèmes combinés dans un nouveau mélange PMMA-ABS, et de bien se contenter des avantages de l'ABS recyclé. [1]

Le présent mémoire aura par conséquent comme ambition d'analyser ces mélanges et décrypter les différentes étapes de réalisation des éprouvettes qu'on a soigneusement élaborées à différents pourcentages en masse proportionnellement ordonnés, en passant par l'étuvage, l'extrusion, le broyage et l'injection. Au final une étude expérimentale qui se base sur des essais mécaniques (traction, compression, micro-dureté) afin de vérifier les résultats donnés a été faite.

Introduction générale

CHAPITRE I
GENERALITES SUR LES POLYMERES

Introduction

La science des polymères a pris naissance dans les grands laboratoires industriels du monde à partir du besoin de comprendre, de concevoir et de réaliser de nouveaux types de matériaux tels que les plastiques, les caoutchoucs, les adhésifs et les fibres [3].

Le mot polymère est d'origine grecque. Il est composé de deux mots : « polus » qui signifie « plusieurs », et « merus » qui signifie « partie ». Donc le polymère est composé de plusieurs parties. C'est pourquoi la science a défini les polymères pour de longues chaînes moléculaires d'une très grande masse moléculaire. C'est pour cette raison que le terme macromolécule est fréquemment utilisé pour désigner les matériaux polymériques.

De plus, *Un Polymère* est une substance organique ou inorganique, liquide ou solide à température ambiante, constitué d'enchaînement de motifs répétés (**Monomère**)⁽¹⁾ de macromolécule de même nature chimique composée principalement de Carbone et d'hydrogène (Figure I.1) et relié par des **liaisons covalentes**⁽³⁾. Un polymère peut être naturel dans le monde inerte ou vivant ou obtenu par une modification chimique d'un polymère naturel ou bien entièrement synthétisé par voie chimique ou enzymatique par une réaction de **polymérisation**.
[1]

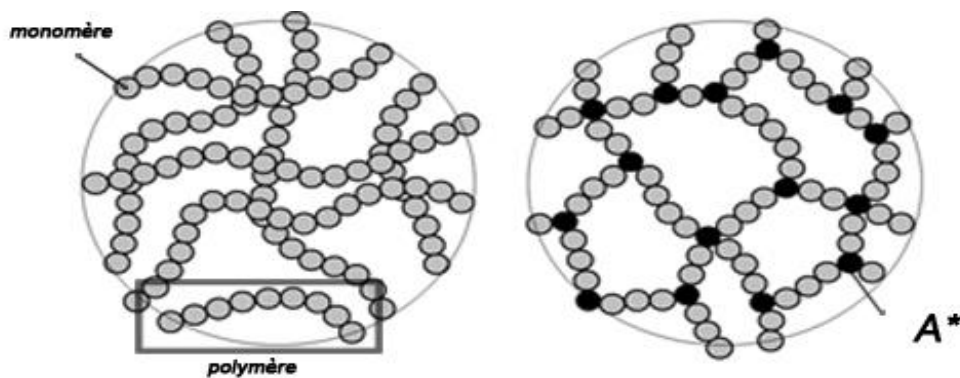


Figure I.1 : Représentations d'un ensemble de monomère formant un polymère

A* : Ce sont les monomères qui, en se liant les uns aux autres, forment des liens plus rigides



Figure I.2 : Polymères naturels

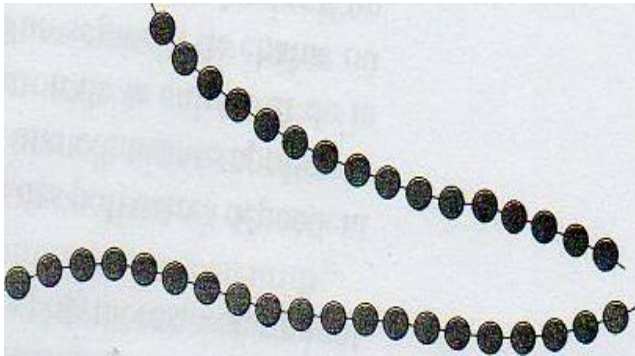
NEF



Figure I.3 : Polymères synthétiques

I) Structure de la macromolécule

La structure macromoléculaire est constituée de plusieurs monomères identiques dont le squelette est souvent à base de carbone, liés par des liaisons covalentes (. Les macromolécules peuvent se présenter sous forme monodimensionnelle, c'est-à-dire l'assemblage des monomères se développe en une seule direction de l'espace (Figure I-a) et peut éventuellement posséder des **ramifications** à faible longueur (Figure I -b). Dans cette dernière catégorie se trouve la majorité des polymères thermoplastiques : le Polyéthylène (PE), le Polypropylène (PP), le Polychlorure de Vinyle (PVC), les Polyamides (PA6, PA 6.6, PA 12), le Polycarbonate (PC), le Poly-méthacrylate de Méthyle (PMMA)...



(Figure I.4-A)



(FigureI.4-B)

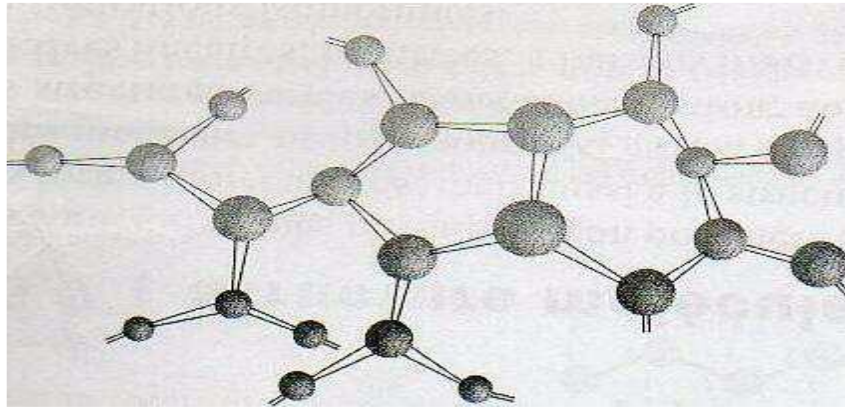


Figure I.4.C

Figure I.4 : Représentation schématique des différentes architectures macromoléculaires d'un polymère monodimensionnel: (A) Polymère linéaire, (B) polymère ramifié, (C) polymère réticulé [6]

II. Elaboration des polymères

II.1. Polymérisation

II.1.A. Polymérisation par addition

La polymérisation en chaîne nécessite la présence de centres actifs. Ceux-ci peuvent être créés soit sous l'influence d'une forme d'énergie externe (chaleur, radiations lumineuses ou ultraviolettes, rayonnements α , β , γ , neutrons), soit le plus souvent à partir d'un composé réactif ou amorceur, que l'on ajoute au milieu réactionnel, et qui donne naissance à une substance amorçant R^* possédant un centre actif. Les centres actifs peuvent être des radicaux, des anions et des cations. Ils sont capables de réagir avec des molécules monomères insaturées, puis d'assurer la croissance rapide du polymère par addition successive de monomères dans une réaction en chaîne. La croissance de la macromolécule ne s'arrête que lorsque le centre actif a disparu. Ainsi, une réaction de polymérisation comporte trois phases : amorçage, propagation, interruption..... [3]

L'exemple le plus courant de polymérisation en chaîne est fourni par les monomères de méthyle:

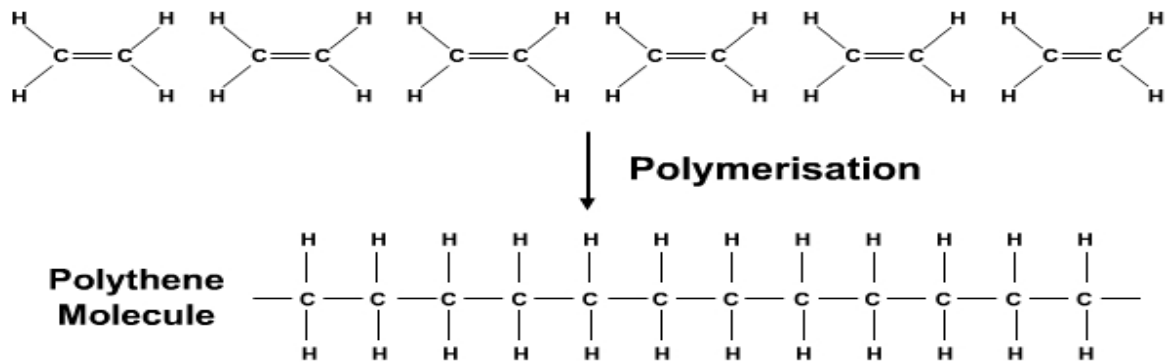


Figure I.5 : polymérisation par adition du polythène

II.1.B. Polycondensation

La polycondensation est la réaction entre corps à plusieurs fonctions tendant à former des macromolécules avec élimination d'un sous-produit, l'eau en général.

Les réactions de polycondensation ou de polymérisation par étapes consistent en l'union de molécules polyfonctionnelles (c'est-à-dire portant plusieurs fonctions chimique : acide, alcool, amine, etc.) par les réactions chimiques habituelles d'estérification, d'amidification, d'anhydrification, ... etc. Ces réactions peuvent se faire avec élimination (polycondensation proprement dite) ou sans élimination (polyaddition) de petites molécules. [3]

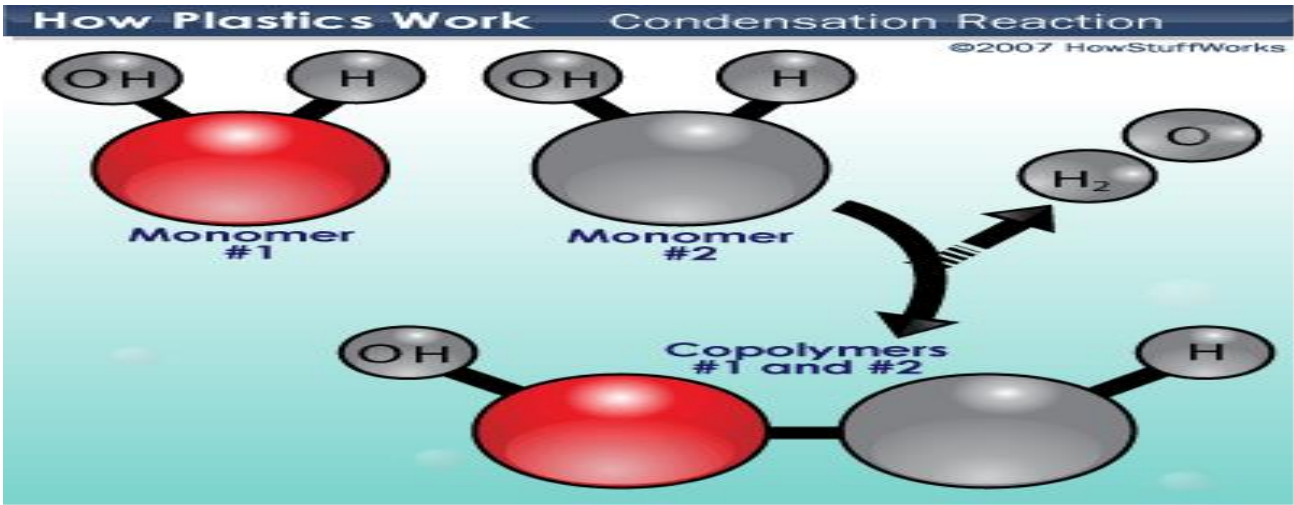


Figure I.6 : Polymérisation du plastic par condensation

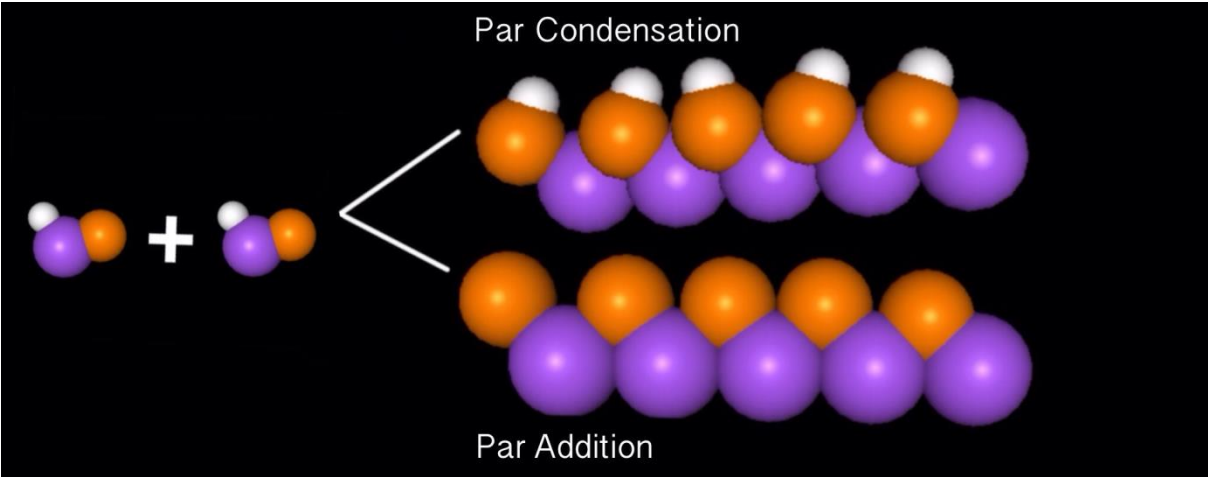


Figure I.7 : Polymérisation par adition et condensation

III) Classification des polymères :**III.A) Selon leur origine :**

Polymères naturels : bio polymères : ils sont issus du règne végétal où animal, leur importance est considérable. On peut cependant mentionner, dans cette catégorie, la famille des polysaccharides (cellulose, amidon...), le caoutchouc naturel, etc.

- **Polymères artificiels :** ces polymères sont obtenus par modification chimique d'un polymère naturel d'origine :
 - **Végétale :** la cellulose est extraite, entre autres, du bois et du coton puis transformée en esters de cellulose, éthers de cellulose, etc. ;
 - **Animale :** la caséine du lait mélangée au formaldéhyde donne la Galaltithe,
- **Polymères synthétiques :** polymères préparés par polymérisation de molécules monomères : polystyrène, polyésoprène synthétique, etc. [4]

III.B) Selon la composition chimique de leur chaîne squelettique :

Un polymère peut être :

- Organique ;
- Inorganique : les polymères inorganiques sont des polymères dont le squelette ne comporte pas de carbone ;
- Hybride : ce sont des polymères qui comprennent des composés organiques et inorganiques

Un polymère peut être aussi :

- Homo-chaines : un polymère homo-chaîne a une chaîne principale construite avec les atomes d'un seul élément ;
- Hétéro-chaines : un polymère Hétéro-chaines a une chaîne principale construite avec les atomes de plus d'un type d'élément ; (exemple de polymères Organique Homo-chaines : ABS)

III.C) Selon leur masse molaire moyenne:

Pour qu'un polymère ait des propriétés mécaniques intéressantes, il faut que sa **masse molaire moyenne** atteigne et dépasse une certaine valeur critique. Cette valeur dépend de la nature du polymère, mais elle est approximativement située entre 2 000 et 10 000 g/mol. Au-dessous de cette valeur, on parle d'**Oligomère**.

III.D) Selon leurs propriétés thermomécaniques :

- **Les polymères thermodurcissables** : ils durcissent de façon irréversible sous l'action de la chaleur et/ou par ajout d'un réactif, les liaisons covalentes se développent dans les trois dimensions, ce sont des polymères tridimensionnels..... [4]

- **Les Elastomères**..... [13]

Les élastomères sont des matières réticulées d'une manière incomplète. Le degré de réticulation⁽²⁾ est faible à la différence des thermodurcissables. Les pontages permettent aux macromolécules de revenir en place plus ou moins rapidement après une déformation sous contraintes. C'est la propriété fondamentale des élastomères.

- **Les polymères thermoplastiques Cristallins, semis-cristallins et Amorphes** :

Ces matériaux sont appelés plastiques parce qu'ils se plient, et thermoplastiques parce qu'ils changent leurs formes sous l'influence de la température et ils se moulent facilement lorsqu'on leur applique des températures élevées. Ces matériaux ont un point de fusion et ils sont répertoriés en deux classes : [5]

- **Les cristallins** : ont une structure bien ordonnée selon un motif précis qui caractérise l'assemblage du matériau polymérique. Le taux de cristallinité donne l'importance de la matière. EXEMPLE : PE, PET, PBT, PA.....
- **Les semis-cristallins** Pour certains thermoplastiques, il peut y avoir une certaine régularité dans la disposition des atomes mais la cristallisation ne peut jamais être totale, d'où l'appellation polymère semi-cristallin. Lorsque les chaînes de macromolécules sont disposées les unes parallèles aux autres, alors la régularité de la structure moléculaire peut exister.
- **Les amorphes** : ils ont des structures aléatoire, parce qu'ils n'ont pas motif précis. Leurs structure est similaire de celle des liquides. EXEMPLE : PVC, PS, PC, et les deux polymères thermoplastiques amorphes⁽⁴⁾ qui feront l'objet de notre étude le PMMA et l'ABS.

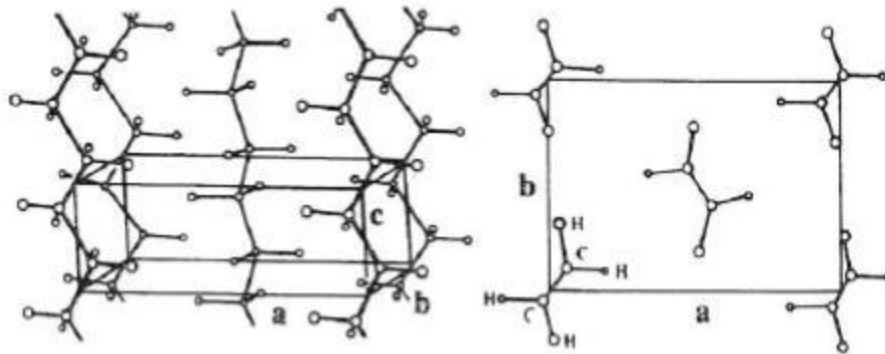


Figure I.8: Schéma idéalisé de la structure cristalline orthorhombique du polyéthylène

Un polymère thermoplastique possède une structure chimiquement linéaire. Il est composé de chaînes macromoléculaires liées entre elles par des forces de cohésion. Les chaînes peuvent être :

- **Linéaires et denses** : dans ce cas le polymère sera rigide, comme le PEHD (polyéthylène haute densité)

- **Ramifiées** : dans ce cas le polymère sera plus souple comme le PE BD (Polyéthylène basse densité)

Les thermoplastiques peuvent être fondus à plusieurs reprises et sont capables, soit de se dissoudre ou au moins d'être sensibles au gonflement sous l'action de nombreux solvants.

Ils sont rigides à température ambiante, ramollissent avec l'augmentation de la température puis finalement devient fluide. Les thermoplastiques amorphes sont semblables à du verre par rapport à la structure moléculaire et la transparence. Ils se distinguent des thermoplastiques semi cristallins, qui sont laiteux et opaques.

Quand un plastique est transparent comme le verre, on peut supposer qu'il s'agit d'un thermoplastique amorphe (mais attention il y a des exceptions, comme par exemple le Polyméthylpentène).

Les plastiques thermoplastiques constituent la plus grande proportion de matières utilisées dans le monde.

➤ Exemples de thermoplastiques semi-cristallins

- Polyamide (PA)
- Polyéthylène (PE)
- Polyéther cétone (PEK)

➤ Exemples de thermoplastiques amorphes

- Acrylonitrile styrène acrylate (ASA)
- Polycarbonate (PC)
- Polystyrène (PS)
- Polychlorure de vinyle (PVC)
- Polystyrène acrylonitrile (SAN)

Et les deux matériaux thermoplastiques qui font l'objet de notre travail,

- Poly méthacrylate de méthyle (PMMA)
- Acrylonitrile butadiène styrène (ABS)..... [8]

IV) Principaux adjuvants :

Malgré la grande variété des polymères, pour satisfaire les exigences de l'utilisation plusieurs additifs peuvent entrer dans la composition d'un polymère entraînant des variations importantes de leurs propriétés :

- **Plastifiants** : molécules à bas poids moléculaire, diminuent la force de liaison entre les chaînes, améliorent la souplesse d'un polymère rigide.
- **Lubrifiants** : facilitent les qualités de frottement, Ex. : poudre de téflon et talc
- **Stabilisants** : ralentissent la dégradation des polymères pendant la mise en œuvre ou l'utilisation en améliorant la résistance aux effets de chaleur, radiation et oxydation
- **Ignifugeants** : lors de combustion les polymères libèrent des gaz toxiques, les ignifugeants rendent plus difficile l'amorçage ou la propagation de la combustion
- **Fillers** : ajout de 5 à 60 % de filler permet de renforcer les propriétés mécaniques telles que la dureté, la résistance et la résistance à l'abrasion, diminuent le prix. Ex. noir de carbone ou carbonate de calcium.
- **Renforts**: pour des applications structurelles [8]

V) Comportement des polymères

Le comportement mécanique des polymères est caractérisé par une très grande diversité apparente. En effet, pour les mêmes conditions d'utilisation, et d'un point de vue technologique, on peut trouver des polymères qui sont, soit rigides fragiles, soit ductiles, soit caoutchoutiques.

Ainsi, dans la famille des polymères, on peut retrouver un grand nombre de types de comportement : viscoélastique, visco plastique, hyper élastique, durcissant, endommageable. Cette diversité se retrouve, pour un même polymère, si l'on fait varier certaines de ses caractéristiques, ou simplement ses conditions d'utilisation. Il peut être rigide fragile, ductile ou élastique etc.

Ceci ne veut pas dire que le comportement d'un polymère est variable, voire incontrôlé. Ce sont les paramètres contrôlant son comportement et les processus élémentaires envisageables qui sont nombreux.

V.1) Comportement contrainte déformation

La figure I.9 présente trois types de comportement contrainte déformation des matériaux polymères. [10]

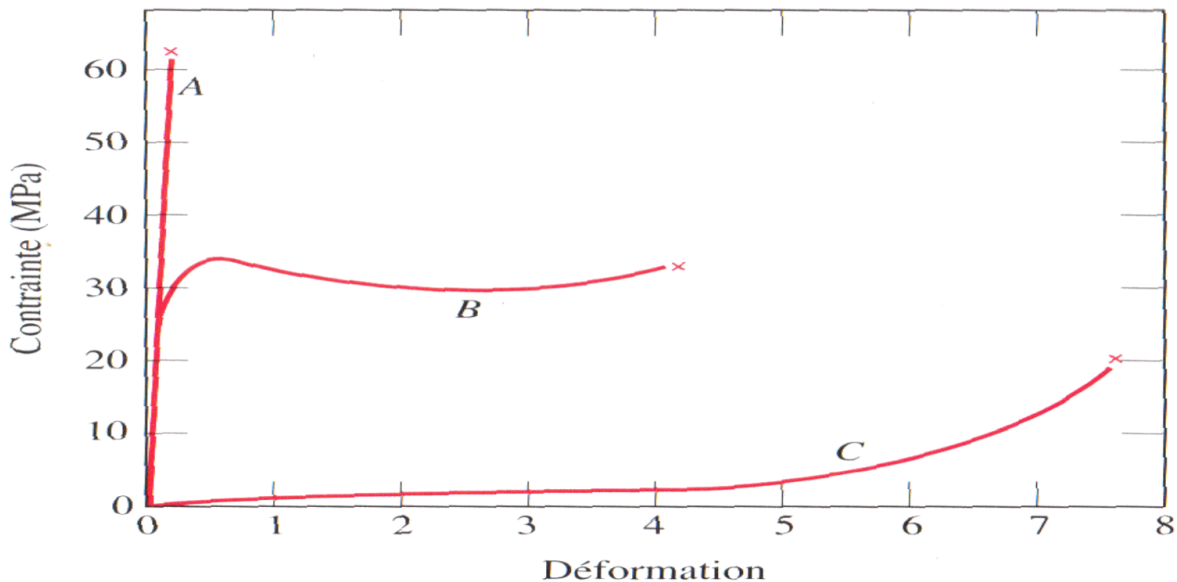


Figure I.9: trois types de comportement contrainte déformation des polymères.

La courbe A illustre le caractère en contrainte déformation d'un polymère fragile dont la déformation élastique s'accompagne d'une rupture.

La courbe B montre que le comportement des matériaux **plastiques** peut être semblable à celui de nombreux matériaux métalliques : la déformation élastique initiale est suivie d'une déformation plastique.

La courbe C correspond à une déformation élastique non linéaire analogue à celle des caoutchoucs que manifeste une classe de polymères appelés élastomères.

polymères	Masse volumique (g/cm ³)	Module d'Young (GPa)	Résistance à la traction (MPa)	Limite d'élasticité (MPa)	Allongement à la rupture (%)
PE (BD)	0.91-0.94	0.17-0.28	7-17	9-15	100-650
PE (HD)	0.95-0.97	0.55-1.10	20-37	25-35	10-1200
PVC	1.30-1.60	2.40-4.10	40-60	40-45	40-80
PTFE	2.15-2.20	0.40-0.55	17-35		200-400
PP	0.90-0.91	1.20-1.70	30-70	30-40	10-600
PS	1.04-1.05	2.30-3.30	35-70		1-3
PMMA	1.17-1.20	2.25-3.25	50-90	55-75	2-6
Phénol formaldéhyde	1.24-1.32	2.80-4.90	35-65		1.5-2.0
Nylon 6,6	1.13-1.15	1.60-3.80	75-95	45-85	15-300
PETP	1.29-1.40	2.80-4.10	50-70	60	10-300
PC	1.20	2.40	60-70	65	110-150
Polyesters	1.10-1.40	1.30-4.50	45-85		3-2300
Epoxydes	1.20-1.40	2.10-5.50	40-85		
PiP	0.91	0.002-0.1	10		

Tableau I.1 : caractéristiques mécaniques de quelques polymères.

V.2) Comportement mécanique des polymères

Les matériaux polymères sont formés d'unités structurales qui sont les motifs monomères liés entre eux par des liaisons intermoléculaires faibles appelées liaisons de "Van Der Waals". Ces liaisons assurent la cohésion d'un polymère surtout aux basses températures.

De plus, dans la plupart des polymères, principalement les thermoplastiques, qui font l'objet de notre étude, les mouvements relatifs de segments macromoléculaires devenant possibles dans un certain domaine d'état lié à la température (manifestations thermiquement activées), font naître des phénomènes dissipatifs traduits globalement par la viscoplasticité.

Par conséquent, d'un point de vue mécanique, un matériau polymère se caractérise par un comportement possédant simultanément trois composantes :

- Une composante élastique réversible, qui prédomine dans les basses températures, notamment en deçà de la température de transition vitreuse T_g , pour des vitesses de sollicitation élevées, ou pour des chargements très faibles, avec un module et une loi de comportement de Hooke : $\sigma = E \cdot \epsilon$;
- Une composante viscoplastique irréversible dépendant du temps, qui prévaut aux températures élevées et aux grandes vitesses de sollicitation. Dans ce cas, la contrainte est liée à la vitesse de déformation par la loi de Newton : $\sigma = \eta \cdot \dot{\epsilon}$;
- Une composante visqueuse ou élastoviscoplastique combinant les deux caractères précédents à un domaine de températures intermédiaires supérieures à la température de transition vitreuse. La déformation est non seulement fonction de la température, mais aussi du temps ou de la vitesse de déformation). Lorsque la contrainte est supprimé, il subsiste une déformation rémanente qui disparaît au cours du temps parfois lentement (viscoélasticité linéaire) ou tend vers une faible composante irréversible (élastoviscoplasticité).

Il est primordial de noter que parmi les différentes catégories de matériaux polymères, la viscoélasticité donne sa nature au comportement mécanique essentiellement pour les matières thermoplastiques. Ainsi, pour cette classe de polymères, l'effet viscoélastique peut-être très prononcé et se caractérise par sa forte dépendance de la température et du temps.

V.3) Différents processus de déformation :

La figure suivante montre la courbe contrainte-déformation (essai de traction) d'un thermoplastique semi cristallin et représentation schématique d'une éprouvette de traction
Dans les différentes zones ;

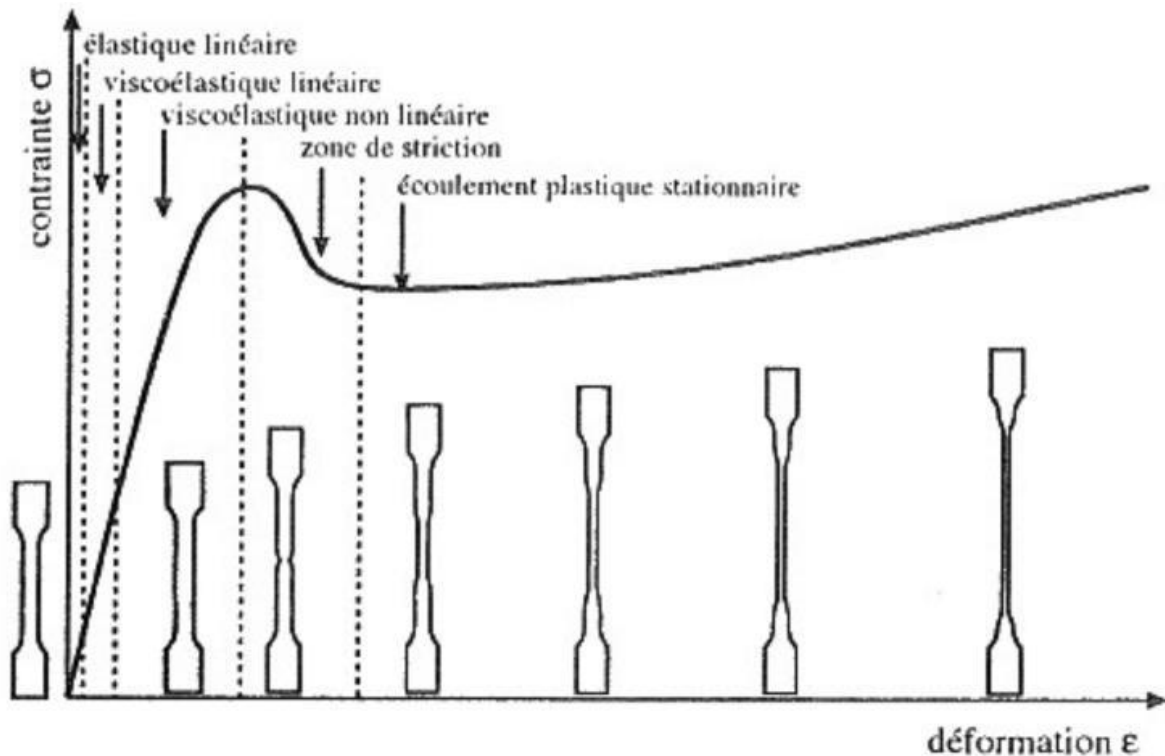


Figure. I.10 Courbe contrainte-déformation (essai de traction) d'un thermoplastique semi cristallin et représentation schématique d'une éprouvette de traction

Dans les différentes zones

VII) Facteur influençant sur les propriétés mécaniques des polymères

VII.A) Masse molaire

L'ampleur du module de Young d'élasticité ne semble pas varier directement en fonction de la masse molaire. Pourtant, on a déjà observé que la résistance à la traction de nombreux polymères augmente avec la masse molaire. En termes mathématique, la résistance à la traction (R_m) est en fonction de la masse molaire moyenne en nombre selon l'équation suivante : $R_m = R_{m\infty} - \frac{A}{\bar{M}_n}$ Ou $R_{m\infty}$ est la résistance à la traction pour une masse molaire infinie, et A, une constante. [10]

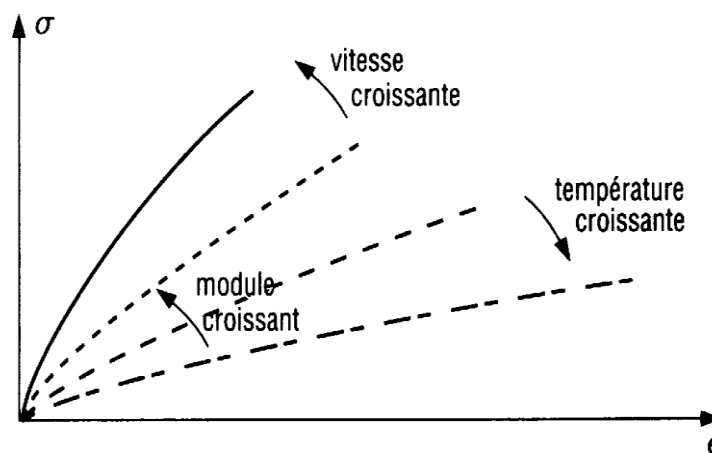
VII.B) Degré de cristallinité des polymères :

Le degré de cristallinité d'un polymère donné peut avoir une forte incidence sur ses propriétés mécaniques, puisqu'il exerce un effet sur l'étendue des forces de liaison intermoléculaires de faible intensité des liaisons de Van Der Waals importantes entre les segments adjacents d'une chaîne sont généralement présentes dans les régions cristallines où les chaînes moléculaires sont étroitement empilées en un arrangement ordonné et parallèle. Elles sont toutefois bien moins importantes dans les régions amorphes en raison du défaut d'alignement des chaînes. En conséquence, le module d'élasticité des polymères semi-cristallins augmente fortement avec le degré de cristallinité.

VII.C) Vitesse de chargement :

Une vitesse faible permettra, à température constante, une réorganisation macromoléculaire plus facile qu'à vitesse importante. Le module augmentera avec la vitesse alors que l'allongement possible diminuera (bris fragile) (fig. ci-dessous). Pour étudier le comportement

Figure. I.11 : influence de la vitesse et de la température sur le module

**VII.D) Température**

Les polymères sont des matériaux utilisés dans des applications variées, déterminées par leurs propriétés et leur mise en forme. Le comportement des polymères avec la température ou les sollicitations est ainsi déterminant. On observe différentes transitions dont l'étude est déterminante pour comprendre le comportement du matériau et choisir son domaine d'utilisation ;

VII.D.1) État vitreux $T < T_g$

Dans une phase cristalline, les molécules sont rangées et alignées. Elles n'ont en revanche aucun ordre dans une phase vitreuse : elles forment des pelotes enchevêtrées. La mobilité des molécules de la phase vitreuse est d'autant plus faible que la température est basse. Ce qui confère à tous les polymères en général une bonne rigidité, une bonne résistance mécanique, et une faible capacité de déformation ;

VII.D.2) État caoutchoutique $T_g < T < T_f$ ou T_d

Il est dû à la phase amorphe et existe dans la quasi-totalité des polymères. Il démarre généralement aux alentours de la température de transition vitreuse T_g et il est limité supérieurement par la température de fusion des zones cristallines si elles existent ou par la température de décomposition thermique T_d .

Dans cet état la phase cristalline n'évolue pas et sa structure reste identique à ce qu'elle était à $T < T_g$. La phase amorphe subit des changements : l'activation thermique provoque un déplacement des molécules, une rupture des liaisons de faibles énergies entre les molécules et une augmentation du volume du polymère. Il en résulte une grande facilité de mouvement des molécules ;

VII.D.3) État fluide $T_f < T < T_d$

Cet état ne concerne que les thermoplastiques. La phase cristalline n'existe plus car $T > T_f$, il n'y a plus qu'une phase amorphe. Toutes les molécules (celles provenant de la phase amorphe et celle provenant de la phase cristalline) forment des pelotes. Les nœuds d'enchevêtrement disparaissent par reptation, le matériau s'écoule comme un fluide. Le polymère est malléable : peu de résistance mécanique, peu rigide.

Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de connaître ce qu'est un polymère, sa masse molaire, sa structure moléculaire, et de savoir les différents modes et les types des polymères.

Aussi, ce chapitre nous a clarifiés sur la cristallinité, le traitement et l'application des polymères et leurs classifications.

(1) : Monomères : en chimie un monomère est une substance le plus souvent organique utilisé dans la synthèse des oligomères et des polymères au cours d'une réaction d'oligomérisation ou de polymérisation. Le mot monomère vient du grec monos "un seul ou une seule" et meros "partie".

(2) : Réticulation : formation d'un réseau tridimensionnelle par création de liaison entre les chaines macromoléculaires d'un polymère.

(3) : Liaison covalentes : Cette liaison se caractérise par la mise en commun d'électrons afin de saturer les couches électroniques externes de chacun des atomes de la molécule. Cette liaison permet par exemple d'expliquer l'association de deux atomes d'hydrogène pour former la molécule de di-hydrogène. La liaison covalente est également une liaison forte puisque elle permet de saturer la couche électronique externe des atomes.

(4) : Amorphe : un composé amorphe est un composé dans lequel les atomes ne respectent aucun ordre à moyenne et grande distance qui le distingue des composés cristallisés.

CHAPITRE II

Mélanges de Polymères

CHAPITRE II : Mélanges de Polymères**1^{ère} partie : généralités sur les mélanges de polymères****Introduction**

Certains des thermoplastiques utilisés sont sous forme de mélanges de polymères. Le mélange de deux polymères peut permettre la combinaison des propriétés de chacun des polymères, et ainsi obtenir un nouveau matériau possédant des propriétés intéressantes. [15]

II.1 : Intérêt des mélanges polymériques

Vue le problème des déchets actuellement en hausse, l'industrie favorise de plus en plus l'utilisation des mélanges polymériques. Ceux-ci sont obtenus, soit au moyen de synthèse de nouveaux monomères, soit en développant de nouvelles méthodes de polymérisation ou encore en mélangeant des polymères. Cette dernière s'est avérée la stratégie la plus convenable pour les raisons suivantes :

- L'opportunité de développer de nouvelles propriétés ou améliorer d'autres pour satisfaire les besoins du client.
- La capacité d'améliorer la transformation des matériaux avec peu de sacrifice dans les propriétés ;
- La capacité d'améliorer la transformation des matériaux qui sont autrement limités dans leur capacité d'être transformés en produits finis ;
- Permettre un développement plus rapide des matériaux polymériques modifiés pour satisfaire les besoins naissants en déviant l'étape de polymérisation de nouveaux monomères aux propriétés inconnues ;
- Développer des matériaux aux propriétés améliorées qui peuvent montrer un degré de synergisme, et générer rapidement et économiquement une gamme de matériaux de différentes propriétés chimiques, mécaniques ou autres ;
- Le recyclage des déchets industriels ou municipaux ; [16]

II.1.1- Intérêt du mélange PMMA-ABS

-L'intérêt de tester l'influence de l'ABS sur le PMMA est :

- La possibilité d'améliorer les Propriétés du PMMA ;
- L'intérêt économique en utilisant l'ABS recyclé ;
- L'intérêt de combiner la propriété de la résistance au choc de l'ABS avec la propriété de dureté du PMMA :
- L'amélioration de la raideur du mélange, ainsi que son allongement.

II.2 : Aspect thermodynamique de la miscibilité

A l'équilibre, un mélange de deux polymères amorphes peut exister sous forme d'une seule phase dans laquelle les segments des deux composants macromoléculaires sont intimement mélangés, ou sous forme de deux phases séparées constituées chacune essentiellement d'un polymère

La miscibilité de deux composants est une notion thermodynamique. L'énergie libre de mélange s'écrit :

$$\Delta G_m = \Delta H_m - T \Delta S_m \quad (1)$$

Où :

- ΔH_m : Enthalpie du mélange.
- T : Température absolue.
- ΔS_m : Entropie du mélange.

La condition nécessaire mais non suffisante pour que les composants du mélange soient miscibles est :

$$\Delta G_m < 0 \quad (2)$$

L'entropie de mélange, ΔS_m , est liée au nombre d'arrangements possibles des différents constituants. Celui-ci est d'autant plus faible que les composants du mélange sont de masses molaires élevées.

L'enthalpie de mélange, ΔH_m , est représentative de la nature exothermique ou endothermique du processus de mélange. Si les interactions entre composants du mélange sont répulsives, il faut fournir de l'énergie pour mélanger les polymères et donc, elle est positive. Par contre, elle peut être négative, si des interactions favorables entre les molécules mélangées existent.

Dans le cas des macromolécules, ΔS_m est positif, mais proche de zéro. Pour que le mélange soit miscible, il faut donc que ΔH_m soit négatif ou proche de zéro. [16]

II.3 : Les méthodes d'obtention de mélanges

La structure des mélanges de polymères est très étroitement liée à la technique utilisée.

Les techniques les plus utilisés pour l'obtention de mélanges sont : [16]

II.3.1 : Mélange à l'état fondu

C'est la méthode la plus répandue pour la préparation des mélanges polymériques dans l'industrie, et a été notre méthode d'élaboration du mélange PMMA-ABS. Les constituants du mélange sont mélangés à l'état fondu dans des extrudeuses ou des mélangeurs.

La température doit être supérieure à la température de transition vitreuse et même à la température de fusion, pour que la dispersion soit efficace (110°C-200°C pour notre cas) .

Cette méthode présente des inconvénients qui résident dans la consommation élevée d'énergie et les changements chimiques défavorables dans le mélange causés principalement par le cisaillement fort qui provoque une dégradation des polymères. [16]

II.3.2 : Mélange en solution

La préparation des mélanges polymériques en solution est réalisée à partir des solutions des deux polymères dans un même solvant, le mélange peut être récupéré à partir de la solution, par précipitation ou par évaporation du solvant.

Cette méthode est fréquemment utilisée dans des études académiques à l'échelle du laboratoire et moins appropriée à l'échelle industrielle vue le coût et la non disponibilité des solvants et la difficulté d'enlèvement d'immenses quantités de solvants organiques parfois toxiques. [16]

II.4 : Paramètres qui affectent le mélange

Un mélange de deux ou plusieurs polymères peut être homogène (1 phase) ou hétérogène (2 phases).

Deux polymères A et B sont miscibles quand ils donnent un mélange homogène ou non miscible quand ils donnent un mélange hétérogène.

Un polymère semi-cristallin A, qui contient des zones amorphes et cristallines, et un polymère amorphe B, peuvent éventuellement conduire à un mélange hétérogène constitué d'une phase homogène (A + B) amorphe et d'une phase A cristalline.

Certains mélanges de polymères peuvent être non miscibles ou miscibles selon les conditions de température et de concentration.

La comptabilisation de deux polymères non miscibles est l'action de stabiliser la dispersion d'une phase A dans une phase B (séquençage, greffage, introduction d'émulsifiants, réseaux interpénétrés...).

La notion de compatibilité repose plus sur l'homogénéité, au niveau macroscopique, des propriétés globales du matériau résultant du mélange, alors que la miscibilité implique forcément interpénétration des chaînes macromoléculaires au niveau microscopique. Dans une application industrielle, c'est effectivement la compatibilité qui sera un critère déterminant, puisqu'on cherchera à mettre en adéquation les propriétés d'un matériau -éventuellement multiphasé et un cahier des charges, sans forcément se soucier de la morphologie.

Quand deux polymères de natures différentes sont miscibles, on obtient un mélange homogène qui se comporte comme un seul polymère dont les caractéristiques dépendent de celles des polymères « parents ». Certaines d'entre elles répondent à des lois des mélanges diverses, dont on peut citer la plus simple : [12]

$$C_m = \Phi_a \cdot C_a + \Phi_b \cdot C_b \quad (3)$$

Avec

- C_m : caractéristique du mélange
- C_a : caractéristique du polymère A
- C_b : caractéristique du polymère B
- Φ_a : fraction volumique du polymère A
- Φ_b : fraction volumique du polymère B
- et bien sûr : $\Phi_a + \Phi_b = 1$

II.5 : Effet des conditions de mise en œuvre

Les conditions de mise en œuvre jouent un rôle crucial dans le développement de la morphologie des mélanges. Parmi ces conditions on cite l'équipement utilisé et les conditions de malaxage comme le temps, la température et la vitesse de cisaillement du mélange.

B.D. Favis a étudié l'influence du temps de mélange sur la taille de la phase dispersée, il a constaté que la réduction de la taille se faisait essentiellement au cours des deux premières minutes de mise en œuvre, puis après une vingtaine de minutes, une légère réduction de la taille de la phase dispersée est remarquée.

Théoriquement, le diamètre des particules de phase dispersée doit diminuer lorsque la vitesse de cisaillement γ augmente. Expérimentalement, il a été observé que le diamètre moyen des particules de la phase dispersée passe par un minimum quand la vitesse de cisaillement augmente. [16]

II.6 : Principales propriétés des mélanges polymériques

II.6.1 : Propriétés thermiques

Le principe de base est de définir les températures de transition vitreuses. La théorie de base désigne des cas très précis :

- **1^{er} cas** : la Tg de chaque polymère reste inchangée, les mélanges sont incompatibles.
- **2^{eme} cas** : la Tg de chaque polymère change de valeur et l'intervalle se réduit, Dans ce cas précis, on parle de semi-compatibilité ou bien de miscibilité partielle.
- **3^{em} cas** : on observe une seule **Tg** pour le mélange qui est compris entre les deux Tg. Dans ce cas on parle de la compatibilité à l'échelle microscopique ou bien compatibilité parfaite [43], et qui peut être calculée par :

Théorie de Fox (approximation de la loi de Couchmann à utiliser en priorité)

$$\frac{1}{T_g} = \frac{X_A}{T_{g_A}} + \frac{X_B}{T_{g_B}} \quad (4)$$

Où :

- X_A, X_B : fractions massiques des constituants

Théorie de Couchman

$$\text{Ln}T_g = \frac{X_A \Delta C_{p_A} + (1 - X_A) \Delta C_{p_B} \text{Ln}T_{g_B}}{X_A \Delta C_{p_A} + X_B \Delta C_{p_B}} \quad (5)$$

- $X_{A,B}$: fractions massiques des constituants
- ΔC_p : variation de Cp au passage de Tg (supposé indépendante de T)
- $T_{g_{A,B}}$: Tg des constituants

➤ Comparaison de la théorie avec l'expérience

L'utilisation des formules précédentes peut être illustrée à l'aide des travaux de Lasz [Lasz et al, 1980] qui ont comparé les Tg obtenues par les lois de Fox et Couchman avec leurs valeurs expérimentales. On voit que malgré sa grande simplicité, la loi de Fox donne des valeurs assez proches de la réalité [16].

II.6.2 : Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques sont liées à plusieurs facteurs :

- facteurs structuraux : la masse moléculaire, la composition chimique et la structure chimique.
- facteurs internes : la température de transformation, le système de refroidissement et la nature de l'environnement

II.6.3: Propriétés physiques

Les propriétés physiques des mélanges polymériques dépendent de la miscibilité, la composition et de la structure.

La transparence optique des mélanges dépend de la taille des particules et de l'indice de réfraction de tous les polymères. Selon cette définition, le manque de transparence ne donne aucune indication sur l'incompatibilité. [16]

II.7. : Utilisation des mélanges polymériques dans l'industrie

A l'origine, l'objectif des mélanges était d'améliorer une propriété donnée de la matrice, le plus souvent sa résistance aux chocs. Actuellement, de nouveaux enjeux se développent, tels que la réduction des coûts (dilution d'un polymère technique coûteux), la réponse à un cahier des charges donné avec le meilleur rapport propriétés/coût, la diminution du nombre de grades à produire et des stocks ou encore l'amélioration d'une propriété (processabilité, tenue thermique, résistance mécanique ou chimique). Les mélanges de polymères peuvent également constituer une voie intéressante pour le recyclage des polymères. En effet contrairement à d'autres méthodes de recyclage, elle ne nécessite pas la séparation complète des différents composants des déchets plastiques. De nos jours, les mélanges représentent quelques 30% de la consommation mondiale de matières plastiques. Cette part est en constante augmentation de près de 10% depuis plus de 10 ans. [16]

2^{ème} partie: élaboration du mélange PMMA-ABS

II.8 : Poly méthacrylate de méthyle (PMMA) : propriétés et comportement

II.8.1 : Définition

Le PMMA est un polymère thermoplastique hautement transparent, obtenu par polymérisation du monomère méthacrylate de méthyle (figure II.1). Le PMMA possède des qualités optiques exceptionnelles (transparence) et une très bonne tenue dans le temps ainsi qu'une rigidité élevée. Le PMMA est utilisé pour fabriquer des fibres optiques, des lentilles de contact, des "vitres" incassables de grandes dimensions et de fortes épaisseurs (verrières, aquariums...), des hublots, des phares, des radios, des T.V, des téléphones (cadres...), l'industrie automobile (feux arrière, position, plafonnier, cadres),... Il entre également dans la composition de certains lubrifiants et de peintures acryliques ([11] [6])

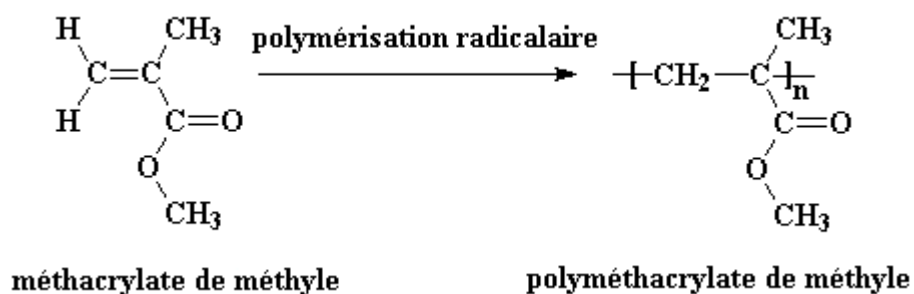


Figure II.1 Le Poly méthacrylate de méthyle (PMMA)

Le PMMA peut remplacer le polycarbonate (PC) dans des applications qui nécessitent davantage de transparence, de résistance aux UV et/ou de résistance aux rayures.

Le PMMA a été produit pour la première fois en 1933, par la société Röhm and Haas. Les plus grandes marques de PMMA sont Altuglas, Plexiglas et Diakon. [6]. Le Plexiglas étant le nom

de la marque déposé par Röhm et Haas pour les plaques de poly méthacrylate de méthyle. [13]

II.9 : Les propriétés du méthacrylate de méthyle

II.9.1 : Propriétés physiques

Le PMMA est connu pour ses propriétés optiques exceptionnelles. Ce polymère amorphe est d'une transparence remarquable (92 % de transmission lumineuse) dans le visible (380 à 780 nm).

Son indice de réfraction est de 1,491 (pour $\lambda = 587,6$ nm hélium). Ce qui en fait un matériau très utilisé dans le domaine optique. La température de ramollissement du PMMA est de 130 à 140 °C [2].

Le PMMA est hygroscopique et dans des conditions extrêmes, l'eau absorbée agira comme un plastifiant et modifiera les propriétés du matériau.

II.9.2 : Propriétés mécaniques

Le PMMA est un polymère amorphe dont la température de transition vitreuse est de 110 - 135 °C. C'est-à-dire, qu'à température ambiante, il est dur, rigide, cassant avec un faible allongement.

Le thermoformage n'est possible que si le module est suffisamment faible pour permettre une déformation aisée sous efforts modérés. Au-dessus de la température de transition vitreuse, le module d'un polymère amorphe chute considérablement et demeure pratiquement constant [3].

II.9.2 : Dégradation du PMMA

Le PMMA présente, par rapport aux isolants classiques, l'avantage d'avoir des propriétés mécaniques meilleures et une mouillabilité plus faible. Néanmoins, il présente l'inconvénient d'être plus vulnérable à l'action des décharges de surface qui provoquent sa dégradation.

La dégradation thermique du PMMA peut se décomposer en trois étapes suivant la température :

Coupure au niveau des liaisons faibles (obtenues lors de la polymérisation radicalaire lors d'une réaction de terminaison chaîne-chaîne) à $T < 200$ °C, dégradation des liaisons vinyloxy situées en queue de chaîne entre 200 et 300 °C et enfin une coupure aléatoire en milieu de chaîne de 300 à 400 °C . [14]

II.9.3 : Description du produit utilisé : PMMA IG840

Le présent tableau donne les différentes caractéristiques du matériau à partir duquel nous avons procédé, qui est le PMMA IG840 :

Nom :	LG PMMA IG840 : Polyméthacrylate de Méthyle Acrylique	
Disponibilité :	Asie Pacifique	Amérique latine
	Europe	Amérique du Nord
Caractéristiques	Usage général	
Les usages	Usage général	
Apparence	Transparent	
Formes	Pellets	
Méthodes de traitement	Extrusion	Moulage par injection
ASTM et ISO Propriétés		
Physique	Valeur nominale	Unité
Densité	1.18 g / cm ³	ASTM D792
Absorption d'eau (24 h)	0.30 %	ASTM D570
Mécanique	Valeur nominale	Unité
Résistance à la traction	66,7 MPa	ASTM D638
Elongation (rendement)	8.0 %	ASTM D638
Module de flexion	3300 MPa	ASTM D790
Résistance à la flexion (Rendement)	133 MPa	ASTM D790
Dureté	Valeur nominale	Unité
Dureté Rockwell	96	ASTM D785
Thermique	Valeur nominale	Unité
Déviation Température sous charge (1,8 MPa, recuite)	89,0 ° C	ASTM D648

Température de ramollissement Vicat	109 ° C	ASTM D1525 2
Optique	Valeur nominale	Unité
Indice de réfraction	1.490	ASTM D542
Transmittance (3000 pm)	92,0 %	ASTM D1003
Indice de Jaunissement (3,00 mm)	0,40 YI	ASTM D1925
Informations de traitement		
Injection		Valeur nominale
Température de séchage		70 - 80° C
Temps de séchage		4,0 à 6,0 heures
Température arrière		210-250° C
Moyen Température		210-250° C
avant Température		210-250° C
Température du moule		70-80 ° C
Pression d'injection		78,5 à 147 MPa

Tableau II.1 : Fiche technique du PMMA [17]

II.10 : Le polymère d'Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS) :

II.10.1 : Définition

Le matériau ABS est biphasé (structure complexe), fabriqué en mélangeant un **copolymère** (1) styrène-acrylonitrile (SAN, issu de styrène et d'acrylonitrile) avec un matériau élastomère (2) ou du SAN a été greffé sur le tronc de polybutadiène). Les nodules (phase en îlots) de la structure élastomère sont noyés dans la matrice. La phase élastomère apporte de la résistance aux chocs et de la souplesse qui sont les caractéristiques majeures de l'ABS.

Il se recycle facilement et peut se combiner avec les autres composés tyranniques (PS, SB, SAN).

En raison de ses bonnes qualités d'aspect de surface, de sa stabilité dimensionnelle et de son aptitude à la décoration (il est facile de le colorer), l'ABS est beaucoup utilisé pour des applications de capotage dans des secteurs, tels que l'électroménager, la téléphonie, le matériel

informatique et le jouet. Le fabricant de jouets **Danois Lego** l'utilise pour fabriquer ses briques de construction, C'est une des particularités qui leur confèrent d'ailleurs leur qualité.



Figure II.3 : Briques de construction et jouets de **Danois Lego**

C'est surtout le matériau privilégié pour les appareils électroménagers. Les carters d'aspirateurs et les corps de cafetières sont souvent en ABS. Dans ces cas, il s'agit le plus souvent de pièces injectées sous forme de fil, il est utilisé dans les imprimantes 3D.

L'ABS est également utilisé dans les industries nautiques pour la fabrication de petites embarcations légères de type annexe en raison de sa légèreté, rapidité de construction et par collage de deux feuilles thermoformées garnies de mousse au milieu. Ce qui permet de réaliser une embarcation totalement insubmersible (exemple des célèbres Sportyak 1 et 2 présents dans les ports de plaisance).

En raison de ces propriétés antichocs et de son aspect brut, l'ABS est la base de nombreuses répliques d'armes : fabrication de corps , ou de crosses des diverses répliques d'air soft.

Dans le domaine de l'automobile, la carrosserie de la **Citroën Méhari**, une voiture dérivée de la Dyane, est réalisée en ABS teinté dans la masse, et obtenue par thermoformage.

Encore de nos jours, le plastique en ABS est utilisé pour faire des carrosseries entières (voitures sans permis). Il est également utilisé pour la construction des calottes externes de casque de moto.



Figure II.4 : Sportyk2 et casque de motos fabriqués à base d'ABS

II.10.2 : Propriétés de l'ABS :

Propriétés physiques	
T⁰ transition vitreuse	105 à 115 C ⁰
Masse volumique	1,03-1.08 g.cm ⁻³

Tableau II.2 : Propriétés physiques de l'ABS

L'ABS est un polymère thermoplastique présentant une bonne tenue aux chocs, relativement rigide, léger et pouvant être moulé. Il appartient à la famille des polymères tyranniques. [4]

L'ABS est couramment utilisé pour sa mise en œuvre aisée, sa grande rigidité, sa résistance à la chaleur et sa résistance au choc. [15]

II.10.3 : Synthèse de l'ABS :

L'ABS est un mélange de polymères. Il est synthétisé par polymérisation du styrène et de l'acrylonitrile formant la matrice SAN (styrène-acrylonitrile), en présence du polybutadiène (tableau III.2).

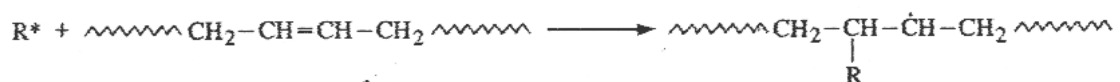
5) Les proportions peuvent varier de 15 à 35% d'acrylonitrile, de 5% à 30% de butadiène et de 40% à 60% de styrène (pourcentage massique). [15]

Styrène	Acrylonitrile	SAN	Polybutadiène (PB)
$\begin{array}{c} \text{CH}_2=\text{CH}_2 \\ \\ \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CH}_2=\text{CH}_2 \\ \\ \text{C}\equiv\text{N} \end{array}$	$\text{---} \left[\text{CH}_2-\text{CH} \right]_n \text{---} \left[\text{CH}_2-\text{CH} \right]_m \text{---}$ <div style="text-align: center;"> </div>	$\text{---} \left[\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2 \right]_n \text{---}$

Tableau II.3 : Monomères styrène et acrylonitrile, copolymère SAN et polybutadiène

Le SAN est un copolymère statistique du styrène et de l'acrylonitrile. Les particules élastomères de polybutadiène sont synthétisées par polymérisation en émulsion, ou par polymérisation en suspension, pendant laquelle le polybutadiène est réticulé à un taux bien défini et greffé au copolymère SAN. Le système de greffage est le même dans tous les procédés de polymérisation de l'ABS. Des radicaux sur le polybutadiène sont formés selon deux réactions: [15]

- addition à une liaison double C=C du polybutadiène



- abstraction d'un hydrogène



La dernière étape consiste au mélangeage du copolymère SAN, du polybutadiène greffé au SAN et de divers additifs (charges, colorants, agents anti UV, ignifugeants, etc.) à l'état fondu. [15]

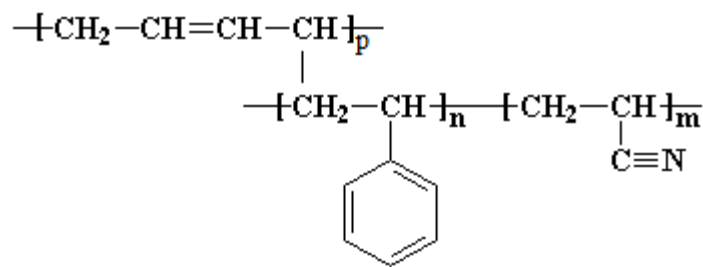


Figure II.5: Formule de l'ABS

II.10.4 : Microstructure de l'ABS :

L'ABS est un thermoplastique amorphe. Il est composé de plusieurs phases :

- une phase continue : la matrice vitreuse SAN (copolymère acrylonitrile-styrène) ;
- une phase discontinue : des nodules de polybutadiène greffés au SAN et dispersés dans la matrice, dont la taille peut varier entre 0,1 et 1 µm de diamètre. Le greffage permet d'assurer une compatibilité entre la matrice et la phase dispersée et de conférer au matériau de bonnes propriétés mécaniques, comme la résistance au choc.

En raison à l'immiscibilité entre les copolymères SAN et le polybutadiène, les chaînes PB se séparent des chaînes SAN et forment des domaines (nodules) de PB. Le greffage limite la démixtion à des tailles micrométriques et sous-micrométriques (figure 24). Ces nodules eux-mêmes peuvent être diphasiques. Cette morphologie complexe des ABS dépend des pourcentages en acrylonitrile, butadiène, styrène et des méthodes de synthèse. [15]

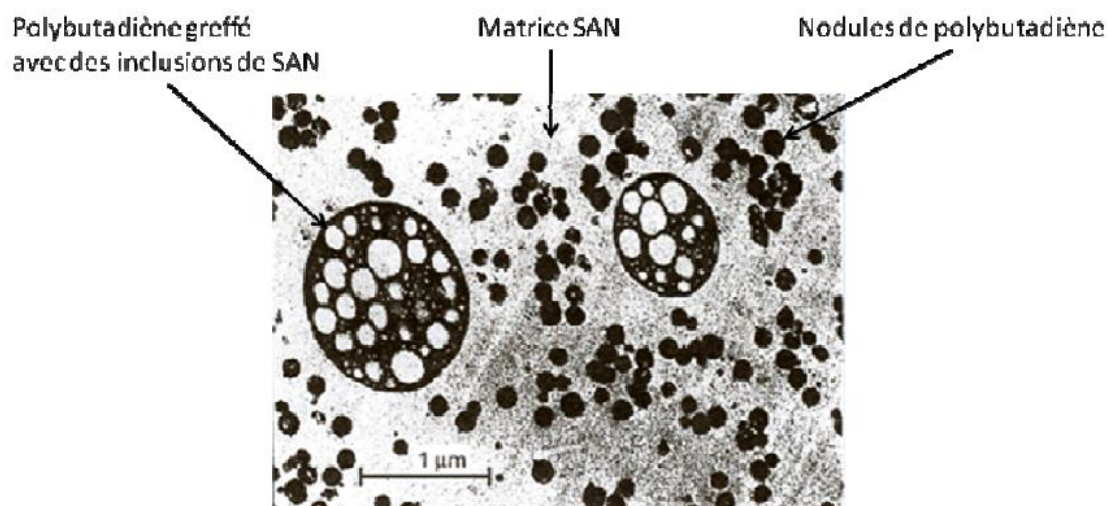


Figure.II.6 : Morphologie d'un ABS au MET

II.10.5 : Mises en œuvre de l'ABS

Avant toute mise en œuvre, l'ABS, légèrement hygroscopique, doit être étuvé à 80-85°C pendant 2 à 4h.

Les ABS peuvent se mettre en forme par extrusion, injection, thermoformage et par soufflage. En injection-moulage, les températures sont comprises entre 200°C et 300°C, température qui est fonction du grade de l'ABS (standard, chaleur,...). La température du moule doit être comprise entre 40°C et 70°C. En extrusion, la température de travail se situe dans la gamme 10°C – 250°C en sortie de filière. [15]

II.11 : Extrusion des polymères

II.11.1 : Principe

L'extrusion est une technique de transformation des matières thermoplastiques qui permet d'obtenir des objets finis ou semi œuvrés par un processus technologique continu. Cette technique, modifiée par l'adaptation d'un matériel approprié, permet d'élargir l'assortiment d'objets fabriqués et d'étendre la gamme de produits à partir des profilés rigides et souples à la fabrication des plaques, des feuilles, des films, des objets creux, des granulés plastifiés, des câbles multi fils et multicolores, des films et des feuilles stratifiées, des profilés expansés et allégés, etc.

La presque totalité des matières thermoplastiques est au moins extrudée une fois lors de sa préparation, mais seulement une partie en sort sous forme d'objets finis. L'extrusion est largement utilisée pour la fabrication des granulés et des compounds transformés ensuite par d'autres méthodes (exemple injection) et des produits semi œuvrés tels que : plaques, feuilles, films, tubes, etc.

L'extrudeuse est un système {vis + fourreau} qui a trois fonctions complémentaires :

- Alimentation à partir d'une trémie dans laquelle sont conservés les granulés,
- Compression des granulés, suivie de leur fluidification pour élévation de température,
- Extrusion au travers d'une filière, par élévation de la pression.

Ces trois fonctions sont réalisées en continu grâce à un profil adapté de la vis dont la rotation dans le fourreau transmet la majeure partie de l'énergie nécessaire au procédé. Ces différentes fonctions sont obtenues par la variation du pas du filet de la vis et /ou celle du diamètre du noyau de la vis.

II.11.2 : Matières extrudées

L'extrusion conduisant à la production en continu de profilés peut être appliquée en pratique à toutes les matières thermoplastiques.

L'adaptation et le choix du matériel concernent la vis c'est-à-dire sa longueur, son rapport de longueur au diamètre, son profil et son taux de compression, le système d'alimentation, le type d'extrudeuse (mono vis ou à deux vis), sa puissance, la filière, l'équipement de contrôle d'équipement de réception etc.

D'autre part, l'application des dérivés de l'extrusion, par exemple le gonflage du film ou l'extrusion des feuilles diminue la gamme des matières transformées et en même temps augmente les exigences concernant la machine et son équipement.

Il est difficile de donner à ce sujet des chiffres exacts.

II.11.3 : Domaine d'application et techniques dérivées

L'adaptation d'un équipement adéquat au matériel d'extrusion permet d'obtenir une large gamme de produits fabriqués à l'aide de cette machine. Par exemple, on utilise l'extrudeuse comme élément de base pour :

-la production des profilés, pleins ou tubulaires, rigides ou souples, calibrés ou non, enroulés ou coupés à la longueur demandée. Appartiennent à cet assortiment de production, les profilés multi couleurs, les profilés en matières expansées, les profilées composites dont une partie de la section est par exemple rigide et une autre souple ;

-la fabrication de plaques ou de feuilles en continu, composées d'une ou de plusieurs couches superposées par co-extrusion,

-le revêtement de fils, de câbles et de profilés, par exemple en métal,

-la production d'articles creux par extrusion - soufflage

- la production de fibres synthétiques à tisser, à retordre et à assembler,
- la production des films et de gaines minces par extrusion gonflage. Cette technique permet de fabriquer des films composés de plusieurs couches par co-extrusion,
- la préparation de granulés plastifiés et colorés à partir de poudres (mélanges-maîtres de coloration, compoundage),
- le dégazage, l'extraction d'impuretés volatiles, la polymérisation en continu pour l'industrie de fibres synthétiques.
- le revêtement par une ou plusieurs couches (par exemple hétérogènes), du papier et du carton pour l'industrie de l'emballage,
- d'autres applications spéciales comme : l'alimentation de calendres, le recyclage de déchets (film de PE, bouteilles de PVC, etc.), la préparation de mélange spéciaux.

II.12 : Le procédé d'injection – moulage

Depuis la fin des années 1800 et l'invention de la première machine d'injection par les frères John et Isiah Hyatt, le procédé d'injection-moulage n'a pas cessé d'être perfectionné pour devenir actuellement le procédé de fabrication de pièces plastiques le plus utilisé au monde. Il peut en effet s'adapter autant à l'élaboration de pièces imposantes (plusieurs kilogrammes) qu'à la production d'objets beaucoup plus petits, de l'ordre du gramme. L'avantage principal de ce procédé réside dans la possibilité d'obtenir des géométries de pièces très complexes tout en ayant des temps de cycle très rapides, permettant une production à très haute cadence.

Une machine d'injection-moulage comprend une unité de plastification, une unité de fermeture (dans laquelle est fixé le moule) et une unité de commande. Son principe de fonctionnement est le suivant : dans l'unité de plastification, la vis est placée dans un fourreau cylindrique, chauffé par conduction. Elle peut être entraînée soit en rotation, soit en translation. Lorsqu'elle tourne, sa fonction est tout d'abord de faire fondre des granulés de polymère, de les mélanger et de convoyer la matière à l'entrée de l'unité de fermeture.

Ensuite, elle agit comme un piston pour injecter la matière fondue dans un moule. Ce dernier, généralement réglé à une température proche de la température ambiante va permettre de figer le plus rapidement possible le polymère. C'est ce qui se passe lorsque l'on transforme des thermoplastiques. Pour les polymères thermodurcissables ou des élastomères, en général, le

mélange est tiède et injecté dans un moule chaud permettant l'initiation de la polymérisation. [18]

➤ II.12.1 : Les étapes du procédé :

Le procédé d'injection se déroule en cinq étapes :

Étape 1 (Cf. Figure 1a) : la phase de dosage. Les granulés de polymère tombent depuis une trémie dans un ensemble vis-fourreau. Ils sont ensuite fondus progressivement par actions conjuguées des colliers chauffant le fourreau, du cisaillement de la matière, provoqué par la rotation de la vis et la friction des granulés (entre eux et contre les parois du fourreau et de la vis). La matière fondue est alors convoyée en avant de la vis (via un clapet anti-retour), dans l'espace créé par le recul progressif de cette dernière lors de sa rotation.

Étape 2 (Cf. Figure 1b) : la phase d'injection. Grâce à un mouvement de translation de la vis, le polymère fondu est transféré du réservoir à un moule via des canaux. Ce mouvement de translation est généré par un vérin, à travers le clapet anti-retour qui, dans cette phase, empêche la matière de rebrousser chemin. [18]

Étape 3 (Cf. Figure 1c) : la phase de compactage. Le moule est composé de deux parties, une fixe et une mobile. Durant le compactage, le moule est maintenu sous pression pour rester fermé, pendant que la matière est compactée par la vis. Pendant cette phase, le polymère fondu continue à être injecté pour compenser le rétrécissement, ou retrait, de la matière qui refroidit.

Étape 4 (Cf. Figure 1d) : la phase de refroidissement. Lorsque le polymère est entièrement figé au niveau du ou des seuils d'injection, il n'est plus nécessaire d'appliquer une pression de maintien, et la pièce continue de se refroidir jusqu'à ce qu'elle soit complètement solidifiée. La vis reprend son cycle de rotation à l'étape 1.

Étape 5 (Cf. Figure 1d) : la phase d'éjection. Le moule s'ouvre, et la pièce formée est éjectée du moule.

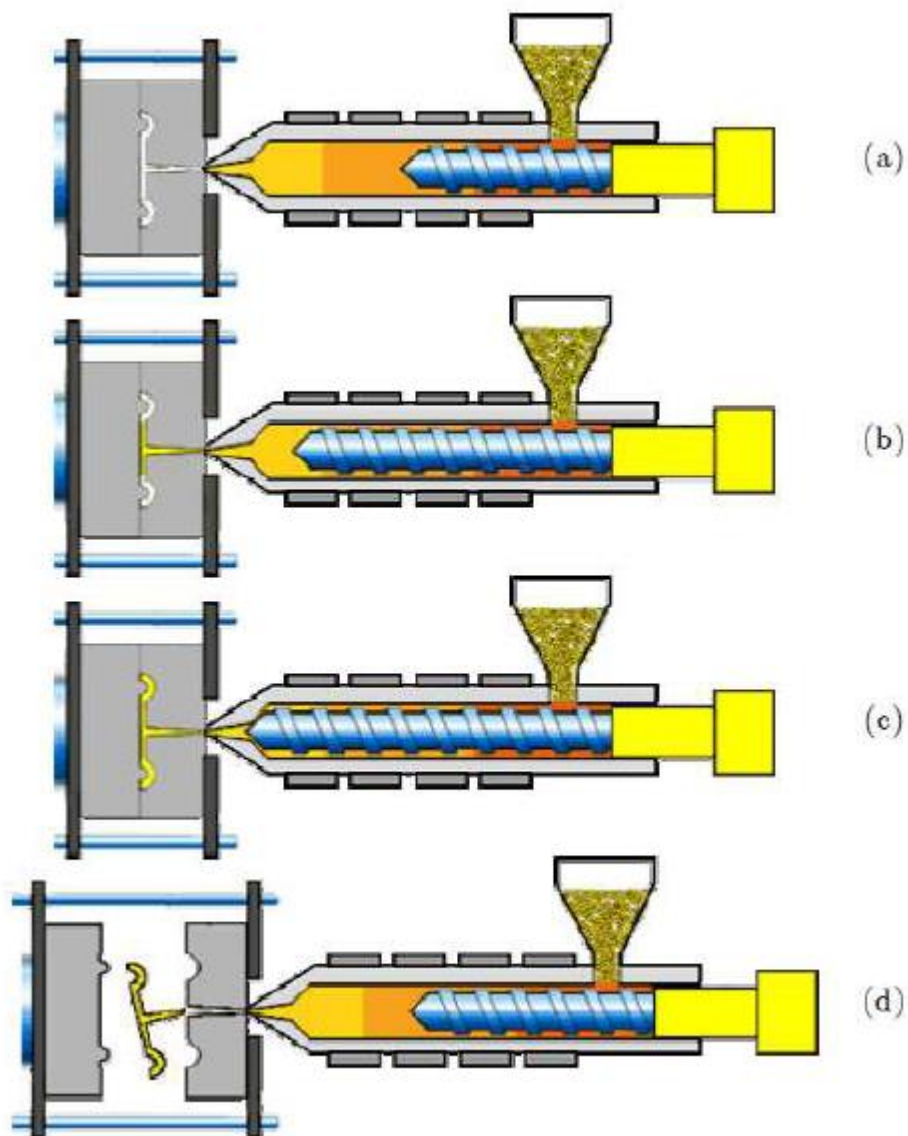


Figure.II.7 : Les étapes du procédé d'injection-moulage des thermoplastiques

II.13: Conclusion

Ce chapitre nous a permis de définir la notion de mélanges polymériques et leurs intérêts, ainsi que de définir les différentes caractéristiques de nos matériaux utilisés (PMMA et ABS). Et de se familiariser avec les méthodes d'élaboration des mélanges, voir extrusion et injection.

CHAPITRE III

Techniques et procédures expérimentales

Chapitre III : Techniques et procédures expérimentales

Introduction

Toute étude de matériaux nécessite une caractérisation qui définit ses propriétés ainsi que le domaine et les conditions de son utilisation.

Cependant, on trouve divers caractérisations : Caractérisation physique, chimique, thermomécanique, mécanique.....etc.

Notre étude se base sur la caractérisation mécanique du mélange de polymères PMMA-ABS.

Les propriétés mécaniques des polymères sont d'un grand intérêt puisqu'elles conditionnent non seulement les problèmes de mise en forme des matériaux mais également leur comportement en service dans des applications industrielles extrêmement diversifiées. Le choix du matériau d'une pièce industrielle dépendra de propriétés mécaniques, résistance, dureté, ductilité etc. Il est donc nécessaire de mesurer ces grandeurs physiques par des essais mécaniques.

Pour caractériser notre mélange on a réalisé trois essais mécaniques : essai de traction, essai de compression et l'essai de micro dureté que nous allons définir au courant de ce chapitre, nous donnerons aussi un aperçu des différentes techniques et dispositifs utilisés.

III.1 : Les matériaux utilisés :

Le plexiglas (PMMA), de nom chimique : polyméthacrylate de méthyle, est une matière plastique du groupe des résines acryliques, inventé par Bradel à la fin du 18ème siècle. Ce polymère est un thermoplastique transparent issu du monomère: méthacrylate de méthyle (PMMA).

III.1.A : le PMMA IG840 :

Nom :	LG PMMAIG840 : Polyméthacrylate de Méthyle Acrylique	
Disponibilité :	Asie Pacifique	Amérique latine
	Europe	Amérique du Nord
Caractéristiques	Usage générale	
Les usages	Usage générale	
Apparence	Transparent	
Formes	pellets	
Méthodes de traitement	Extrusion	Moulage par injection
ASTM et ISO Propriétés		
Physique	Valeur nominale	Unité
densité	1.18 g / cm ³	ASTM D792
Absorption d'eau (24 h)	0.30 %	ASTM D570
Mécanique	Valeur nominale	Unité
Résistance à la traction	66,7 MPa	ASTM D638
Elongation (rendement)	8.0 %	ASTM D638
Module de flexion	3300 MPa	ASTM D790
Résistance à la flexion (Rendement)	133 MPa	ASTM D790
Dureté	Valeur nominale	Unité
Dureté Rockwell	96	ASTM D785
Thermique	Valeur nominale	Unité

Déviati <u>o</u> n Temp <u>é</u> rature sous charge (1,8 MPa, recuite)	89,0 ° C	ASTM D648
Temp <u>é</u> rature de ramollissement Vicat	109 ° C	ASTM D1525 2
Optique	Valeur nominale	Unité
Indice de réfraction	1.490	ASTM D542
Transmittance (3000 pm)	92,0 %	ASTM D1003
Indice de Jaunissement (3,00 mm)	0,40 YI	ASTM D1925
Informations de traitement		
Injection		Valeur nominale
Temp <u>é</u> rature de séchage		70 - 80° C
Temps de séchage		4,0 à 6,0 heures
Temp <u>é</u> rature arri <u>è</u> re		210-250° C
Moyen Temp <u>é</u> rature		210-250° C
avant Temp <u>é</u> rature		210-250° C
Temp <u>é</u> rature du moule		70-80 ° C
Pression d'injection		78,5 à 147 MPa

Tableau III.1 : Fiche technique du PMMA IG 840 [17]

II.1.B : l'ABS HI121H :

L'acrylonitrile butadiène styrène ou ABS est un polymère thermoplastique présentant une bonne tenue aux chocs, résistant aux contraintes mécaniques et thermiques relativement rigide, léger et pouvant être moulé, présentant un bilan écologique positif. Il appartient à la famille des polymères styréniques.

III.2: Elaboration des mélanges

III.2.1: Principe du travail

Deux types de mélanges sont élaborés dans le but d'étudier leurs caractéristiques, le premier est un mélange de polymères à base de PMMA et d'ABS recyclés, le second est un mélange de polymères à base de PMMA et d'ABS vierge. Nous avons effectué un mélange à chaud

(extrusion). Après que les mélanges deviennent homogènes, nous les injectons dans une presse à injection afin d'obtenir des éprouvettes aux normes souhaitées.

III.2.2: Déroulement du travail

Ce travail a été réalisé au niveau de l'Entreprise Nationale de Plastique et de Caoutchouc, Filiale SISCOPLAST de Draa-EL-Mizan. Avec l'apport des ingénieurs et des opérateurs qualifiés de la société qui nous ont assurés l'élaboration de nos éprouvettes, les différentes étapes suivies pour la réalisation de ce travail sont présentées ci-dessous:

III.3 : Préparation du mélange utilisé

Dans cette étape à l'aide d'une balance électronique nous avons pesé des quantités d'ABS et du PMMA de sorte à avoir un mélange pesant 1000 g. On les a mélangés, tout en ajoutant des pourcentages en masse différents d'ABS au PMMA.

III.3.1 : L'étuvage :

Ce procédé sert au séchage de la matière. Pendant cette étape nous avons étuvé ces recettes à une température de 75⁰ C pendant 6 à 8 h. comme le montre les figures suivantes :



Fig.III.1 : Préparation des mélanges



Fig.III.2 : Pesage des mélanges



Fig.III.3 : Etuvage



Figu.III.4 : Température d'étuvage

REMARQUE : l'étuvage est un procédé indispensable. Ça aide à avoir un produit homogène, dont les bulles d'air ne se présentent pas. Ce que nous avons prouvé durant notre travail, et que les figure suivante montre :



(A)



(B)



(C)

Figure III.5 : Eprouvettes réalisés avec du PMMA étuvé (A) et non étuvé (B)

III.3.2: L'Etape de l'extrusion :

Les mélanges passent par l'extrudeuse dans le but d'avoir la même répartition de la phase minoritaire taux d'ABS dans celle de la phase majoritaire taux de PMMA. Les mélanges sortent de l'extrudeuse sous forme de longues tiges qui s'appellent gains (profilés).

On distingue quatre zones différentes de température dans l'extrudeuse qui change d'une façon croissante en se rapprochant de la zone de sortie de la matière.

Paramètres d'extrusion:

- Cadence (vitesse d'étirage) = 15.34 m/min.
- Débit : 92g/min.

Le nom de l'extrudeuse : Delmonico, les paramètres utilisés :

Les températures : 185 C⁰, 190 C⁰, 200C⁰ et 210C⁰

-la force de fermeture: 700 KN

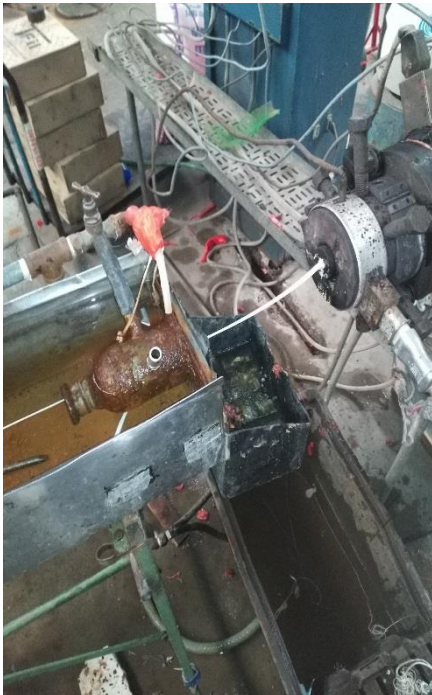


Figure III.6 : L'extrusion des mélanges PMMA/ABS avec l'extrudeuse DELMONICO

III.3.3: Le broyage de la matière extrudé : dans cette étape, on a mis la matière obtenue par extrusion sous forme de profilés, dans un broyeur qui la fait sortir sous forme de granulés prêt à être injectés.



Figure III.7 : Broyage des mélanges après extrusion

III.3.4: L'Injection de la matière broyée :

La machine d'injection-moulage **Arburg** comprend une unité de plastification, une unité de fermeture (dans laquelle est fixé le moule) et une unité de commande. Son principe de fonctionnement est le suivant : Dans l'unité de plastification, la vis est placée dans un fourreau cylindrique, chauffé par conduction. Elle est entraînée en rotation. Lorsqu'elle tourne, sa fonction est tout d'abord de faire fondre des granulés de polymère, de les mélanger et de convoier la matière à l'entrée de l'unité de fermeture.

Ensuite, elle agit comme un piston pour injecter la matière fondue dans un moule. Ce dernier, généralement réglé à une température proche de la température ambiante va permettre de figer le plus rapidement possible le polymère.



Figure. III.8 : presse d'injection Arburg

III.3.5: Le Polissage: c'est un procédé de finition. Nous l'avons réalisé avant de soumettre nos éprouvettes à l'essai de compression, afin d'avoir des éprouvettes uniformes.



FigureIII.9 : Polisseuse

III.4: Caractérisation de la matière obtenue

• La caractérisation des matériaux c'est la quantification des propriétés :

-Mécaniques ;

-Thermiques :

-Physiques...etc.

• Déterminer les données à utiliser en conception

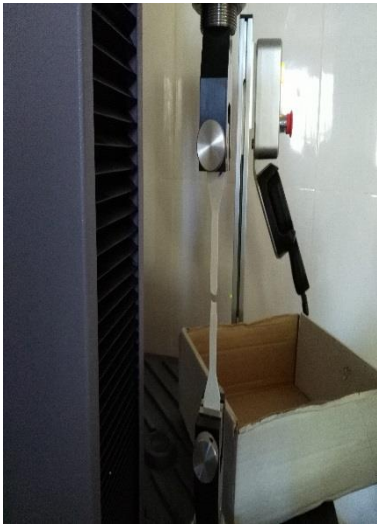
- Est-ce qu'une pièce va casser?

- Est-ce qu'une pièce va se déformer?

• Vérifier l'effet des traitements effectués.

Le présent travail s'est porté sur la caractérisation mécanique de notre mélange. Après avoir réalisé nos éprouvettes, nous leur avons appliqué une série d'essais mécanique qui se résume en : essai de traction, essai de compression, et l'essai de micro dureté.

Moyennant ces essais, nous avons caractérisé nos différents mélanges de PMMA-ABS.



FigureIII.10 : Machine de traction



FigureIII.11 : Machine de compression



Figure III.12 Micro Duromètre

III.4.1: Principe de l'essai de traction :

L'essai de traction permet de mesurer le degré de résistance à la rupture d'un matériau. Expérimentalement cet essai consiste à placer un petit échantillon du matériau à étudier entre les mors d'une machine de traction qui tire sur lui jusqu'à sa rupture. La cellule de la machine enregistre l'allongement ΔL et la force F appliquée, que l'on convertit ensuite en contrainte σ et déformation ϵ selon des lois bien définies : [IV.1]

- la contrainte associée à la force F est définie par :

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

Avec S la section de l'éprouvette. Cette grandeur σ est à distinguer de la contrainte nominale (ou conventionnelle) σ_n liée à la structure. La contrainte nominale est le rapport entre la force F et la surface initiale de l'échantillon S_0 :

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

- la déformation ϵ_v dite déformation vraie, est égale au cumul des déformations élémentaires :

$$\delta\epsilon = \frac{\delta l}{l}$$

Soit :

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$$

Cette grandeur ε est à distinguer de la déformation nominale liée à la structure. La déformation nominale ε_n (ou allongement relatif) est le rapport entre l'allongement et la longueur initiale l_0 :

$$\varepsilon_n = \Delta l / l_0$$

l_0 désigne la longueur initiale de l'éprouvette (il s'agit de la longueur entre congés raccordant le corps de l'éprouvette à ses têtes). On peut aussi bien considérer une longueur de base espérée initialement sur le corps de cette éprouvette. l_0 est également appelée longueur utile de l'éprouvette, longueur mesurée par l'extensomètre.

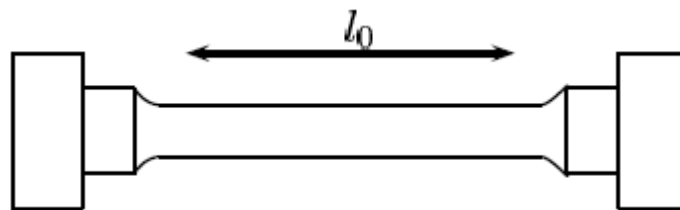


Figure III.13: Eprouvette de traction à section circulaire

Les relations permettant de passer des grandeurs nominales aux grandeurs vraies s'écrivent telle que, l'hypothèse d'une déformation sans variation de volume :

La déformation élastique est supposée homogène dans la longueur utile, c'est à dire que la déformation se répartit uniformément dans la zone délimitée par l_0 .

$$\sigma_v = \sigma_n(1 + \varepsilon_n) \dots \dots \dots (1)$$

$$\varepsilon_v = \ln(1 + \varepsilon_n) \dots \dots \dots (2)$$

La machine de traction, nous donne des résultats, de la force (KN) en fonction de l'allongement ΔL , la course (mm). Nous allons transformer ces résultats de la machine, en

divisant la force (F) sur la surface initiale (S₀) pour obtenir de la contrainte σ (MPa) et en divisant l'allongement (ΔL) par la longueur initiale (L₀) pour avoir la déformation ($\epsilon\%$). On calcule par la suite les contraintes vraies, et les déformations vraies données par les lois précédentes. Toutes ces opérations sont effectuées à l'aide de Microsoft office Excel 2013, la courbe schématique est représentée dans la figure III.2.

On déduit, à partir de la courbe contrainte-déformation de la (figure III.2) les caractéristiques mécaniques suivantes :

- **Le module d'Elasticité E (MPa)** : C'est le module tangent, c'est-à-dire la pente de la tangente ($E=d\sigma/d\xi$), déterminé, à partir de la tangente à l'origine de la courbe contrainte-déformation dans le domaine élastique de la courbe,
- **La contrainte associée à la résistance à la rupture (σ_r)** : C'est le quotient de la force appliquée au moment de la rupture par la section initiale
- **La déformation à la rupture (ϵ_r)** c'est le rapport de la course finale au moment de la rupture par la longueur initiale (L₀)

Les propriétés mécaniques d'un polymère semi-cristallin sont couramment déterminées à partir d'un essai de traction (uni axiale) dont la courbe schématique est représentée dans la **figure III.14.A**

➤ **Limite d'élasticité :**

La figure III.14.B représente une courbe de traction nominale obtenue sur un matériau solide. Cette courbe relie la contrainte nominale $\sigma_n = F/S_0$, où F est la force mesurée et S₀ la section initiale de l'éprouvette, à la déformation nominale $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$, où Δl est l'allongement de l'éprouvette et l_0 sa longueur initiale. Les points caractéristiques de cette courbe sont [20] :

- la limite d'élasticité σ_e , marquant le début de la déformation plastique (irréversible) du matériau.
- la limite d'élasticité conventionnelle $\sigma_{0,2\%}$, donnant la contrainte nominale nécessaire pour une déformation plastique de 0,2% (on utilise également avec la même convention la quantité $\sigma_{0,1\%}$ pour des matériaux peu ductiles, c'est à-dire dont la déformation plastique est faible avant la rupture) [20]

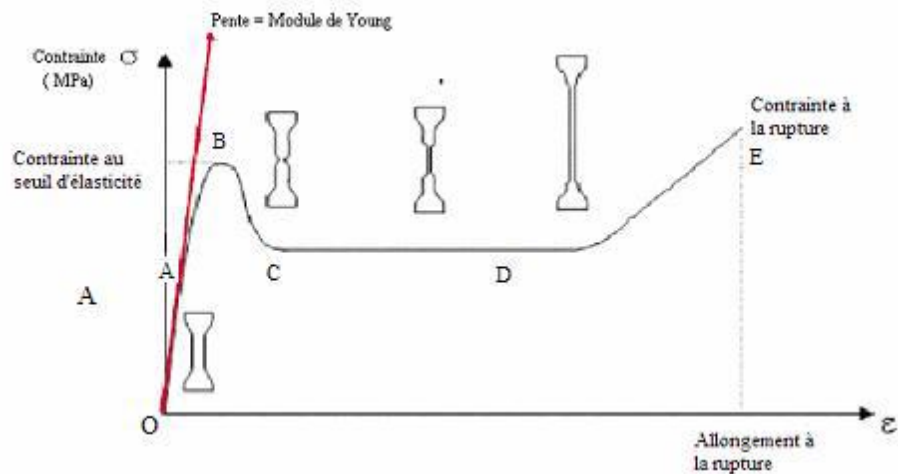


Figure. III.14.A : Propriétés mécaniques issues de la déformation d'un matériau soumis à une contrainte

Ces courbes sont réparties en cinq grands domaines :

- Zone OA : zone de déformation viscoélastique homogène, la déformation ne dépasse pas alors que quelques pourcents et est réversible. La phase amorphe est mise sous tension, ce qui explique le caractère réversible du comportement à ce stade de déformation.
- Zone AB : seuil d'élasticité ou le processus inter lamellaire prédomine. Le passage par un maximum sur la courbe s'accompagne d'une déformation plastique qui n'est plus réversible et se manifeste par l'apparition d'une striction.
- Zone BC : la zone strictionnée cesse de diminuer de section et s'étend progressivement à tout l'échantillon (Zone CD)
- Zone DE : la force augmente en fonction de l'allongement jusqu'à rupture de l'éprouvette.

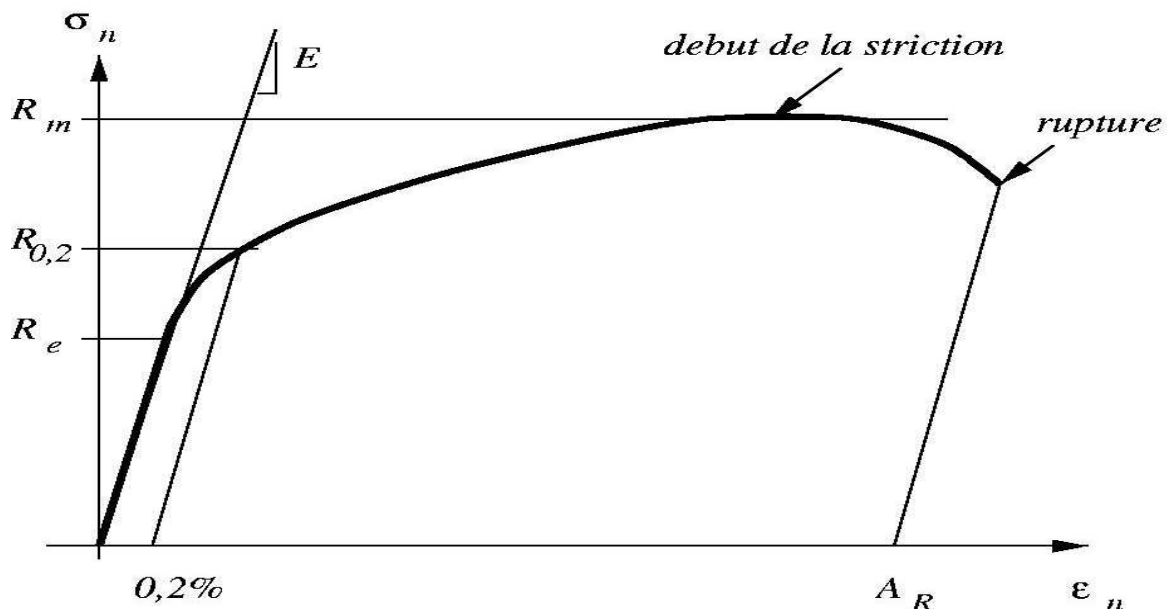


Figure. III.14.B – courbe de traction nominale [20]

➤ **Les conditions expérimentales de notre essai de traction :**

V=2 mm/min

T=25C⁰ (température ambiante)

Distance entre attaches : 70 mm

Taux d'acquisition des donnés : 5 HZ

La longueur : 7.4 mm

Epaisseur : 3 mm

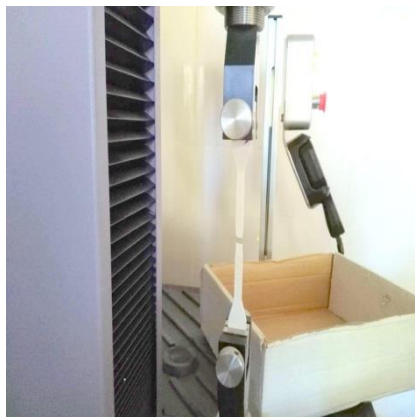


Figure III.15 : Machine de traction MTS Criterion (model 42)

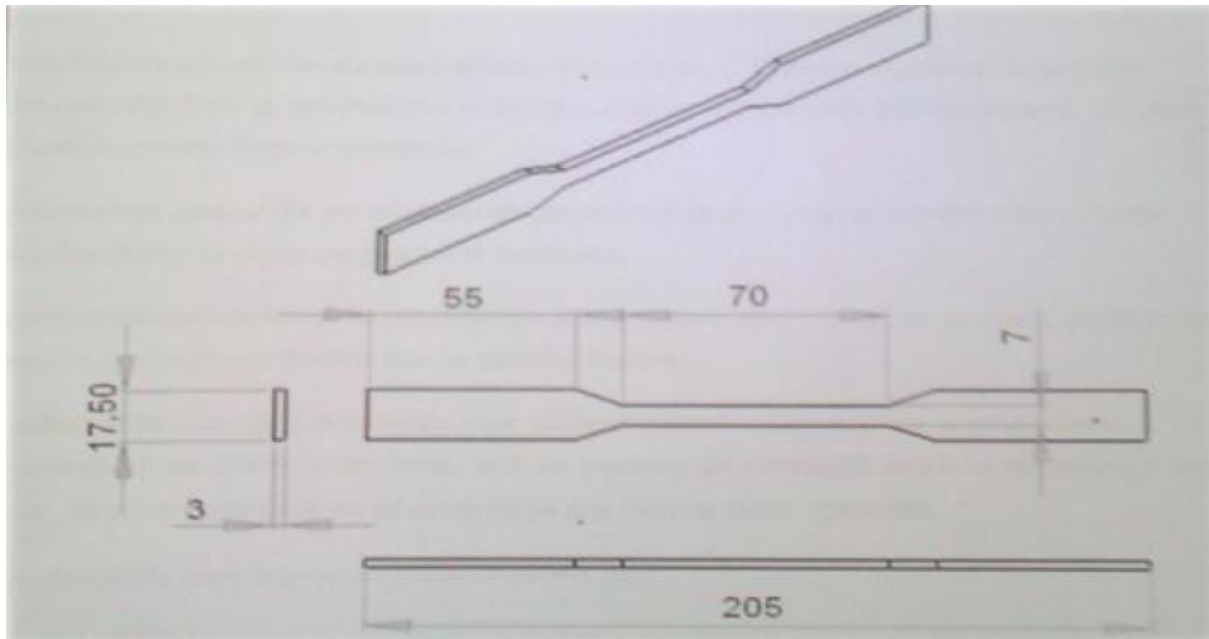


Figure III.16: Epreuve plate standard

III.4.2: Essai de compression

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

III.4.2.A: Principe de l'essai de compression

Cet essai destructif consiste à soumettre une éprouvette à un effort de compression, et cela généralement jusqu'à la rupture. Les éprouvettes utilisées de géométrie parfaitement définie (figure III.2) ont été prélevées dans le sens axial des plaques. [22]

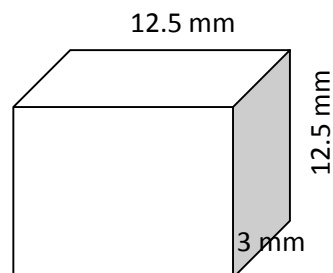


Figure III.17: Epreuve de compression

L'éprouvette est posée entre deux mors. L'un de ces mors est fixe. L'autre mors est mobile et relié à un système d'entraînement à vitesse de déplacement imposée dynamométrique.

III.4.2.B : Courbes contrainte déformation

- **Expression de la déformation et de la contrainte**

Les grandeurs délivrées par les différents capteurs sont la force $F(t)$ et le déplacement $\delta(t)$ fonction du temps t . L'obtention des mesures de déformation et de contrainte est indirecte.

Si on suppose des états de déformation et de contrainte uniformes, ces grandeurs peuvent être calculées à partir des mesures globales de l'éprouvette. Les expressions des composantes nominales et vraies de la déformation et de la contrainte suivant l'axe d'application de la sollicitation principale sont données par les relations suivantes (les indices n et v correspondent respectivement aux valeurs nominales et vraies). [22]

III.4.2.C : Contrainte et déformation nominale

La contrainte nominale σ_n est obtenue par le rapport de la force F sur la section initiale de l'éprouvette S_0 :

$$\sigma_n(t) = \frac{F(t)}{S_0}$$

La déformation nominale ε_n est donnée par le ration de l'allongement l de l'éprouvette par la longueur initiale de l'éprouvette l_0 . Pour l'essai de compression cette déformation est donnée par : [22]

$$\varepsilon_n(t) = \frac{\Delta l(t)}{l_0} = \frac{l_0 - l(t)}{l_0}$$

III.4.2.E: Contrainte vraie-déformation vraie

La contrainte vraie est définie par la relation de la force F , par la section transverse instantanée au cours de l'essai.

$$\sigma_v = \frac{F(t)}{S(t)}$$

En faisant l'hypothèse raisonnable de déformation à volume constant (plasticité) (III.4), la contrainte vraie peut être reliée à la contrainte nominale via la relation suivante

$$SL = S_0 L_0$$

$$\sigma_v = \frac{F}{S} = \frac{F}{S_0} \frac{l}{l_0} = \sigma_n (1 - \varepsilon_n)$$

La déformation vraie est définie par la somme de toutes les déformations nominales instantanées :

$$\varepsilon_v = \int d\varepsilon_n = \int \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0}$$

La déformation vraie peut également être déterminée à partir de la déformation nominale selon :

$$\varepsilon_v = \ln(1 + \varepsilon_n)$$

Pour résumer, la contrainte vraie et la déformation vraie peuvent être exprimées en fonction de la contrainte nominale et de la déformation nominale via les relations suivantes :

$$\begin{cases} \sigma_v = \sigma_n (1 - \varepsilon_n) \\ \varepsilon_v = \ln(1 + \varepsilon_n) \end{cases}$$

A partir de l'enregistrement du déplacement $\delta(t)$ de la traverse et de la mesure de la force

$F(t)$ au cours de l'essai, la déformation axiale vraie $\varepsilon_v(t)$ et la contrainte vraie $\sigma_v(t)$ peuvent être calculées. [22]

III.5 : Conditions expérimentales des essais de compression

III.5.1: Machine de compression

Les essais de compression uni axial ont été réalisés par le biais d'une machine hydraulique universelle de type IBERTEST mode UIB.100/W (Figure III.6). Les bâtis d'essais UIB sont fournis avec deux plateaux :

- Plateau supérieur, logé en siège sphérique et tenu par un bouton qui fixe l'ensemble.
- Plateau inférieur il repose sur la base de cadre mobile

La machine possède une vitesse de chargement qui varie jusqu'à 200 mm/min et une capacité de 100 kN. Elle est pilotée par un ordinateur en temps réel qui permet l'acquisition des données et leur traitement rapide à l'aide d'un logiciel. [22]



Figure III.18 Machine de compression IBERTEST

III.6: Dureté Knoop :

L'essai de Knoop permet la mesure de dureté des matériaux fragile, comme le verre et la céramique. Il existe également des applications spécifiques pour les plastiques. Le pénétrateur en diamant est de forme pyramidale à base rectangulaire Avec un angle de $172^{\circ}30'$ entre deux faces opposées et 130° pour les deux autres faces. Les charges appliquées sont inférieures à 1 kgf. Le pénétrateur laisse une empreinte dont la taille est comprise entre 0,01 et 0,1 mm ($D = 7 d$ et $H = D / 30$). Si on mesure la longueur et la largeur de l'empreinte à l'aide d'un microscope, la dureté de Knoop (**HK**) est donnée par la formule suivante :

$$HK = \frac{14.229F}{D^2}$$

Où F est la charge en kgf et D^2 , l'aire de l'empreinte en millimètres carrés.

RQ : La norme de micro-dureté Knoop a été adoptée en 1969



Figure III.19: mesure de la micro dureté avec un duromètre ZWICK/ROELL

III.6.1: Le microduromètre

Le microduromètre utilisé est de chargement max de 1kgf, une durée de chargement max de 60s ainsi qu'un zoom optique X100. Il est piloté par un logiciel interne qui traite et donne directement la dureté. Il est constitué :

- d'un bâti rigide muni d'une base mobile qui permet de centrer l'éprouvette.
- d'une partie microscope pour voir l'empreinte couplée au pénétrateur qui exerce l'effort à l'aide d'un moteur électrique.

- d'un écran et d'un pavé digital qui permettent d'entrer les paramètres relatifs à l'essai et de lire les résultats . [21]

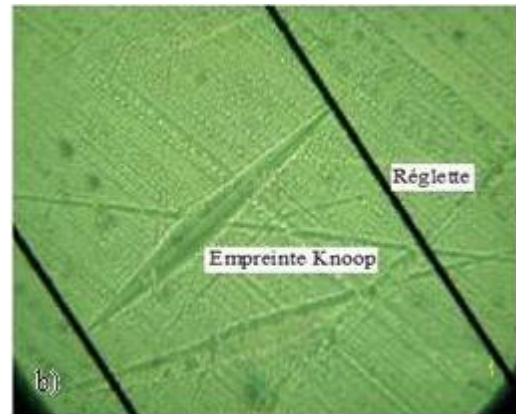


Figure.III.20: a) Microduromètre

b) Empreinte Knoop

III.6.1: Conditions expérimentales des essais de dureté

Les essais de micro dureté ont été réalisés à température ambiante ($25C^0$), sur des éprouvettes plates, avec une force de chargement constante $F = 25$ gf appliquées pendant 20s.

Les dimensions de l'éprouvette (Figure III.5) sont : 12mm de longueur, 12mm de largeur et 3mm d'épaisseur. [22]

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les matériaux composant notre mélange et présenté les différentes techniques expérimentales utilisées pour l'élaboration et la caractérisation de ces derniers, ainsi que les dispositifs utilisés.

La caractérisation mécanique nous a permis de connaître le comportement de nos mélanges. Elle permet aussi de déterminer les caractéristiques intrinsèques du produit élaboré tels que son module de Young sa résistance maximal, ainsi que sa déformation.

La caractérisation morphologique, via l'essai de traction, permet de déterminer la relation entre la disposition des différents grains dans le mélange à l'échelle microscopique et ce qui se passe à l'échelle macroscopique.

CHAPITRE IV

Résultats et discussions

CHAPITRE IV : résultats et discussions**1^{ère} partie : comportement mécanique des mélanges****Introduction**

Dans ce présent chapitre nous aborderons les résultats obtenus suite aux différents essais de caractérisation effectués sur les différentes éprouvettes à savoir :

- Essai de traction.
- Essai de compression.
- Essai de micro-dureté.

Une discussion sera faite sur les caractéristiques mécaniques des mélanges, qui se portent sur le comportement de :

- Module d'élasticité (E) ;
- Contrainte à la limite élastique (σ_e) ;
- La déformation à la limite élastique ;
- La contrainte à la rupture ;
- La déformation à la rupture ;
- La micro dureté.

IV.1 : Caractérisation Mécanique**IV.1.1. Courbes Contrainte-Déformation**

❖ **Courbes Contrainte vraie –Déformation vraie des mélanges PMMA-ABS (VG) :**

- **Polymère 100% PMMA**
 - **Cas de traction**

La **Figure IV.1** montre la courbe contrainte vraie σ_v en fonction de la déformation vraie ϵ_v en traction uni axiale d'une éprouvette réalisée avec du 100% PMMA.

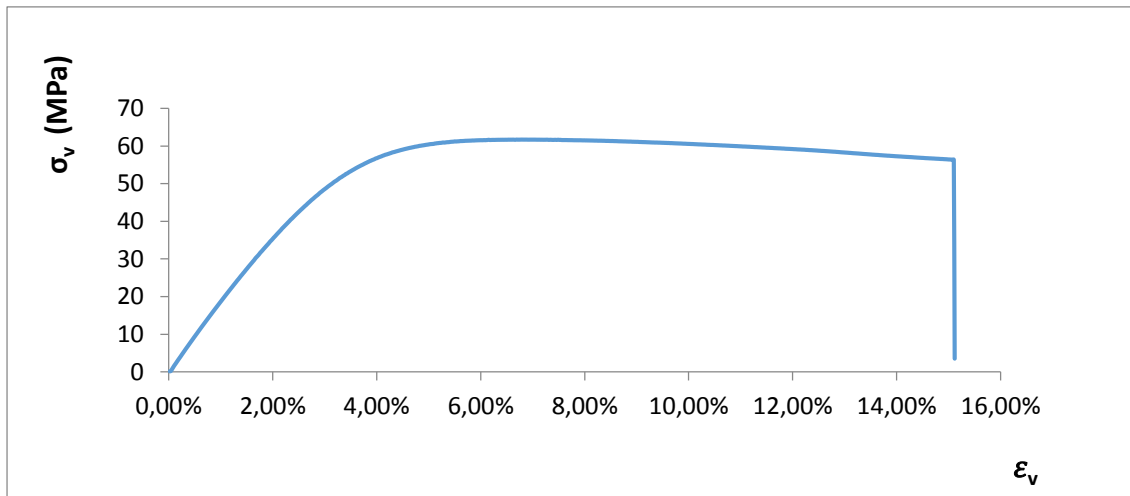


Figure IV.1 Courbe contrainte vraie- déformation vraie du polymère 100% PMMA cas de traction

La courbe de traction du 100% PMMA présente un comportement élasto-plastique comprenant 2 paliers, palier élastique et palier plastique, avec une contrainte élastique de $\sigma_e=59.56$ MPa, une déformation élastique de $\epsilon_e=4.4\%$. Elle montre aussi une contrainte à la rupture de l'ordre de $\sigma_r=61.00$ MPa, ainsi qu'une déformation à la rupture de $\epsilon_r=9.26$ %, un module d'élasticité $E= 819,72$ MPa

- **Cas de compression :**

La **Figure IV.2** montre la courbe contraintes vraie-déformation vraie σ_v (ϵ_v) donnée par une éprouvette réalisée avec du 100% PMMA, soumise à une compression uni axial.

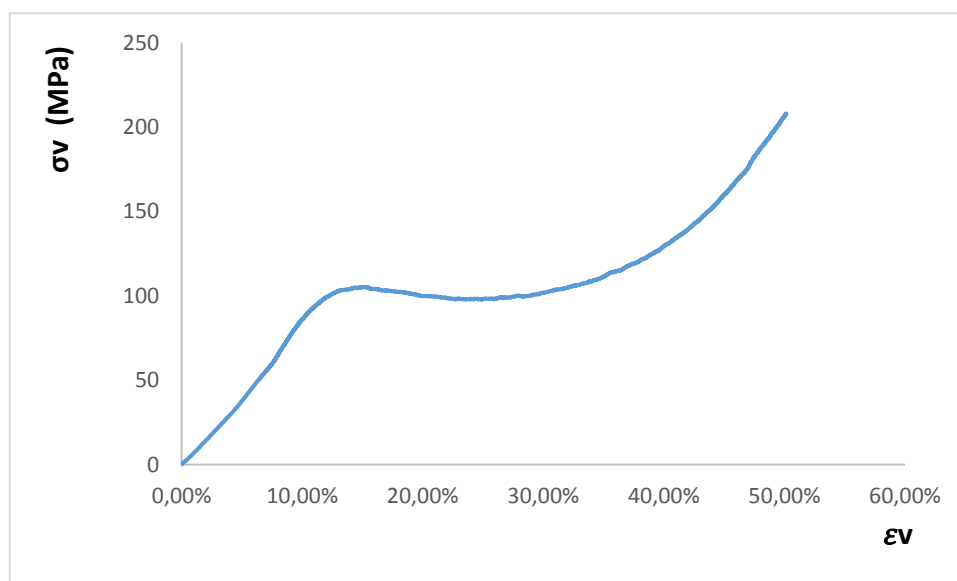


Figure IV.2. Courbe contrainte déformation du polymère 100% PMMA cas de compression

La courbe de compression du 100% PMMA présente un comportement visco-élastoplastique suivi d'un durcissement avant la rupture, avec une contrainte élastique de 99 MPA, une déformation élastique qui ne dépasse pas 12%. Elle montre aussi un module de Young allant jusqu'à 1795,04 MPa.

➤ **Polymère 100% ABS :**

• **Cas de traction :**

➤ **Polymère 100% ABS (VG)**

La Figure IV.3 montre la courbe contrainte vraie σ_v en fonction de la déformation vraie ϵ_v en traction uni axiale d'une éprouvette réalisée avec du 100% ABS vierge.

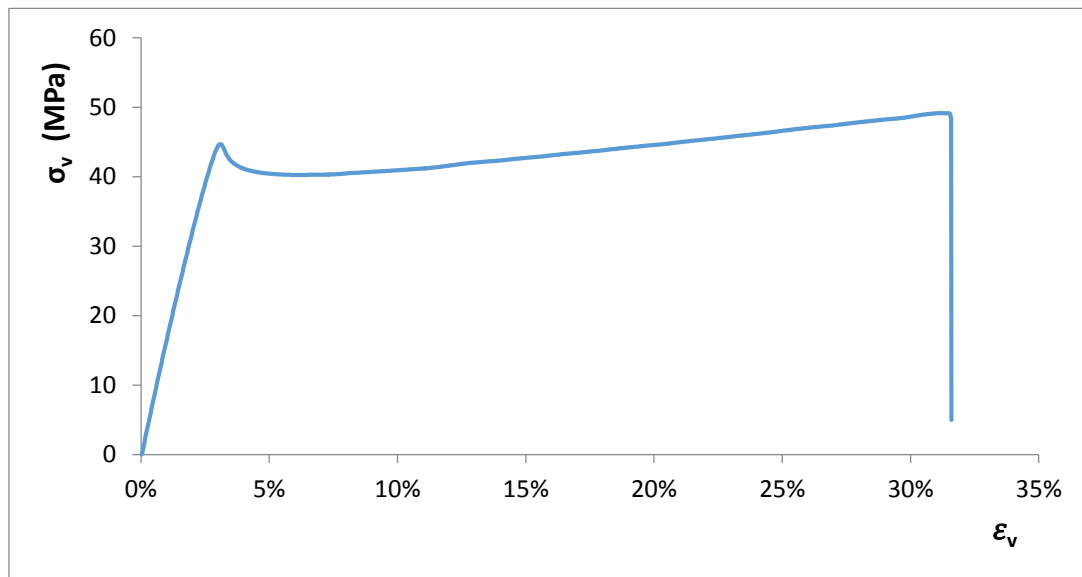
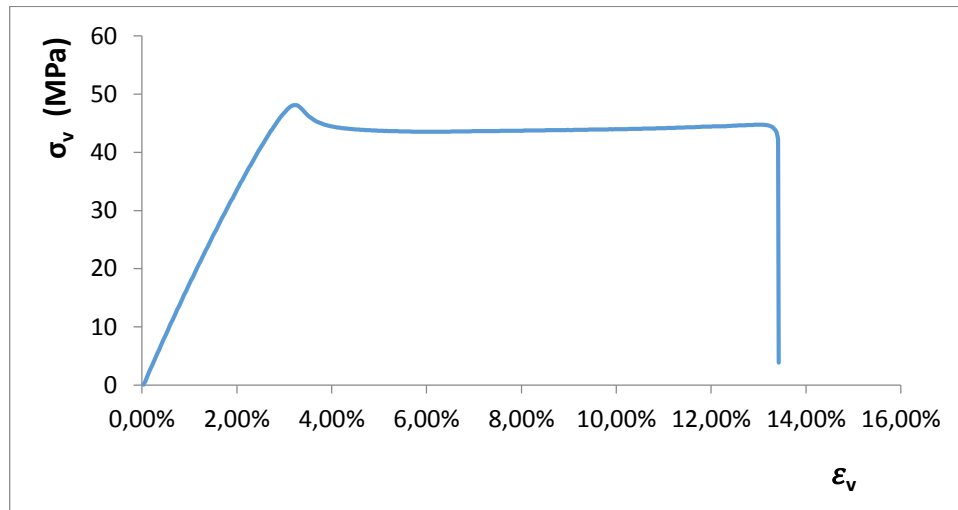


Figure IV.3: Courbe contrainte vraie- déformation vraie du polymère 100% ABS (VG) cas de traction

La courbe de traction du polymère 100% ABS (VG) donnée par la **Figure IV.3** nous renseigne sur le caractère plastique d'ABS. En effet, il peut atteindre dans notre cas une contrainte à la rupture $\sigma_r = 48,27$ MPA et une déformation à la rupture de $\epsilon_r=31.58\%$, une déformation élastique de $\epsilon_e =2.69\%$ avec une contrainte élastique $\sigma_e =41,43$ MPA, ainsi qu'un module de Young allant jusqu'à $E=1565,58506$ MPA, Son comportement est donné par une courbe à deux paliers, palier élastique et palier plastique suivi d'une rupture.

➤ Polymère 100% ABS (R) :

La Figure IV.4 montre la courbe contrainte vraie σ_v en fonction de la déformation vraie ϵ_v en traction uni axiale d'une éprouvette réalisée avec du 100% ABS recyclé.



FigureIV.4 : Courbe contrainte vraie- déformation vraie du polymère 100% ABS (R) cas de traction

- La superposition des deux courbes 100% PMMA et 100%, ABS (VG) et 100% ABS(R) cas de traction :

La Figure IV.5 montre une superposition des trois courbes 100% PMMA ,100% ABS(VG) et 100% ABS(R) en traction.

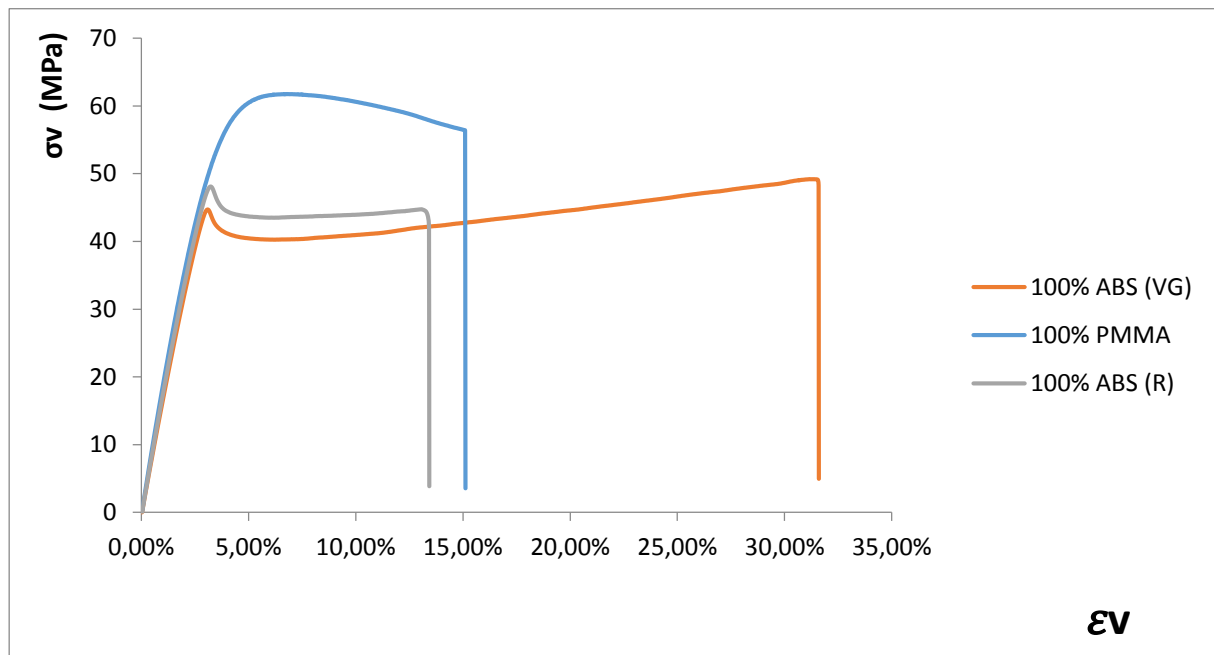


Figure. IV.5: Superposition des courbes contrainte déformation des polymères 100% PMMA, 100% ABS (VG) et 100% ABS(R) cas de traction

D'après la Figure IV.5 le PMMA a une élasticité plus intéressante que l'ABS ($\sigma_{ePMMA}=59.56 \text{ MPA} > \sigma_{eABS R}=45,61 \text{ MPA} > \sigma_{eABS V}=41,43 \text{ MPA}$),

En terme d'allongement à la rupture, l'ABS vierge est plus important que le PMMA, ($\epsilon_{rABS}=31.58\% > \epsilon_{rPMMA}=4.4\%$),

La comparaison des courbes de comportement d'ABS recyclé avec celui d'ABS vierge montre que le comportement d'ABS recyclé enregistre une augmentation de la limite élastique, tandis qu'il engendre une diminution de près de 60 % d'allongement à la rupture par rapport à l'ABS vierge. Ce qui nous incite à supposer que l'ABS se durcit après recyclage, un durcissement qui peut être expliqué par une création de nouvelles liaisons interatomique.

- **Cas de compression**

La Figure IV.6 montre la courbe contrainte vraie σ_v en fonction de la déformation vraie ϵ_v en compression uni axiale d'une éprouvette réalisé avec du 100% ABS vierge.

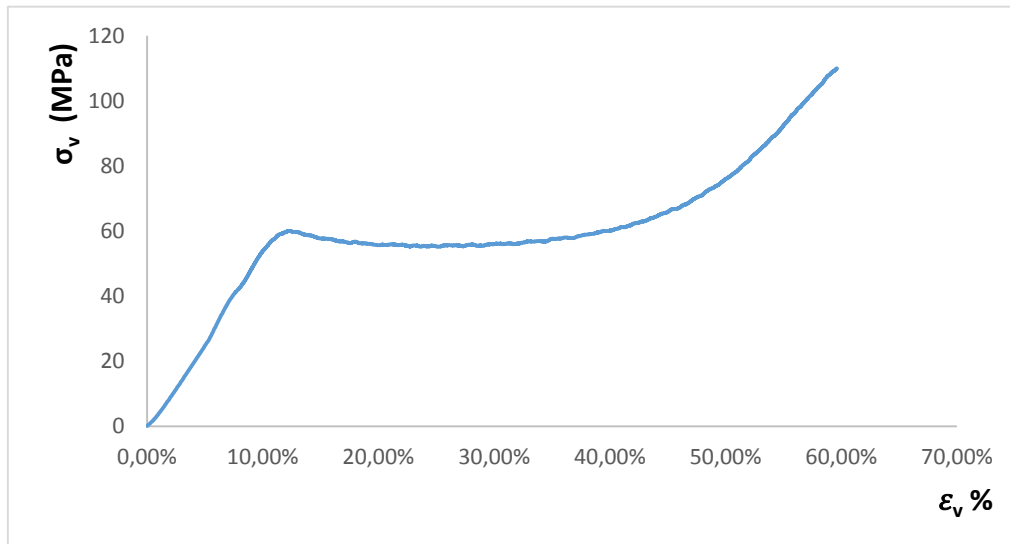


Figure.IV.6: Courbe contrainte déformation du polymère 100% ABS (VG) cas de compression

La **Figure. IV.6** représente la courbe de compression du 100% ABS(VG) qui montre un comportement visco-élastoplastique suivi d'un durcissement avant la rupture avec une déformation élastique de 11,02%. Elle montre aussi une contrainte élastique de l'ordre de 57,62 MPa, et un module de Young de l'ordre de 554.80 MPa.

➤ **La superposition des deux courbes 100% PMMA et 100% ABS (R) et ABS (VG) cas de compression :**

La Figure.IV.7 montre une superposition des courbes 100% PMMA, 100% ABS (VG) et 100% ABS (R), cas de compression.

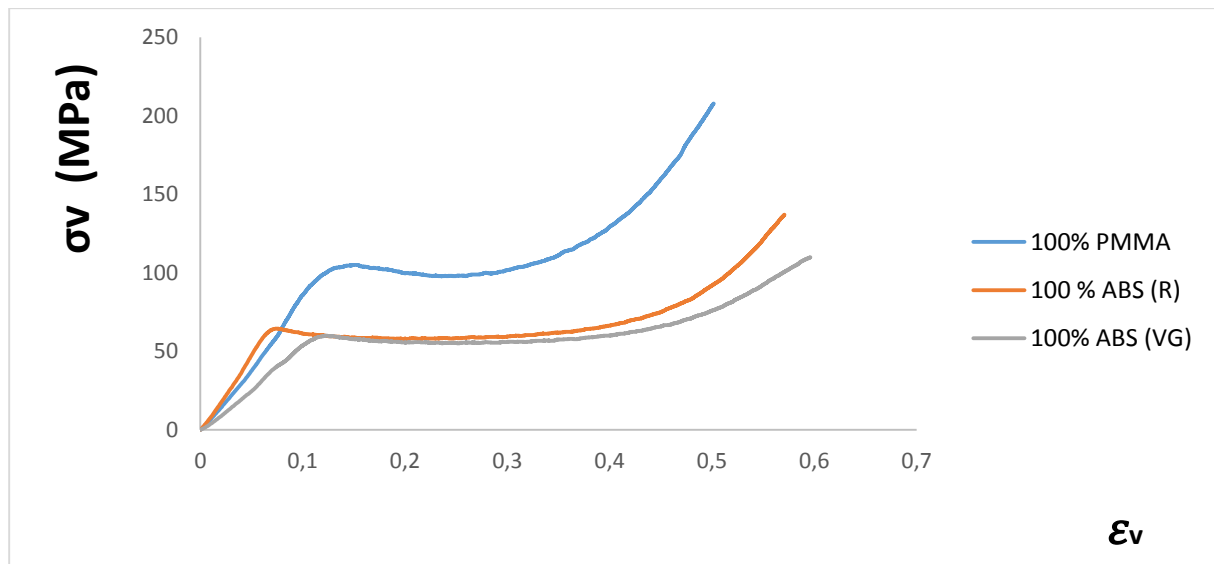


Figure. IV.7: Superposition des courbes contrainte vraie-déformation vraie des polymères 100% PMMA ,100% ABS (R) et ABS (VG), cas de compression

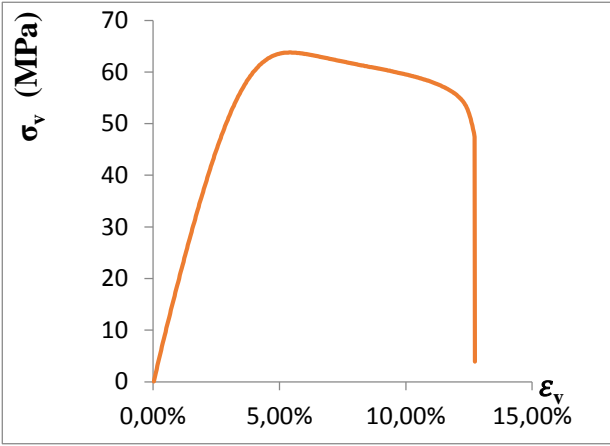
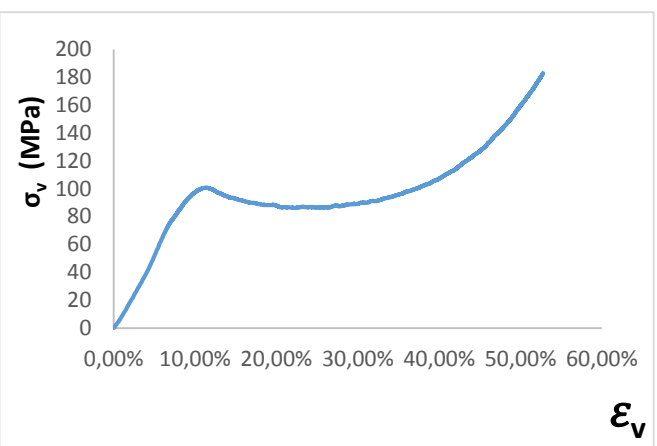
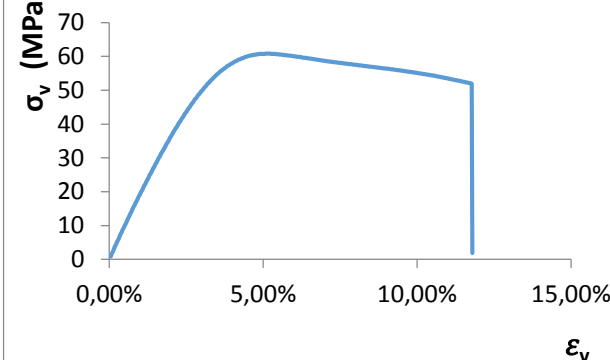
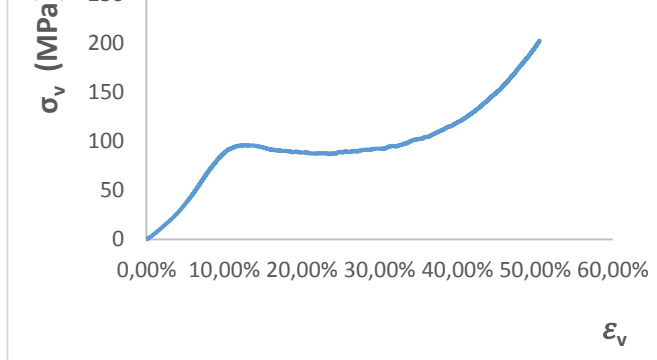
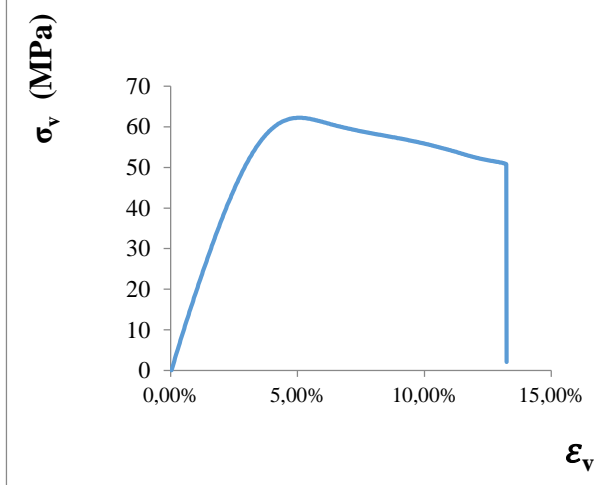
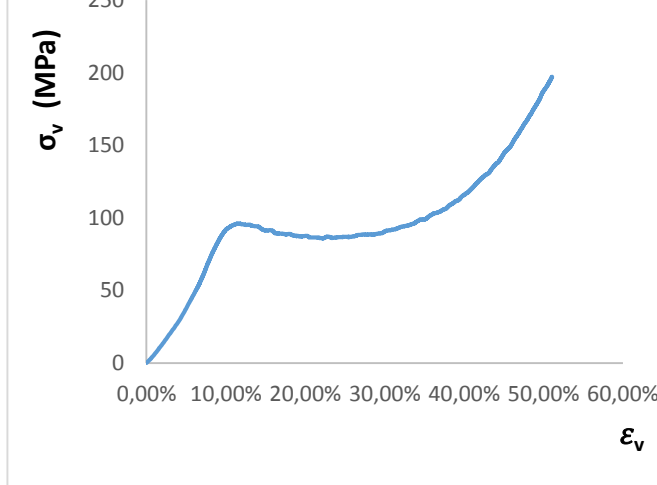
La figure IV.7 montre que le recyclage de l'ABS engendre en compression, une augmentation en limite élastique ($\sigma_{eABS (R)} = 62.53 \text{ Mpa} > \sigma_{eABS (VG)} = 57,62 \text{ Mpa}$) et diminution en déformation élastique.

D'après le module de Young, on peut dire que l'ABS recyclé est plus rigide que l'ABS vierge. Ce qui peut être probablement expliqué par le durcissement de l'ABS après recyclage qui s'interprète par la cristallisation de celui-là.

La comparaison des deux courbes 100% PMMA et 100% ABS nous renseigne que le PMMA est plus rigide que l'ABS. Ce qui est donné par une limite élastique de $\sigma_{ePMMA} = 99,27\text{MPa} > \sigma_{eABS (VG)} 57,62 \text{ MPa}$ (ABS VG), et une déformation élastique de $\epsilon_{ePMMA} = 12.05 > \epsilon_{eABS (VG)} = 11.02$ ainsi qu'une rigidité donnée comme suit, par le module de Young : $E (PMMA) = 819.72 \text{ MPa} > E (ABS (vg)) = 554.80 \text{ MPa}$.

IV.2 : Comportement mécanique des copolymères à base de PMMA et ABS

Le tableau suivant regroupe toutes les courbes contraintes vraie σ_v en fonction de la déformation vraie ϵ_v , en cas de traction et compression pour différentes compositions utilisées durant notre étude ;

Courbe de traction	Courbe de compression
	
<p>FIGURE. IV.8: contrainte - déformation 10%ABS(R)</p>	<p>FIGURE IV.9: contrainte- déformation 10%ABS(R)</p>
	
<p>FIGURE.IV.10:contrainte/déformation 20%ABS(R)</p>	<p>FIGURE IV.11: contrainte/ déformation 20%ABS(R)</p>
	
<p>FIGURE.IV.12:contrainte/déformation 20%ABS(VG)</p>	<p>FIGUREIV.13: contrainte/ déformation 20%ABS(VG)</p>

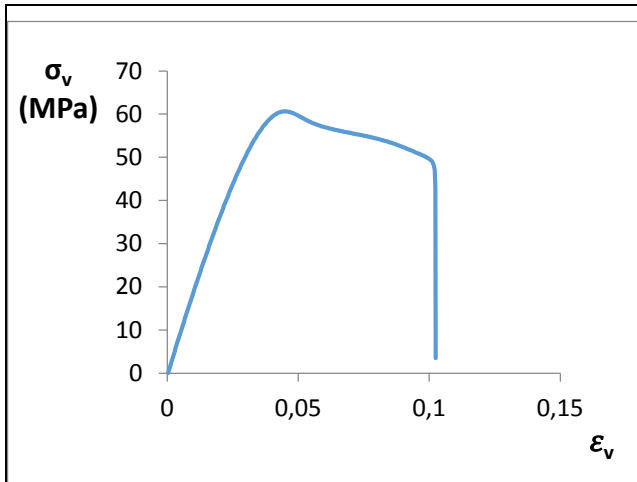


FIGURE .IV.14: contrainte/ déformation 30%ABS(R)

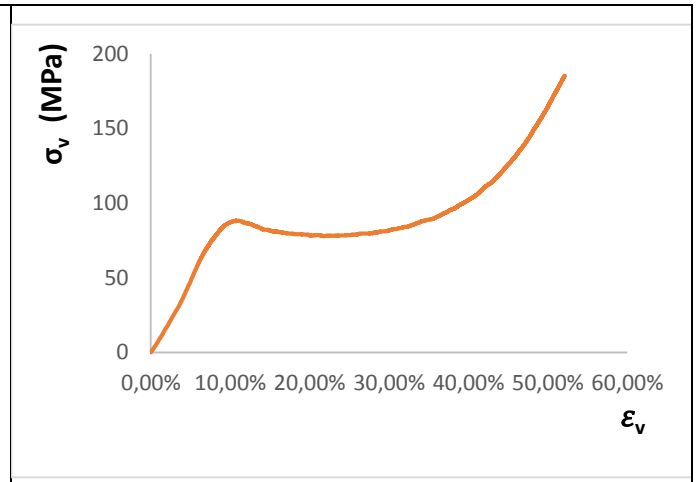


FIGURE .IV.15: contrainte/ déformation 30%ABS(R)

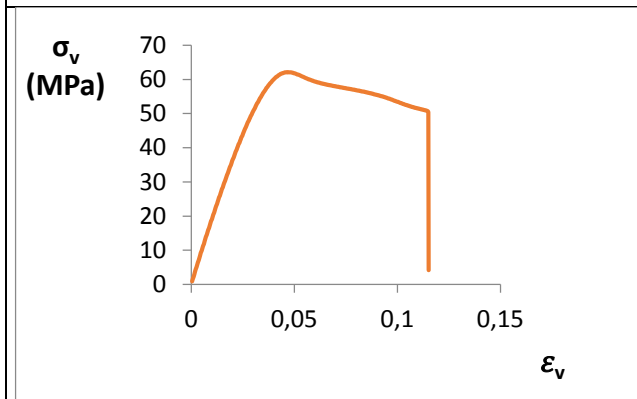


FIGURE .IV.16: contrainte/ déformation 40%ABS(R)

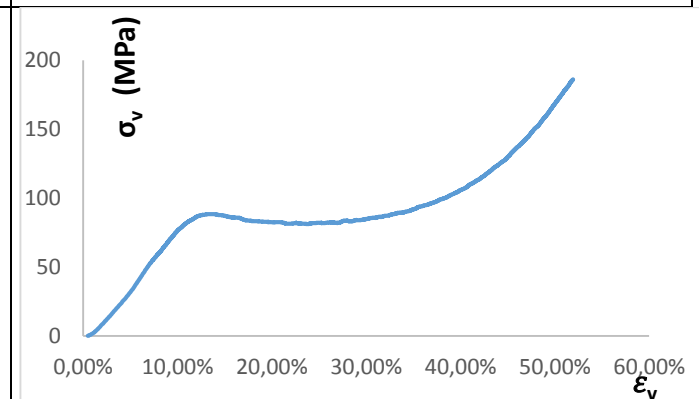


FIGURE IV.17: contrainte / déformation 40%ABS(R)

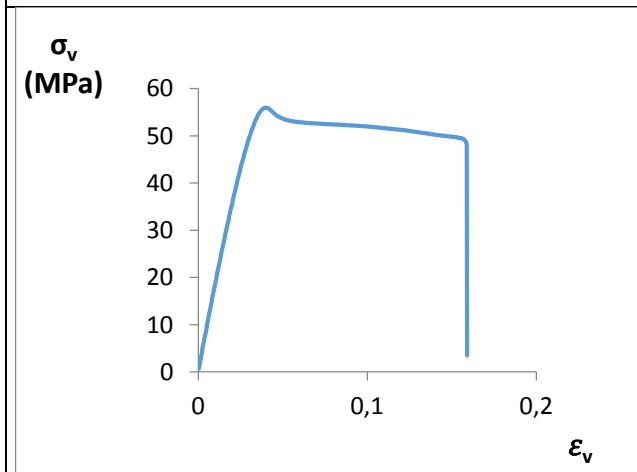


FIGURE.IV.18: contrainte/ déformation 50%ABS(R)

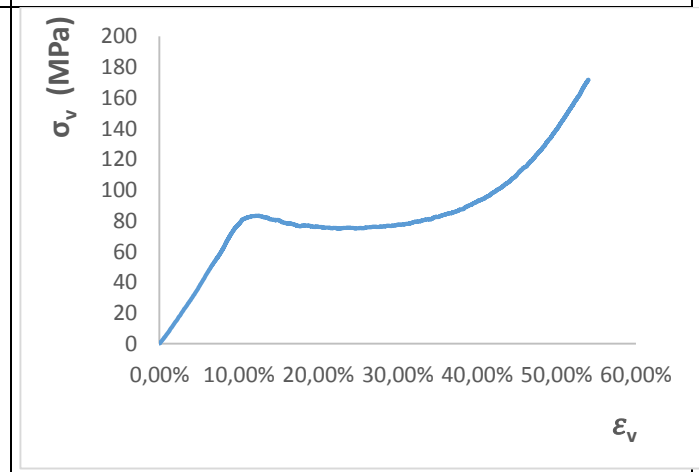


FIGURE .IV.19: contrainte/ déformation 50%ABS(R)

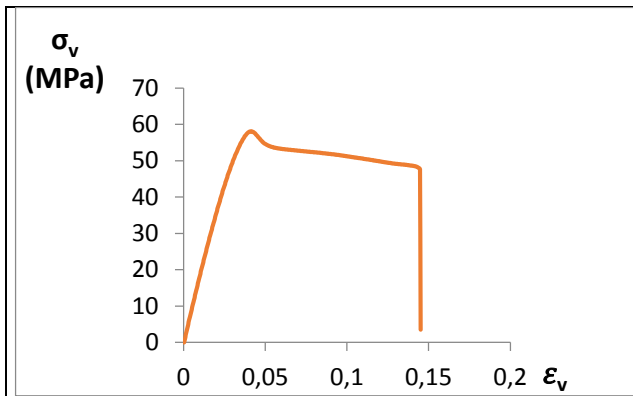


FIGURE.IV.20: contrainte/déformation 50% ABS (VG)

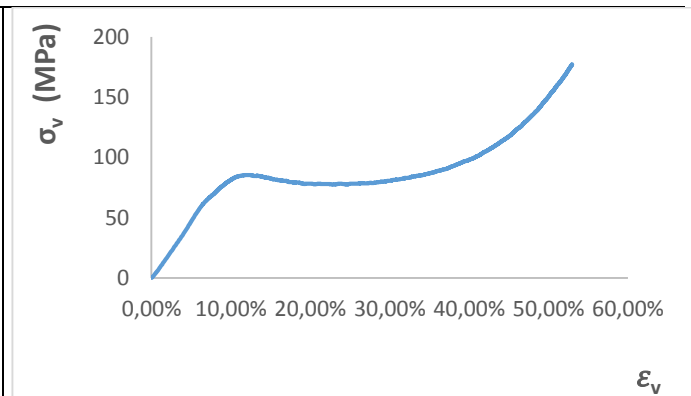


FIGURE.IV.21: contrainte/déformations 50% ABS (VG)

➤ Superposition des courbes des mélanges PMMA/ l'ABS recyclé en traction

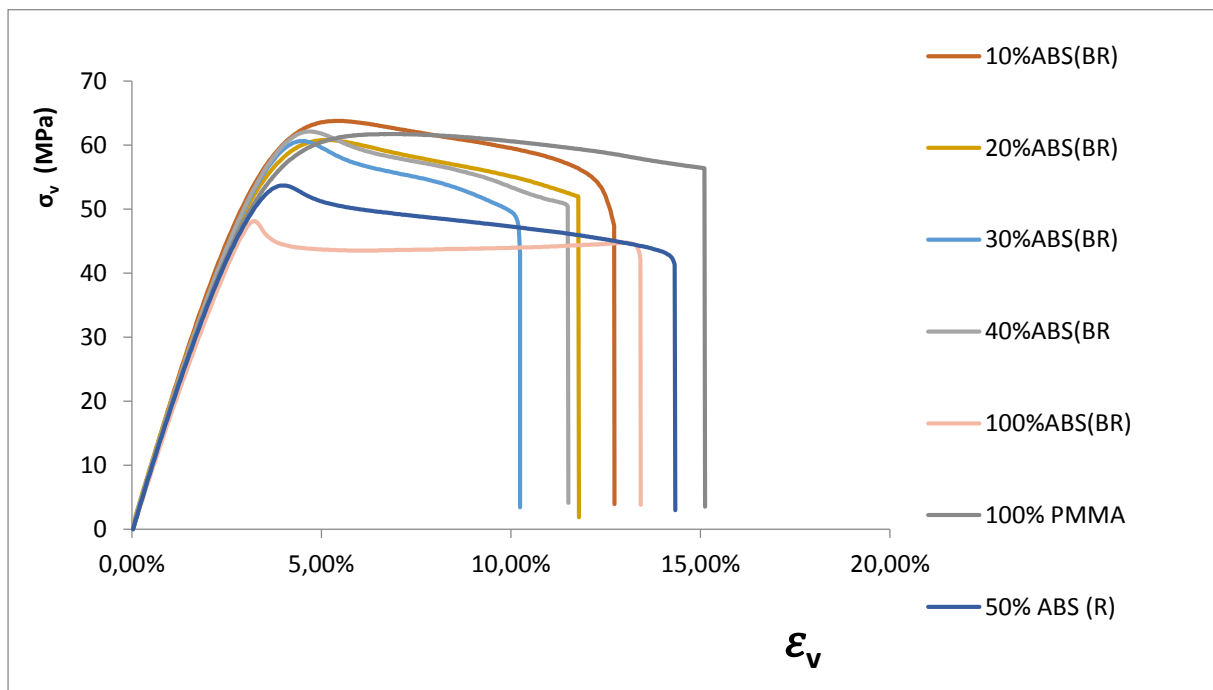


FIGURE IV.22 : Superposition des courbes des mélanges PMMA/ ABS recyclé en traction

- Superposition des courbes contraintes vraie déformation vraie des mélanges PMMA/ ABS vierge en traction

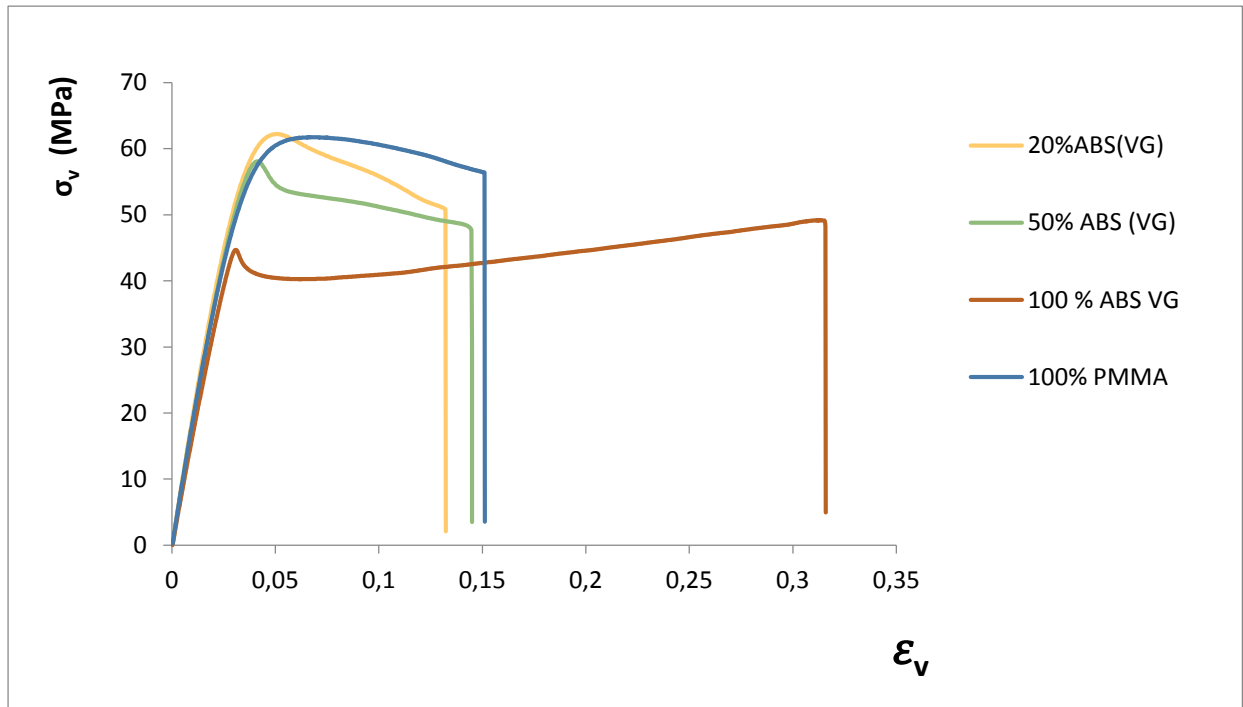


FIGURE IV.23 : Superposition des courbes des mélanges PMMA/ ABS vierge en traction

D'après la figure IV.23, superpositions des courbes PMMA et ABS (VG) on remarque qu'on ajoutant de l'ABS au PMMA le mélange perd en élasticité et gagne en plasticité.

➤ Superposition des courbes des mélanges PMMA/ ABS recyclé en compression

La figure IV24 montre une superposition des courbes déformations vraies-contraintes vraies des mélanges PMMA/ ABS recyclé soumis à un essai de compression ;

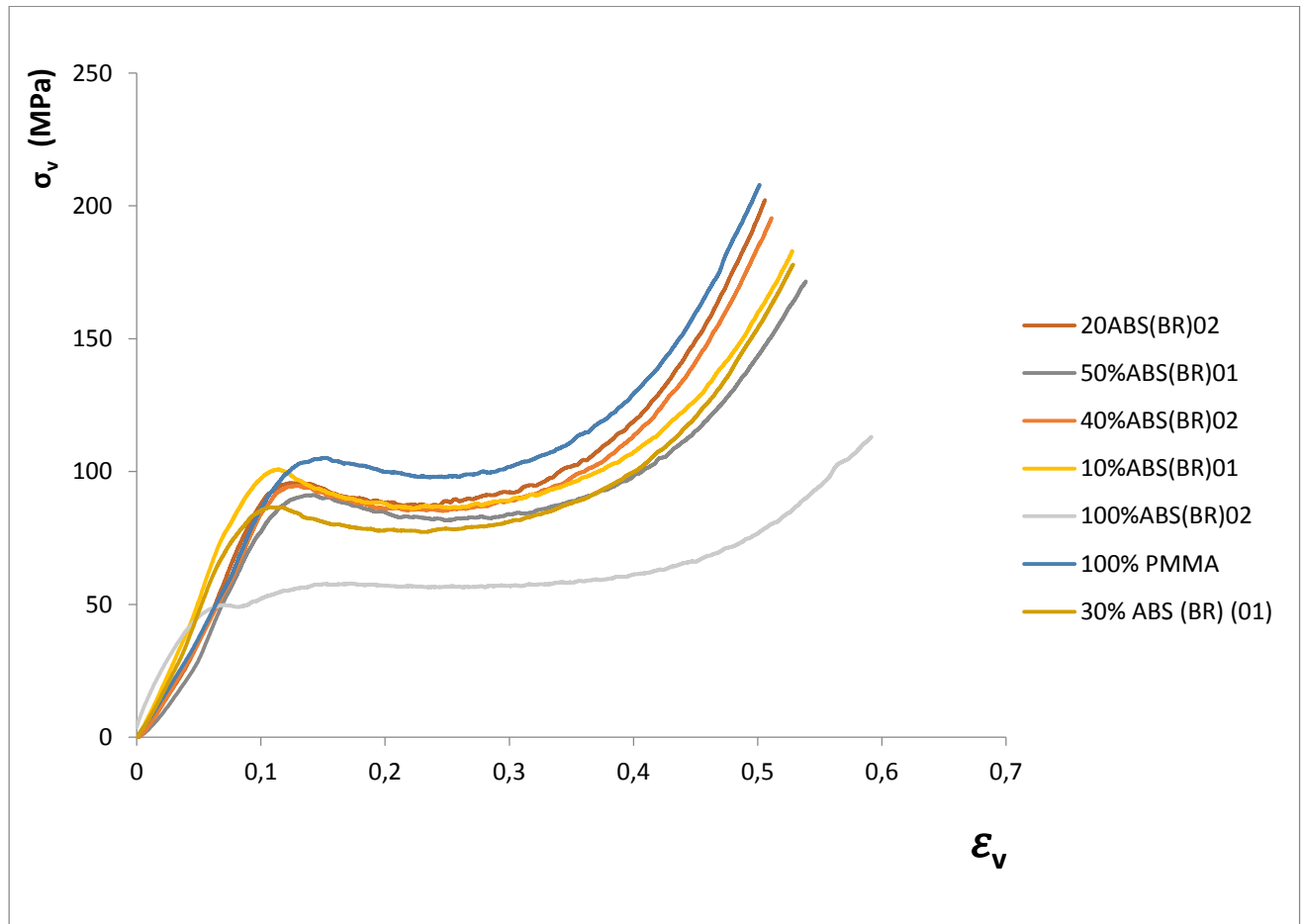


Figure.IV.24 Superposition des courbes des mélanges PMMA/ l'ABS recyclé en compression

➤ Superposition des courbes des mélanges PMMA/ ABS vierge en compression

La figure IV.25 montre une superposition des courbes déformations vraies-contraintes vraies des mélanges PMMA/ ABS vierge soumis à un essai de compression ;

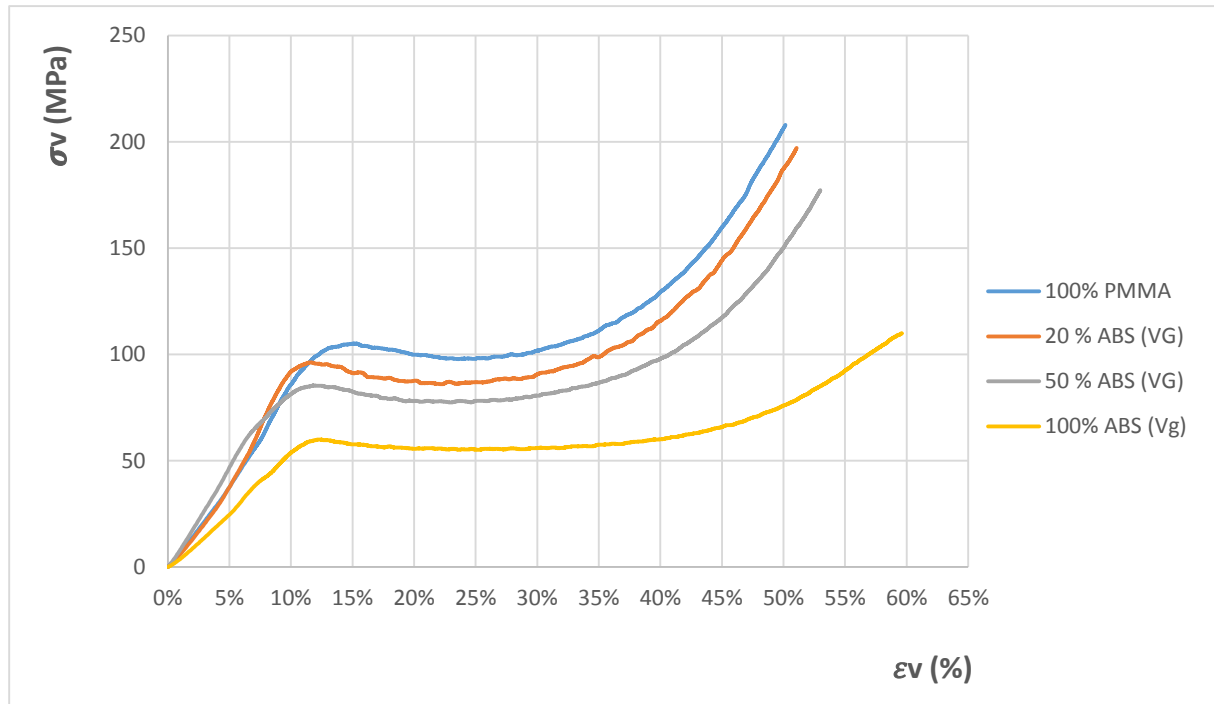


FIGURE.V.25 superposition des courbes des mélanges PMMA/ ABS vierge en compression

Les figures IV.24 et IV.25 montrent la diminution de la limite d'élasticité en augmentant le pourcentage d'ABS, cela provoque la fragilité de ce mélange en le sollicitant à l'essai de compression.

2^{ème} partie : caractéristiques mécaniques des mélanges

IV.3 : Tracée des courbes de caractéristiques mécanique des mélanges

IV.3.1 : Tracée de la courbe du Module de Young en fonction du pourcentage % d'ABS cas de compression

➤ ABS recyclé

% d'ABS (R)	Le module de Young (E)
0%	1795,042342
10%	979,7339251
20%	956,6571
30%	968,613443
40%	848,249
50%	801,750258
100%	969,8943335

Tableau IV.1: variation du module de Young des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS recyclé obtenue par compression

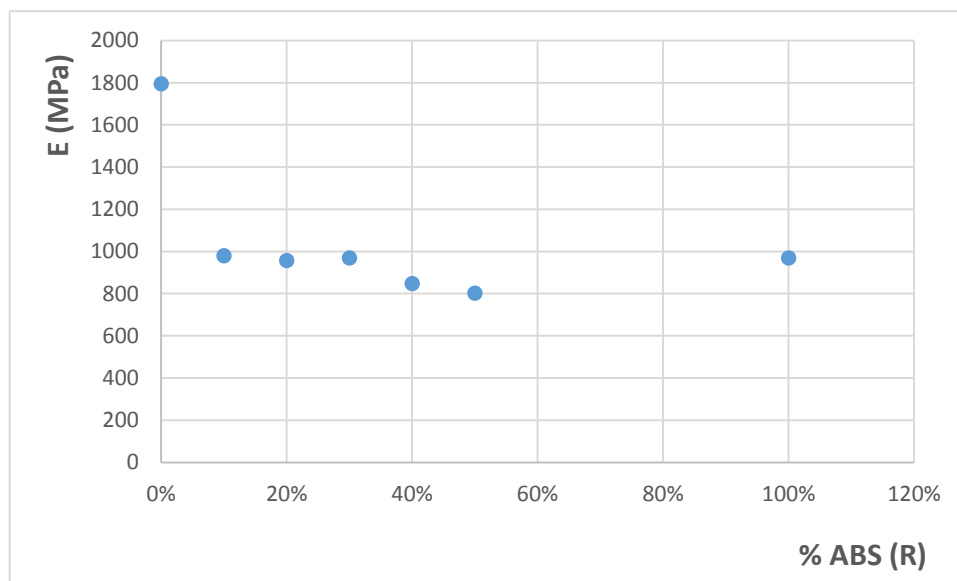


Figure IV.26: courbe du module de Young des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS recyclé obtenue par compression

La figure IV.26 montre l'évolution du module d'élasticité des mélanges PMMA-ABS recyclé sollicité en compression. Généralement, le module des échantillons diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ABS indiquant la diminution de la raideur du mélange.

➤ **ABS vierge**

% d'ABS (VG)	Le Module d'élasticité E en cas de compression
0%	1795,042342
20%	861,0765779
50%	954,1307363
100%	554,8064188

Tableau IV.2: variation du module de Young des mélanges PMMA/ABS (VG) en fonction du % d'ABS vierge obtenue par compression

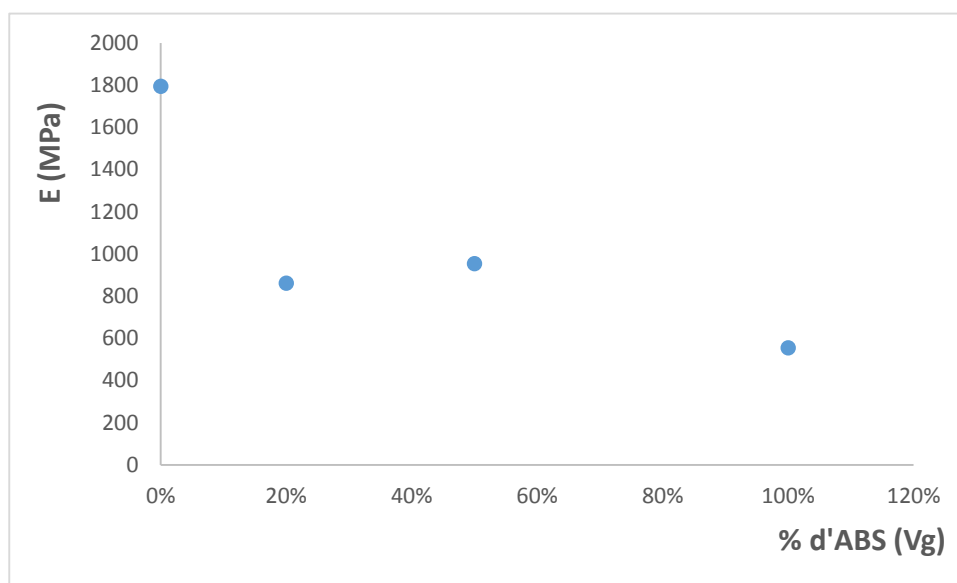


Figure V.27: courbe du module de Young des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS vierge obtenue par compression

D'après la figure IV.27 on remarque que dans le cas du mélange PMMA-ABS (vierge) le module d'élasticité augmente à l'ajout de 20% ABS jusqu'à 50% d'ABS vierge et diminue au-delà de 50%, tend dis qu'il atteint une valeur optimale à 50% ABS (VG), comme on remarque aussi une grande diminution de la raideur d'ABS vierge par rapport au PMMA.

➤ Superposition des courbes E (%ABS) cas d'ABS (R) et ABS (VG) en compression

% d'ABS (R)	E cas de compression	E en cas de compression
0%	819,722609	1795,042342
10%	979,7339251	
20%	956,6571	861,0765779
30%	968,613443	
40%	848,249	
50%	801,750258	954,1307363
100%	969,8943335	554,8064188

Tableau IV.3: Valeurs du module de Young des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS vierge et recyclé obtenue par compression

La figure V.28 montre une superposition des courbes E (%ABS recyclé et le vierge)

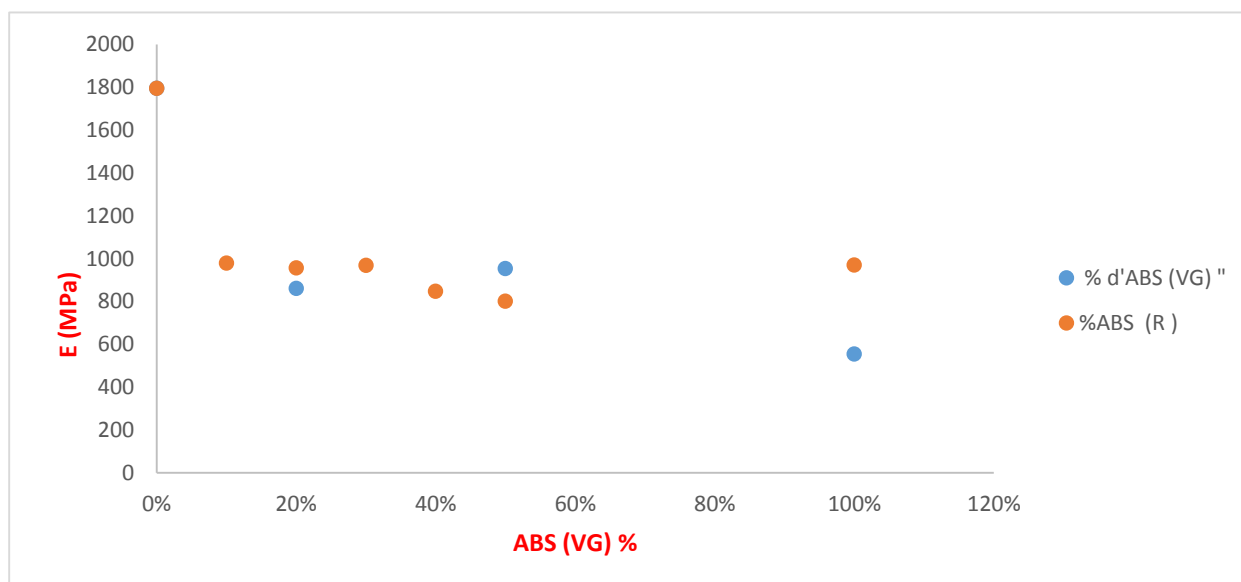


Figure IV.28 : Superposition des courbes E (%ABS) cas d'ABS (R) et ABS (VG) en compression

La figure IV.28 montre que le comportement des courbes du module d'élasticité en compression en fonction du 100% ABS vierge et 100% ABS recyclé à presque la même

allure. Ce qui montre qu'il n'y a pas grande différence entre rigidité d'ABS vierge et celle de l'ABS recyclé. Comme on remarque une chute par rapport à la rigidité du PMMA.

IV.3.2 : Tracée de la courbe du Module de Young en fonction du pourcentage % d'ABS en traction

➤ **ABS (R)**

% d'ABS (BR)	Module d'élasticité E en cas de traction (MPa)
0%	1795.042342
10%	1886,218746
20%	1773,939197
30%	1769,667146
40%	1767,074638
50%	1716,535262
100%	1643,1955

Tableau IV.4 : Variation du module de Young des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS recyclé en traction.

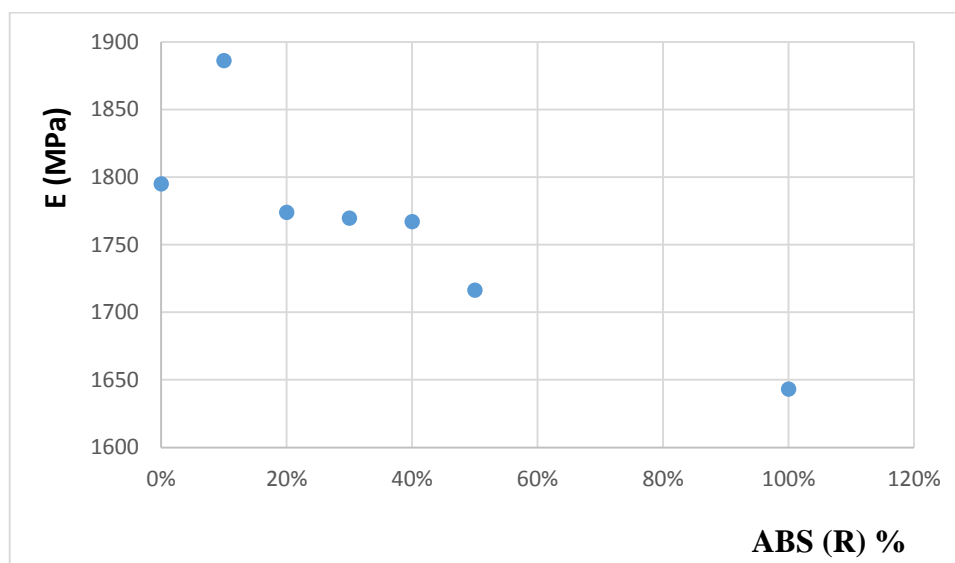


Figure IV.29: Courbe du module de Young des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS broyé, obtenue par essai de traction

➤ ABS (VG)

% d'ABS (VG)	Module d'élasticité E (MPa) cas de traction
0%	1795,042342
20%	1792,71429
50%	1718,337385
100%	1719,89577

Tableau IV.5 : variation du module de Young des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS vierge obtenue par essai de traction.

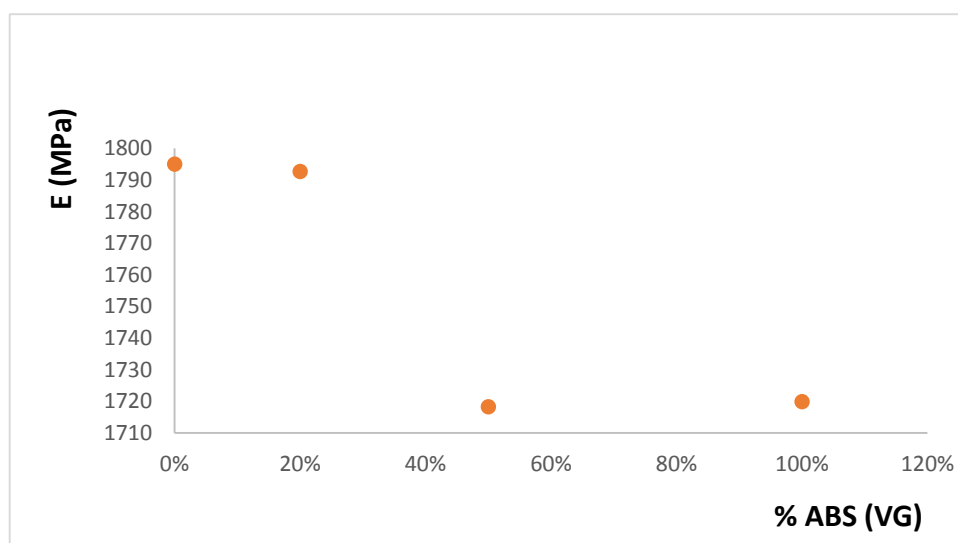


Figure IV.30 : courbe du module de Young des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS vierge obtenue par essai de traction.

D'après les figures IV.29 et IV.30 on constate une chute du module d'élasticité avec l'augmentation du pourcentage d'ABS ajouté.

➤ **superposition des courbes E (%ABS) cas d'ABS (R) et ABS (VG) en traction**

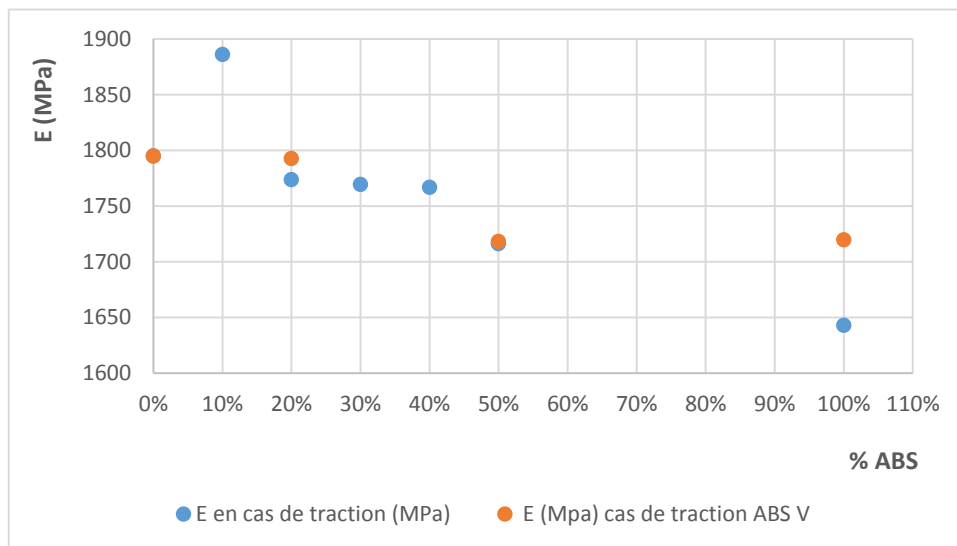


Figure IV.31: Superposition des courbes E (%ABS) cas d'ABS (R) et ABS (VG) en traction

D’après la figure IV.31 le changement du comportement des deux courbes E (ABS (R)) et ABS ((VG)) a presque la même allure, jusqu’à ce que les deux courbes atteignent approximativement la même valeur à 50% d’ABS.

IV.3.3 : Tracée de la courbe de la limite élastique σ_e des mélanges PMMA/ABS en fonction du pourcentage % d’ABS en traction

➤ **ABS vierge**

% d'ABS (VG)	contrainte élastique (MPa)
0%	59,56
20%	58,43868991
50%	56,6866
100%	41,43309918

Tableau IV.6: Variation de la limite élastique σ_e des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d’ABS vierge obtenue par essai de traction.

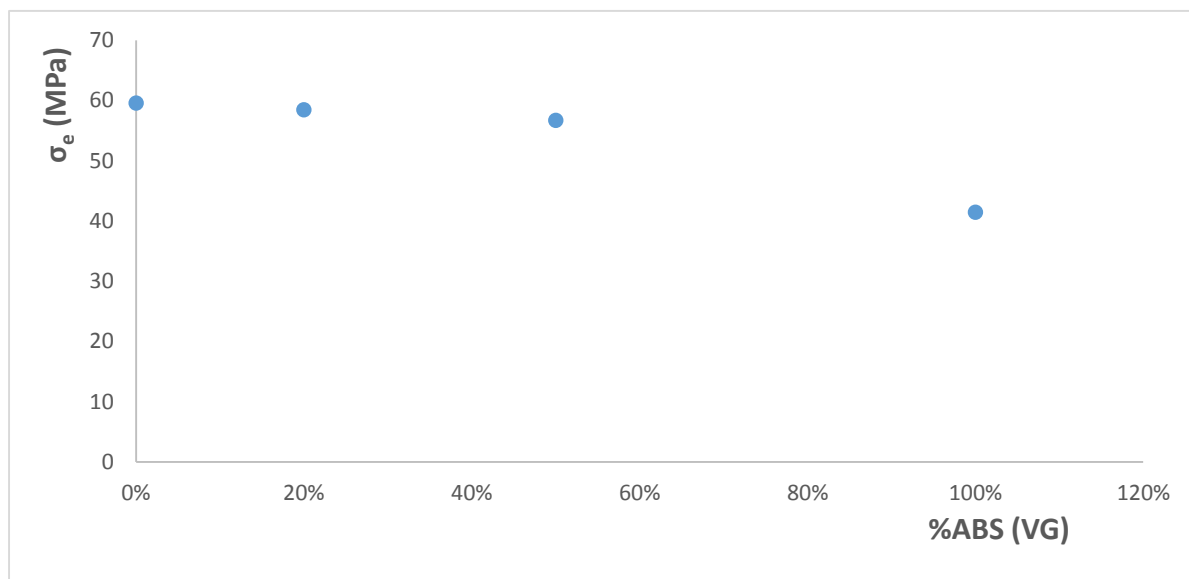


Figure IV.32 : Courbe de la contrainte à la limite élastique σ_e des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS vierge obtenue par essai de traction

➤ **ABS recyclé**

% d'ABS (R)	contrainte à la limite élastique (MPa)
0%	59,56
10%	59,2044
20%	56,57465686
30%	53,3352
40%	56,52068524
50%	48,226
100%	45,6164

Tableau IV.7: Variation de la contrainte à la limite élastique σ_e des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS recyclé obtenue par essai de traction.

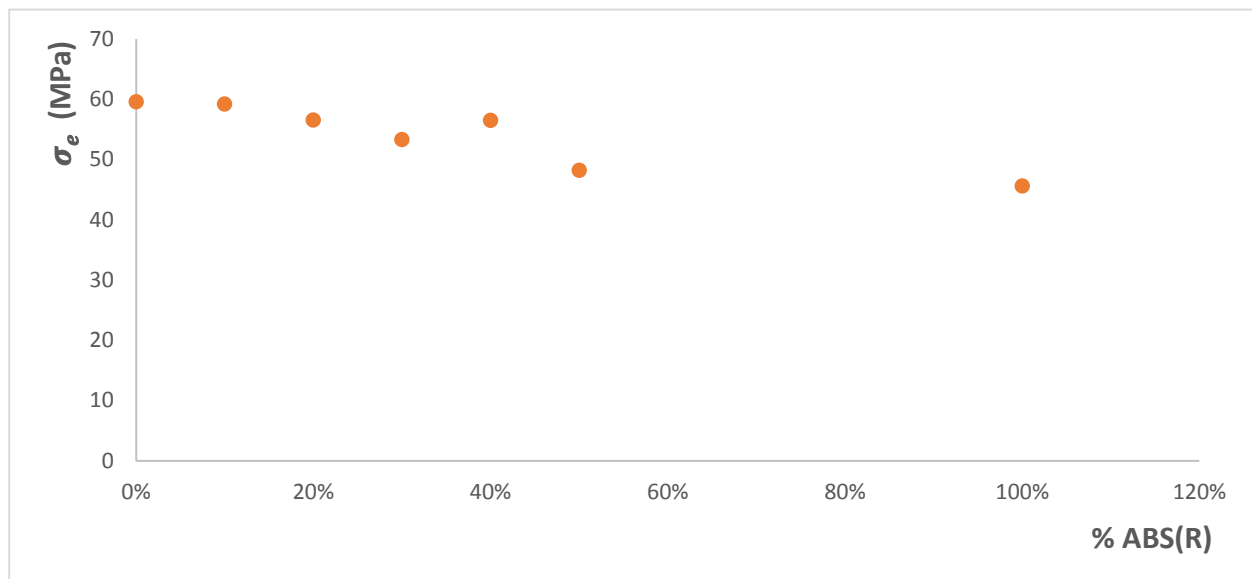


Figure IV.33 : Courbe de la contrainte à la limite élastique σ_e des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS recyclé obtenue par essai de traction

D'après les figures IV.32 et IV.33 on remarque une légère diminution de la contrainte élastique à l'ajout d'ABS, ce qui peut être même négligé dans certaines applications industrielles.

➤ **Superposition des courbes σ_e (%ABS) cas d'ABS (R) et ABS (VG) en traction**

% d'ABS	σ_e (MPa) ABS (R)	contrainte élastique en traction (MPa) ABS(VG)
0%	59,56	59,56
10%	59,2044	
20%	56,5746	58,4386
30%	53,3352	
40%	56,5206	
50%	48,226	56,6866
100%	45,6164	41,4330

Tableau IV.8: valeurs de la contrainte élastique σ_e des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS recyclé et vierge obtenue par essai de traction.

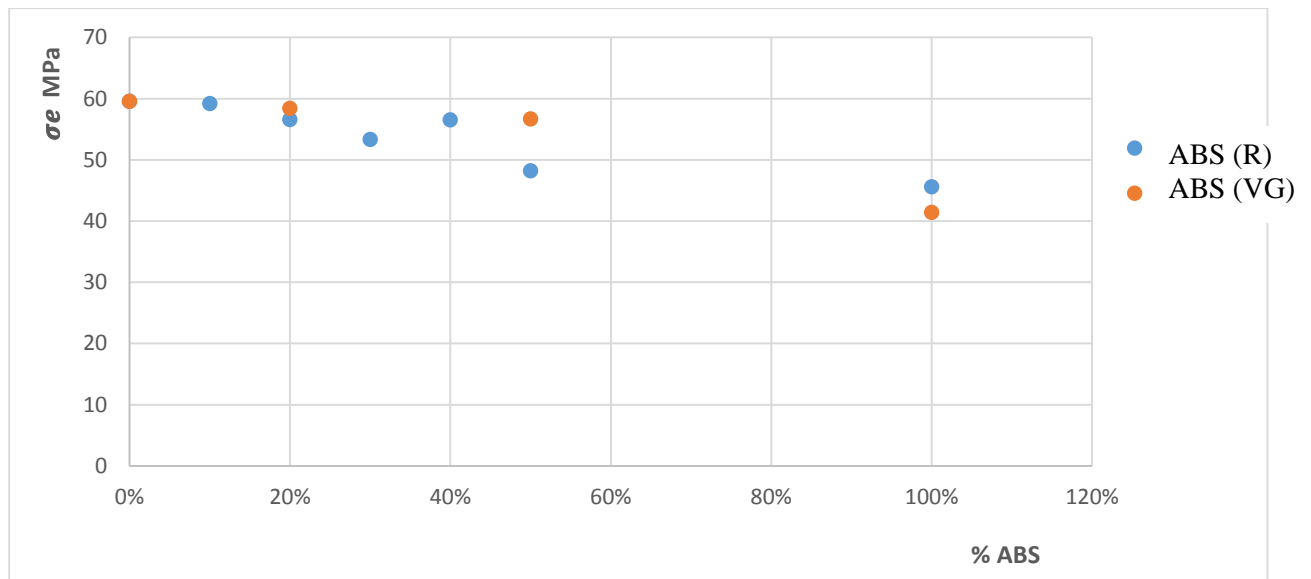


Figure IV.34 : Superposition des courbes σ_e (%ABS) cas d'ABS (R) et ABS (VG) en traction

La figure IV.34 montre que le comportement des courbes de la contrainte à la limite d'élasticité en traction en fonction du 100% ABS vierge et 100% ABS recyclé a presque la même allure. Ce qui montre qu'il n'y a pas grande différence entre élasticité d'ABS vierge et celle du recyclé. Comme on remarque aussi une chute par rapport à la limite d'élasticité du PMMA.

V.3.4.2) Cas de compression

➤ ABS (R)

% ABS (R)	la contrainte élastique en compression
0%	99,27
10%	97,65419
20%	81,13723664
30%	84,35178072
40%	78,94621496
50%	74,68519979
100%	33,52593154

Tableau IV.9: Variation de la limite élastique σ_e des mélanges PMMA/ABS en fonction du %d'ABS recyclé obtenue par essai de compression

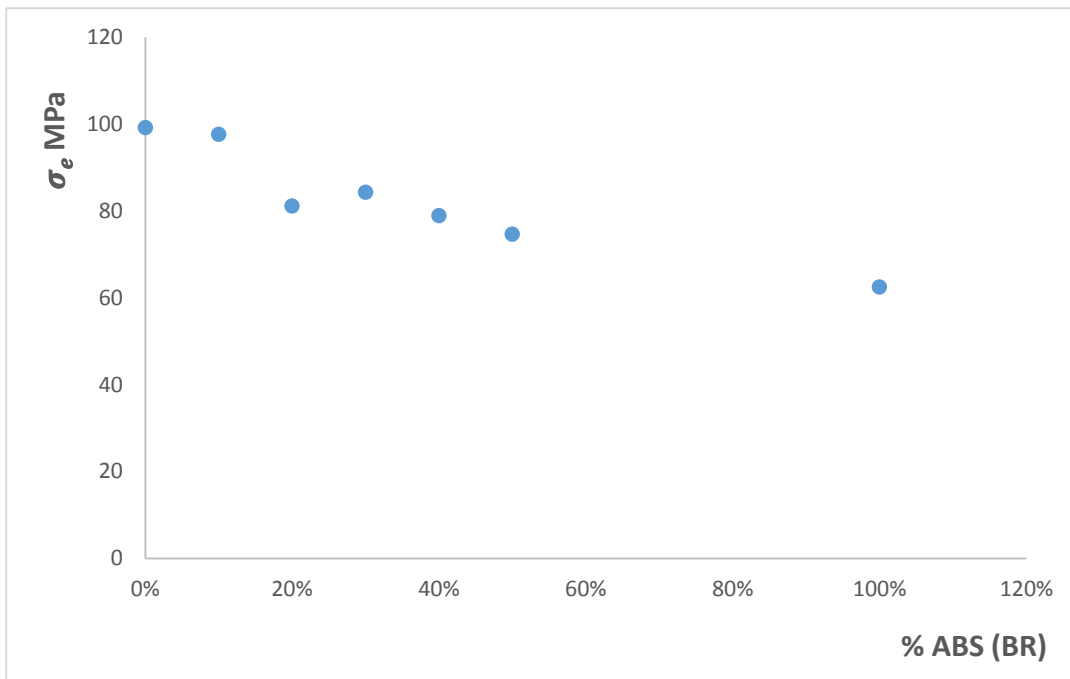


Figure IV.35 Courbe de la contrainte à la limite élastique σ_e des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS recyclé obtenue par essai de compression

➤ **ABS (VG)**

% ABS (VG)	σ_e (MPa)
0%	99,27
20%	83,479
50%	79,1129
100%	57,62

Tableau IV.10: variation de la limite élastique σ_e des mélanges PMMA/ABS en fonction du %d'ABS vierge obtenue par essai de compression

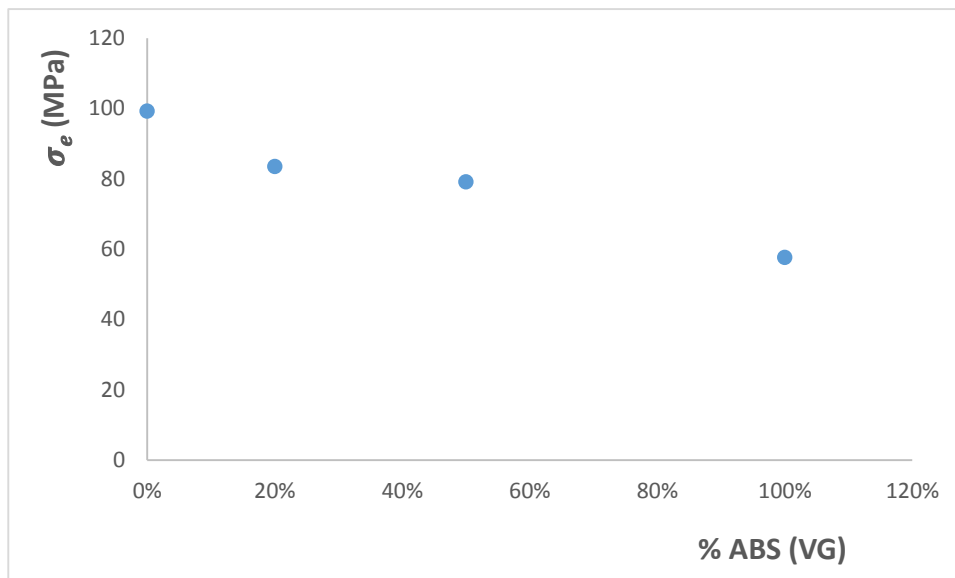


Figure IV.36 Courbe contrainte élastique σ_e en fonction du % d'ABS (VG) en compression

D'après les figures IV.35 et IV.36 on remarque une diminution de la contrainte élastique à l'ajout d'ABS quand on sollicite en compression.

➤ **Superposition des courbes σ_e (%ABS) cas d'ABS (R) et ABS (VG) en compression.**

% ABS (R)	contrainte élastique en compression (MPa) ABS (R)	Contrainte élastique (Mpa) ABS (VG)
0%	99,27	99,27
10%	97,65419	
20%	81,13723664	83,479
30%	84,35178072	
40%	78,94621496	
50%	74,68519979	79,1129
100%	33,52593154	57,62

Tableau IV.11: Valeurs de la contrainte élastique σ_e des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS recyclé et vierge obtenue par essai de compression.

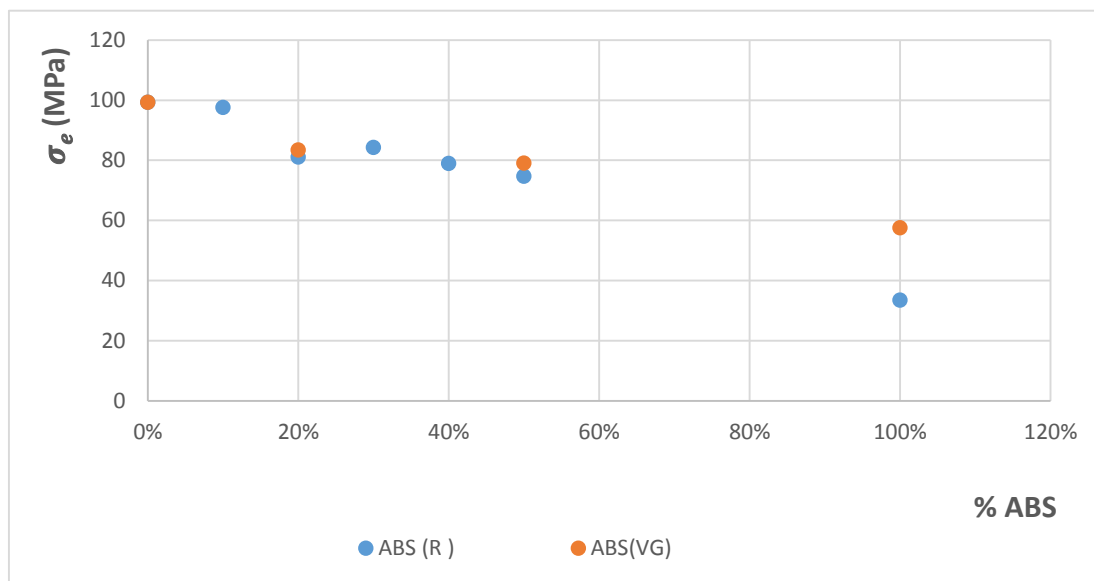


Figure IV.37: Superposition des courbes contrainte à la limite élastique σ_e des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS recyclé et vierge obtenue par essai de compression.

La figure IV.37 montre que l'allure du comportement des courbes de la contrainte à la limite d'élasticité en compression en fonction du 100% ABS vierge et 100% ABS recyclé, est presque la même. Ce qui montre qu'il n'y a pas de grande différence entre l'élasticité d'ABS vierge et celle du recyclé en cas de compression. Comme on remarque aussi une chute par rapport à la limite d'élasticité du PMMA.

IV.3.5) Tracée de la courbe de la contrainte à la rupture σ_r des mélanges PMMA/ABS en fonction du pourcentage % d'ABS

IV.3.5.1) Cas de traction :

➤ ABS vierge :

%ABS (VG)	contrainte à la rupture (σ_r) en MPa
0%	59,3969
20%	50,8205
50%	55,9574
100%	48,27

Tableau IV.12: Variation de la contrainte à la rupture σ_r des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS recyclé obtenue par essai de traction.

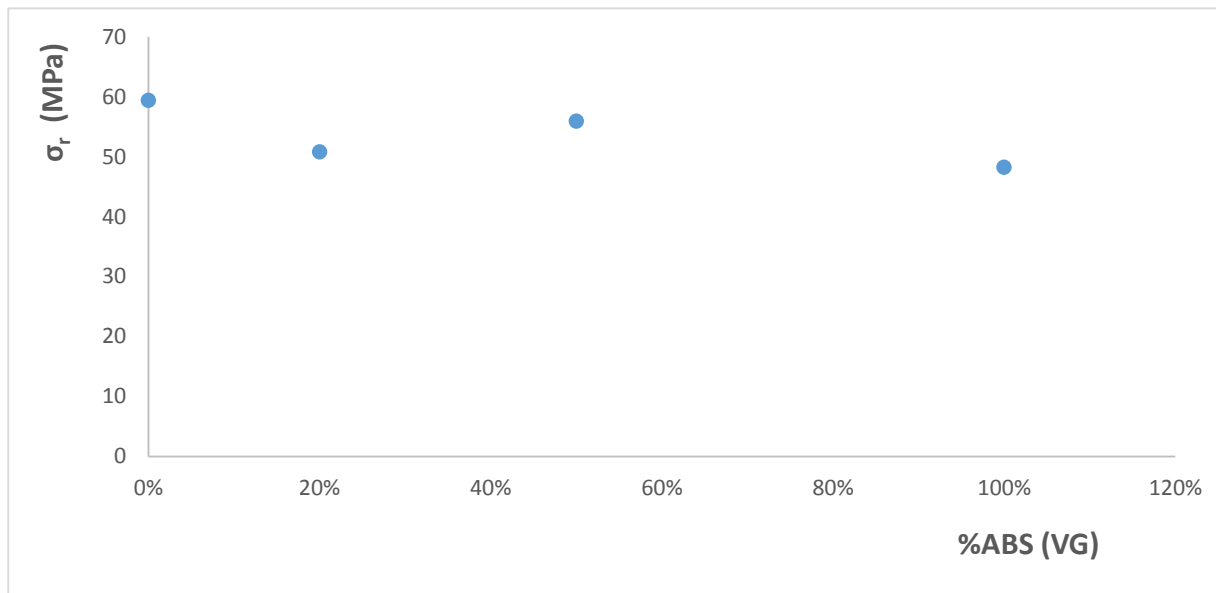


Figure IV.38 Courbe contrainte limite à la rupture σ_r en fonction du % ABS(VG) cas de traction

➤ **ABS recyclé**

% ABS (R)	Contrainte à la rupture σ_r
0%	56,39
10%	47,44
20%	51,96
30%	43,07
40%	50,47
50%	48,24
100%	42,23

Tableau IV.13 Courbe contrainte à la rupture σ_r en fonction du % ABS(R) cas de traction

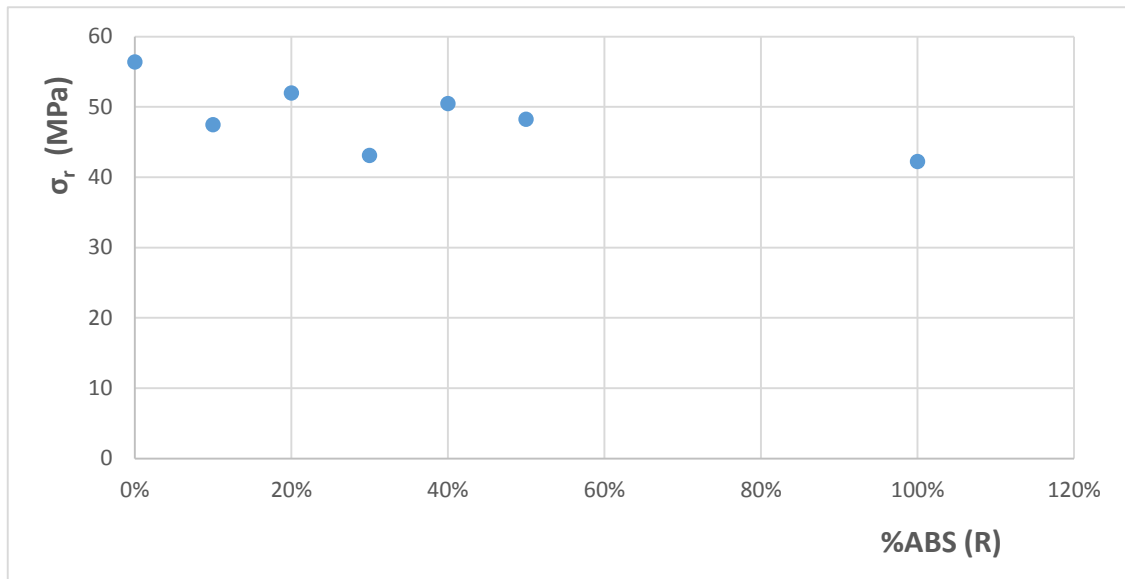


Figure IV.39 courbe contrainte limite à la rupture σ_r en fonction du % ABS(R) cas de traction

Les figures IV.38 et IV.39 montre une légère augmentation de la limite à la rupture à 50% ABS par rapport aux autres pourcentages qui marquent une diminution négligeable.

➤ **superposition des courbes σ_r (%ABS) cas d'ABS (R) et ABS (VG) en traction.**

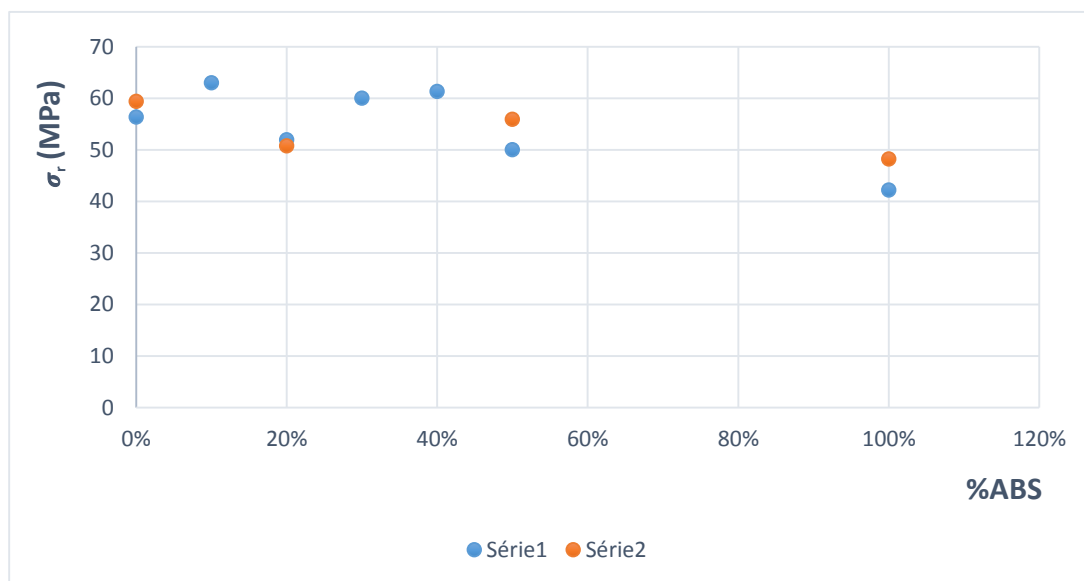


Figure IV.40 : superposition des courbes contrainte à la limite élastique σ_r des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS recyclé et vierge obtenue par essai de traction

La figure IV.40 montre que le comportement des courbes de la contrainte à la limite de la rupture en traction en fonction du 100% ABS vierge et 100% ABS recyclé a presque la même allure. Ce qui montre qu'il n'y a pas grande différence entre la résistance à la rupture d'ABS vierge et celle du recyclé. Comme on remarque aussi une chute par rapport à la limite de la rupture du PMMA.

IV.3.6 : Tracée de la courbe de la déformation à la rupture σ_r des mélanges PMMA/ABS en fonction du pourcentage % d'ABS

IV.3.6.1 : Cas de traction

➤ ABS (VG)

%ABS (VG)	déformation à la rupture $\epsilon_r\%$
0%	15,01
20%	13,23
50%	14,49
100%	31,58

Tableau IV.14: Variation de la déformation à la rupture ϵ_r des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS recyclé obtenue par essai de traction.

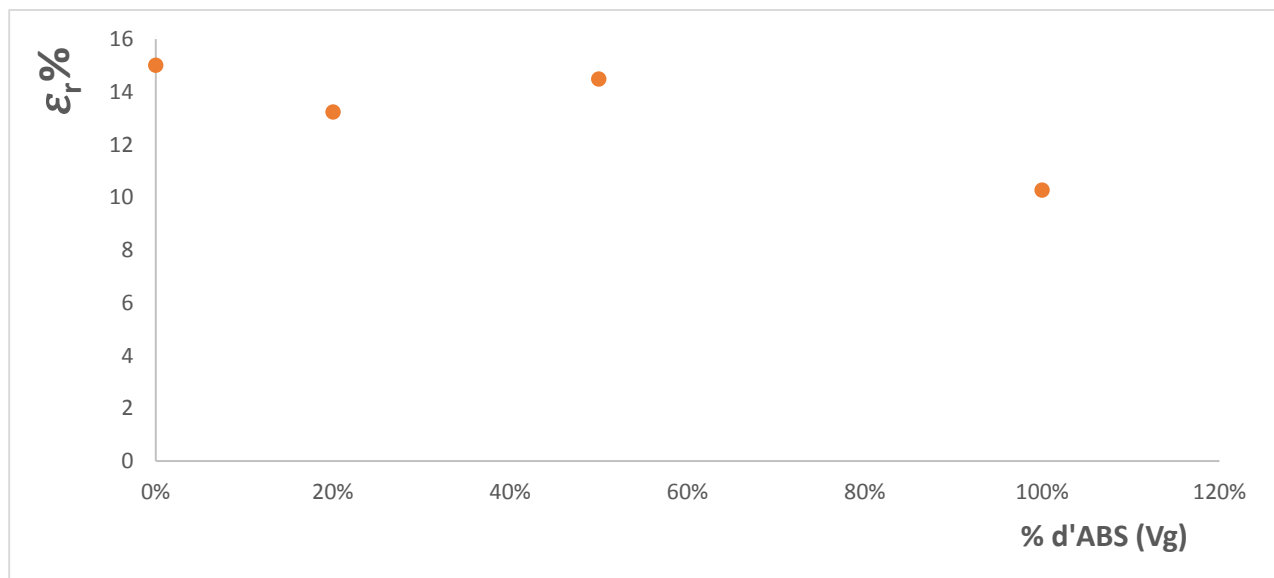


Figure IV.41 Courbe de la déformation à la rupture ϵ_r en fonction du % ABS(VG) cas de traction

➤ ABS recyclé

% ABS (R)	déformation à la rupture en traction % ϵ_r
0%	15,1
10%	12,27
20%	11,77
30%	10,24
40%	11,49
50%	15,88
100%	13,41

Tableau IV.15: Variation de la déformation à la rupture ϵ_r des mélanges PMMA/ABS en fonction du % d'ABS recyclé obtenue par essai de traction.

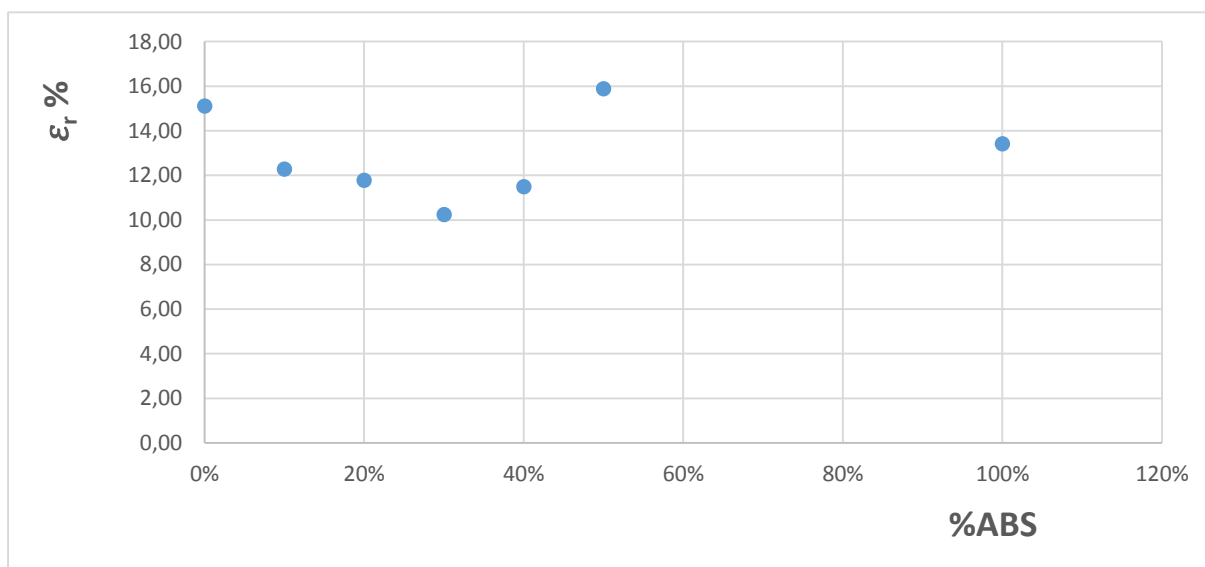


Figure V.42 : courbe déformation à la rupture ϵ_r % en fonction du % ABS(R) cas de traction

➤ Superposition des courbes ϵ_r (%ABS) cas d'ABS (R) et ABS (VG) en traction.

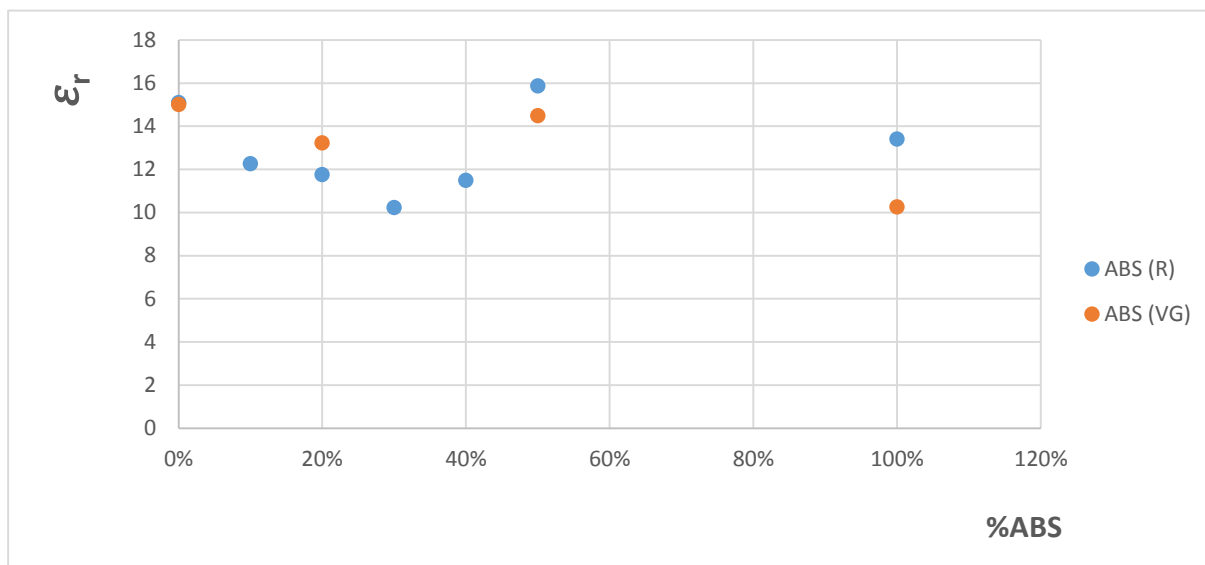


Figure V.43 : Superposition des courbes déformations à la rupture ϵ_r en fonction du % d'ABS recyclé et vierge obtenue par essai de traction.

D'après la figure 43 , on remarque que l'allure des deux courbes ABS (VG) et ABS (R) est la même, où elles baissent entre 0% et 30% et elles augmentent entre 30% et 50%, et elle marquent un pic à 50% ABS. Comme on remarque aussi que l'impact d'ABS (R) est mieux que celui d'ABS (VG).

On en déduit que l'ajout de 50% d'ABS à une influence positive sur l'allongement à la rupture.

V.3.7) Tracé de la courbe de la micro-dureté des mélanges PMMA/ABS en fonction du pourcentage % d'ABS

➤ ABS recyclé

% d'ABS (R)	La micro dureté HK
0%	14,333333
10%	9,333333
20%	12,333333
30%	16,666666
40%	12,333333
50%	14,5
100%	13,333333

Tableau IV.16: Valeurs de la micro dureté HK à différents pourcentage proportionnelle d'ABS recyclé

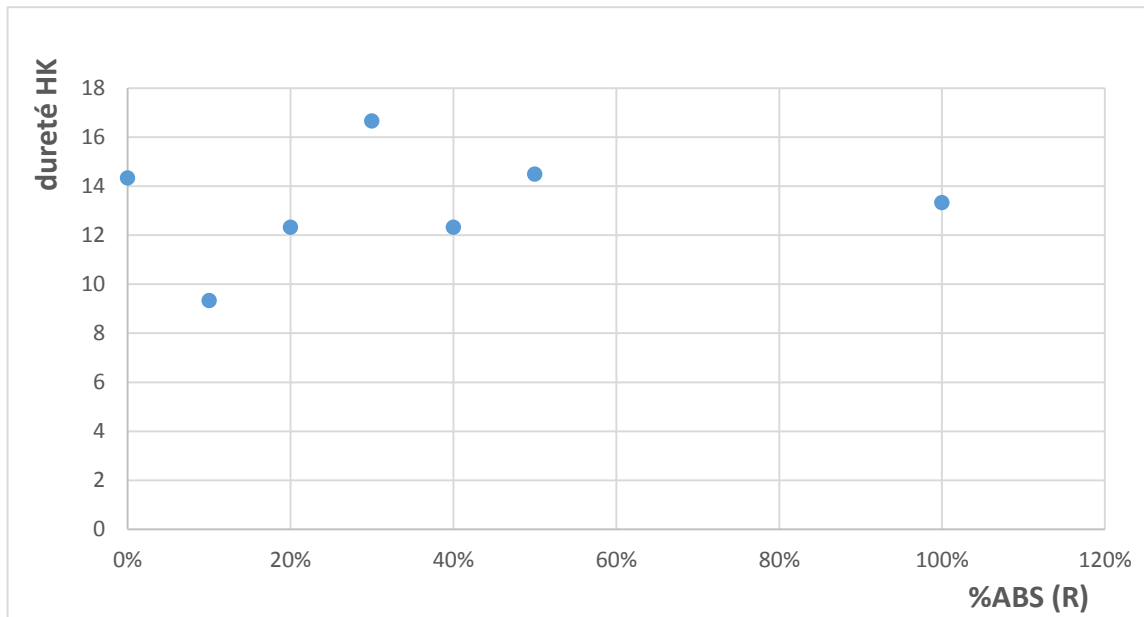


Figure IV.44 Courbe de la micro-dureté HK en fonction du %d’ABS recyclé

D’après la figure IV.44 la micro dureté n’est pas stable ce qui peut être dû à l’immiscibilité du copolymère PMMA-ABS.

- **ABS vierge**

% d'ABS (VG)	La micro dureté HK
0%	14,333333
20%	12
50%	12,333333
100%	11,333333

Tableau V.17: Valeurs de la micro dureté HK à différents pourcentage proportionnelle d’ABS vierge

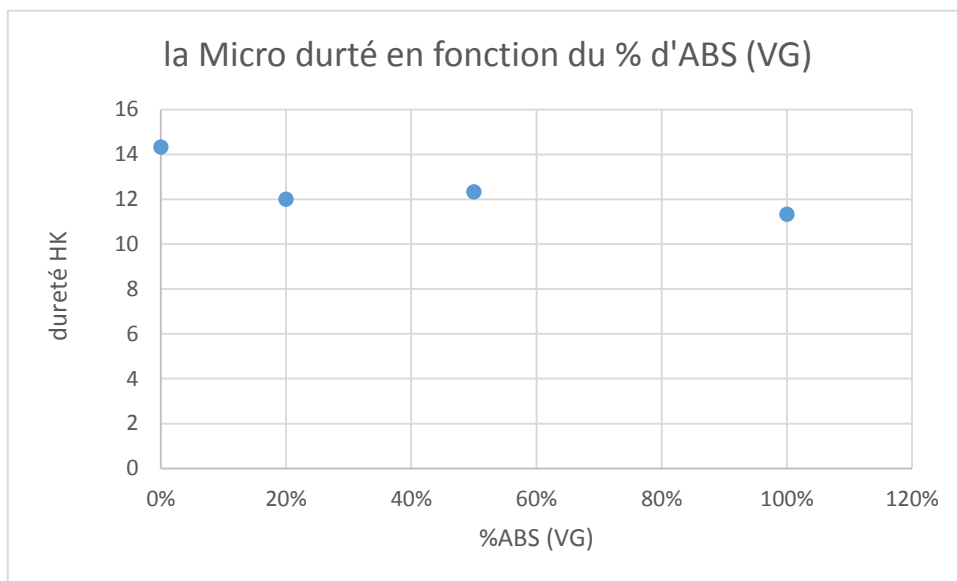


Figure IV.45 courbe de la micro-dureté HK en fonction du %d’ABS vierge

D’après les figures IV.44 et IV.45 la micro dureté n’est pas stable ce qui peut être dû à l’immiscibilité du copolymère PMMA-ABS, cependant elle montre un pique en raison de 50% ABS. . La dureté HK diminue de façon linéaire avec l'augmentation du rapport ABS dans le mélange, car l'ABS est plus mou que le PMMA.

➤ **Superposition des courbes de la micro-dureté des mélanges PMMA/ABS en fonction du pourcentage % d’ABS**

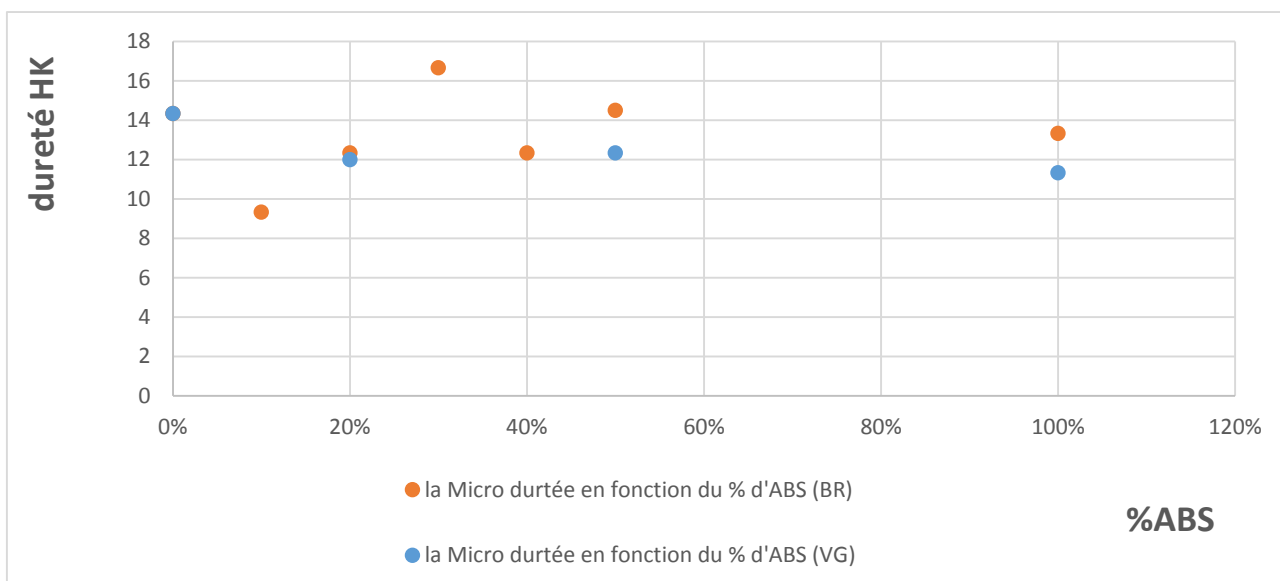


Figure IV.46 Superposition des courbes de la micro-dureté des mélanges PMMA/ABS en fonction du pourcentage % d’ABS

La Figure IV.46 montre qu'il y'a une légère hausse en dureté d'ABS recyclé par rapport à celle d'ABS vierge, ce qui traduit probablement le durcissement de l'ABS après recyclage.

Comme cette figure montre aussi le changement de dureté HK des mélanges PMMA-ABS contenant des pourcentages différents d'ABS. Il est clairement apparu que la dureté HK diminue avec l'augmentation du pourcentage ABS. Ceci est dû à la dureté inférieure de l'ABS en comparaison avec le PMMA.

V.4 : Conclusion

A l'issue de ce chapitre, nous avons pu déterminer le comportement mécanique de nos mélanges, ce qui nous a permis de définir ses caractéristiques (\mathbf{E} , σ_e , ϵ_e , ϵ_r , σ_r) et d'avoir une analyse mécanique de celui-ci, ce qui nous a permis de constater :

- une chute du module de Young à l'ajout de l'ABS ;
- une diminution de la contrainte à la rupture à l'ajout de l'ABS ;
- une augmentation de la déformation à la rupture à l'ajout de 50% d'ABS ;
- augmentation de la micro dureté avec l'augmentation du pourcentage d'ABS ;
- nous avons constaté une quasi-stabilité de ces caractéristiques mécaniques en faisant une comparaison entre ABS vierge et ABS recyclé, cela nous montre l'avantage de l'utilisation de l'ABS recyclé. Les propriétés en traction, comme le module de Young et la contrainte maximale, sont très peu affectées.

Conclusion générale

A la lumière de ce travail, consacré à l'élaboration des mélanges polymériques à base de PMMA (IG840) et ABS (HI121) vierge et recyclé par la technique d'extrusion mono vis ,dont des éprouvettes normalisées réalisées par injection ont été caractérisées en traction, compression, et mesure de micro dureté, nous avons nous avons pu :

Déterminé les caractéristiques mécaniques des nouveaux matériaux (mélanges PMMA-ABS) et déduit l'influence de l'ajout de l'ABS sur le comportement mécanique du PMMA pour chaque proportion.

A l'issus des résultats obtenus nous avons pu déterminer les caractéristiques mécaniques des nouveaux matériaux (mélanges PMMA-ABS) et de déduire l'influence de l'ajout de l'ABS sur le comportement du PMMA pour chaque proportion.

Dans les conditions de préparation décrites dans ce travail, nous avons réalisé que le mélange effectué à l'aide d'extrudeuse mono vis, qui ne permis pas d'avoir une miscibilité totale des deux matériaux afin d'amélioré les caractéristique mécanique du matériau de base (PMMA) par l'ajout d'ABS ; induit dans notre cas une baisse des valeurs des caractéristiques mécanique d'enivrent 4% maximum, ce qui n'est pas vraiment significatif. Cela nous a permis de dire que cette technique reste un procédé très disponible à l'échelle industrielle permettant la récupération des rebuts (le recyclage).

En comparant les résultats de notre travail à ceux de l'article publié dans le journal irakien pour l'ingénierie mécanique et matérielle, [Dr Imad Ali et al], ([1]) nous avons déduit que le procédé d'élaboration à une influence directe sur le comportement du matériau élaboré.

Ce présent travail nous a permis aussi de dire que les mélanges de polymères restent une bonne alternative soit pour la récupération (le recyclage) soit pour l'élaboration de nouveaux matériaux avec de nouvelles caractéristiques.

Perspectives

En guise de perspectives nous proposons :

D'utiliser l'extrudeuse baxis;

D'utiliser des adjuvants (Fillers, Renforts....) ;

D'étudier la miscibilité du mélange PMMA-ABS ;

D'élaborer de l'ABS à grande teneur en acrylonitrile par rapport au AN greffée, car c'est l'acrylonitrile qui confie les bonne caractéristiques mécaniques à l'ABS, (E , σ_e , ϵ_r).

De vérifier la création de nouvelles liaisons intermoléculaire en faisant le teste de l'infrarouge ;

De changé le procédé de mélange en utilisant de l'acétone au lieu de l'extrusion par exemple ;

D'étudier la densité des mélange afin de se faire une idée sure les défauts de la micro dureté.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Imad Ali Disher Al-Hydary et al. Preparation et caractérisation des mélanges de PMMA-ABS. Article publié dans le Journal irakien pour l'ingénierie mécanique et matérielle, Vol.12, No.4. 2012.
- [2] H. Staudenger : UBER polymérisation, BER .DTSCH.CHEM.GES ; N^o53 (1920) 1.073-1.085.
- [3] Mohamed Amraoui. Les propriétés mécaniques des Polymères et des bio-polymères. Mémoire de magistère. Université d'Oran. 2009.
- [4] <https://fr.m.wikipedia.org>
- [5] Salah Kamel. Effet de la température et de vieillissement thermique sur le comportement mécanique et microstructural du polycarbonate. Mémoire de master en génie mécanique.UM M TO .2016.
- [6] Rachid El Aidani. Effet du vieillissement sur les propriétés de la membrane humidifuge en e-ptfe/nomex® utilisée dans les vêtements de protection contre les incendies. 2012
- [7] "Vieillissement chimique des plastiques." Techniques de l'ingénieur (AM 3152)
- [9] Alain Lameur. Mise en œuvre des polymères, Initiation a la rhéologie des polymères. Cours .Université de Toulouse. 2015
- [10] Matthieu Garin. Synthèse et étude des propriétés physico-chimiques des poly (butylène succinate) Linéaire et branché. Thèse de doctorat .Université de Reims Champagne-Ardenne UFR science exacte et naturelles. 2012.
- [11] Lakhdhari Fatiha. Synthèse de polymères photorésistants. Mémoire de Magister. USTOMB. 2008
- [12] Benaabid-Zouai Fatma-Zohra. Etude des mélanges PVDF/PMMA et de leurs nano composites PVDF/PMMA/Maghnite en vue d'application comme revêtement. Thèse de doctorat. Université Ferhat Abbas SETIF. 2015.
- [13] Jean- Marie Michel, contribution à l'histoire industrielle des polymères en France.

- [14] Patrick Amarelis. Nanocomposites polyméthacrylate de méthyle - silicates lamellaires. Influence de la nature de la charge et de l'interface sur les propriétés mécaniques et sur la transition vitreuse. Thèse de Doctorat. Université PARIS 6. 2005
- [15] Marielise Barthes. Thèse de Doctorat. Université BORDEAUX 1, Spécialité: Mécanique et Ingénierie. 2010.
- [16] Sophie Grima. Biodégradation de matériaux polymères à usage agricole. Thèse de doctorat. Toulouse. 2002.
- [17] Fiche technique du PMMA
- [18] Thuy Linh Pham. Plastification en injection des polymères fonctionnels et chargés. Thèse de doctorat .L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon Pour. 2013
- [19] Moukrani Hayet. Taghrout Farid. Étude du comportement mécanique des déchets d'équipements électriques et électroniques avec SBR. Mémoire de fin d'étude master en génie mécanique. UMMTO. 2016.
- [20] Roland Fortunier. Comportement Mécanique des Matériaux. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines 158 cours Fauriel 42023 Saint-Etienne cedex 2.
- [21] Cours Base physique quantitative des lois de comportement mécanique (Ch_14_LdC).
- [22] Kal Naima. Etude expérimentale de comportement mécanique de PMMA à l'état vierge et après vieillissement par UV. Mémoire de Master en génie mécanique. UMMTO. 2014.