



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

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCEM

MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE CHIMIE

Pour l'obtention du diplôme de :

MASTER EN CHIMIE

Spécialité : Chimie Macromoléculaire

Par :

Mr ZENNAKI Mohammed el amine

Sur le thème

Préparation et caractérisation de nouveaux matériaux dérivés de déchets de polystyrène

Soutenu publiquement le 06 octobre 2020 à Tlemcen devant le jury composé de :

Mr K. MEDJAHED	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mr L. TENNOUGA	Professeur	ESSA-Tlemcen	Encadreur
Mr B. BOURAS	Maitre de Conférences A	Université de Tlemcen	Examineur
Mr T. HOCINE	Maitre de Conférences B	Université de Tlemcen	Examineur

Année Universitaire : 2019 ~ 2020

A mes très chers parents

Affables, honorables, aimables : vous représentez pour moi le symbole de la bonté par excellence.

Votre prière et votre bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études ;

Vous avez tout fait pour que vos enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études ;

Je vous dédie ce travail en témoignage de votre profond amour ;

Mais Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous les sacrifices que vous n'avez cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte ;

Ce travail est le fruit de vos sacrifices.

A mon très cher frère (hadj)

Que dieu vous assiste ;

Je te souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité ;

A mon grand-père et ma grand-mère

A tous les membres de ma famille, petits et grands

Remerciements

Ce travail a été réalisé au Laboratoire d'Application des Electrolytes et des Polyélectrolytes Organiques (LAEPO), de l'université Abou-Bakr-Belkaid de Tlemcen dirigé par Monsieur le professeur **Kouider MEDJAHED**

Je tiens à remercier en premier lieu Monsieur le Professeur **Kouider MEDJAHED**, pour m'avoir accueillie au sein de son laboratoire. Je lui suis profondément reconnaissante de ses conseils et ses encouragements.

Monsieur le Professeur **Lahcène TENNOUGA**, a suivi ce travail de recherche, je lui adresse remercier chaleureusement pour m'avoir encadré, conseillé et encouragé tout au long de ce travail, et également pour la confiance qu'il m'a accordée.

Je remercie tous les membres du jury d'avoir accepté de juger ce travail avec bienveillance : Mr **Kouider MEDJAHED** pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury. Mr **Brahim BOURAS**, Maitre de conférences A et Mr **Tayeb HOCINE**, Maitre de conférences B qui ont très aimablement accepté de faire partie du jury en qualité d'examineurs.

Je remercie également l'équipe de formation de filière macromoléculaire l'université de Tlemcen pour ses conseils et ses encouragements.

J'adresse également mes remerciements les plus sincères au Monsieur **Ahmed BENALI**, pour sa permanente disponibilité, son aide, son soutien moral, ses orientations et ses remarques fructueuses au cours de mon étude. Merci beaucoup.

Un grand merci à tous les membres du Laboratoire (LAEPO) sans exception, je citerais les thésards en particulier les doctorants qui m'ont soutenu moralement le long de ce travail.

Mes remerciements s'adressent également à l'ingénieur du Laboratoire (LAEPO) Madame **Souhila ZIANI** pour sa disponibilité et son aide.

Mes remerciements vont également à tous mes collègues chercheurs du LAEPO, qui m'ont soutenu moralement le long de ce travail et particulièrement à chahinez. Imene, mohammed, rabah, soundous, ghizlene, amine, kheireddine, meriem, sara, ayoub, redouane, nedjwa, qui ont su créer une ambiance chaleureuse de camaraderie et de travail pendant 2 ans qui restera un souvenir que je conserve de cette période.

Un grand merci pour mes amis au cours de ma carrière scolaire particulièrement amina, abdessamed, mohammed.

Veillez trouver dans ce travail l'expression de ma profonde reconnaissance.

ZENNAKI med el amine



Liste des tableaux

Tableau 1 : Quelques applications de PEBD et PEHD.....	6
Tableau 2 : Recyclage et production de thermoplastiques au japon.....	14
Tableau 3 : Des résines qui facilitent le tri et le recyclage dans le flux des déchets.....	15
Tableau 4 : Différents types de polymérisation.....	18
Tableau 5 : Quelques propriétés selon la tacticité.....	19
Tableau 6 : Propriétés physico-chimique de polystyrène.....	20
Tableau 7 : Propriétés mécaniques.....	20
Tableau 8 : Propriétés thermiques.....	21

Liste des figures

Figure 1 : Structure de polyéthylène.....	5
Figure 2 : Structure de polypropylène.....	7
Figure 3 : Structure isotactique de polypropylène.....	7
Figure 4 : Structure de polychlorure de vinyle.....	9
Figure 5 : Structure des polyesters thermoplastiques.....	10
Figure 6 : Structure de polycarbonate.....	11
Figure 7 : Structure de polyamides (PA6 et PA66).....	12
Figure 8 : Structure de polytétrafluoréthylène.....	13
Figure 9 : Déchets plastiques existants, recyclés et nouveaux entrants.....	14
Figure 10 : Structure de polystyrène.....	17
Figure 11 : Diagramme schématique de la production de PSE.....	22
Figure 12 : Structure de copolymère styrène-acrylonitrile.....	24
Figure 13 : Structure de copolymère l'acrylonitrile styrène acrylate.....	25
Figure 14 : Structure de copolymère styrène butadiène.....	26
Figure 15 : Montage de préparation du polystyrène sulfoné.....	32
Figure 16 : Structure de polystyrène sulfoné.....	33
Figure 17 : Structure de polystyrène sulfoné de sodium.....	33
Figure 18 : Forces agissant sur deux éléments de couches voisines.....	35
Figure 19 : Mouvement laminaire de cisaillement entre deux plans parallèles.....	36
Figure 20 : Variation de la contrainte en fonction du gradient de vitesse.....	37
Figure 21 : Variation de la viscosité en fonction du gradient de vitesse.....	37

Figure 22 : Variation de la viscosité en fonction du gradient de vitesse.....	38
Figure 23 : Comportement rhéofluidifiant.....	39
Figure 24 : L'expression logarithmique.....	39
Figure 25 : Variation de la contrainte en fonction du gradient de vitesse.....	40
Figure 26 : Variation de la viscosité en fonction du gradient de vitesse.....	40
Figure 27 : Rhéomètre Brookfield DV-III+.....	41
Figure 28 : Variation de la viscosité à cisaillement zéro en fonction de la concentration pour le polystyrène dans le toluène à 25°C.....	44
Figure 29 : Variation de la viscosité en fonction du taux de cisaillement pour le polystyrène $3,2 \cdot 10^4$ g/mol dans le toluène pour diverses concentrations à 25°C.....	45
Figure 30 : Variation de la viscosité réduite en fonction de la concentration du polystyrène à différentes températures dans le toluène.....	46
Figure 31 : Variation de la viscosité réduite du polystyrène sulfoné en fonction de la concentration.....	47
Figure 32 : Variation de la viscosité dynamique en fonction du taux de cisaillement pour des solutions de NaPSS de différentes concentrations.....	48
Figure 33 : Variation de la viscosité spécifique du NaPSS en fonction de sa concentration.....	49



Liste des abréviations

PP	Polyéthylène
PEHD	Polyéthylène haut densité
PEBD	Polyéthylène basse densité
PP	Polypropylène
PVC	Polychlorure de vinyle
PS	Polystyrène
PVDC	Polychlorure de vinylidène
PET	Polyéthylène téréphtalate
PBT	Polybutylène téréphtalate
PC	Polycarbonate
PA	Polyamide
PA6	Polycaprolactame
PA66	Polyhexa méthylène diadipique
PTFE	Polytétrafluoréthylène
PELD	Polyéthylène basse densité
AIBN	Azobisisobutyronitrile
PSE	Polystyrène expansé
HBCD	Hexabromocyclododécane
SAN	Styrène acrylonitrile
ASA	Acrylonitrile styrène acrylate
HIPS	High impact polystyrene
SBR	Styrène butadiène rubber
ABS	Acrylonitrile butadiène styrène

T_g	Température de transition vitreuse
T_f	Température de fusion
DS	Le degré de sulfonation
τ	La contrainte de cisaillement
$\dot{\gamma}$	Le taux de cisaillement
v	La vitesse de cisaillement
η	La viscosité dynamique
C^*	La concentration critique de recouvrement.

Tables des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	
I. Les thermoplastiques.....	4
I.1.Introduction	4
I.2.Classification des thermoplastiques	5
I.2.1. Les polyoléfines	5
I.2.2. Les polystyréniques	8
I.2.3. Les polyvinyliques	9
I.2.4. Polyesters thermoplastiques.....	10
I.2.5. Les polycarbonates	10
I.2.6. Les polyamides	11
I.2.7. Polyvinyléthers	12
I.2.8. Polymères contenant du fluorure	12
I.2.9. Les cellulosiques	13
I.3. Production et recyclage.....	13
I.3.1. Le recyclage primaire.....	16
I.3.2. Recyclage mécanique.....	16
I.3.3. Recyclage chimique.....	16
I.3.4. Récupération d'énergie	17
II. Polystyrène	17
II.1. Synthèse	17
II.2. Des propriétés de polystyrène	18
II.2.1. Physico-chimique.....	20
II.2.2. Mécanique.....	20
II.2.3. Thermiques	21
II.3. Dérivés de Polystyrène.....	21
II.3.1. Polystyrène expansé (EPS)	21

A.EPS basé sur la polymérisation en suspension.....	22
B. PSE basé sur le procédé d'extrusion.....	23
II.3.2. Polystyrène syndiotactique	23
II.3.3. Copolymères styréniques.....	24
A. Styrène-acrylonitrile (SAN).....	24
B. Styrène-acrylonitrile (SAN).....	24
C. Styrène butadiène.....	25
II.4. Recyclage	26
II.4.1. Recyclage mécanique	27
II.4.2. Recyclage chimique	27
II.4.3. Recyclage thermique.....	27
Référence	29

CHAPITRE II : PRODUITS ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

I. Produits et matériels utilisés	32
II. Mode opératoire	32
III. Méthodes de caractérisations.....	34
III.1. Rhéologie.....	34
III.1.1. Définition.....	34
III.1.2. Caractéristiques d'un fluide... ..	34
III.1.3. Contrainte de cisaillement.....	35
III.1.4. Déformation et vitesse de cisaillement.....	36
III.1.5. Les modes d'écoulement	37
A. Fluide newtonien.....	37
B. Fluide non-newtonien indépendant du temps.....	38
III.1.6. Appareillage.....	41
Référence.....	42

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

I.Introduction	43
II. Etude rhéologique du polystyrène.....	43
II.1. Effet de la concentration.....	43

II.2. Effet du taux de cisaillement.....	44
II.3. Effet de la température sur la viscosité réduite.....	45
III. Etude rhéologique du sodium polystyrène sulfoné.....	46
III.1. Influence de la polarité.....	46
III.2. Influence de la concentration.....	47
Références	50
Conclusion générale	51



INTRODUCTION GENERALE

Dans les pays développés, la consommation de plastique a augmenté de façon remarquable au cours des deux ou trois dernières décennies [1]. Dans les pays développés, les ressources pétrolières limitées sont utilisées pour produire une variété de plastiques pour une large gamme de produits. Pour la plupart des applications, les produits ont un cycle de vie de quelques mois, puis la grande majorité est éliminée par combustion à ciel ouvert et dans des décharges non sanitaires, ce qui présente des risques pour la santé publique et l'environnement [2]. Dans la plupart des cas, la valorisation de ces déchets plastiques n'est pas économiquement réalisable.

L'industrie s'oriente de plus en plus vers la réutilisation et la reproduction des plastiques pour des raisons économiques et environnementales, de nombreuses entreprises développant des technologies et des stratégies de recyclage des plastiques. Mieux encore, des efforts sont faits pour produire des matériaux biodégradables à partir de matières végétales qui peuvent remplacer les plastiques [3]. Les plastiques sont fabriqués à partir de ressources non renouvelables et sont soit non biodégradables, soit le processus de biodégradation est lent. Par conséquent, les déchets plastiques sont généralement le type de déchets persistants le plus odieux et réduisent la durée de vie des installations d'élimination des déchets telles que les décharges [4].

Le polystyrène est un plastique largement utilisé pour les emballages. Son code SPI c'est 6, indiquant la difficulté associée à son recyclage [5]. En raison de sa faible densité, ce qui crée une nuisance visible. Les formes courantes de polystyrène largement utilisées dans l'industrie sont le polystyrène à usage général (GPPS), le polystyrène expansé (EPS), le polystyrène à haute résistance aux chocs (HIPS) et le polystyrène syndiotactique (SPS).

Le recyclage du polystyrène est également une pratique bien établie. Cependant, dans la plupart des pays, il existe une restriction à l'utilisation du polystyrène recyclé dans les applications alimentaires [6].

Parmi des applications les plus curieuses pour le polystyrène recyclé est de préparation des branches de la coloration des murs et des sols [7] des adhésives [8] et des peintures [1] et des colorants bien efficace [9].

Recyclage de déchets de polystyrène est aussi utilisé pour l'élimination de phénol [10] et des métaux [11] dans les eaux usées bien que dans le traitement des eaux comme coagulation et floculation [11].

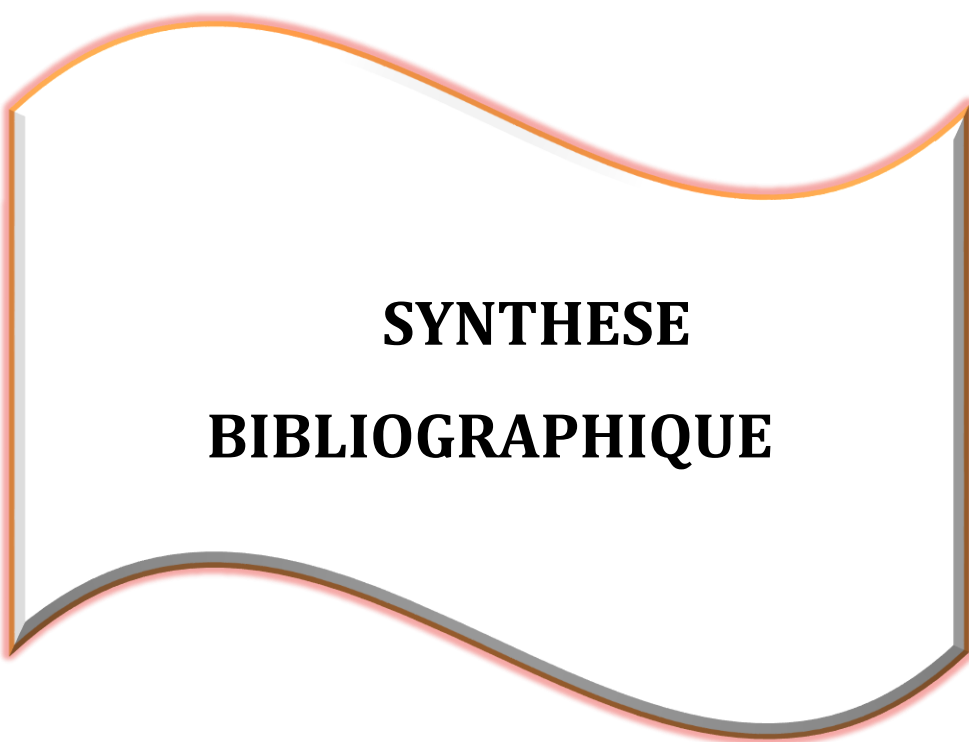
Ce document sera présenté en trois grande partie :

- La première partie comporte deux chapitres est dédiée à une large revue de la littérature relative aux thermoplastiques, et leur dérivée et des applications. Nous donnons aussi un résumé sur le polystyrène, leurs caractéristiques et applications. La technique de préparation et leur dérivée. Nous nous intéressons par le recyclage des déchets de polystyrène et des applications.
- Dans la deuxième partie, nous essayons de donner les étapes de la modification de polystyrène pendant la synthèse et aussi rappelle générale sur la rhéologie.
- La troisième partie est consacrée pour les résultats expérimentaux de l'étude physico-chimique des systèmes (polystyrène-solvant) et (polystyrène sulfoné)

Nous terminons ce travail par une conclusion générale.

Références

- [1] Chaukura N, Gwenzi W, Bunhu T, Ruziwa DT, Pumure I (2016). A review. *Resour. Conserv. Recycl.* Elsevier B.V. 107: 157–165. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.031>.
- [2] Huysmana S, Debaveyea S, Schaubroecka T, De Meestera S, Ardenteb F, Mathieuxb F, Dewulf J (2015). *Resour, Conser and Recycling* Elsevier.101:53-60. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.05.014>.
- [3] Selke SE (2006). *Plastics Recycling and Biodegradable Plastics. Handbook of Plastics Technologies.* McGraw-Hill.
- [4] Venkatesan R (2006). *Plastics. Sci. Rep.* 43: 34–36.
- [5] Bekri-Abbes I, Bayoudh S, Baklouti M (2006). *J. Polym. Environ.* 10.1007/s10924-006-0018-3.
- [6] Hocking MB (1991). *POLICY FORUM.* 251: 504–505. [10.1126/science.251.4993.504](https://doi.org/10.1126/science.251.4993.504)
- [7] Chindaprasirt P, Hiziroglu S, Waisurasingha C, Kasemsiri P (2008). *Polymers and Polymer Composites.* 10.1002/pc.
- [8] Issam AM, Poh BT, Abdul Khalil HPS, Lee WC (2009). *J Polym Environ.* 17: 165–169. [10.1007/s10924-009-0134-y](https://doi.org/10.1007/s10924-009-0134-y).
- [9] Liu D, Liu J (2013). *J Mater Cycles Waste Manag.* 10.1007/s10163-013-0210-1.
- [10] Sun H, Zhang Z, Song L (2010). *Wiley Online Library.* 10.1002/ep.10430.
- [11] Sułkowski WW, Nowak K, Sułkowska A, Wolińska, Bajdur WM, Pentak D, Mikuła B (2009). *Pure Appl. Chem.* 81: 2417–2424. [10.1351/PAC-CON-08-11-20](https://doi.org/10.1351/PAC-CON-08-11-20)



**SYNTHESE
BIBLIOGRAPHIQUE**

I. Les Thermoplastiques

I.1. Introduction

Les polymères thermoplastiques sont généralement solides ou caoutchouteux à température pièce et se distinguent par leur capacité à se mélanger ou à être mise en forme à partir d'une certaine température. Par définition, ils retrouvent aussi leurs propriétés initiales après refroidissement. Cette capacité rend possible une multitude de méthodes de mise en forme comme l'extrusion et le moulage ou le recyclage des résidus [1], l'avantage d'utiliser des polymères thermoplastiques est leur coût de mise en forme généralement plus bas et leur cadence de production plus élevée que pour la majorité des matériaux thermodurcissables [2].

Le comportement thermoplastique de ces polymères provient des interactions intermoléculaires de basse énergie entre certains groupes du motif constitutif de ceux-ci. À très basses températures, l'énergie de ces liaisons est dominante par rapport à l'énergie de vibration des chaînes et aucun mouvement n'est possible, le solide est à un état vitreux. À partir d'une température définie comme la température de transition vitreuse T_g , les parties amorphes du thermoplastique retrouvent une certaine mobilité, redonnant une certaine élasticité macroscopique au matériau. Ce changement apporte une chute importante du module élastique du matériau [3].

Si le polymère est complètement amorphe, l'augmentation de température mènera à un changement graduel de ses propriétés avec la diminution de l'importance des interactions intermoléculaires et l'augmentation du glissement entre les chaînes polymériques. Généralement, ce polymère se retrouvera à l'état liquide viscoélastique à une centaine de degrés au-delà de la (T_g).

Dans le cas d'un polymère semi-cristallin, les régions cristallines de la matrice empêcheront de grands glissements des chaînes jusqu'à ce que la température de dissociation des cristaux ne soit atteinte, la température de fusion (T_f) [4].

Théoriquement, un polymère 100% cristallin passerait de l'état vitreux à l'état liquide visqueux à la T_m sans avoir de T_g observable : les vrais polymères

thermoplastiques ne sont par contre jamais totalement cristallins, étant donné la présence de sections amorphes au bout des cristallites [5].

I.2. Classification des thermoplastiques

I.2.1. Les polyoléfines

A. Polyéthylène : Le polyéthylène est le plastique produit en masse le plus largement utilisé (Figure 1). La capacité de production mondiale de polyéthylène en 2007 est estimée à 79.10^6 tonnes par an. De cette quantité, 21.10^6 tonnes sont du PEBD, 22.10^6 tonnes du PEBD linéaire (PEBDL), et le reste de 36.10^6 tonnes du PEHD [6].

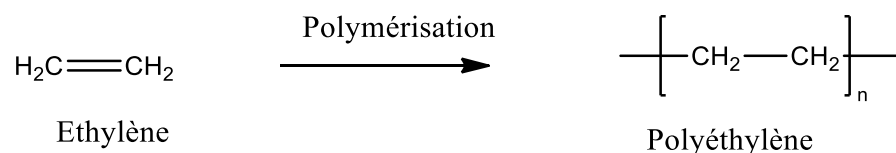


Figure 1 : La structure de polyéthylène

Le développement du PE a commencé en 1936 avec l'introduction du procédé de polymérisation à haute pression de l'éthylène en PEBD ($0,915-0,94g. cm^{-3}$), qui a produit un polymère de poids moléculaire relativement faible. La fabrication du PEHD par polymérisation à basse pression a commencé après la découverte des catalyseurs Ziegler en 1953. Le PEHD produit par ce procédé a une densité moyenne ($0,945g. cm^{-3}$). Le procédé Philips et Standard Oil a également été développé dans les années 1950 et produit du PEHD de la plus haute densité ($0,96g. cm^{-3}$).

Tous les polyéthylènes sont semi-cristallins. Leur densité et leur température de fusion diminuent avec l'augmentation de la ramification.

Le PE possède une bonne stabilité chimique. Les propriétés mécaniques dépendent du poids moléculaire et du degré de ramification de la chaîne. Le PE peut être facilement scellé à chaud, est résistant et a une grande élasticité. Il a de bonnes propriétés de résistance au froid et constitue une bonne barrière à la vapeur d'eau.

Cependant, le PEBD a de faibles propriétés de barrière aux gaz, aux arômes et aux matières grasses. Avec l'augmentation de la densité, toutes les propriétés de barrière augmentent ainsi que la rigidité, la dureté et la résistance, en raison de la cristallinité la plus élevée. En même temps, on observe une diminution de la résistance aux chocs, de la ténacité, de la résistance à la fissuration sous contrainte, de la résistance au froid et de la transparence [7].

PE est utilisé dans la moitié des emballages plastiques et dans les domaines les plus divers.

Tableau 1 : Regroupe quelques applications de PE et leurs dérivés [7]

Polymères	PEBD	PEHD
Applications	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Les conteneurs soufflés en PEBD sont utilisés comme emballages dans les industries pharmaceutiques et cosmétiques ainsi que pour les aliments, les jouets et les produits de nettoyage. ❖ Le PEBD moulé par injection est utilisé pour fabriquer des seaux et divers récipients ménagers et de cuisine 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ La production de conteneurs et d'articles moulés par injection, Les bouteilles de détergents, les bidons d'essence et les réservoirs de mazout. ❖ La transformation en films et en tuyaux est de plus en plus courante.

B. Polypropylène: Depuis 1986 environ, le polypropylène (PP)(Figure 2) se classe au troisième rang de la production de plastique en vrac après le PE et le polychlorure de vinyle (PVC), avec une production annuelle estimée à 40.10^6 tonnes par an [7]. Le PP est composé de chaînes d'hydrocarbures linéaires et ses propriétés sont donc très proches de celles du PE. Le PP et ses copolymères peuvent être classés en trois catégories : homopolymère monophasique (h-PP) (l'un des thermoplastiques les plus légers, avec une densité allant de $0,90$ à $0,91g.cm^{-3}$), copolymère statistique monophasique(r-PP) et

copolymère hétérophasique (heco-PP). Le h-PP peut être soit isotactique (poids moléculaire entre 2.10^5 et $5.10^5 g. mol^{-1}$), soit syndiotactique, soit atactique (avec poids moléculaires entre 20 000 et $80\ 000 g. mol^{-1}$) [7].

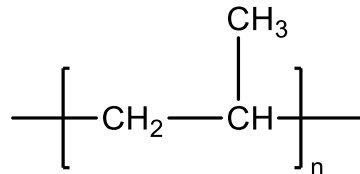


Figure 2 : Structure de polypropylène

Le PP isotactique est obtenu avec des catalyseurs au propylène et aux métaux de transition ou des catalyseurs métallocènes. Le PP syndiotactique est également obtenu avec des catalyseurs métallocènes. Le PP atactique, qui est en réalité un PP hautement ramifié, est un adhésif et non un polymère typique. Le PP produit commercialement à grande échelle est isotactique à 95 % (Figure 3).

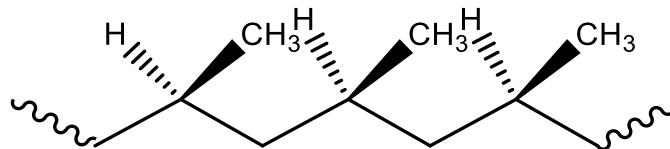


Figure 3 : Structure isotactique de polypropylène

Le PP est un excellent matériau pour les procédés d'injection et d'extrusion. Il convient de mentionner les récipients d'emballage, en particulier les bouteilles, fabriquées selon ces procédés. Les bouteilles en PP conservent bien leur forme à des températures élevées, ce qui permet de les remplir à chaud [7]. Des propriétés améliorées sont obtenues en utilisant des mélanges de polymères avec de l'éthylène comme mentionné précédemment. Les récipients moulés par injection sont utilisés pour les aliments surgelés, par exemple les crèmes glacées [7]. En outre, des récipients et des plats

stérilisables à la vapeur peuvent être produits pour être chauffés aux micro-ondes. Les nouveaux emballages en PP sont des bouteilles et des boîtes multicouches avec des couches barrières internes, qui peuvent être remplies à chaud ou stérilisées en autoclave, ainsi que directement à la vapeur. Les emballages en PP peuvent être remplis de liquides tensioactifs en raison de leur bonne résistance à la fissuration sous contrainte [8].

Le PP possède de bonnes propriétés de barrière à la vapeur d'eau et de résistance aux graisses. Plus de 40 % du PP produit en Europe est utilisé pour la réalisation de films [7]. Ces films présentent une faible rigidité, résistance et dureté. L'épaisseur de ces films se situe entre 12 et 125 μm . En s'étirant, généralement biaxialement, dans leur plage de température de fusion, les films PP peuvent être orientés. L'orientation peut être utilisée pour améliorer des propriétés telles que la résistance mécanique, la stabilité au froid (jusqu'à -50°C) et la résistance à la chaleur. Le PP thermosoudable à orientation biaxiale (BOPP) est utilisé pour l'emballage des produits de confiserie, des produits de boulangerie, des produits de snack, des pâtes, des produits à base de pommes de terre et des fruits secs. En outre, les films BOPP jouent un rôle important dans l'emballage des cigarettes ainsi que dans les emballages cosmétiques et pharmaceutiques [7].

I.2.2. Les Polystyreniques

Polystyrène avec une production annuelle de plus de 12.10^6 tonnes, le polystyrène (PS) occupe la quatrième place sur la liste des polymères en vrac, derrière le PE, le PP et le PVC. Le PS est produit commercialement depuis 1930 [7]. En tant que plastique thermoplastique, il peut être traité à des températures comprises entre 150 et 300°C . Les produits formés à partir du PS sont durs et transparents, avec une brillance élevée et une résistance à de nombreux produits chimiques. Ses inconvénients sont sa fragilité et sa sensibilité à la fissuration sous contrainte. En raison de sa grande perméabilité aux gaz et aux vapeurs, il est principalement utilisé comme matériau pour les produits nécessitant une courte durée de conservation, généralement réfrigérés et n'ayant pas une teneur trop élevée en matières grasses, comme le yaourt, la crème glacée, le fromage frais et la crème à café. Le PS est également utilisé comme séparateur ou organisateur pour les fruits, les œufs, les produits de boulangerie et les sucreries, les emballages pour les produits

alimentaires et pharmaceutiques ainsi que les appareils ménagers et les récipients tels que les gobelets et la vaisselle jetable sont tous fabriqués en PS.

Les films PS orientés sont utilisés pour l'emballage des produits laitiers et des cigarettes.

I.2.3. Les polyvinyliques

La capacité du chlorure de vinyle à se polymériser a été observée pour la première fois il y a plus de 150 ans. Le chlorure de polyvinyle est fabriqué industriellement depuis environ 1930. Le PVC (Figure 4) a conservé sa position de leader parmi les plastiques en vrac aujourd'hui en raison de son faible prix et de ses nombreuses possibilités d'application. La capacité annuelle mondiale de production de PVC est d'environ 30.10^6 tonnes [7]. Le PVC se dégrade facilement sous l'effet de la chaleur, de la lumière et de l'énergie mécanique. Afin d'améliorer la faible stabilité de ce plastique, une série d'additifs sont incorporés dans la masse fondue du PVC.

Les additifs les plus importants pour la transformation du PVC sont les plastifiants, qui peuvent être incorporés à des températures élevées pour donner des mélanges stables à la température ambiante, le PVC à un spectre d'applications extrêmement large. Les récipients moulés par soufflage pour l'emballage de produits liquides (boissons, huiles alimentaires, détergents, cosmétiques et produits pharmaceutiques) font l'objet d'une attention particulière, tout comme les plats pour aliments gras (très stables contre les substances à faible polarité) et les films (tels que les films en PVC souple à haute perméabilité aux gaz) pour l'emballage de la viande fraîche. Le PVC souple est également utilisé comme composant de joints d'étanchéité [7].

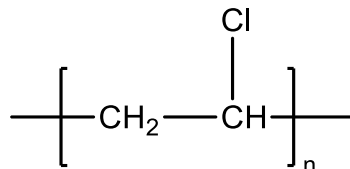


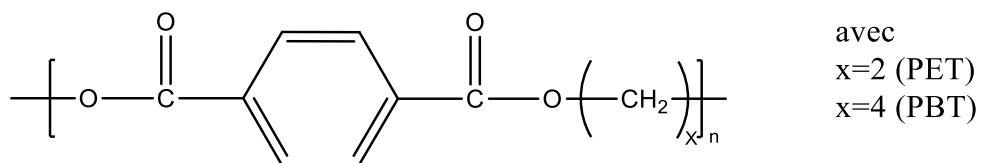
Figure 4 : Structure de polychlorure de vinyle

Les homo et copolymères de chlorure de vinylidène (VDC) possèdent des propriétés de barrière extrêmement élevées aux gaz, à l'eau et aux arômes, ainsi qu'une bonne résistance à l'eau et aux solvants, par exemple Du polychlorure de vinylidène (PVDC), poudre caractérisée par une bonne résistance chimique et une haute-imperméabilité à la vapeur d'eau, à certains gaz et à certaines huiles, dont les industriels se servent pour fabriquer des matières complexes à base de papier (comme le papier-aluminium) ou divers films plastiques.

I.2.4. Polyesters thermoplastiques

Les représentants les plus importants de ce groupe sont le polyéthylène téréphtalate (PET) et le téréphtalate de polybutylène (PBT) (Figure 5). Les propriétés de barrière des PET sont bonnes en ce qui concerne les gaz, les arômes et les graisses et ont des propriétés de barrière légèrement inférieures contre la vapeur d'eau. En raison de sa cristallinité partielle, le PET présente une résistance élevée à une charge de courte durée sur une large gamme de températures allant de 60 °C à plus de 200 °C [7].

La clarté et la résistance du verre sont améliorées par l'étirement du plastique. Les films PET étirés biaxialement, d'une épaisseur d'environ 12 µm, sont des substrats importants dans les laminés barrières et ont un large spectre d'utilisation, en particulier pour des durées plus longues à des températures élevées supérieures à 150°C.



les polyesters thermoplastiques

Figure 5 : Structure des polyesters thermoplastiques

I.2.5. Les polycarbonates

Le polycarbonate (PC) est un plastique de grande valeur qui présente une grande résistance et une grande dureté ainsi qu'une bonne ténacité. Le PC a une grande résistance à la chaleur, jusqu'à 135 °C, ainsi qu'au froid, jusqu'à 90 °C [7]. Le plastique amorphe transparent relativement coûteux possède cependant une perméabilité relativement élevée aux gaz et à la vapeur d'eau, ce qui nécessite de le combiner avec une couche barrière appropriée. Le PC est bien adapté à la fabrication de vaisselle et d'ustensiles de cuisine, de filtres et de machines à café, de biberons et d'autres récipients.

Diphénylolpropane ou de bisphénol A sont des matières premières peuvent être utilisées pour obtenir ce type de thermoplastique (Figure 6).

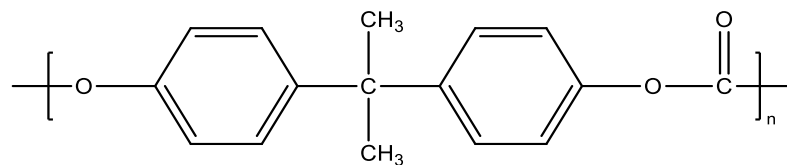
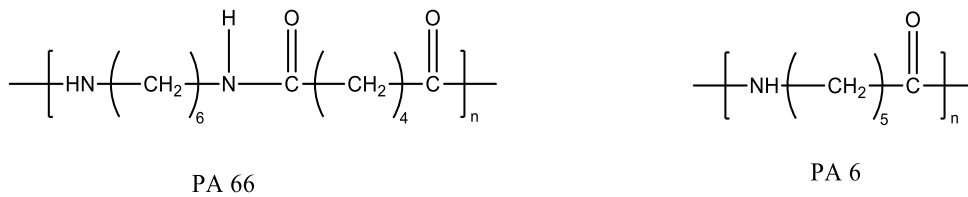


Figure 6 : Structure de polycarbonate

I.2.6. Les polyamides

La fabrication de la grande variété de polyamides (communément appelés nylons) se fait par polycondensation d'acides aminocarboxyliques (ou de leurs dérivés fonctionnels, par exemple les lactames) et à partir de diamines et d'acides dicarboxyliques.

Seuls au sein de leurs groupes, les polyamides (PA) se distinguent toutefois par le nombre de carbones compris dans leurs monomères, que désigne le chiffre qui suit leurs différentes abréviations par exemples le polycaprolactame (PA 6) et polyhexaméthylène diadipique (PA 66) (Figure 7). Les PA ont tous une importance particulière dans le domaine de l'emballage. En raison de la forte nature polaire du groupe CONH, des liaisons hydrogène sont formées entre les macromolécules voisines. Par conséquent, le PA est dur, résistant à la température et certains types sont hautement cristallins. Plus le segment entre les groupes amide est court, plus les groupes polaires peuvent absorber d'eau.

**Figure 7** : Structure de PA66 et PA6

I.2.7. Polyvinyléthers

Les polyvinyléthers forment un autre groupe de thermoplastiques, qui ne sont pas utilisés comme récipients ou films d'emballage. Ce sont des polymères atactiques formant des huiles, des résines souples collantes ou des matériaux élastiques de caoutchouc non collants selon leur poids moléculaire et leur composition. Tous les polyvinyléthers sont très résistants à la saponification par les acides et les alcalis dilués. Ils peuvent ensuite être utilisés comme plastifiants polymères insaponifiables et pour la fabrication de colles.

I.2.8. Polymères contenant du fluorure

Même si ces plastiques sont principalement utilisés comme revêtements dans la fabrication de matériaux en contact avec les aliments, ils sont traités dans cette section comme des thermoplastiques. Le plus important représentant de ce groupe est le polytétrafluoréthylène (PTFE)(Figure 8),qui est synthétisé par la polymérisation radicale du tétrafluoroéthylène. Ce polymère linéaire cristallin à haut poids moléculaire est exceptionnellement résistant aux solvants et autres produits chimiques [7]. Le PTFE fond autour de 320-345°C et peut être utilisé en continu entre des températures de 200 et 260°C. En raison de son ininflammabilité, le PTFE possède des propriétés antiadhésives exceptionnelles et présentes en outre de bonnes caractéristiques de glissement. Pour ces raisons, le polymère est utilisé comme matière première pour les revêtements antiadhésifs résistants à la température pour les poêles à frire, les casseroles et autres ustensiles de cuisine.

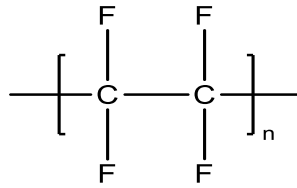


Figure 8 : Structure de PTFE

I.2.9. Les cellulosiques

Le groupe de plastiques connus sous le nom de celluloses régénérées constitue une transition entre les polymères naturels et les plastiques entièrement synthétiques. En tant que produit naturel transformé, la feuille de cellulose régénérée (cellophane) a servi de base aux premiers emballages transparents et flexibles pour les aliments et le tabac. La cellulose régénérée est fabriquée à partir de cellulose. Le site La matière première est transformée en sodium-cellulose-xanthogénate (viscose) avec de l'hydroxyde de sodium et du disulfure de carbone [7].

La feuille de cellulose régénérée est utilisée pour l'emballage des produits de boulangerie et de pâtisserie pour des durées de stockage courtes, les épices, les noix, les fruits secs, les pralines, les aliments à forte odeur et les cigarettes.

Les propriétés exceptionnelles de la cellulose régénérée en tant que matériau d'emballage sont sa machinabilité et ses soudures épaisses, car la cellulose ne fond pas lorsque la température de thermoscellage est trop élevée.

I.3. Production et recyclage

Aux États-Unis, environ 30 millions de tonnes de déchets plastiques ont été produites en 2009 et seulement 7% environ ont été recyclés. Les déchets plastiques finissent dans les décharges, les plages, les rivières et les océans, causant ainsi des problèmes environnementaux [9]. Au Royaume-Uni, environ 5 milliards de déchets plastiques sont produits chaque année [10]. Au Japon, les quantités de déchets sont passées de 46 millions de tonnes en 2001 à 65 millions de tonnes en 2010 et devraient atteindre une production de 0,7 kg/personne/jour en 2050 [11]. Dans certains pays développés comme le Japon, les déchets plastiques se classent au troisième rang des

déchets municipaux et industriels [11], environ 90 % des plastiques sont des thermoplastiques utilisés pour les conteneurs et les matériaux d'emballage (films, feuilles, bouteilles), les produits de première nécessité, les appareils ménagers et les automobiles, comme le montrent le Tableau 2 et la (Figure 9) [12].

Tableau 2 : Recyclage et production de thermoplastiques au japon [13]

Plastiques	Quantités %
Polyéthylène	24.1
Polypropylène	23.1
Polychlorure de vinyle	15.2
Polystyrène	7.0
PET	4.0
ABS	3.5
Autres plastiques	13.3

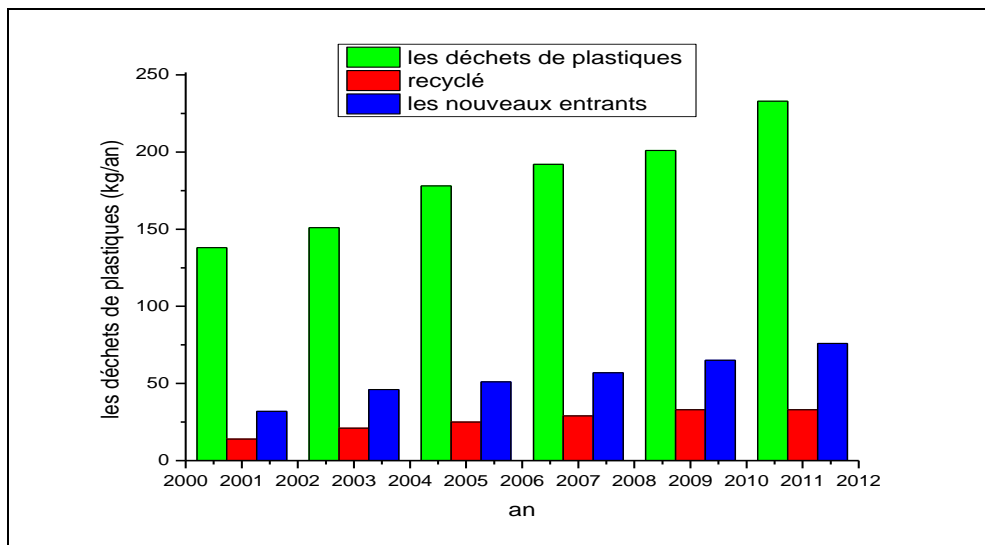









Figure 9 : Déchets plastiques existants, recyclés et nouveaux entrants

Le recyclage des plastiques désigne un processus consistant à obtenir des produits utiles à partir de déchets plastiques après leur retraitement ou leur refonte. Le recyclage

est l'une des actions les plus importantes actuellement disponibles qui apporte une solution aux problèmes environnementaux et écologiques.

Tableau 3 : Représente des résines qui facilitent le tri et le recyclage dans le flux des déchets [14]

Polymère	Code d'identification de la résine
Polyéthylène téréphtalate	 01 PET
Polyéthylène haute densité	 02 PE-HD
Polychlorure de vinyle	 03 PVC
Polyéthylène basse densité	 04 PE-LD
Polypropylène	 05 PP
Polystyrène	 06 PS
Autres polymères	 07 O

Le recyclage des thermoplastiques présente de nombreux avantages, tels que la fourniture de matières premières à l'industrie manufacturière, la réduction de la menace environnementale pour l'homme car il est non biodégradable, la réduction des problèmes d'incinération et de mise en décharge, la diminution de la consommation d'énergie pour la subsistance, et le fait qu'il constitue une source de revenus et offre des possibilités

d'emploi [15]. Toutefois, les facteurs économiques qui ont influencé la viabilité du recyclage des thermoplastiques comprennent le prix, le coût du recyclage par rapport aux formes d'élimination requises, l'adéquation à des applications spécifiques, le manque d'informations sur la disponibilité des plastiques recyclés, ainsi que la quantité et la qualité de l'offre de thermoplastiques recyclés par rapport aux thermoplastiques vierges [15]. Le recyclage des déchets de thermoplastiques peut être effectué par quatre méthodes :

I.3.1. Le recyclage primaire : se réfère au recyclage de la ferraille d'histoire contrôlée. Ce procédé reste le plus populaire car il garantit la simplicité, le faible coût et la possibilité de nettoyer des déchets non contaminés d'un seul type. Il implique la fusion avec utilisation de solvants et le remoulage de matériaux propres [16,15].

I.3.2. Recyclage mécanique : les déchets plastiques sont recyclés ou retraités par un procédé mécanique utilisant l'extrusion à l'état fondu, l'injection, le soufflage, le vide et le moulage par inflation après triage [17]. Cette méthode utilise à 100 % les déchets de plastique et les transforme en produits identiques ou de valeur, mais avec des qualités réduites qui peuvent être améliorées par l'application d'additifs. Il peut être ou non nécessairement séparé en fonction des produits et de la qualité souhaités. Elle est applicable au retraitement des plastiques qui nécessitent un prétraitement ou une décontamination.

I.3.3. Recyclage chimique : les déchets plastiques servent de matières premières et se transforment en monomère ou en d'autres produits tels que le fioul et le gaz de cuisine par décomposition et dépolymérisation des matières premières à l'aide d'énergie thermique ou de catalyseurs [18,19]. Cette méthode semble être économique, mais elle réduit le rendement des nouveaux produits [20] et moins que le rendement du recyclage mécanique des thermoplastiques en raison de l'absence de perte de matériaux et d'accumulation causée par le blocage des conduites à la suite de l'arrêt de la machine, ce qui abaisse les points de fusion pendant les étapes de solidification. Les blocages ou les obstructions de pipelines peuvent être difficiles à éliminer. Cette méthode implique la décomposition des déchets de polymères en espèces de faible poids moléculaire pour les

réutiliser avec des applications de solvants comme le benzène, le chlorobenzène, le trichloréthylène, le toluène et le xylène, appelée dissolution/réprécipitation (DR) ou solubilisation avant pyrolyse (appliquée à haute température et à haute pression en l'absence d'oxygène) [21]. Cela permet de résoudre les problèmes d'obstruction des pipelines, mais à un coût et un temps de traitement accrus et avec une consommation d'énergie élevée par rapport au recyclage mécanique.

I.3.4. Récupération d'énergie : Cette méthode fait référence à la récupération du contenu énergétique du plastique. La manière la plus efficace de réduire le volume de matières organiques qui implique la récupération d'énergie est représenté par l'incinération. Cette méthode est une bonne solution car elle génère une énergie considérable à partir des polymères, mais elle n'est pas écologiquement acceptable en raison du risque sanitaire que représentent les substances toxiques en suspension dans l'air, par exemple les dioxines (dans le cas des métaux lourds, des polymères contenant du chlore, du carbone toxique et des radicaux libres à base d'oxygène) [16]. Cette méthode conduit à la formation des monomères à partir desquels le polymère est fabriqué [17] [22,23].

II. Polystyrène

II.1. Synthèse

Le polystyrène est un polymère thermoplastique linéaire à squelette aliphatique obtenu par polymérisation du motif styrène (figure 10). Son principal mode de synthèse est la polymérisation radicalaire qui conduit à un polystyrène atactique totalement amorphe (pas de stéréosélectivité) [24].

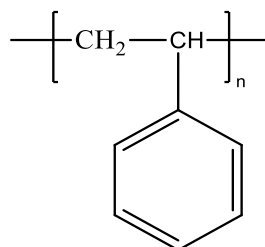


Figure10 : Structure de polystyrène

Le polystyrène a été mis au point à l'origine par le chimiste allemand Eduard Simon en 1839 en distillant ou en pyrolysant du storax liquide [25], Le styrène a été produit pour la première fois à l'échelle industrielle en 1931 par les industries IG Farben en Allemagne et un peu plus tard par la Dow Chemical Company aux États-Unis. Ces deux entreprises ont utilisé la déshydrogénation catalytique de l'éthylbenzène, qui est encore le principal procédé utilisé aujourd'hui [26].

Tableau 4 : Représente des différents types de polymérisation

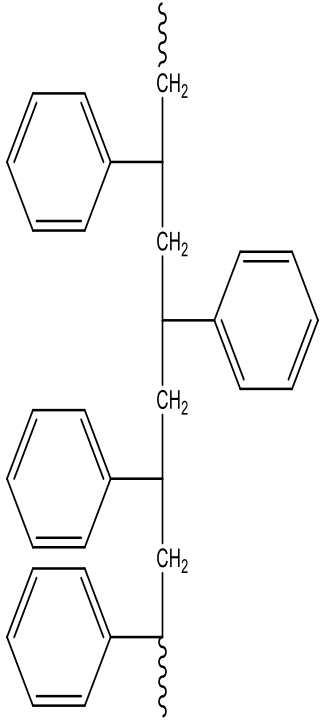
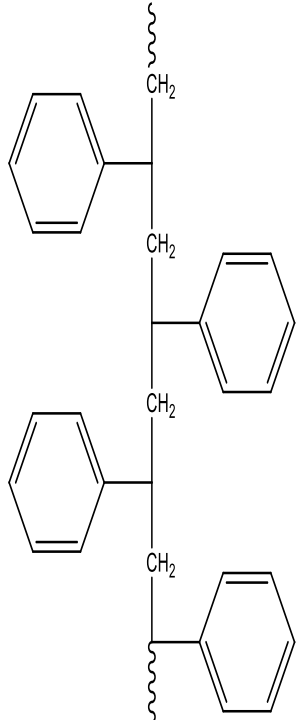
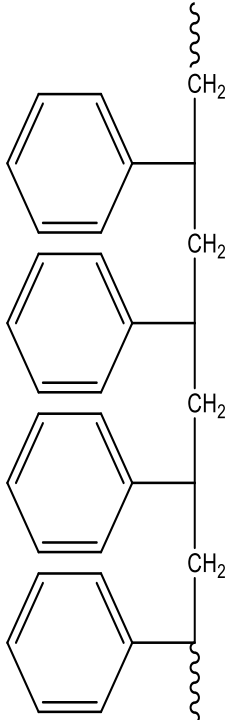
Techniques de polymérisation	Les initiateurs utilisés	Types de polymères obtenus
Polymérisation radicalaire (La polymérisation continue (en masse ou en vrac) et polymérisation en suspension)	- AIBN, peroxyde de benzoyle - Acide organique (pKa entre 0.5 et 2.5) [27]	Atactique (le type le plus utilisé dans les emballages et les biens durables [28])
Polymérisation anionique	- Organolithiens [28]	Atactique
Polymérisation coordinative	- Catalyseur ziegler-natta $TiCl_4/Al(CH_2CH_3)_3$	Isotactique [29]
Systèmes catalytiques	Complexe des métaux de transition et contre ion (borate)	Syndiotactique [30]

- ❖ Polymérisation en masse : le styrène sert de solvant au polymère, la polymérisation a lieu entre 110 et 150 °C. en présence ou sans initiateur.

- ❖ Polymérisation en suspension : en phase aqueuse, la polymérisation se fait en présence d'un colloïde protecteur (alcool polyvinylique) et d'un initiateur à 50-60°C

Dans le cas du polystyrène, la tacticité décrit la mesure dans laquelle le groupe phényle est uniformément aligné dans la chaîne polymère. La tacticité a un effet important sur les propriétés du plastique.

Tableau 5 : Représente quelques propriétés selon la tacticité

Types de polymères	Atactique	Syndiotactique	Isotactique
Structure développée			
Température de fusion (°C)	100% amorphe	270 [31]	240 [29]
Température de transition vitreuse (°C) [32]	100	105	87

II.2. Des propriétés de polystyrène

II.2.1. Physico-chimique

Le polystyrène est transparent, incolore, rigide, relative dur et cassant et absorbe que 0.2% d'eau et présente une grande perméabilité [33].

Tableau 6 : Présente autres propriétés physico-chimique [32]

Propriétés	Polystyrène
Masse molaire (g/mol)	104
Energie de cohésion kj/mol	29.6-35.4
Enthalpie de fusion kj/mol	8.37-10
Paramètre de solubilité MPa	15.6-21.1
Température de transition K	373
Densité (20°c)	1.04-1.09

Le polystyrène est compatible avec de nombreux produits chimiques. Il est altéré par des acides, des plastifiants, des solvants aliphatiques et aromatiques

II.2.2. Mécanique

Les propriétés mécaniques d'un polymère comprennent sa résistance, son module d'élongation, sa résistance aux chocs.

Les formes cristallines du polystyrène polymère ont une faible résistance aux chocs.

Tableau 7 : Indique les valeurs des propriétés mécaniques du polystyrène [32]

Propriétés mécanique	La valeur
Modules de traction (MPa)	3000-3600
Résistance à la traction (MPa)	30-60

Allongement en traction (%)	1.0-5.0
Module de cisaillement (MPa)	1400
Module de flexion (MPa)	3200
Résistance aux chocs (J/m)	28
La dureté shore D	78

II.2.3. Thermiques

Les propriétés thermiques sont les propriétés présentées par le polymère lorsqu'il est soumis à la chaleur. Elles comprennent la température de déformation thermique ; la température de transition vitreuse ; la conductivité thermique, et la température de dégradation.

Le polystyrène est un thermoplastique, qu'est présent à l'état solide ou vitreux à température normale. Mais lorsqu'il est chauffé au-dessus de sa température de transition vitreuse, il se transforme en une forme liquide qui s'écoule et peut être facilement utilisée pour le moulage et l'extrusion. Il redevient solide lorsqu'il refroidit. Cette propriété du polystyrène est utilisée pour le couler dans des moules avec des détails fins.

Tableau 8 : Présente les valeurs de propriétés thermiques [32]

Propriétés thermiques	La valeur
Capacité thermique spécifique (J/Kg.K)	1250
Conductivité thermique (amorphe T=473K) (J/smK)	0.13
La dilatation thermique 20-100 °c (µm/m.K)	1201
Température de ramollissement Vicat (°c)	100
Température de dégradation (°c)	A partir de 327

II.3. Dérivés de Polystyrène

II.3.1. Polystyrène expansé (EPS)

Le polystyrène expansible est généralement produit par deux procédés de base.

A. EPS basé sur la polymérisation en suspension

La polymérisation en suspension pour la production de PSE est effectuée dans un réacteur à gaine avec un agitateur et généralement deux ou plusieurs chicanes. Le volume des cuves est normalement compris entre 20 et 100m³. Au début du processus de production, la phase aqueuse et la phase monomère sont placés dans le navire, et des additifs sont ajoutés soit avant soit pendant la polymérisation. Ce sont généralement des composants solubles dans l'eau et les monomères qui sont dissous ou dispersés dans des cuves séparées avant le début de la réaction. Le rapport des phases monomères/eau se situe généralement entre 40:60 et 60:40 [30]. Le réacteur rempli est chauffé à la température de réaction. En général, la polymérisation est effectuée en plusieurs étapes de température. Pendant la polymérisation radicalaire, un agent gonflant (pentane) est ajouté sous pression. Et sa finition dans un procédé à plusieurs étapes (Figure 11) ensuite les billes sont transportées vers le moule pour produire des formes adaptées à l'application. [30]



Figure 11 : Diagramme schématisé de la production de PSE

PSE c'est un matériau durable contient un meilleur effet d'isolation thermique et isolant léger mais il résiste difficilement au feu et une faible résistance à la flexion.

EPS est utilisée dans de nombreux projets de construction pour l'isolation thermique et aussi, de plus en plus souvent, pour l'insonorisation des nouveaux bâtiments et les travaux de modernisation ou de rénovation. Les plaques de mousse EPS sont utilisées pour l'isolation des murs, des toits, des sols et des plafonds.

Les matériaux d'emballage utilisant la mousse EPS protègent les marchandises emballées dans les lieux de stockage et pendant le transport contre les dommages mécaniques et thermiques (grâce à leur faible poids, leur résistance à l'eau, leur bon comportement d'absorption des chocs) aussi les matériaux d'emballage pour les

machines, les pièces, le verre, la porcelaine, les équipements optiques, électriques et électroniques, les jouets et les produits pharmaceutiques.

B. PSE basé sur le procédé d'extrusion

Polystyrène d'un poids moléculaire moyen d'environ 200 000 g/mol, hexabromocyclododécane (HBCD) comme retardateur de feu, oxyde de magnésium comme absorbeur d'oxygène, stéarate de calcium comme lubrifiant et n-pentane comme agent gonflant sont dosés dans la vis de l'extrudeuse au moyen d'un doseur à débit précis.

Le PSE extrudé est normalement transformé directement en matériau de remplissage en vrac pour les applications d'emballage, le calage (utilisé pour remplir l'espace dans une boîte d'expédition), le rembourrage (où les qualités de résilience de la mousse de polystyrène sont utilisées) et le texturiseur.

II.3.2. Polystyrène syndiotactique

Obtention de polystyrène syndiotactique se fait par des complexes des métaux de transition (par exemple $CpTiCl_3$) et contre ion à base de méthylalumoxane, de borane, de borate.

Le SPS est très différent du polystyrène amorphe en termes de propriétés chimiques et thermiques. La haute stéréorégularité permet au SPS d'obtenir un haut niveau de cristallinité, ce qui se traduit par une température de fusion élevée (270 °C), un taux de cristallisation rapide et une grande résistance aux solvants. Avec ces caractéristiques données par la cristallisation.

Le SPS a une faible densité, d'excellentes propriétés électriques, une résistance hydrolytique et une bonne aptitude au moulage [30].

Le SPS est appliqué dans les plastiques techniques : électricité comme des composants des piles à combustible, les machines et appareils professionnels (protecteurs thermiques pour imprimantes et composants des fours à micro-ondes), automobile par exemple connecteurs de harnais et connecteurs de cartes et porte-fusibles, composants de pompes pour puits de pétrole.

II.3.3. Copolymères styréniques

A. Styrène-acrylonitrile (SAN)

Les copolymères SAN (Figure 12) sont produits par polymérisation radicalaire à l'aide de procédés en solution, en suspension ou en émulsion [30]. Les produits utiles sur le plan industriel sont des matériaux transparents à phase unique. Le procédé de polymérisation par radicaux libres utilisé pour fabriquer les copolymères SAN permet d'obtenir des polydispersités de large poids moléculaire ($M_w/M_n > 2$).

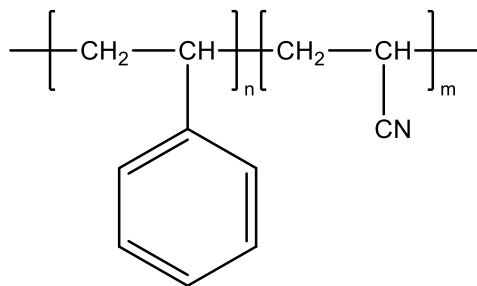


Figure 12 : Structure de copolymère styrène-acrylonitrile

Les segments AN apportent une amélioration de certaines propriétés mécaniques : module de Young élevé, tenue aux chocs, ténacité, résistance à la rupture, tenue aux rayures, dureté.

SAN sont rentables dans des applications structurelles telles que les pichets, les gobelets, les transformateurs de produits alimentaires, les emballages rigides, les conteneurs de produits alimentaires et les boîtiers de batteries automobiles.

B. L'acrylonitrile styrène acrylate (ASA)

Ce copolymère est préparé par une greffage de SAN sur la chaîne principale de caoutchouc qu'est généralement (acrylate d'alkyle) qu'est polymérisé en émulsion ou en radicalaire [30] (Figure 13).

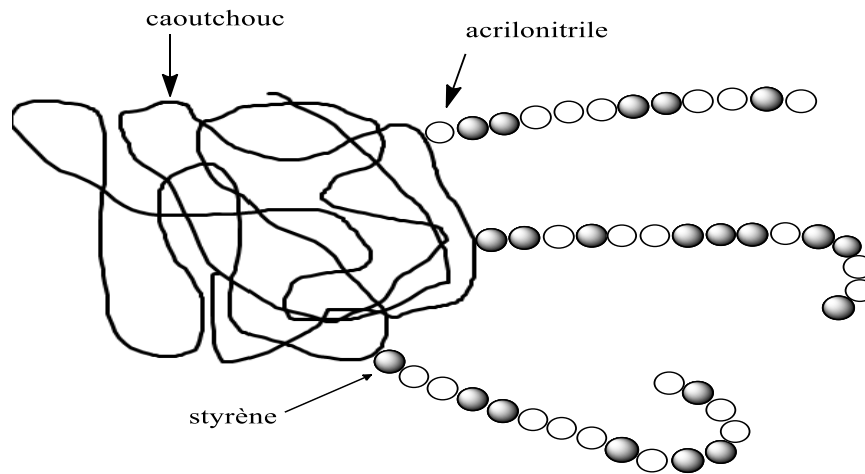


Figure 13 : Structure de ASA

Permet les propriétés de ce copolymère : l'ASA a des avantages évidents en termes de résistance aux intempéries et de résistance au vieillissement thermique et une grande résistance à la fissuration sous contrainte environnementale, en particulier contre les alcools et de nombreux agents de nettoyage. L'ASA présente également des avantages par rapport à d'autres matériaux thermoplastiques pour le boîtier [30], l'ASA présente des avantages en termes de rigidité, de résistance aux chocs, de température de déformation thermique et de résistance aux intempéries.

L'ASA est passée d'un petit produit de niche à une importante matière plastique depuis son introduction sur le marché il y a une trentaine d'années. Le plus grand domaine d'application de l'ASA est le secteur automobile (presque tous les constructeurs automobiles utilisent l'ASA pour les pièces extérieures non peintes), technologie solaire telles que les logements pour les capteurs solaires et les supports pour les cellules solaires et les chargeurs de batterie alimentés par l'énergie solaire [30]

L'ASA est depuis longtemps utilisée pour les boîtiers de divers équipements, machines, etc.

C. Styrène butadiène

- Le SB, poly(styrène/butadiène) ou SBR ou (HIPS) (Figure 14), est un copolymère du styrène et du 1,3-butadiène. Le SBR est obtenu en suspension ou en solution avec un catalyseur [30]. Il a des propriétés d'élastomère proche du caoutchouc,

résistant au gel, à l'abrasion et à la déchirure entre autres. Il est appliqué dans les pneumatiques et l'électroménager, des outils électriques, du mobilier, des articles ménagers, des télécommunications, de l'électronique, de l'informatique, des produits jetables, des produits médicaux, de l'emballage et des loisirs

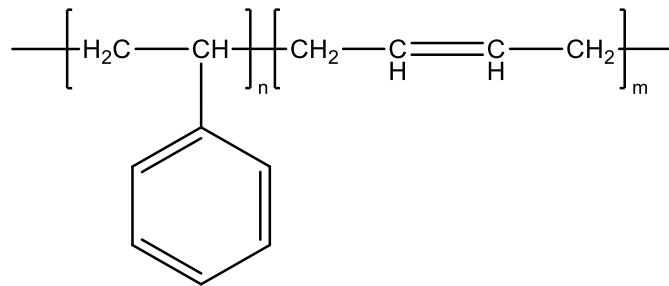


Figure 14 : Structure de SBR

- Le SBS poly(styrène/butadiène/styrène) c'est un triblocs copolymère obtenu par polymérisation anionique vivante réalisée dans un solvant hydrocarboné et initiée par un alkyle de lithium approprié [30]. Il présente généralement une plus grande résistance dans les plages de dureté. SBS est utilisé pour des objets comme les semelles des chaussures, la gomme des pneus et aussi utilisé comme colles et mastics d'étanchéité et dans la modification du bitume [30].

D. Acrylonitrile butadiène styrène

ABS c'est un copolymère obtenu par la polymérisation en émulsion et constituée de deux étapes :

La 1^{ère} étape est la préparation du latex de caoutchouc à l'aide d'émulsifiants.

La 2^{ème} étape est de greffage de styrène acrylonitrile sur la chaîne de caoutchouc après polymérisation [30].

Ce copolymère montre une bonne résistance aux chocs, et utilisé dans des applications de capotages, dans des secteurs tels que l'électroménager et aussi dans le domaine de l'automobile comme carrosserie

II.4. Recyclage

Le polystyrène est un polymère polyvalent, qui a été utilisé à de nombreuses fins telles que l'emballage, les biens de consommation, etc., mais l'élimination de ces produits crée une pollution de l'environnement en raison de leur nature non dégradable. C'est pourquoi une attention accrue est accordée au recyclage, et permet les dérivés plus répondre c'est PSE et HIPS selon les méthodes suivantes :

II.4.1. Recyclage mécanique

Le procédé c'est la dissolution des déchets de matériaux de type polystyrène dans une section de dissolution utilisant un solvant réutilisable ayant un faible point d'ébullition et une vitesse de vaporisation élevée, l'élimination des contaminants solides dans une ou plusieurs sections de filtration, la dévolatilisation des PS dissous et la récupération des matériaux de type polystyrène pur [34].

II.4.2. Recyclage chimique

Ce procédé est basé sur la dépolymérisation ou pyrolyse de polystyrène par des composés tel que des oxydes métalliques, des acides et des bases solides ou des solvants supercritique (comme l'eau benzène, toluène) pour obtenir le monomère styrène (avec une sélectivité supérieur a 70 %) et d'hydrocarbures aromatiques, notamment l'éthylbenzène, le toluène, benzène [34,28].

II.4.3. Recyclage thermique

Cette technique consiste à brûler le matériau afin de générer de l'énergie thermique [35]. Il est généralement possible d'avoir accès dans les pays industrialisés à des installations d'incinération permettant de convertir l'énergie stockée dans les déchets solides en énergie thermique. Le PS possède une bonne capacité énergétique équivalente à environ 46 000 kJ/kg [36].

Le recyclage de polystyrène est limité par des problèmes de transport en raison de son faible rapport densité/volume. Il n'est donc pas rentable de le collecter, de le stocker et de le transporter sur de longues distances. En outre, les incitations à promouvoir le

recyclage sont limitées en raison du manque d'investissements dans les infrastructures, les équipements de compactage et les systèmes logistiques. En raison de sa grande stabilité, le processus de dépolymérisation en ses monomères est très gourmand en énergie et nécessite des températures et des pressions élevées et dégagement des gaz toxiques.

Références

- [1] Ratta V (1999). Thèse de doctorat, Université d'État de Virginie, États-Unis
- [2] Strong AB (2008). Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications, 2^{ème} éd
- [3] Muzzy JD (2000). Thermoplastics- properties, Comprehensive Composite Materials 2^{ème} éd.
- [4] Halary JL, Laupretre F, Monnerie L (2011). Polymer Materials: Macroscopic Properties and Molecular Interpretations. 1^{er} éd
- [5] Groover MP (2012). Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, 5^{ème} éd.
- [6] Beer G, Wiesecke J, Mannebach G, Auffermann J, Vogt H, Bisson P, Marczinke B (2005) Kunststoffe Plast Eur 95(10)
- [7] Piringer OG, Baner AL (2008). Plastic Packaging Interactions with Food and Pharmaceuticals, 2^{éd} München Germany
- [8] Brydson J (1995). Plastics Materials, 6^{ème} éd Oxford, Royaume-Uni
- [9] Weber R, Gaus C, Tysklind M, Johnston P, Forter M, Hollert H, Heinisch E, Holoubek I, Lloyd-Smith M, Masunaga S, Moccarelli P, Santillo D, Seike N, Symons R, Torres JPM, Verta M, Varbelow G, Vijgen J, Watson A, Costner P, Woelz J, Wycisk P, Zennegg M (2008). Environ. Sci. Pollut. Res. 15: 363–393, doi.org/10.1007/s11356-008-0024-1.
- [10] European Commission (EC) (2009). White Paper on Climate Change.
- [11] El-Newehy M (2016). Zero Waste. doi.org/10.1201/9780429059247-7
- [12] Aderogba AK (2014). Soc. Sci. 3: 79-88. doi.org/10.11648/j.ss.s.2014030401.19.
- [13] Institute Plastic Waste Management (2016). An Introduction to Plastic

Recycling. tokyo,japan

- [14] D20 Committee (2010). ASTM D7611/D7611M-10: Standard Practice for Coding Plastic Manufactured Articles for Resin Identification. ASTM Int. West Conshohocken, PA
- [15] Hopewell J, Dvorak R, Kosior E, Hopewell J, Dvorak R, Kosior E (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities Plastics recycling: challenges and opportunities
- [16] Grigore ME (2017). review MDPI Recycling2. 24:1-11.<https://doi.org/10.3390/recycling2040024>
- [17] Achilias DS, Roupakias C, Megalokonomos P, Lappas AA, Antonakou EV (2007). Science Direct. 149:536-542. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.06.076>.
- [18] Garcia JM; Roberstson ML (2017). Science. 358:870-872. <https://doi.org/10.1126/science.aaq0324>
- [19] Ademiluyi T, Akpan C (2007)J Appl Sci. 11: 15 - 19
- [20] Park JJ, Park K, Park J, Kim DC (2002)Korean J Chem. Eng. 19: 658-662. <https://doi.org/10.1007/BF02699313>.
- [21] Wong LS, Ngadi N, Abdullah TAT (2013). Applied Mechanics and Materials 695:170-173. doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.695.170.
- [22] Al-salem SM, Lettieri P, Baeyens J (2009). A review. Waste Manag. 29: 2625-2643. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004>.
- [23] Andrady AL (2015). Plastics and environmental sustainability, 1^{er} éd. WILEY, NJ-USA.
- [24] Erner A (2005). Thèse de doctorat Ecole des mines de Paris
- [25] Andrady AL, Neal MA (2009). Phil. Trans. R. Soc. 364: 1977-1984. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2008.0304>.
- [26] Wunsch JR (2000). Polystyrene Synthesis, Production and Applications.,

4^{ème} éd

- [27] Shero EJ, Obrien JJ, Priddy DB (1992). US Patent. 11: 4–6
- [28] Chaukura N, Gwenzi W, Bunhu T, Ruziwa D T, Pumure I (2016) A review. Resour. Conserv. Recycl. Elsevier B.V. 107: 157–165. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.031>.
- [29] Natta G, Pino P, Mantica E, Danusso F, Mazzanti G, Peraldo M (1956). Chim.Ind.38:124-128
- [30] Scheirs J, Priddy D (2003). Modern Styrenic Polymers : Polystyrenesand Styrenic Copolymers. Wiley series in polymer science
- [31] Ishihara N, Kuramoto M, Uoi M (1987). U.S. Pat. 4,680,353 .
- [32] Van.Krevelen DW, Te nienhuis K (2009). Properties of Polymers, 4^{ème} éd. Amsterdam
- [33] Trtignon JP, Verdu J, Piperaud M,Dobraczynski A (2006). Précis de Matières Plastiques. Structures-Propriétés, Mise En Oeuvre, Normalisation, 4^{ème} éd
- [34] Maharana T, Negi YS, Mohanty B (2007). Review article Polym. - Plast.Technol.Eng.46:729–736. <http://dx.doi.org/10.1080/03602550701273963>
- [35] Acierno S, Carotenuto C, Pecce M (2010). Polym. - Plast. Technol. Eng. 49 : 13–19. <http://dx.doi.org/10.1080/03602550903282994>.
- [36] Rader CP, Baldwin SD, Cornell DD, Sadler GD, Stockel RF (1995). Plastics, Rubber, and Paper Recycling volume 609.



**TECHNIQUES
EXPERIMENTALES**

I. Produits et matériels utilisés

- Les déchets de polystyrène (WPS) avec une masse de 12g.
- Chloroforme (CHCl_3) comme solvant avec un volume de 250 mL. Il est fourni par la société Biochem.
- Acide sulfurique (95-97%) avec un volume de 150 mL est fourni par la société SIGMA-ALORICH.

II. Mode opératoire

Les déchets de polystyrène sont dissous totalement dans la quantité d'annoncé précédemment de chloroforme puis versé dans un ballon de 1L avec une agitation et sans chauffage.

Après quelque minute, acide sulfurique est ajouté dans la solution. Le mélange est agité pendant 4h et une température entre 45 et 60 °C (Figure 15)

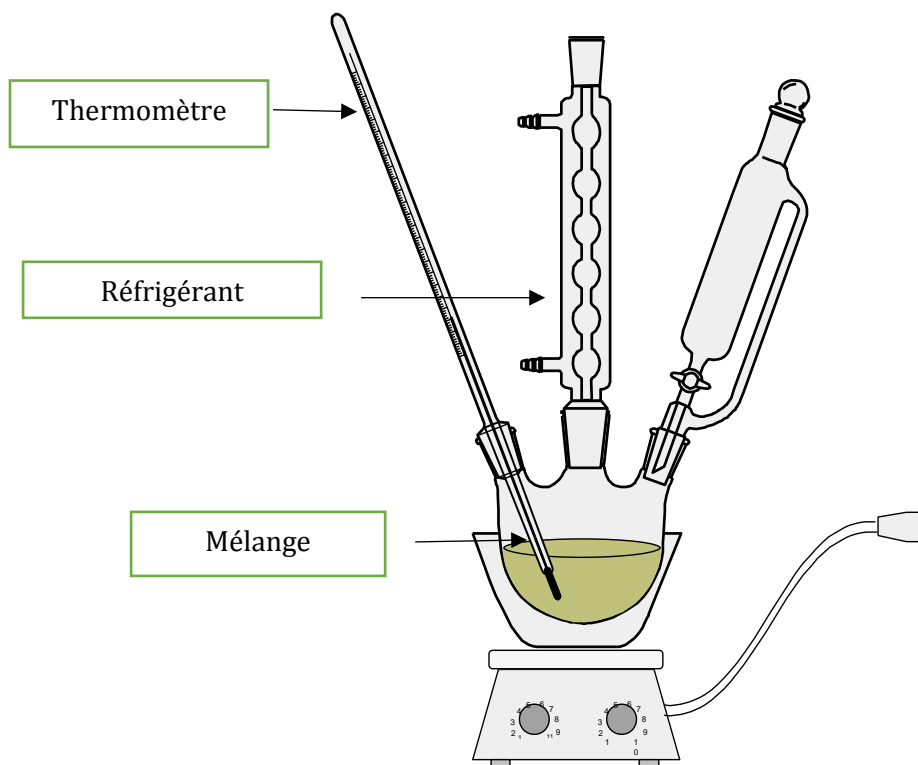


Figure 15 : Montage de préparation du polystyrène sulfoné

La solution est précipitée par l'eau distillé très froid et récupération de produit par filtration sous vide puis mettre dans étuve pendant 12h.

Le produit sou forme de visqueux avec un (pH =2) est traité par plusieurs fois de lavage jusqu'a atteindre pH=5 (Figure 16).

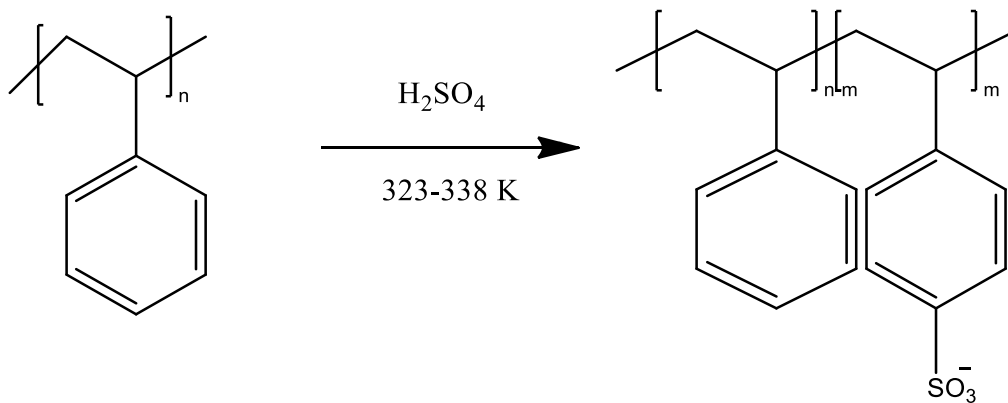


Figure 16 : La structure de polystyrène sulfoné

Théoriquement le taux de sulfonation (DS) est calculé à partir de l'équation (1) après la titration de produit final par l'hydroxyde de sodium (Figure 17):

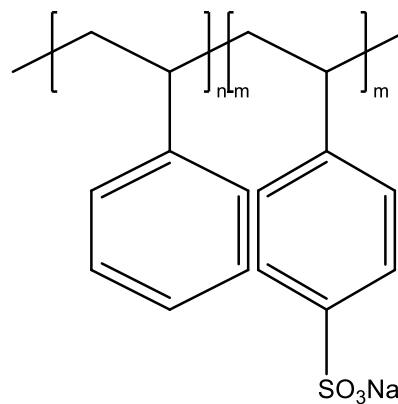


Figure17 : La structure de polystyrène sulfoné de sodium

$$DS = \frac{CV}{100(W - 81.CV)} \quad (1) \quad [1]$$

Où

C (mol/L) : la concentration de l'hydroxyde de sodium

V(L): le volume de titrage de l'hydroxyde de sodium

W (g): la masse de polystyrène sulfoné

81 (g/mol) la masse molaire d'unité de styrène.

Dans notre travail, le DS optimale était de 60 %.

III. Méthodes de caractérisations

III.1. Rhéologie

III.1.1. Définition

La rhéologie est une discipline qui traite l'écoulement et les déformations des matériaux sous l'action de contraintes. La rhéologie a été développée pour décrire les propriétés des matériaux au comportement mal défini et intermédiaire entre celui du solide élastique parfait et celui du fluide newtonien. La section qui suit vise à définir les principaux paramètres rhéologiques ainsi que les différentes typologies d'écoulement des fluides [2] ou par autre définition, elle désigne la science qui étudie les phénomènes de déformation de la matière sous l'effet de contraintes [3]. La déformation du matériau s'effectue par glissement relatif des différentes couches, sans qu'il y ait transfert de matière d'une couche à l'autre. Les mouvements laminaires de cisaillement sont engendrés à l'aide de rhéomètres. C'est à partir de tels mouvements que peuvent être déterminés les paramètres rhéologiques des fluides [2]. Le but principal de la rhéologie est d'étudier la réponse de chaque fluide oppose aux sollicitations mécaniques qu'il subit.

III.1.2. Caractéristiques d'un fluide

Un fluide, est défini comme un milieu continue [3], Il est formé d'un grand nombre de particules très petites qui se déplacent de manière libre les unes par rapport aux autres. Les particules constitutives d'un fluide ne sont pas liées par des liaisons covalentes, les molécules sont tellement proches qu'il est difficile de comprimer le fluide.

Elles interagissent cette fois fortement par l'intermédiaire de forces de van der Waals, interactions électrostatiques [4]. Un liquide se définit par (l'isotropie du milieu, la mobilité, la compressibilité) [5].

III.1.3. Contrainte de cisaillement

La contrainte de cisaillement est une grandeur dynamique, qui est la responsable des mouvements laminaire de cisaillement, en cours de ce mouvement deux couches en contact l'une à l'autre, se déplace relativement l'une par rapport à l'autre. Il apparait à l'interface des forces de frottement entre ces deux couches, ces forces exercent tangentielllement à la surface de la couche [5] (Figure 18) avec :

La couche 1 est animée d'une vitesse \vec{v}_1 supérieure à la vitesse \vec{v}_2 de la couche 2.

La couche 1 exerce sur la couche 2 une force de cisaillement \vec{dF} parallèle au mouvement et tendant à accélérer la couche 2.

La couche 2 exerce de sa part sur la couche 1, une force de cisaillement $-\vec{dF}$ tendant à la freiner.

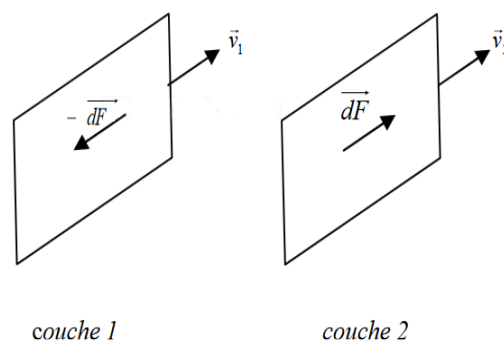


Figure 18 : Forces agissant sur deux éléments de couches voisines

On définit la contrainte de cisaillement (τ)

$$\tau = \frac{dF}{dS} \quad (2)$$

Avec τ : s'exprime en $N.m^{-2}$ ou bien en Pascal (Pa)

dS : la surface élémentaire de l'entité considérée en m^2 [2].

III.1.4. Déformation et vitesse de cisaillement

Ce qui décrit le mouvement des matériaux en cours du temps indépendamment des contraintes ou par autre définition sous l'effet d'un cisaillement, un liquide s'écoule en couches planes, parallèles entre elles, animées de vitesses différentes qui varient continûment entre la surface fixe et la surface mobile [6].

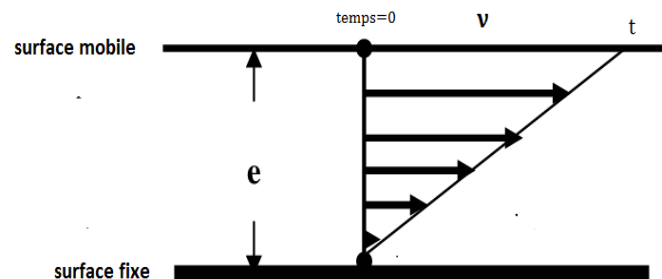


Figure 19 : Mouvement laminaire de cisaillement entre deux plans parallèles

Le mouvement de cisaillement ($\dot{\gamma}$) est exprimé en S^{-1} par la relation suivante :

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{e} \quad (3) \quad [7]$$

Avec :

v : la vitesse de cisaillement.

e : l'épaisseur cisailée.

III.1.5. Les modes d'écoulement

A. Fluide newtonien

Pour ces liquides newtoniens, il existe une proportionnalité entre la contrainte de cisaillement τ et le gradient de cisaillement $\dot{\gamma}$ l'équation (4):

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (4)$$

La viscosité dynamique η est indépendante du gradient de cisaillement (Figure 20-21).

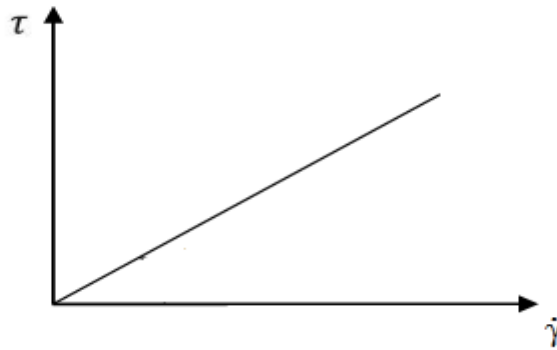


Figure 20 : Variation de la contrainte en fonction du gradient de vitesse

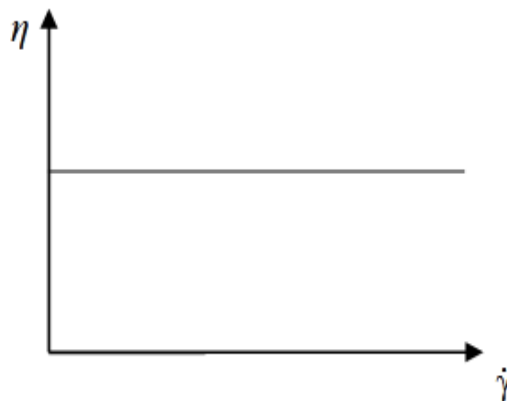


Figure 21 : Variation de la viscosité en fonction du gradient de vitesse

B. Fluide non-newtonien indépendant du temps➤ **Les rhéofluidifiants (pseudo-plastique)**

Le comportement rhéofluidifiant est défini par un rhéogramme dont la concavité est tournée vers le bas. Dans ce type d'écoulement la viscosité décroît lorsque le cisaillement augmente [8]. En général, ces fluides sont représentés, par une loi de puissance ou encore loi d'Ostwald l'équation (5).

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (5)$$

k: représente l'indice de consistance (Pa.s) et exprime par la relation suivante :

$$k = \frac{\eta}{\dot{\gamma}^{(n-1)}} \quad (6)$$

Où n : l'indice d'écoulement

avec $n < 1$

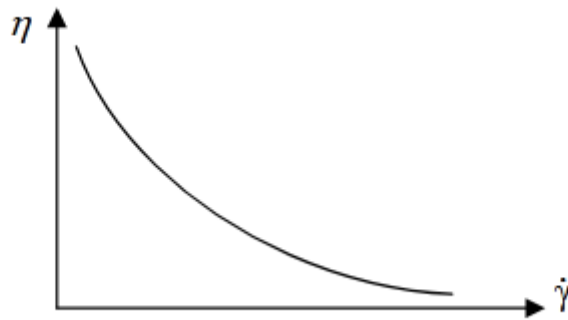


Figure 22 : Variation de la viscosité en fonction du gradient de vitesse

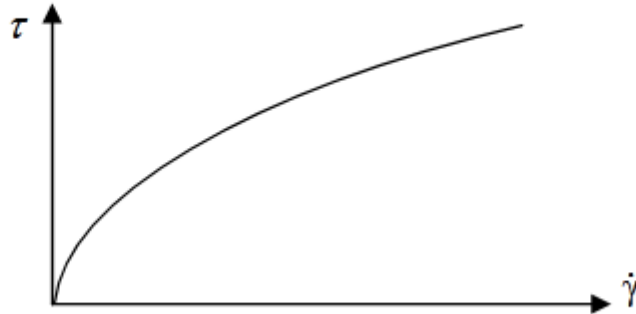


Figure23 : Comportement rhéofluidifiant

L'équation de la loi de puissance ou loi d'Ostwald s'exploite facilement en passant aux logarithmes (recherche par régression linéaire pour validation du modèle). En effet, l'équation (5) devient :

$$\log \tau = \log k + n \cdot \log \dot{\gamma} \quad (7)$$

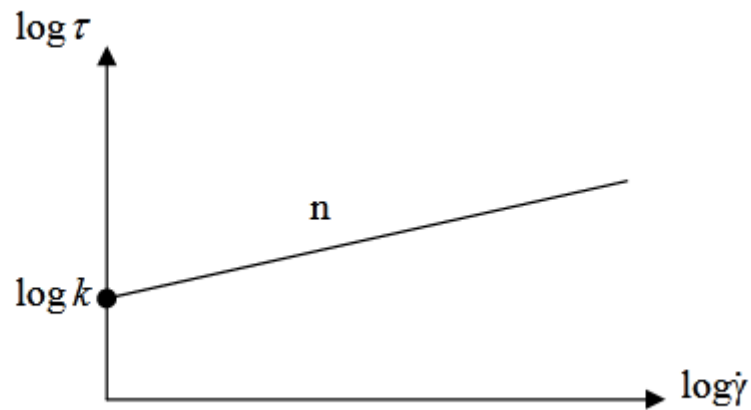


Figure24 : L'expression logarithmique

➤ **Les rhéoépaississants ou dilatant**

Le comportement rhéoépaississant (encore appelé dilatant) est défini par un rhéogramme dont la concavité est tournée vers le haut: le fluide devient plus visqueux et donc plus «épais» lorsque le cisaillement croît [6]. Le comportement est similaire à celle d'un fluide rhéofluidifiant (la loi d'Ostwald) sauf que l'indice d'écoulement n est supérieur à 1.

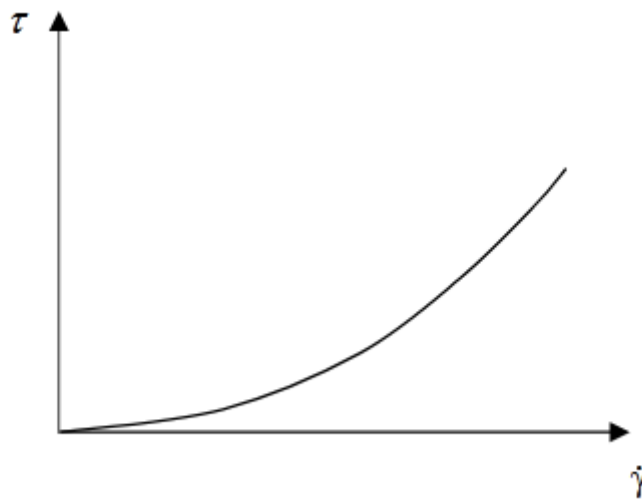


Figure25 : Variation de la contrainte en fonction du gradient de vitesse

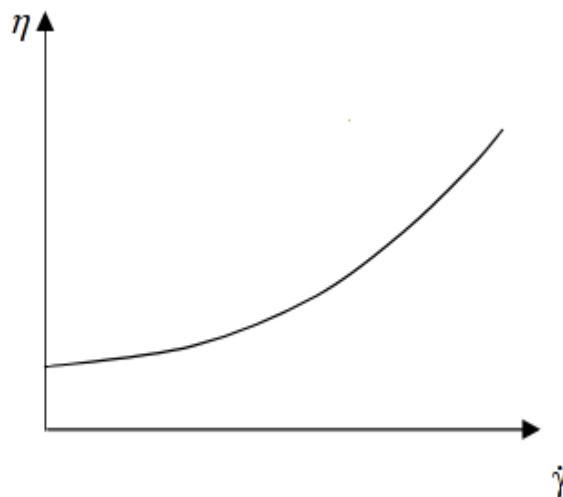


Figure26 : Variation de la viscosité en fonction du gradient de vitesse

III.1.6. Appareillage

Pour notre travail, le viscosimètre Brookfield DV-III + est également utilisé pour la détermination des propriétés rhéologiques des fluides. Ce viscosimètre se compose d'un rotor ou « mobile » et d'un stator qui peut être constitué du récipient contenant le fluide d'essai (Figure 27).



Figure27: Rhéomètre Brookfield DV-III+

Références

- [1] Sun H, Zhang Z, Song L (2010). 10.1002/ep.10430.
- [2] Tixier N (2003). Thèse Doctorat, Université de Limoges, France.
- [3] Guyon E, Hulin JP, Petit L (2001). Hydrodynamique physique, EDP Sciences.
- [4] Bouton J, Couarraze G, Grossiord JL (1991). Rhéologie et rhéométrie- Caractérisation de la viscosité, de la plasticité et de l'élasticité des liquides et des produits pâteux-Lois de comportement, fascicule.
- [5] Bentrar R (2013). Mémoire de master, université de tlemcen, algerie.
- [6] Coussot P, Grossiord JL (2001). Comprendre la Rhéologie, De la circulation du sang à la prise du béton, EDP Sciences.
- [7] Roustan M, Pharamond JC, Line A (1999). Technique de l'ingénieur. 3800:1-22.
- [8] Upadhyay RD, Kale DD (2000). journal of polymer research. 3: 175-181. <https://doi.org/10.1007/s10965-006-0148-2>.



**RESULTATS ET
DISCUSSIONS**

I. Introduction

L'étude des propriétés des polymères en solution par les techniques de caractérisation (diffusion de la lumière, viscosimétrie, etc.) fournit des informations sur la conformation des macromolécules, ainsi que sur les interactions des molécules de solvant et des interactions intramoléculaires entre les segments de polymère.

La modification des polymères Pas forcément toujours réussi, mais dans notre cas est valide pour obtenir un polymère chargé. La compréhension des polyélectrolytes est nécessaire pour une compréhension fondamentale des systèmes et des processus biologiques [1] La recherche sur les polyélectrolytes a également de nombreuses applications industrielles directes.

Plusieurs paramètres influençant sur la structure et la stabilité des polyélectrolytes, Nous nous sommes intéressés dans ce manuscrit à l'étude des interactions avec des solvants et leur influence sur le polymère chargé et aussi le leur comportement à des différentes concentrations.

II. Etude rhéologique du polystyrène

II.1. Effet de la concentration

La figure 28 représente la variation de la viscosité du polystyrène dans le toluène. On remarque que la viscosité augmente avec l'augmentation de la concentration, bien que le taux de cette augmentation est différent pour les différentes masses moléculaires. Plus le poids moléculaire du polymère est élevé, plus le taux d'augmentation de la viscosité est rapide. Pour une masse moléculaire de polymère, l'ajout de polymère au solvant augmente la viscosité mais lentement avant 1,5 g/L (les régions diluées). Cependant, le taux de cette augmentation de la viscosité avec la concentration devient important à une concentration modérée, environ de 1,8 g/L.

Dans les régions diluées, les molécules de polymère sont séparées par le solvant et les propriétés sont déterminées par le comportement d'une chaîne de polymère

individuelle. Cependant, l'apparition d'enchevêtrements intermoléculaires et leur effet sur la propriété d'écoulement compliquent l'interprétation des résultats [2].

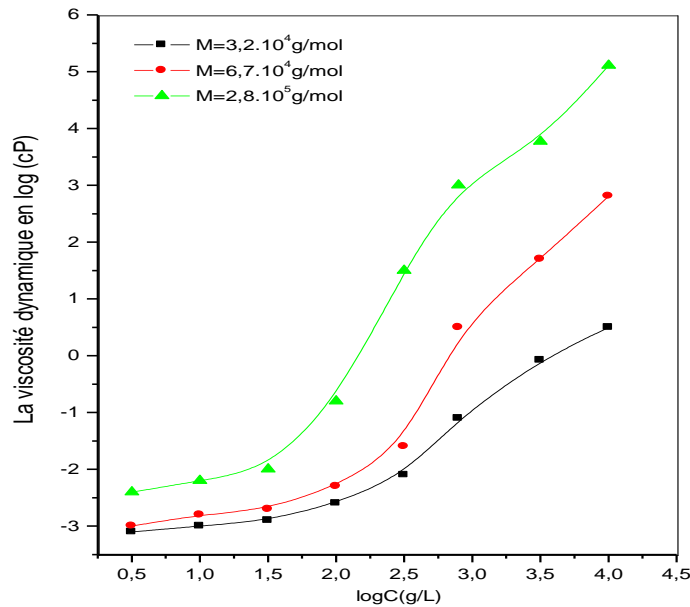


Figure 28 : Variation de la viscosité à cisaillement zéro en fonction de la concentration pour le polystyrène dans le toluène à 25°C

II.2. Effet du taux de cisaillement

L'influence du taux de cisaillement sur la viscosité pour une masse moléculaire constante à 25°C bien montré dans la figure 29. On remarque que l'augmentation de taux de cisaillement conduit à une diminution de viscosité du milieu, par contre l'augmentation de la concentration de polystyrène résulte une augmentation de viscosité qui peut être expliquée par les interactions formées entre polymère et solvant.

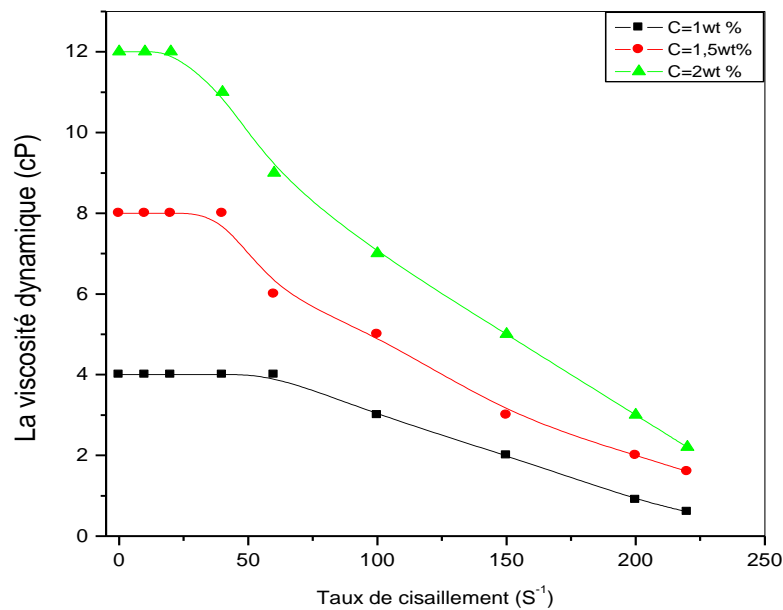


Figure 29 : Variation de la viscosité en fonction du taux de cisaillement pour le polystyrène $3,2 \cdot 10^4$ g/mol dans le toluène pour diverses concentrations à 25°C

Les polymères en solution présentent une viscosité dépendant du taux de cisaillement, au-dessus d'un taux de cisaillement critique, $\dot{\gamma}_{\text{cri}}$. La région dans laquelle la viscosité est une fonction décroissante du taux de cisaillement est appelée la région non newtonienne de la loi de puissance. Lorsque la concentration augmente, la valeur de $\dot{\gamma}_{\text{cri}}$ est déplacée vers des taux de cisaillement plus faibles [3]. En dessous de $\dot{\gamma}_{\text{cri}}$, la viscosité de la solution est indépendante du taux de cisaillement et est appelée viscosité à cisaillement zéro, η_0 . La transition entre la viscosité indépendante du taux de cisaillement et la viscosité dépendante du taux de cisaillement se produit dans une région relativement étroite en raison de la distribution étroite du poids moléculaire de l'échantillon de PS [3].

II.3. Effet de la température sur la viscosité réduite

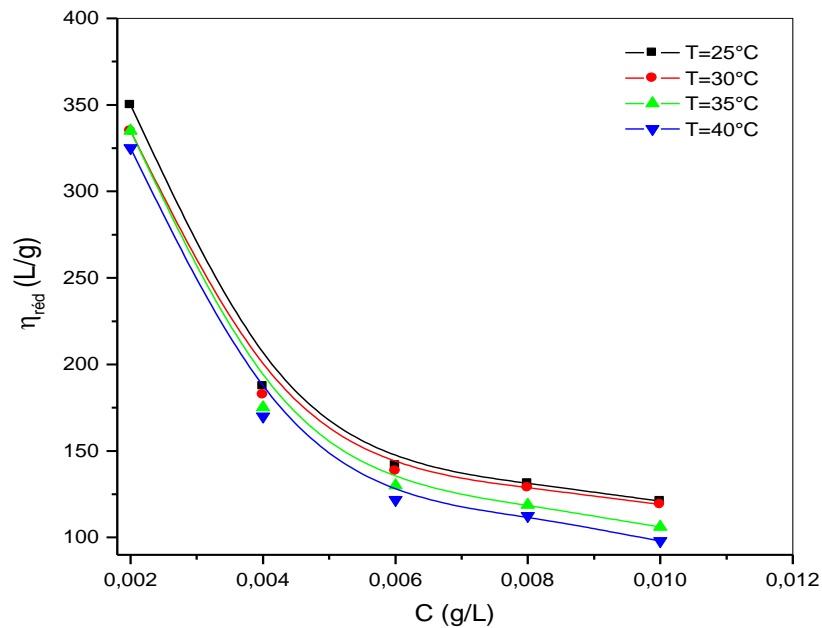


Figure 30 : Variation de la viscosité réduite en fonction de la concentration du polystyrène à différentes températures dans le toluène

Des mesures de viscosité réduite sont effectuées pour le polystyrène dans le toluène en fonction de la concentration à différentes températures. Dans tous les cas, la viscosité réduite diminue avec l'augmentation de la concentration et diminue avec l'augmentation de la température (Figure 30). La raison de ce comportement peut être due au développement d'une grande force de frottement entre les couches de la solution et la répulsion électrostatique intermoléculaire à longue distance et à l'agrégation des particules d'un point de vue mécanique. Ceci pourrait indiquer que lorsque la concentration en polymère augmente, on tend à se rapprocher de l'orientation maximale des particules [4].

III. Etude rhéologique du sodium polystyrène sulfoné

III.1. Influence de la polarité

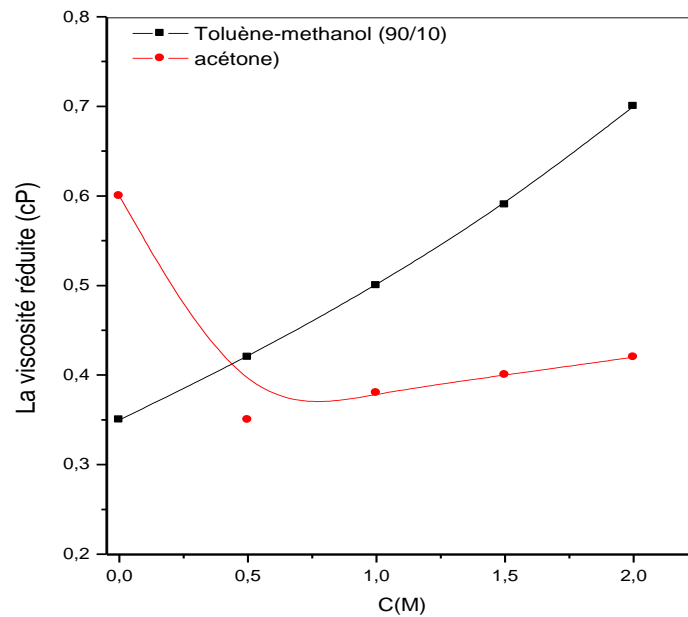


Figure 31 : Variation de la viscosité réduite du polystyrène sulfoné en fonction de la concentration

La figure 31 montre la variation de la viscosité du polystyrène sulfoné dans les deux solvants en fonction de sa concentration. Pour le mélange (toluène méthanol), plus la concentration en polymère augmente, la viscosité augmente linéairement. Dans l'acétone, on observe une diminution de la viscosité jusqu'à 0,5 M puis une petite augmentation. On peut expliquer ces résultats par l'effet de la polarité (les interactions de paires d'ions prédominent pour des solvants non polaires tandis que l'ionisation est suffisante pour présenter un effet polyélectrolyte significatif pour des solvants polaires) [5].

III.2. Influence de la concentration

Dans la figure 32, nous présentons la variation de la viscosité des solutions de NaPSS de différentes concentrations en fonction du taux de cisaillement. On remarque, que la viscosité dynamique diminue avec l'augmentation du taux de cisaillement. Ainsi, la viscosité augmente lorsque la concentration en polymère augmente. Grâce à l'orientation

et la déformation du polyélectrolyte formé dans l'écoulement, on peut ainsi observer un comportement rhéofluidifiant pour le polystyrène sulfoné. Un comportement newtonien est observé aux fortes vitesses de cisaillement et pour des faibles concentrations en NaPSS, suivi par une diminution de la viscosité (comportement rhéofluidifiant)[6]. La figure 32 montre également la loi de puissance la mieux ajustée dans le régime d'amincissement par cisaillement.

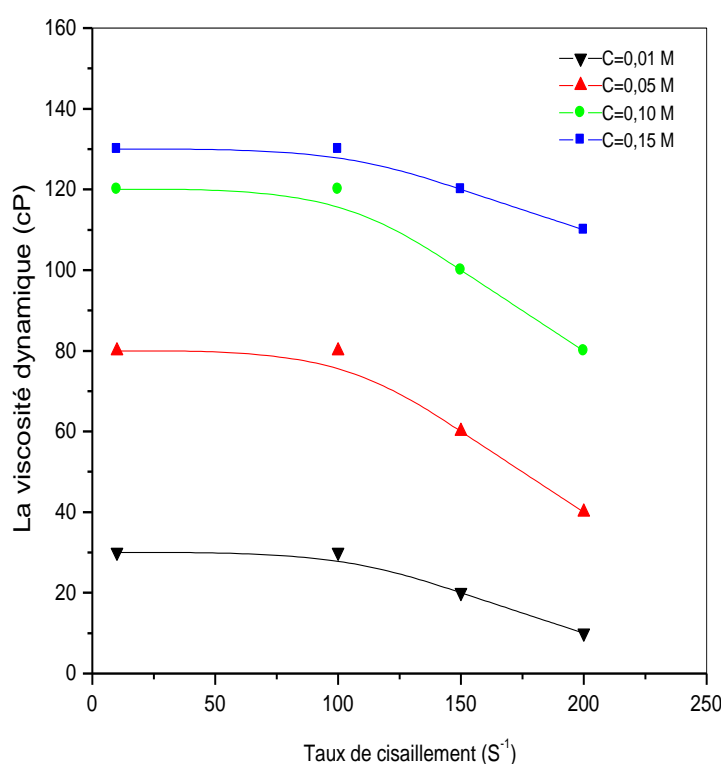


Figure 32 : Variation de la viscosité dynamique en fonction du taux de cisaillement pour des solutions de NaPSS de différentes concentrations

En traçant la viscosité spécifique, nous éliminons l'effet de la viscosité du solvant (Figure 33). Les données couvrent plus de quatre décennies de concentration et montrent clairement la concentration critique de recouvrement égale à 0.9 M (limite entre régime dilué et semi-dilué) est déterminée en première approximation par le croisement des deux segments de droite provenant d'une courbe de la viscosité en fonction de la

concentration en polymère. Dans le régime dilué, les chaînes de polymères, sous forme de pelotes, restent éloignées les unes des autres. Par contre, lorsque la concentration en polymère devient supérieure à C^* , les chaînes de polymères restent enchevêtrées les unes des autres.

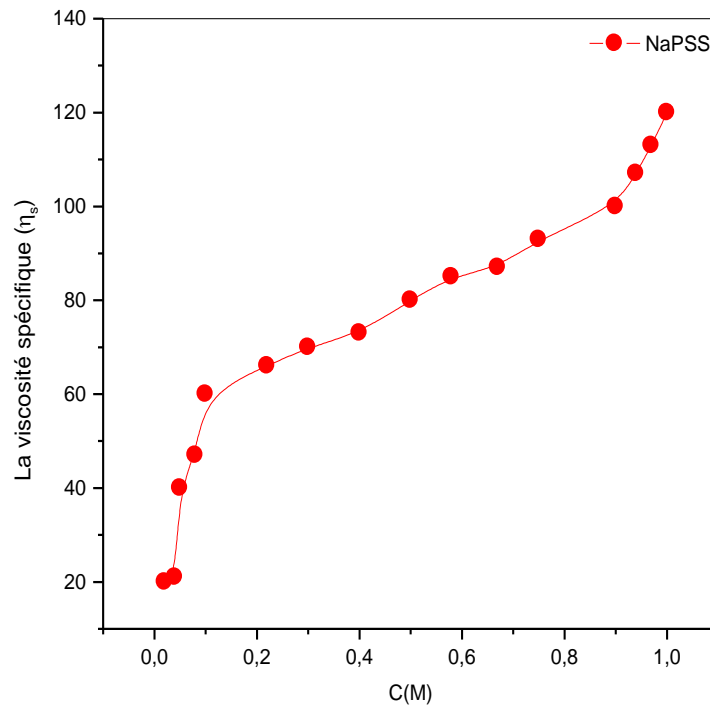


Figure 33 : Variation de la viscosité spécifique du NaPSS en fonction de sa concentration

Références

- [1] Boris DC, Colby RH (1998). *Macromolecules*. 17 : 5746-5755. 10.1021/ma971884i.
- [2] Poh BT, Ong BT (1984). *Eur. Polym. J.* 10: 975 978. 10.1021/ma971884i.
- [3] Kulicke WM, Kniewsk R (1984). *Rheol Acta*. 23: 75-83. 10.1007/BF00708475
- [4] Mongondry P, Thèse de doctorat, Université du Maine – Le Mans, France.
- [5] Weiss RA, Turner R, Lundberg RD (1984). 10.1002/pol.1985.170230227
- [6] Bentrar R (2013). Mémoire de master, Université de Tlemcen, Algérie.



CONCLUSION GENERALE

Dans ce mémoire, la modification des déchets de polystyrène nous a permis de préparer le polystyrène sulfoné. Le dosage par titrage de la solution aqueuse du copolymère nous a renseignés sur le degré de sulfonation obtenu.

Les interactions entre copolymère et solvant jouent un rôle important dans l'étude rhéologique. La viscosité dynamique du système (polystyrène-toluène) diminue avec l'augmentation du taux de cisaillement. De même, lorsque la concentration augmente, la viscosité dynamique augmente avec la masse moléculaire du copolymère.

La diminution de la viscosité réduite avec l'augmentation de la concentration pour le même système est résultant de la force de frottement entre les couches de la solution et répulsion électrostatique intermoléculaire à longue distance.

Les résultats montrent que la viscosité réduite diminue avec l'augmentation de la concentration, ainsi la viscosité diminue avec l'augmentation de la température pour le mélange polystyrène toluène.

La polarité joue un rôle important dans l'étude rhéologique des polyélectrolytes due à des interactions de paires d'ions prédominant pour des solvants non polaires tandis que l'ionisation est suffisante pour présenter un effet polyélectrolyte significatif pour des solvants polaires.

Un comportement rhéofluidifiant est observé quand la viscosité dynamique du système diminue avec l'augmentation du taux de cisaillement. Ainsi, la viscosité augmente lorsque la concentration en polymère augmente, dû à l'orientation et la déformation du polystyrène sulfoné formé.

Les résultats obtenus montrent que la viscosité spécifique augmente avec l'augmentation de la concentration de copolymère formé.

المخلص

تتضمن هذه المخطوطة استرجاع نفايات البوليستيرين ، ولهذا قمنا بتعديلها عن طريق كبريتات حامض الكبريتيك من أجل الحصول على بوليمر مشحون بمعدل تعديل يقارب 60%. تم إجراء التوصيف الفيزيائي والكيميائي للبوليمر المشترك عن طريق الريولوجيا. لقد ثبت أن اللزوجة الديناميكية تتناقص مع زيادة معدل القص وبالتالي ، تزداد اللزوجة مع زيادة تركيز البوليمر. وبالتالي لوحظ سلوك القص الخفيف. ثم نقوم بحساب التركيز الحرج لاسترداد متوسط (الحد بين النظام المخفف وشبه المخفف

الكلمات المفتاحية: نفايات البوليستيرين. اللزوجة الديناميكية. سلوك القص الخفيف. التركيز الحرج

Abstract

This manuscript involves the recovery of polystyrene waste. This is why we modified it by sulfonation of sulfuric acid in order to obtain a charged polymer with a modification rate of almost 60%. The physico-chemical characterization of the copolymer was carried out by rheology. Dynamic viscosity has been shown to decrease with increasing shear rate. Thus, the viscosity increases as the polymer concentration increases. And consequently a shear thinning behavior is observed. Then the critical concentration of medium recovery was calculated (limit between diluted and semi-diluted regime).

Key words: polystyrene waste, Dynamic viscosity, shear thinning behavior, critical recovery concentration

Résumé

Ce manuscrit comporte de la valorisation des déchets de polystyrène, C'est pourquoi nous l'avons modifié par une sulfonation d'acide sulfurique dans le but obtenir un polymère chargé avec un taux de modification presque 60 %. La caractérisation physico-chimique de copolymère a été faite par la rhéologie. On prouve que la viscosité dynamique diminue avec l'augmentation du taux de cisaillement. Ainsi, la viscosité augmente lorsque la concentration en polymère augmente. Et par conséquent un comportement rhéofluidifiant est observé. Puis on a calculer la concentration critique de recouvrement de milieu (limite entre régime dilué et semi-dilué).

Mots clés: déchets de polystyrène, Viscosité dynamique ,comportement rhéofluidifiant, concentration critique recouvrement