



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCÉDES



N° d'ordre :.... M2/GPM/2019

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADIMIQUE

Filière : Génie des procédés

Option: Génie des procédés des matériaux

Thème

Etude du comportement mécanique et détermination des paramètres limites des tubes en PVC

Présenté par

1- SLAIM assam el mokhtar

2- ARABICHE houssine mohamed el amine

Soutenu le 15/07/ 2019 devant le jury composé de :

Président :	Boukabcha Nourdine	Maître de conférences A	Université de A.I.B.M
Examineur :	Megrouss Youcef	Maître de conférences A	Université de A.I.B.M
Rapporteur :	Chouaih Abdelkader	Professeur	Université de A.I.B.M

Année Universitaire 2018/2019

Dédicace

Avec toute mon affection, je dédie ce modeste travail à:

*À celle qui a inséré le goût de la vie et le sens de la
Responsabilité...merci MERE.*

*À celui qui a été toujours la source d'inspiration
et de courage ...merci PERE .*

Je leur serai éternellement reconnaissant.

Ma très chère sœur khadidja

Mon camarade Arabiche Houssine et toute sa famille.

Tous mes amis(es).

*Mes camarades de la promotion, ainsi que tous ceux
qui me connaissent.*

*je dédie très chaleureusement ce mémoire à ma chère
tante ; son mari et leurs enfants (Ryad ,Djo et le petit
Youcef)*

*Enfin à tous ceux que j'aime et tous ceux qui ont une
place particulière dans mon cœur.*

Slaim issam

Remerciements

Ce travail a été réalisé au laboratoire de contrôle qualité de l'entreprise Tubex a Oran

Nous tenus en premier lieu à remercier le bon dieu tout puissant de nous avoir aidés à surmonter toutes les difficultés lors de nos études et ce ne sont pas ces quelques mots qui exprimeront nos sentiment les plus sincères.

Nous exprimons notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre encadreur professeur Abdelkader CHOUAIIH pour le soutien qu'il nous a témoigné et sa disponibilité tout au long de cette étude

Nous remercions vivement le Docteur Nourdine BOUKEBCHA de nous avoir honorés en acceptant de présider le jury et d'avoir pris le temps de lire ce travail.

Nous remercions également Docteur Megrouss Youcef pour l'honneur qu'il nous fait en acceptant de juger notre travail.

Nous tenons à adresser nos vifs remerciements à tous les membres du laboratoire (contrôle qualité) de l'entreprise Tubex pour leurs aides et leurs orientations ; nous pensons plus particulièrement à ABDEL ILAH AYOUNI, ainsi que l'ensemble des ingénieurs et techniciens de l'entreprise, Nous tenons à remercier tous les enseignants, qui ont assuré notre formation durant notre cycle universitaire.

Enfin, il nous est particulièrement agréable d'exprimer ici notre reconnaissance envers nos familles respectives dont le soutien a été essentiel tout au long de nos études ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I - Généralités sur les polymères

I.1 Définition.....	3
I.2 Historique.....	3
I.3 Importance économique et principaux domaines d'utilisation.....	5
I.5 Domaine d'état.....	6
I.6 Transition vitreuse.....	6
I.7 Température de transition vitreuse.....	7
I.8 Structure et caractérisation.....	7
I.9 Type de polymères.....	8
I.9.1 Les thermoplastiques.....	8
I.9.2 Les thermodurcissables.....	9
I.9.3 Les élastomères.....	9
I.10 Processus d'élaboration des polymères industriels.....	10
I.11 Type de réactions de polymérisation.....	10
I.12 Degré de polymérisation et masse moléculaire.....	11
I.13 Domaine d'application.....	12

CHAPITRE II - Le PVC

II.1 L'origine du PVC.....	13
II.2 Définition.....	13
II.3 Polymérisation du chlorure de vinyle.....	14
II.4. Résine de PVC.....	15
II.4.1 Elaboration.....	15
II.4.2 Formulation.....	15
II.5 Transformation du PVC.....	16
II.5.1 Extrusion.....	16
II.5.2 Le calandrage.....	16
II.5.3 Le moulage par injection.....	16
II.6 Structure.....	16
II.7 Propriétés d'usage.....	17
II.7.1 Propriétés physiques.....	17

II.7.2 Propriétés chimiques.....	17
II .7.3 Propriétés électriques.....	17
II .7.4 Propriétés thermiques.....	18
II.7.5 Propriétés mécaniques.....	18
II.8 Applications.....	18
II.9 Entreprise Tubex.....	19
II.10 Produits commercialisés de l'entreprise.....	20
II.11Charges et Additifs.....	20
II.12 Stabilisants.....	21

CHAPITRE III - Partie expérimentale

III.1 Essai de pression	22
III.1.1 Principe de l'essai	22
III.1.2 Matériels utilisés	22
III.1.3 Paramètres	23
III.1.4 A pression 38 bars	23
III.1.5 A pressions 40, 42 et 45 bars.....	24
III.2 Essai de traction	27
III.2.1 Introduction.....	27
III.2.2 Principe de l'essai.....	27
III.2.3 Stratégie d'un essai de traction.....	27
III.2.4 Matériel utilisé.....	28
III.2.5 Paramètres expérimentaux.....	29
III.2.6 Les étapes de l'essai.....	29
III.2.7 Préparation des éprouvettes.....	31
III.2.8 Contrainte au seuil d'écoulement.....	31
III.2.9 Résultats et discussion.....	32
III.2.10 Seuil d'écoulement : à 30°C et à 40°C.....	34
III.2.11 La contraintes à la rupture : à 20°C.....	36
III.2.12 La contraintes à la rupture : à 30°C et à 40°C.....	37
III.3.1 Essai de l'allongement (%).....	39
III.3.2 Essai de l'allongement : à 30°C et 40°C.....	40
III.4. Discussion et interprétation des résultats.....	41
Conclusion générale	43

Liste des tableaux

CHAPITRE II

Tableau II.1. Propriétés mécaniques de PVC

Tableau II.1. Les charges et additifs utilisés en PVC

CHAPITRE III

Tableau III.1. Résultats de la pression de 38 bars

Tableau III.2. Résultats de l'évolution du temps d'essai à différentes pressions et températures

Tableau III.3. Les coefficients de pression

Tableau III.4. Seuil d'écoulement de la traction à 20 °C

Tableau III.5. Seuil d'écoulement de la traction à plusieurs températures

Tableau III.6. La contrainte à la rupture en traction à 20°C

Tableau III.7. Contrainte à la rupture de traction en différente température

Tableau III.8. Allongement en traction à 20 °C

Tableau III.9. Allongement en traction à différentes températures

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I.1. Présentation de quelques polymères courants

Figure I.2. Cliché d'analyse d'un polymère aux rayons X: (a) Semi-cristallin et (b) amorphe

Figure I.3. Type de polymère

Figure I.4. Schéma représentatif de l'élaboration des quatre polymères industriels

Figure I.5. Distribution des masses moléculaires d'un polymère poly-dispersé

CHAPITRE II

Figure II.1. Polychlorure de vinyle (PVC)

Figure II.2. Formule développée de PVC

Figure II.3. Réaction de polymérisation du PVC

Figure II.4. Résine en PVC

Figure II.5. La formule développée de polychlorure de vinyle

Figure II.6. Rapports d'utilisation des polymères

Figure II.7. Tube PEHD d'adduction d'eau

Figure II.8. Tubes en PVC d'assainissement

CHAPITRE III

Figure III.1. Tube en PVC avec les embouts

Figure III.2. Evolution du temps de l'essai en fonction de la température

Figure III.3. Les courbes de temps en fonction de la température

Figure III.4. Les coefficients de la pression en fonction de la température

Figure III.5. Tubes de PVC sous l'effet de pression

Figure III.6. Les courbes typiques des matériaux fragile et ductile

Figure III.7. Machine de traction et logiciel TCS

Figure III.8. Micromètre

Figure III.9. Machine de traction avec éprouvette

Figure III.10. Gabarit

Figure III.11. Eprouvette de PVC

Figure III.12. Premier essai à (30°C-vitesse 20 mm/min)

Figure III.13. Deuxième essai à (30°C-vitesse 80 mm/min)

Figure III.14. Eprouvette après la traction

Figure III.15. Seuil d'écoulement à 20 °C en fonction de la vitesse

Figure III.16. Bac thermique

Figure III.17. Seuil d'écoulement à différentes température en fonction de la vitesse

Figure III.18. Contrainte à la rupture à 20°C en fonction de la vitesse

Figure III.19. Contrainte à la rupture à différentes températures en fonction de la vitesse

Figure III.20. Allongement à 20°C en fonction de la vitesse

Figure III.21. Allongement à différentes températures en fonction de la vitesse

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

La production des polymères est en continuelle ascension. Cette production croissante résulte d'une utilisation accrue dans le monde moderne. Les domaines d'utilisation de ces matériaux sont très variés. Le secteur d'utilisation le plus important étant l'emballage.

Le plus souvent synthétiques, quelque fois naturelles, les matières plastiques doivent leur essor à leur large gamme de caractéristiques, dures, molles ou élastiques, transparentes ou opaques, isolantes et quelquefois conductrices, plus ou moins résistantes aux conditions agressives de leur usage, toujours légères. C'est la nature particulière de leurs molécules en forme de chaîne, ainsi que la variété des modes d'assemblage qu'elles adoptent, qui est à l'origine de cette diversité [1].

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

- Amélioration de la qualité du produit final (en particulier pour les plastiques standard)
- Progrès des techniques de mise en forme.
- Poursuite de la baisse des prix.
- Elévation et élargissement du niveau des connaissances et de développement à l'échelle industrielle.

But de notre travail :

Etude du comportement mécanique et détermination des paramètres des essais limites de température des tubes en PVC avec l'estimation de la température limite et critique. Ensuite, une analyse des défauts présents dans les tuyaux soumis à une pression interne a été effectuée.

Méthodologie :

Nous avons étudié le comportement mécanique du polymère polychlorure de vinyle (PVC) , soumis à des tests de pression et de traction. L'effet de la température et de la vitesse de déformation est mis en évidence. L'approche utilisée consiste à analyser l'évolution de la géométrie globale des courbes de déformation mécanique.

Les différentes zones caractéristiques de ces courbes sont tracées d'abord en fonction de la pression, de la température d'essai et de la vitesse de déformation.

Introduction générale

Structure du mémoire

Le mémoire est divisé en trois principaux chapitres :

Le premier chapitre est une vue générale sur les polymères, leur historique, classification et domaine d'état ainsi que les types de polymères et leurs domaines d'application dans la vie quotidienne.

Le deuxième chapitre présente une description générale du polymère étudié, le PVC, son origine et sa structure ; quelques propriétés d'usage ; et ses domaines d'application. L'entreprise TUBEX et ses produits commercialisés sont présentées dans ce chapitre.

Le troisième chapitre décrit les principes et les paramètres d'essais expérimentaux. Ce chapitre regroupe également l'étude expérimentale effectuée sur les tubes en PVC lors de l'essai de pression et la confection des éprouvettes de ce polymère afin de réaliser les essais de traction, , et couvre la discussion et les interprétations des résultats obtenus

Le mémoire se termine par une conclusion générale sur le travail entrepris, une liste des références bibliographiques et une liste des annexes.

I.1 Définition :

Polymère : c'est un ensemble de macromolécules issus d'assemblage covalent de motifs identiques appelé monomère

Monomère : molécules de base qui réagit par des réactions dites de polymérisation. Le monomère peut être un composé organique instauré, un composé organique comportant un ou plusieurs fonctions réactives.

I.2 Historique :

Le premier plastique est issu de la cellulose et a été découvert en 1869 par les frères Hyatt. Le PVC (Chlorure de Polyvinyle) a été découvert par accident à au moins deux occasions au cours du XIXe siècle, d'abord en 1838 par Henri Victor Regnault et en 1872 par Eugen Baumann. Dans les deux cas, le polymère est apparu comme un solide blanc dans des bouteilles de Chlorure de Vinyle après qu'elles aient été exposées à la lumière solaire

- La bakélite plastique 100% synthétique a été obtenue par hasard en 1907 à partir du phénol et du formol, par le chimiste belge Léo Baekeland.
- Le PA (Polyamide) a été synthétisé pour la première fois en 1941 par Wallace Carothers. Il a été très rapidement utilisé dans l'industrie textile, en particulier pour la fabrication des toiles de parachute. Ce matériau est connu dans le marché sous le nom de Nylon (l'acronyme de Now You Lose Old Nippon). Aujourd'hui il y a plusieurs types de polyamides, généralement désignés par des chiffres ex : PA 6, PA 11, PA 12. Une des principales différences entre ces types est la température de fusion et par conséquent la tenue thermique.
- Le PTFE (Polytétra-Fluoréthylène), sous le nom commercial TEFLON a été découvert par Roy J. Plunkett en 1938 et qui fut introduit commercialement en 1949.
- Le PC (PolyCarbonate) a été découvert en 1953 par trois chercheurs : Schnell, Bottenbruch et Krimm. Sa première mise sur le marché date de 1958.
- Le Polyéthylène (PE) est un des polymères les plus simples et les moins chers. C'est un plastique inerte et le plus employé, il compose notamment de la moitié des emballages. Suivant la méthode de polymérisation, le PE peut être classé en plusieurs types :
 - Polyéthylène Basse Densité ou PEBD (LDPE en anglais pour Low Density Polyethylene) inventé en 1933 par E.W Fawcett et R.O Gibson.

- Polyéthylène à Ultra Haut Poids Moléculaire ou PE-UHPM (UHMWPE en anglais pour Ultra High Molecular Weight Polyethylene).
- MDPE (Medium Density PE).
- Polyéthylène Linéaire à Basse Densité ou PE-BDL (LLDPE en anglais pour Linear Low Density Polyethylene)
- Polyéthylène Haute Densité ou PEHD (HDPE en anglais pour High Density Polyethylene) synthétisé en 1953 par le chimiste allemand Karl Ziegler.

- Les années 1970 ont vu l'arrivée de « la troisième génération » de matériaux plastiques de haute technologie ; cette innovation s'est poursuivie au cours des années 80 et 90, avec de nouveaux polymères créés pour relever des défis de conception spécifiques. Les récentes améliorations en matière de technologies catalytiques permettent un meilleur contrôle de la structure moléculaire des polymères et fournissent des propriétés physiques améliorées, par exemple une nouvelle génération de catalyseurs métallocènes permet la fabrication de films de Polyéthylène plus résistants et plus transparents [2].

<i>Nom Sigle Synthèse</i>	<i>Monomères</i>	<i>Unité constitutive</i>
Polyéthylène PE polymérisation	éthylène $\text{CH}_2 = \text{CH}_2$	$-\text{CH}_2 - \text{CH}_2 -$
Polypropylène PP polymérisation	propylène $\text{CH}_2 = \underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}$	$-\text{CH}_2 - \underset{\text{CH}_3}{\text{CH}} -$
Poly(chlorure de vinyle) PVC polymérisation	chlorure de vinyle $\text{CH}_2 = \underset{\text{Cl}}{\text{CH}}$	$-\text{CH}_2 - \underset{\text{Cl}}{\text{CH}} -$
Polystyrène PS polymérisation	styrène $\text{CH}_2 = \underset{\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}}$	$-\text{CH}_2 - \underset{\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}} -$
Polyamide 6-6 PA6-6 polycondensation	acide adipique $\text{HOOC} - (\text{CH}_2)_4 - \text{COOH}$ hexaméthylène diamine $\text{H}_2\text{N} - (\text{CH}_2)_6 - \text{NH}_2$	$-\text{NH} - (\text{CH}_2)_6 - \text{NH}$ $-\text{CO} - (\text{CH}_2)_4 - \text{CO} -$
Poly(téréphtalate d'éthylène) PET polycondensation	acide téréphtalique $\text{HOOC} - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{COOH}$ éthylène glycol $\text{HO} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{OH}$	$-\text{O} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{O}$ $-\text{CO} - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{CO} -$

Figure I.1. présentation de quelques polymères courants.

I.3 Importance économique et principaux domaines d'utilisation :

L'importance des polymères réside dans leurs propriétés mécaniques, thermiques, optiques, électriques et chimiques. La qualité d'un polymère est liée aux paramètres suivants :

- Propriétés mécaniques et élastiques intéressantes.
- Abondance et disponibilité à coût réduit.
- Possibilité d'avoir des matériaux de toutes les formes, de toutes les épaisseurs.
- Taux de vieillissement faible en fonction du temps.
- Flexibilité et légèreté.

I.4 Classification des polymères :

Les polymères peuvent être classés selon leurs origines :

- Polymères naturels (bio polymère) : bois et fibre végétale, laine, cuire
- Polymères artificiels : 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 ester de cellulose et éther de cellulose
 - ❖ Animal : la caséine extraite du lait mélangée au formaldéhyde donne de la galalithe
 - ❖ Polymère synthétique polymère préparé par polymérisation de monomères : polystyrène

En plus de leur origine, les polymères peuvent être classés selon les critères suivants:

- Selon leur stabilité thermique
- Selon leur conductivité thermique et/ou électrique
- Selon le nombre de liaisons entre les unités constitutives
- Selon leur cristallinité (amorphe ou semi-cristallin)
- Selon leur état physique (liquide ou solide)
- Selon Élastomères)
- Selon la régularité de l'enchaînement de motifs
- Selon le nombre de type d'unités répétitives (homopolymères, copolymères)
- Selon leur masse moléculaire (Oligomères : masse moléculaire inférieure à 2000g/mol, Polymères : masse moléculaire supérieure à 2000g/mol),

- Selon la composition chimique
- l'architecture de leur chaîne (branché, linéaire)
- Selon leur mise en œuvre (thermoplastiques, thermodurcissables [3]).

I.5 Domaine d'état :

La notion domaine d'état exprime le fait que les propriétés d'un matériau varient peut dans un certain domaine de température. Pour les plastiques on distingue les états fondamentaux suivants :

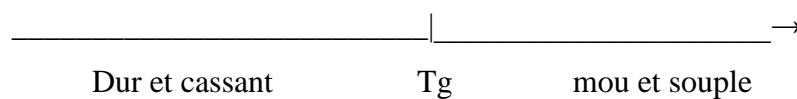
- état vitreux, ou élasticité d'origine énergétique ou état solide.
- état caoutchouteux ou d'élasticité d'origine entropique.
- état fondu ou liquide, ou écoulement.

Entre ces domaines d'états il existe des zones de transition :

- zone de transition vitreuse, ou de ramollissement.
- zone de fusion ou de fluidification [4].

I.6 Transition vitreuse :

C'est le changement d'état du polymère sous l'action de la température. Ce changement entraîne des variations importantes des propriétés du polymère. La transition vitreuse est caractérisée par une température de transition vitreuse (T_g).



En dessous de cette température, le polymère est dit vitreux (état solide) et présente le comportement d'un corps solide élastique. Au dessus cette température il présente un comportement de solide plastique (état viscoélastique), suite à l'affaiblissement de liaisons intermoléculaires (force de Van der Waals, ...).

I.7 Température de transition vitreuse:

- ❖ La température de transition vitreuse « T_g » et la température de fusion « T_f » sont les deux températures fondamentales nécessaires dans l'étude des matériaux polymères.
- ❖ La température de transition vitreuse est partiellement importante pour les polymères amorphes, notamment les thermoplastiques amorphes.
- ❖ Les températures caractéristiques d'un matériau peuvent alors être classées de la façon suivante : Température de transition vitreuse < Température de cristallisation < Température de fusion < Température de décomposition thermique.

I.8 Structure et caractérisation :

Selon leur structure, il existe plusieurs types de polymères :

- Les polymères amorphes: dans ce cas les chaînes macromoléculaires ne sont pas arrangées, il y'a un désordre total. Tels que ceux qui nous intéressent pour le propriété mécanique sont souvent des solides amorphes , on ne détecte aucun ordre à l'aide des rayons X , on observe un <halo amorphe> .
- Les polymères cristallins : il existe dans ce cas les zones cristallines (les chaînes sont ordonnées).
- Les polymères semi-cristallins : ils se composent d'une phase cristalline (l'ordre) ou la chaîne présente des régularités de structure, on observe aux rayons X un ordre cristallin donnant des anneaux de diffraction, caractéristiques d'une structure cristalline et une phase amorphe (désordre) [5].

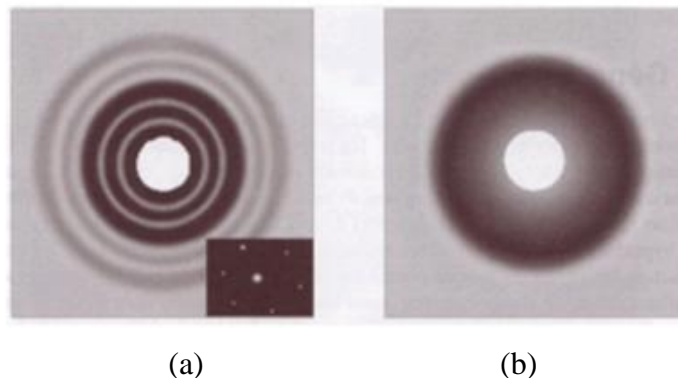


Figure I.2. Cliché d'analyse d'un polymère aux rayons X:
(a) Semi-cristallin et (b) amorphe.

I.9 Type de polymères :

On distingue deux types de chaînes :

Il existe de nombreuses classifications pour les polymères, en fonction du mode D'obtention, (polyaddition, polycondensation ou polymérisation) ou bien alors en Fonction de leurs propriétés (thermoplastiques, thermodurcissables et élastomères), [6]

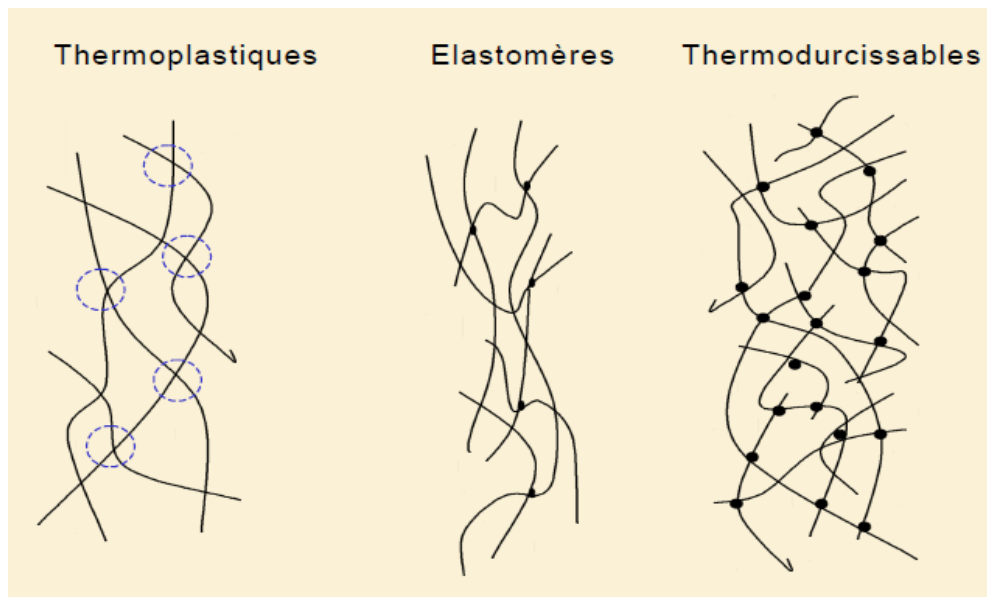


Figure I .3. Type de polymère.

On peut également les différencier par leurs structures : cristallines ou amorphes Les acronymes permettent une identification aisée puisqu'ils utilisent une séquence de Symboles indiquant la structure chimique. Des lettres supplémentaires permettent de Qualifier les charges ou les propriétés de base comme la densité, par exemple PE-HD Désigne un polyéthylène (PE) haute densité (HD). Lorsque l'on classe les polymères selon leurs propriétés ont distingue 3 grands types de polymères :

I.9.1 Les thermoplastiques :

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 PE HD (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 opaque. 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 amorphes

- Acrylonitrile butadiène styrène (ABS)
- Acrylonitrile styrène acrylate (ASA)
- Polycarbonate (PC) •Poly méthacrylate de méthyle (PMMA)
- Polystyrène (PS) •Polychlorure de vinyle (PVC)

I.9.2 Les thermodurcissables :

Les plastiques thermodurcissables sont transformés sous l'impact conjugué de la Température, la pression et les produits chimiques. Les macromolécules réticulent Pendant la cuisson. Cet état de la matière est irréversible, et donc les thermodurcissables ne peuvent être fondus de nouveau après leur réticulation. Ils restent solides et rigides presque jusqu'à la température de décomposition. Cette famille comprend différents matériaux comme les compounds qui durcissent, les résines liquides ou de coulée et les semi-produits. Ils sont indissolubles et ne fusionnent pas. De ce fait, la tenue à la chaleur et la résistance aux attaques chimiques sont considérables.

I.9.3 Les élastomères :

Elastomères est le terme générique désignant des polymères à hauts poids moléculaires et dotés de propriétés élastiques. Ils peuvent être d'origine naturelle (caoutchouc) ou synthétique. Ils peuvent subir une élongation qui peut atteindre plusieurs fois leur longueur initiale puis reprendre leur forme originelle. Exemples d'élastomères : •Styrène butadiène styrène (SBS) •Styrène éthylène butylène styrène (SEBS) •Caoutchouc éthylène propylène ter polymère (EPDM)

I.10 Processus d'élaboration des polymères industriels :

Selon le type de polymères, les matières premières peuvent être de plusieurs sources. Ainsi, la source principale pour l'élaboration des polymères est le pétrole brut. La figure ci-dessous montre les quatre principaux polymères industriels et leur processus d'élaboration.

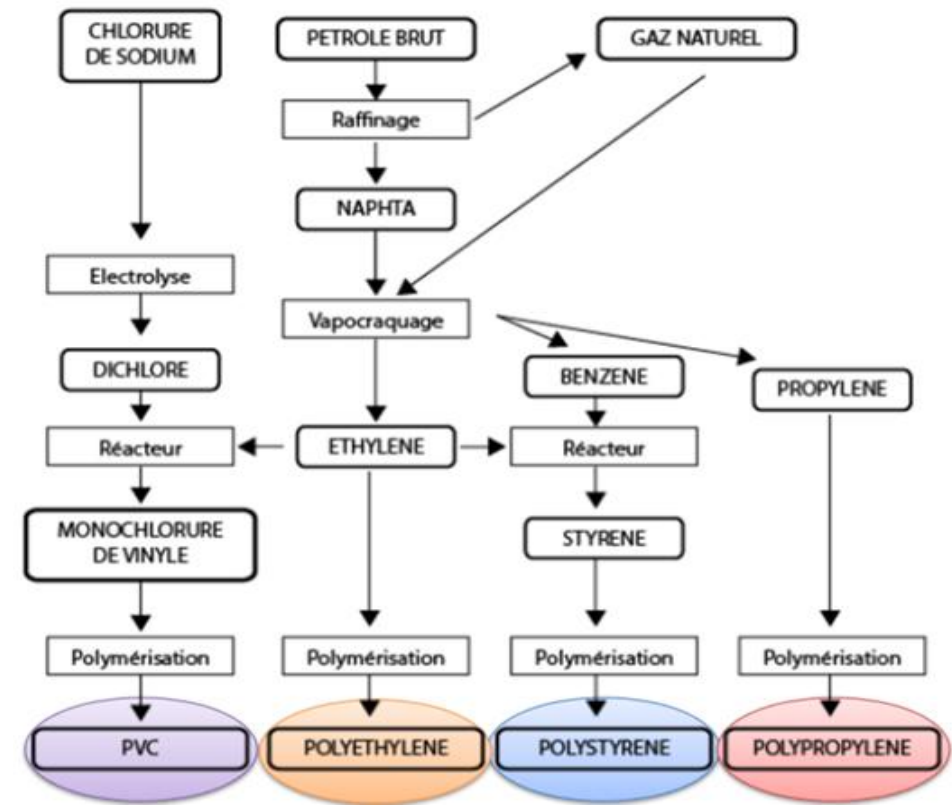


Figure I.4. Schéma représentatif de l'élaboration des quatre polymères industriels.

I.11 Type de réactions de polymérisation :

Deux mécanismes entièrement différents sont utilisés pour la synthèse de polymères lors de la polymérisation.

Le premier type de réaction est appelé polymérisation par étape où la croissance des macromolécules est le résultat de réactions chimiques classiques entre les groupements fonctionnels réactifs des monomères.

Une réaction de polycondensation avec libération d'un sous-produit de la réaction, (souvent de l'eau...) est une réaction de polymérisation par étape.

Le deuxième type de réaction est appelé polymérisation en chaîne et résulte de la formation d'un centre actif A^* qui fixe de façon successive de nombreuses molécules de monomère : $A^* + M \rightarrow AM^*$ puis $AM^* + nM \rightarrow AM^{*n+1}$

Le polymère obtenu présente un degré de polymérisation $(n+1)$.

Une réaction de polyaddition sans libération de sous produit est une réaction de polymérisation en chaîne. Dans ce cas, le mécanisme implique généralement l'ouverture d'une double liaison ($C=C$, par exemple) ou l'ouverture d'un cycle d'atomes [7].

I.12 Degré de polymérisation et masse moléculaire :

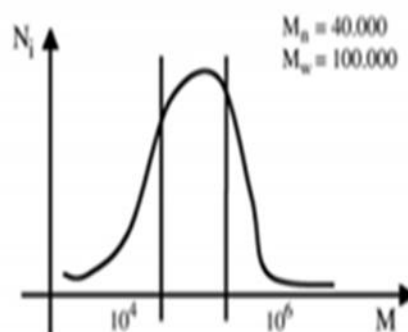
Un polymère peut être caractérisé par son degré de polymérisation ou sa masse moléculaire. Le degré de polymérisation est le nombre total de monomères contenus dans une macromolécule. Lorsque ce degré de polymérisation (DP) est inférieur à 30, on parle d'oligomère et lorsqu'il est supérieur à 30, c'est un polymère. Lorsqu'on observe un polymère de synthèse ou un polymère naturel, il est souvent constitué d'un mélange de chaînes macromoléculaires de tailles différentes avec des degrés de polymérisation différents.

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

$$M_w = \frac{\sum N_i M_i^2}{\sum N_i M_i} \quad M_n = \frac{\sum N_i M_i}{\sum N_i}$$

M_w : est la masse moléculaire moyenne de toutes les macromolécules présentes dans le matériau, M_n : est la masse moléculaire majoritaire dans le mélange.

La figure suivante représente la distribution des masses moléculaires d'un polymère poly-dispersé (N_i est le nombre de chaînes et M la masse moléculaire)



(N_i est le nombre de chaînes et M la masse moléculaire)

Figure I.5. Distribution des masses moléculaires d'un polymère poly-dispersé .

Lorsque M_n est égale à M_w , toutes les chaînes macromoléculaires du polymère ont la même masse moléculaire et le même degré de polymérisation.

Un copolymère résulte de l'union, régulière ou non de plusieurs motifs monomères différents.

I.13 Domaine d'application :

Les polymères sont devenus l'élément essentiel d'un nombre très important d'objets usuels et courants, dans lesquels, ils ont souvent remplacé les substances naturelles [8].

Les domaines d'utilisation sont relativement classés comme suit :

- Emballage
- Bâtiment et construction 23%
- Électricité et électronique 9%
- Automobile 8%
- Sport et loisirs 3%
- L'agriculture 2%
- Autres 21%

Ces six marchés représentent environ 80% des plastiques utilisés dans le monde. Les 20% restants sont dans de nombreux autres marchés, même si leur poids économique est faible, ils sont des opportunités à forte valeur ajoutée potentielle comme le marché de la santé.,

Les cinq familles de polymères les plus utilisées sont :

- Les polychlorures de vinyles (PVC) utilisés comme pièces rigides, tuyauterie, films d'étanchéité.
- Les polyéthylènes (PE) utilisé comme emballages transparents, pièces rigides.
- Les polypropylènes (PP) et les polystyrènes (PS) : pièces rigides, fibres.
- Les polyesters saturés : cosmétiques, revêtements de surface, peintures, vernis, plastifiants pour autres polymères : et les polyesters insaturés : films, fibres textiles, matériaux composites.

II.1 L'origine du PVC :

En 1912, un chimiste Allemand, Fritz Klatte, décida d'essayer d'en faire quelque chose, et fut réagir de l'acétylène avec de l'acide chlorhydrique (HCl). Cette réaction produit du chlorure de vinyle.

En 1913, les premiers brevets de polymérisation ont été déposés par le chimiste Allemand Fritz Klatte.

En 1926, un chimiste Américain, Waldo Semon travaillait à B.F. Goodrich quand il inventa de son côté le PVC .mais contrairement à ses prédécesseurs il lui parut que ce matériau ferait un très bon rideau de douche. Lui et ses patrons de B.F. Goodrich déposèrent un brevet sur le PVC aux états unis (les chefs de Klatte n'avaient apparemment jamais déposé de brevet en dehors de l'Allemagne). Des tonnes de nouvelles applications furent trouvées pour ce merveilleux matériau waterproof, et le PVC fut cette fois ci un grand succès [9].

II.2 Définition :

Le PVC, c'est un produit solide très dangereux en raison notamment de ses propriétés cancérigènes : l'inhalation de vapeur de PVC susceptibles de provoquer de lésions osseuses et angioneurotiques et d'induire certains cancers (angiosarcomes) notamment du foie.

Le PVC utile car il résiste à deux choses que les autres polymères détestent : l'eau et le feu. Du fait de sa résistance à l'eau il est utilisé pour faire des imperméables et des rideaux de douche, et bien sur des tuyaux d'eau. Il résiste au feu parce qu'il contient des atomes de chlore, quand on essaye de brûler le PVC, les atomes de chlore sont relâchés et ils inhibent la combustion .

Le PVC est le deuxième plastique le plus largement utilisé au monde. il fait partie d'une famille de polymères thermoplastiques (qui sont des polymères facile à mouler et à former par chauffage). Ils sont obtenus par polymérisation radicalaire en bloc ou en suspension de chlorure de vinyle [10].

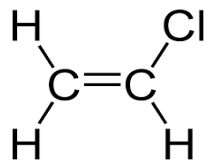


Figure II.1. Polychlorure de vinyle (PVC).

Formule de développée:

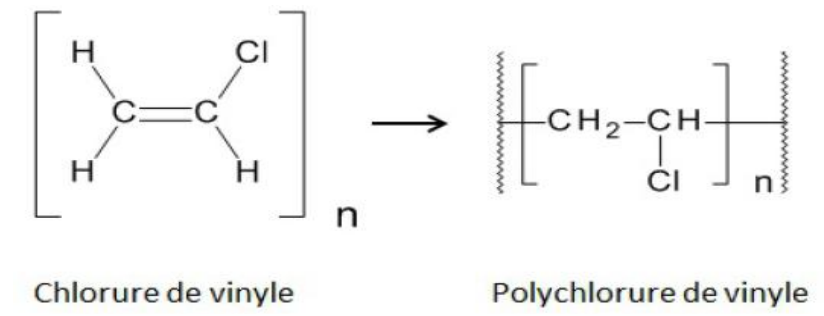


Figure II.2. Formule développée de PVC.

II.3 Polymérisation du chlorure de vinyle :

Les procédés de polymérisation du PVC utilisés industriellement sont :

- procédé en masse
- procédé en émulsion
- procédé en suspension (et micro suspension)

Les procédés en masse et en suspension permettent d'obtenir des résines de granulométrie de l'ordre de 130 μm , qui sont ensuite améliorés (ajout d'additives) et transformées sur des machines fournissant à la fois du cisaillement et de la chaleur.

Par opposition, les résines pour plastisols, obtenues par le procédé en émulsion ou micro suspension, ont une granulométrie beaucoup plus faible, de l'ordre de 10 μm . De ce fait, une fois améliorées, ces résines se mettent en œuvre par des techniques très différentes comme l'enduction [11].

Dans le cas de la polymérisation en suspension du PVC, et après le séchage, le PVC se présente sous forme de poudre blanche à laquelle on ajoute les produits suivants :

- -des stabilisants de chaleur et de lumière.
- -des plastifiants.
- -des lubrifiants.

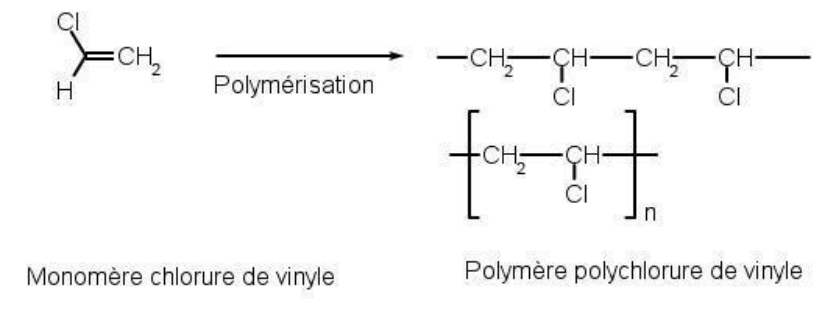


Figure II.3. Réaction de polymérisation du PVC.

II.4. Résine de PVC :

II.4.1 Elaboration : Les polymères sont synthétisés en reliant entre elles par des liaisons covalentes des petites molécules, appelées molécules de monomère, molécules monomères ou plus simplement monomères.

II.4.2 Formulation : Après leur synthèse, les polymères ne sont jamais utilisés tels quels. On leur ajoute diverses substances qui modifient leur comportement, en remplissant différentes fonctions:

- **Stabilisants** : le polymère « pur » est fragile. Il peut subir sous l'action de divers agents (chaleur, lumière, eau, radiations ionisantes, actions mécaniques lors de la transformation, etc.) des réactions de dégradation, qui se traduisent par une modification de la structure chimique (oxydation) et/ou une diminution de la masse molaire, et entraînent une altération des propriétés physiques. L'emploi de stabilisants permet de limiter ces phénomènes ;

- **additifs** pour faciliter la transformation : lubrifiants, agents de démoulage, etc. ;
- **colorants** : pigments minéraux (dioxyde de titane) ou organiques (noir de carbone) ;
- **plastifiants** : pour rendre le matériau plus souple ;
- **charges** (carbonate de calcium, mica, talc) et renforts (fibres de verre) : l'objectif peut être une réduction du coût, mais on cherche en général une amélioration des propriétés mécaniques (augmentation du module d'élasticité) ;
- renforcement au choc : nodules de caoutchouc ;
- additifs anti-combustion, etc [12]



Figure II.4. Résine de PVC.

II.5 Transformation du PVC :

II.5.1 Extrusion : Le PVC est majoritairement transformé dans des extrudeuses pour fabriquer des produits finis comme des tubes, des profilés, des plaques, des tuyaux flexibles et des câbles.

II.5.2 Le calandrage : (sur des machines appelées calandres) permet de fabriquer des films et des revêtements de sol.

II.5.3 Le moulage par injection : est utilisé pour fabriquer des éléments de robinetterie et des boîtiers et les bouteilles sont fabriquées par soufflage.

Le PVC en émulsion et en micro suspension est également utilisé sous forme de pâte pour enduire divers produits en PVC souple comme les plans, les revêtements de sol, les éléments de capotage ou le similicuir. Enfin, les poupées ou les ballons sont fabriqués par roto moulage [13].

II.6 Structure :

La structure de PVC est une chaîne hydrocarbonée avec un atome de chlore liée alternativement à un atome de carbone sur deux.

Le PVC n'est pas totalement amorphe, vu qu'il présente des zones microcristallines basées sur la configuration syndiotactique, dont le taux dépend de la température de polymérisation qui peut atteindre jusqu'à 20% de l'ensemble structural [14].

Il existe deux puissantes forces de cohésion dans le PVC dues en grandes parties aux moments de dipôle exercés par les atomes de chlore, cette polarité rend le PVC incompatible avec les hydrocarbures non polaires par contre celle-ci rend le polymère soluble dans les solvants fortement polaires (par exemple les hydrocarbures chlorés) [15].

La formule structurale de base est la suivante : [16]

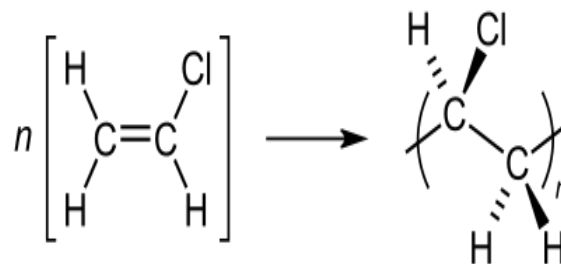


Figure II.5. La formule développée de polychlorure de vinyle.

II.7 Propriétés d'usage :

Les principales propriétés d'usage du PVC peuvent être résumées comme suit :

II.7.1 Propriétés physiques :

Le PVC est un polymère amorphe présentant une très faible cristallinité (de l'ordre de 7%) dont la masse volumique est de :

- pour les mélanges non plastifiés : 104g/cm³.
- pour les mélanges plastifiés : 1.2 a 1.3 g/cm³.

II.7.2 Propriétés chimiques :

Le PVC sans plastifiant possède une bonne résistance aux produits chimiques : acide, bases, huiles, alcools, par contre sensible aux hydrocarbures aromatiques et chlorés.

Le pvc souple (plastifié) est beaucoup plus sensibles aux agents chimiques

II .7.3 Propriétés électriques :

Le PVC présente de bonne qualité d'isolement électrique. Les pertes diélectriques restent néanmoins suffisantes pour permettre le soudage a haute fréquence.

II.7.4 Propriétés thermiques :

Le poly chlorure de vinyle (PVC) amorphe à une température de transition vitreuse comprise entre 75 et 80°C. C'est – à – dire à température ambiante il est rigide et qu'au dessus de 90°C, il est caoutchouc (faible résistance, grande déformation). Le PVC se décompose dans une flamme en libérant de l'acide chlorhydrique gazeux, mais il auto extinguable, les PVC plastifiés brûlent plus facilement.

II.7.5 Propriétés mécaniques :

Le PVC présente une bonne rigidité a température ambiante ainsi qu'une excellente résistance a l'abrasion. Il présente, par contre une certaine fragilité au froid, notamment une fragilité au choc a température inférieure a -10°C dans le cas du PVC plastifié, le seuil de température ou apparait cette fragilité peut être abaissé. [17]

Tableau II.1. Propriétés mécaniques de PVC.

Propriétés	Unités	PVC rigide	PVC souple
• masse volumique	g/cm ³	1,36	1,16-1,35
• module d'élasticité	M Pa	2700-3000	25-1600
• contrainte à la rupture	M Pa	50-60	8-25
• Allongement à la rupture	%	10-50	170-400
• Allongement à la rupture	%	4-6	/
• Température de transition vitreuse	°C	80	-50-80

II.8 Applications :

En ce qui concerne le développement des marchés du PVC, on peut faire la constatation suivante :

- La consommation totale du PVC progresse d'environ 3.5% dans le monde,
- Les profilés rigides augmentent un peu plus que le marché tandis que les films rigides continuent à croître, surtout dans l'emballage l'ameublement,
- Le PVC se recycle facilement, comme la plupart des polymères.

Les grands secteurs industriels consommateurs du PVC sont :

- -emballage
- -bâtiment : profilés (encadrement de fenêtre et portes, volets roulants)
- -automobile : tableaux de bord, accoudoirs
- -bagagerie, chaussures : valises, sac ; bottes, talons de chaussures
- -câblerie : isolation de câbles haute et basse tension
- -plasticulture : films, serres, tuyaux d'irrigation, et de drainage [18].

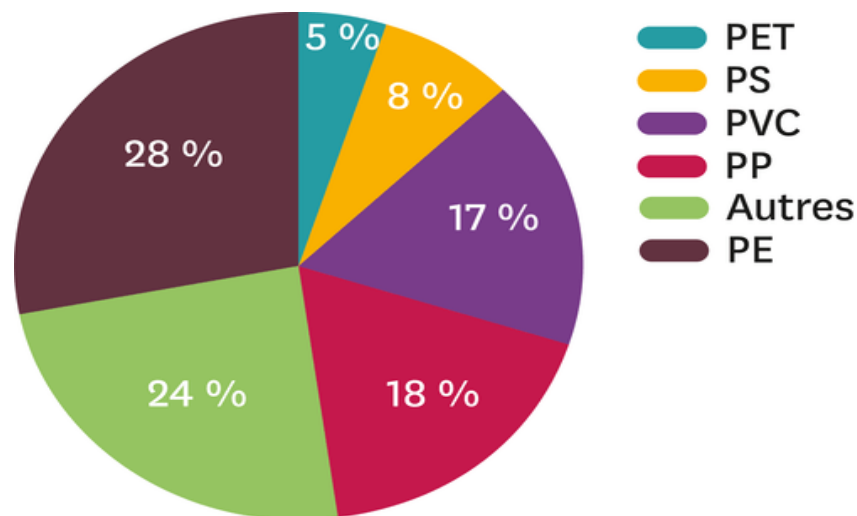


Figure II.6. Rapports d'utilisation des polymères.

II.9 Entreprise Tubex:

La Sarl Tubex, située au niveau de la ville d'Oran, a été créée en 1985 et active dans le domaine de la production de tubes PVC rigide, PEhd et PEbd.

Les domaines d'utilisation des produits industriels de l'entreprise Tubex sont principalement l'Hydraulique (AEP), l'irrigation, la distribution individuelle d'eau potable, le transport et les branchements de réseaux de gaz, le bâtiment et l'industrie en générale.

La société Tubex s'est fixée comme objectif la réponse aux besoins en tubes PVC et Polyéthylène induits par les plans nationaux de développement, notamment pour les secteurs de l'agriculture, l'hydraulique et de l'énergie.

La société Tubex dispose d'un laboratoire équipé d'instruments de mesure et de contrôle de la qualité permettant de réaliser tous les tests et essais exigibles par les normes régissant le domaine d'utilisation des produits (test hydrostatique, résistance à la traction...).

La société Tubex accorde une importance capitale à la qualité des produits fabriqués pour satisfaire les exigences de ses partenaires et clients. Dans cet esprit, elle s'est engagée à améliorer son système de management de la qualité.

A ce titre, **TUBEX** est spécialisé dans la production :

- de tubes PVC pour les réseaux d'assainissement et à l'adduction d'eau potable ;

- de tubes polyéthylène (PE) haute et basse densité (PEHD, PEBD) pour la distribution de gaz combustible, l'irrigation, gaine de protection et l'adduction d'eau potable.

II.10 Produits commercialisés de l'entreprise :

-Alimentation en eau potable : tube en PEHD en coloris noire avec bande bleu pour l'adduction d'eau potable.

-Distribution de gaz : tubes en PEHD noire a trait jaune sont utilisé dans les réseaux de distribution de gaz et pour le branchement d'alimentation des habitations.

-Protection de câble de télécommunication en PVC : tubes en PVC compact pour la protection des lignes souterraine de télécommunication, d'alarme et de télésurveillance

-Protection des câbles électriques : gaine en PE a bande rouge pour la protection des câbles électrique enterré (Basse et haute tension)

-Assainissement par refoulement en PVC : tubes en pvc pression compact a joint.

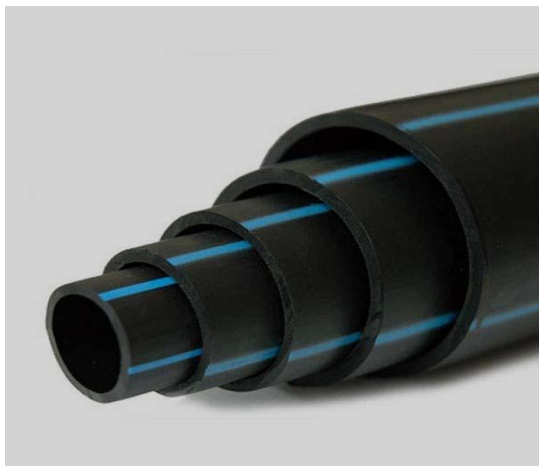


Figure II.7. Tube PEHD d'adduction d'eau



Figure II.8. Tubes en PVC d'assainissement

II.11 Charges et Additifs:

Les charges et additifs utilisés dans la production des tubes en PVC ainsi que leurs quantités sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau II.1. Les charges et additifs utilisés en PVC.

	Matière première	Charges	Stabilisant	TiO ₂	Colorants
Nom	Résine de PVC(poudre)	Craie CaCO ₃	AS-KIM	Oxydes métallique	Noire de carbone
Quantité	6sac de 25Kg=125Kg	12.5kg	4.5Kg	100-50 g	10g

II.12 Stabilisants :

Ce sont des composés que l'on ajoute au polymère plastifié ou non, afin de lui conférer une stabilité accrue vis-à-vis de la chaleur et de la lumière (rayonnement ultra-violet). Ils sont employés à raison de quelques % par rapport au poids de la résine.

- Epoxydes.
- Hydrotalcite.
- Phosphites.
- Sels organiques de métaux.
- Zéolithes.

Les stabilisants sont des ingrédients importants de la formulation du PVC :

- Préviennent la dégradation lors de l'extrusion et de l'injection
- Protègent les profilés en PVC de la déformation, de la décoloration ou du jaunissement sous l'effet des UV
- Facilitent la mise en forme du PVC

Assurent la résistivité électrique à haute température

Dans cette partie expérimentale du travail, nous avons utilisé le PVC de l'entreprise Tubex. La partie expérimentale se divise en deux essais : essai de pression et essai de traction. A noter que les deux essais ont été réalisés au laboratoire de contrôle qualité de l'entreprise Tubex.

III.1 Essai de pression :

Objectif :

Le premier objectif de cet essai est de déterminer la température de la résistance limite d'un tube en PVC.

III.1.1 Principe de l'essai :

Le principe de l'essai, repose sur l'introduction d'un gradient de pression dans le tube jusqu'à éclatement. La pression à l'éclatement est relevée sur la table de commande du dispositif. Les essais de pression ont été effectués en variant le débit de pression et la température.

La température limite est la température maximale à laquelle le tube PVC peut résister. L'expérience est réalisée à l'aide des embouts en les reliant à un générateur de pression en réglant la pression correspondante et en fixant les bouts du tube aux embouts qui correspondent à son diamètre en le mettant dans un bac et en réglant la température correspondante à chaque essai.

Après une certaine durée on détermine le temps de la résistance du tube qui est affiché dans l'appareil pour tracer et regrouper les différentes courbes auxquelles on peut conclure sa température de résistance limite.

III.1.2 Matériels utilisés :

- Coupe tube
- Embouts (figure III.1)
- Bac thermique
- Générateur de pression
- Thermomètre



Figure III.1. Tube en PVC avec les embouts

III.1.3 Paramètres :

- Pressions de l'essai (bar) : 38, 40, 42, 45
- Températures de l'essai (°C) : 25, 30,35,40,45
- Diamètre du tube ϕ : 63 mm
- Epaisseur du tube : 5 mm

Détermination des températures limite et critique du tube en PVC

L'expérience a été réalisée sur un tube en PVC avec les paramètres cités précédemment et à différentes pressions.

III.1.4 A pression 38 bars :

- **Protocole expérimentale :**
 - On ramène un tube PVC de diamètre 63 mm pression nominale 10 et on mesure son épaisseur qui est égale à 5 mm.
 - On coupe le tube en une longueur de 36.5 cm (selon la norme d'essai de pression) et on le fixe aux embouts correspondant à cette longueur et à ce diamètre. A noter que le choix de la longueur du tube est fixé par la norme des essais de pression.
 - On relie l'embout avec le tuyau du générateur de pression on le purge et on le met dans un bac de température 25°C. Ensuite, on le conditionne pendant 30 min puis on referme le couvercle,
 - Après 30 min on règle la pression d'essai pour commencer le test,
 - Une fois que le tube s'éclate l'appareil va afficher sa durée de résistance,
 - Après chaque expérience on refait un autre essai en augmentant la température avec une autre pression,

• **Résultats et discussion :**

Après l'éclatement de chaque tube à un moment donné, nous avons obtenus les résultats de la pression de 38 bars qui sont affichés dans le tableau suivant.

Tableau III.1. Résultats de la pression de 38 bars.

Température (°C)	temps (min)
25	180,0
30	156,0
35	98,0
40	23,0
45	10,0

La courbe donnant l'évolution du temps mesuré en fonction de la température d'essai est représentée sur la figure III.2.

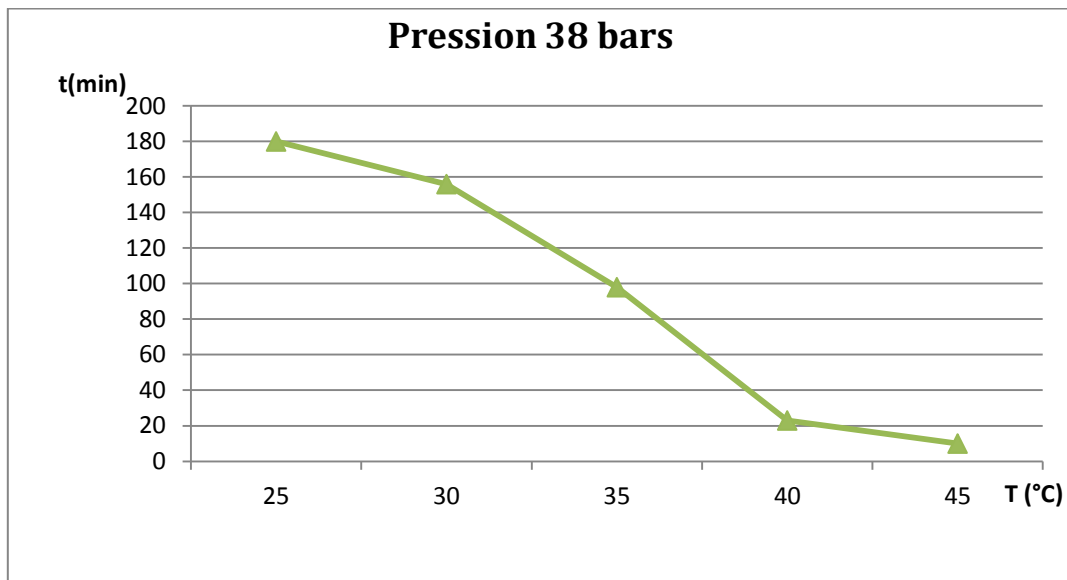


Figure III.2. Evolution du temps de l'essai en fonction de la température.

III.1.5 A pressions 40, 42 et 45 bars :

Dans cette partie, nous avons essayé de varier la pression de 40 à 45 bars. Le même protocole expérimental a été suivi pour les pressions 40, 42 et 45 bars afin de déterminer les températures limite et critique.

III.1.6 Résultats

Tous les résultats obtenus sont affichés dans le tableau suivant :

Tableau III.2. Résultats de l'évolution du temps d'essai à différentes pressions et températures.

Température (°C)	Temps d'essai (min)			
	à 38 bars	à 40 bars	à 42 bars	à 45 bars
25	180,0	142,0	80,0	15,0
30	156,0	90,0	40,0	8,0
35	98,0	45,0	24,0	3,0
40	23,0	17,0	10,0	1,5
45	10,0	4,0	3,0	0,5

Les résultats du tableau III.2 sont représentés par des courbes qui donnent l'évolution du temps d'essai (le temps à lequel résiste le tube à une telle pression) en fonction de la température de l'expérience et différentes pressions.

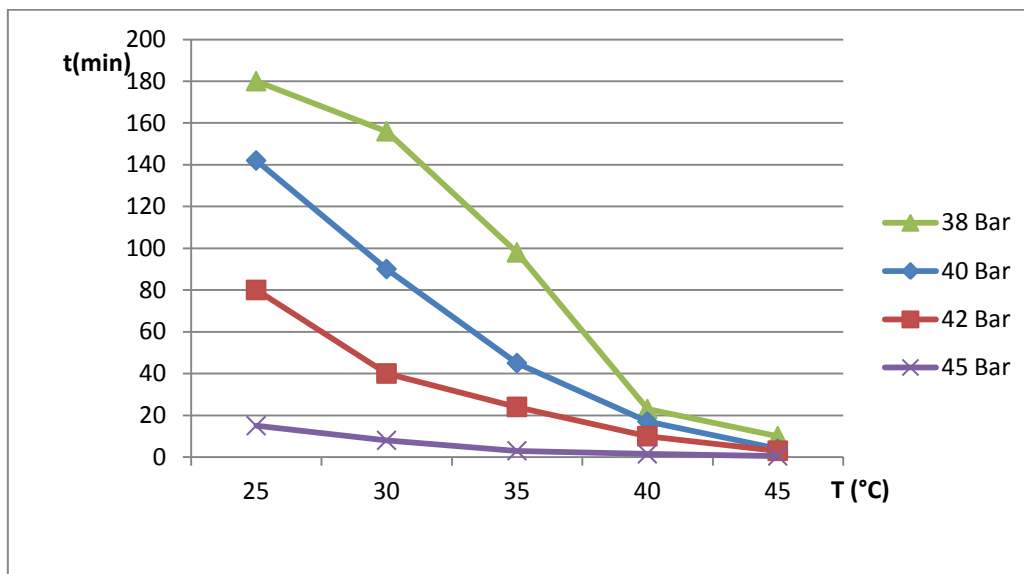


Figure III.3. Les courbes de temps d'essai en fonction de la température.

D'après la figure III.3, on peut constater que la diminution du temps d'essai est proportionnelle à l'augmentation de la température. La température maximale à laquelle le tube peut résister est de 40°C. Cette température est appelée température de résistance limite. Au-delà de cette température, le tube ne peut résister à aucune pression appliquée. Pour cela et d'après les résultats obtenus, la température de résistance critique de notre PVC est de 45°C.

Pour plus de précision on a déterminé un coefficient de chaque pression en utilisant la formule ci-après :

$$\text{Coefficient} = \frac{\text{durée d'essai de chaque tube}}{\text{durée maximale}}$$

Tableau III.3. Les coefficients de pression.

Température (°C)	Coefficients				Moyenne des coefficients
	38 bars	40 bars	42 bars	45 bars	
25	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
30	0,9	0,6	0,5	0,5	0,6
35	0,5	0,3	0,3	0,2	0,3
40	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
45	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0

Les résultats du tableau III.3 sont représentés sur la figure III.4.

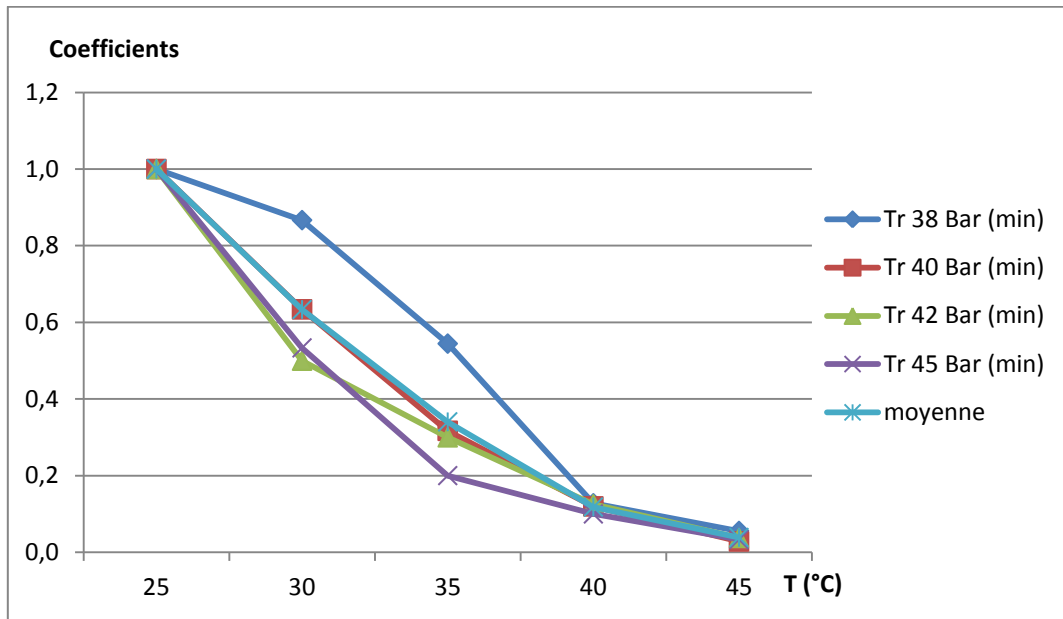


Figure III.4. Les coefficients de la pression en fonction de la température.

D'après cette figure, on remarque que les courbes se croisent dans les deux derniers points de température (40°C et 45°C). Nous pouvons conclure que la température limite à laquelle le tube peut résister est de 40°C par contre sa température critique au-delà de laquelle le tube ne peut plus résister est de 45°C car l'éclatement est instantané.

La figure III.5 montre le tube en PVC après expérience. Sur cette figure nous observons que la déformation est bien évidente.

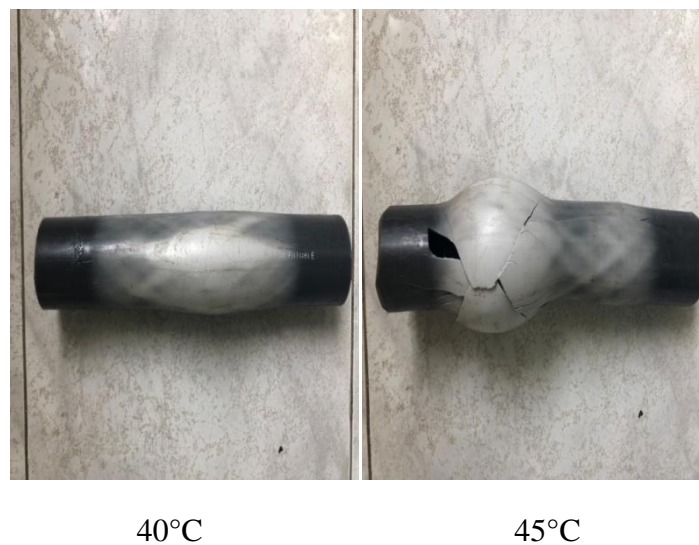


Figure III.5. Tubes de PVC sous l'effet de pression.

III.2 Essai de traction :

III.2.1 Introduction :

Les essais mécaniques sont des expériences dont le but est de caractériser le comportement des matériaux (mécanique des milieux continus). La loi de comportement établit une relation entre les contraintes (pression=force/surface) et les déformations

Vu ses larges champs d'application, aussi bien sur le plan domestique qu'industriel et l'évolution de sa consommation dans le monde ; nous avons choisi le PVC pour faire l'objet de notre présente étude.

Cette étude consistera en des expériences de pression sur les tubes et de traction sur des éprouvettes en PVC sous deux effets important : la température et la vitesse de déformation.

Ces deux séries d'expériences ont été réalisé au laboratoire de contrôle et de qualité a l'entreprise TUBEX situé à la première sortie de l'autoroute Oran-Mostaganem.

III.2.2 Objectif :

- Etude du comportement mécanique du matériau selon la variation de la température d'une part et la vitesse de déformation d'autre part.
- Détermination du seuil d'écoulement ; la contrainte a la rupture et l'allongement ; en déduire la vitesse de caractérisation du tube.

III.2.3 Principe de l'essai :

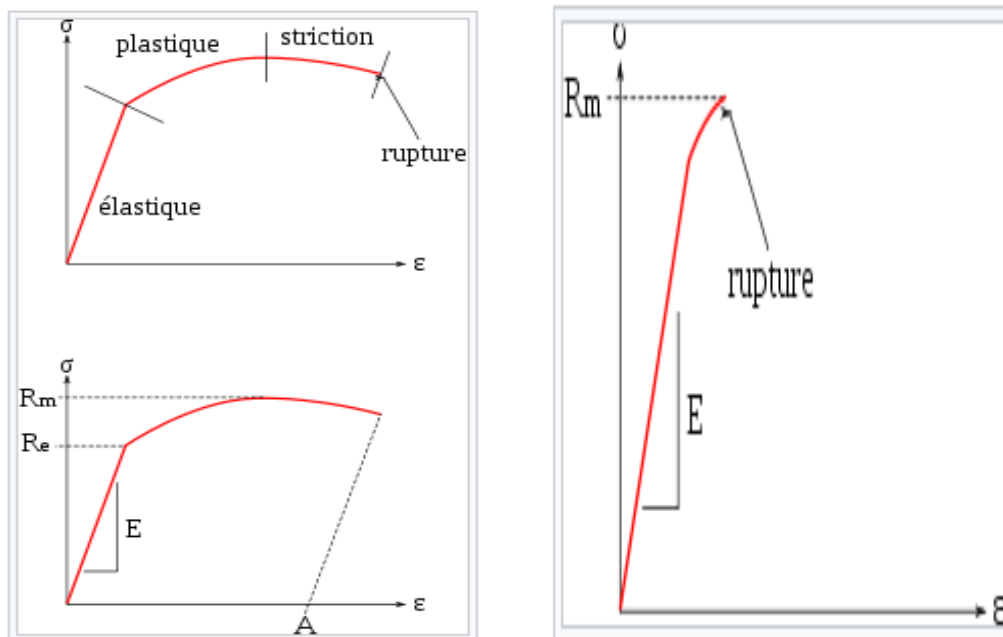
L'essai de traction est l'essai mécanique le plus fréquemment utilisé, il consiste à soumettre une éprouvette du matériau à étudier à une traction et à mesurer son allongement. Une simple courbe contrainte-déformation constituera un bon élément de base pour connaître le comportement mécanique d'un matériau donné, ce qui pose quelques problèmes pour le polymère amorphe à cause de leur caractère hétérogène correspondant a l'apparition d'une striction et sa résistance à la rupture. [19]

III.2.4 Stratégie d'un essai de traction :

Dans cette partie, un essai de traction est réalisé en suivant les étapes ci-après :

- 1) Eprouvette au repos, $F=0$, allongement=0.
- 2) On tire sur l'éprouvette avec une force F_1 qui entraîne un allongement L_1 .

- 3) On supprime l'effort et l'allongement disparaît (le domaine élastique du matériau)
- 4) On tire avec une Force plus importante F2 qui entraîne un allongement L3
- 5) On supprime la force F2, mais l'éprouvette ne retrouve pas son état initial. (nous avons dépassé le seuil d'élasticité et entré dans le domaine plastique). Il reste un allongement L2
- 6) On exerce à nouveau un effort de traction supplémentaire plus important que l'effort F2. Après avoir atteint un maximum, la force décroît et l'éprouvette s'amincit en un endroit (zone de striction), puis il y a rupture. Après cette rupture, on mesure $L4 = Lf - L0$



Courbe typique d'un matériau fragile.

Courbe typique d'un matériau ductile.

- R_m : Résistance à la traction
- R_e : Limite d'élasticité
- E : module de Young
- A : Allongement à la rupture.

Figure III.6. Courbes typiques des matériaux fragile et ductile.

III.2.5 Matériel utilisé :

- Machine de traction DTS 1000 avec une hauteur de 90 cm (voir figure III.7)
- Logiciel : TCS dynamométrie test
- Tubes en PVC d'épaisseur 5 mm
- Fraiseuse permettant d'obtenir l'éprouvette spécifiée
- Eprouvette

- Bac thermique
- Thermomètre
- Micromètre

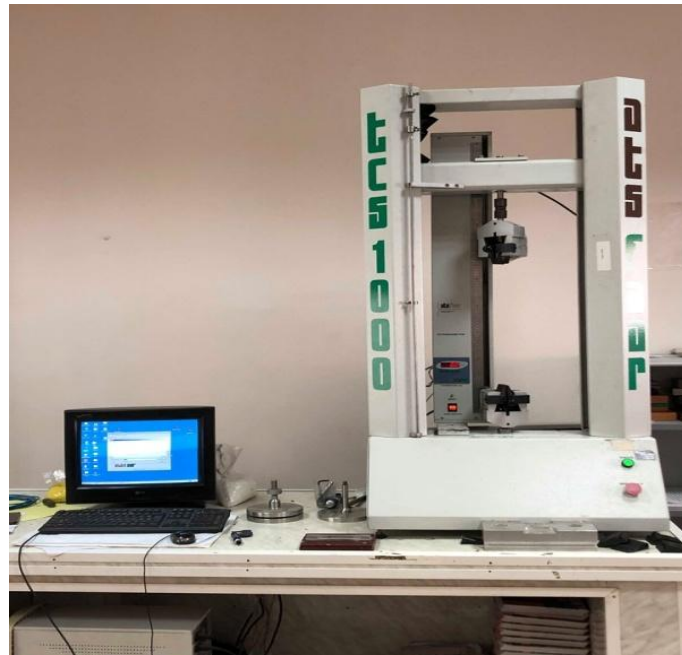


Figure III.7. Machine de traction et logiciel TCS.

III.2.6 Paramètres expérimentaux :

Les paramètres utilisés dans l'expérience de traction sont :

- Epaisseur des tubes : 5 mm
- Vitesse d'essai de déformation : (20-30-50-80) mm/min
- Température d'essai : 20°, 30°, 40°C
- Diamètre ϕ : 63 mm

III.2.7 Les étapes de l'essai :

- On ramène un tube PVC de diamètre 63 mm pression nominale 10 et on mesure son épaisseur à l'aide d'un micromètre qui est égale à 5 mm.
- Des éprouvettes de forme et de dimension données, sont prélevées du tube dans le sens longitudinal, en utilisant la fraiseuse et un gabarit de fraisage
- On laisse l'éprouvette refroidir à température ambiante (20°C) ;

- Il faut d'abord introduire les données relatives de l'éprouvette à tester dont : la surface S_0 , longueur initiale L_0 , régler la vitesse d'essai (20-30-50-80 mm/min) successivement et mettre la machine en marche
- Après l'essai de traction, enregistrer la courbe (contrainte/déformation) jusqu'à la rupture de l'éprouvette et relever sur cette courbe la contrainte au seuil d'écoulement : la contrainte à la rupture et l'allongement.



Figure III.8. Micromètre.



Figure III.9. Machine de traction avec éprouvette .

III.2.8 Préparation des éprouvettes :

Les éprouvettes doivent être choisies au milieu de bandes découpées dans le tronçon de tube PVC. Ensuite, il faut découper l'éprouvette à la température ambiante en déposant la pièce sur la face interne de la bande et en exerçant une pression uniforme et continue.

Toute détérioration telle que les fentes éraflures ou autres imperfection rendent l'éprouvette inutilisable.



Figure III.10. Gabarit.



Figure III.11. Eprouvette de PVC.

Pour traiter la géométrie des courbes nous avons schématisé les principaux paramètres mécaniques en étudiant leur évolution en fonction de la température et de la vitesse de déformation.

III.2.9 Limite d'élasticité :

La limite d'élasticité est la contrainte à partir de laquelle un matériau arrête de se déformer d'une manière élastique, réversible et commence donc à se déformer de manière irréversible.

$$\sigma_E = \frac{F}{A}$$

où

σ_E : est la contrainte en traction au seuil d'écoulement exprimé en N/mm^2 ;

F : est la force au seuil d'écoulement, exprimée en newtons ;

A : est l'aire de la section transversale initiale de l'éprouvette exprimée en millimètres carrés.

III.2.10 Résultats et discussion :

Toutes ces étapes se sont déroulé avec une variation de la vitesse de déformation et de température pour des épaisseurs des tubes (5) mm tout en mesurant le seuil d'écoulement N/mm^2 ; l'allongement % ; et la contraintes a la rupture N/mm^{25}

Chaque test a été appliqué sur deux éprouvettes ; et nous avons tiré la moyenne des deux résultats pour plus de précision.

Un exemple du graphisme obtenu par le logiciel de la machine est donné ci-après. Ces deux représentations donnent la force en fonction de l'allongement pour deux vitesses différentes, 20 et 80 mm/min.

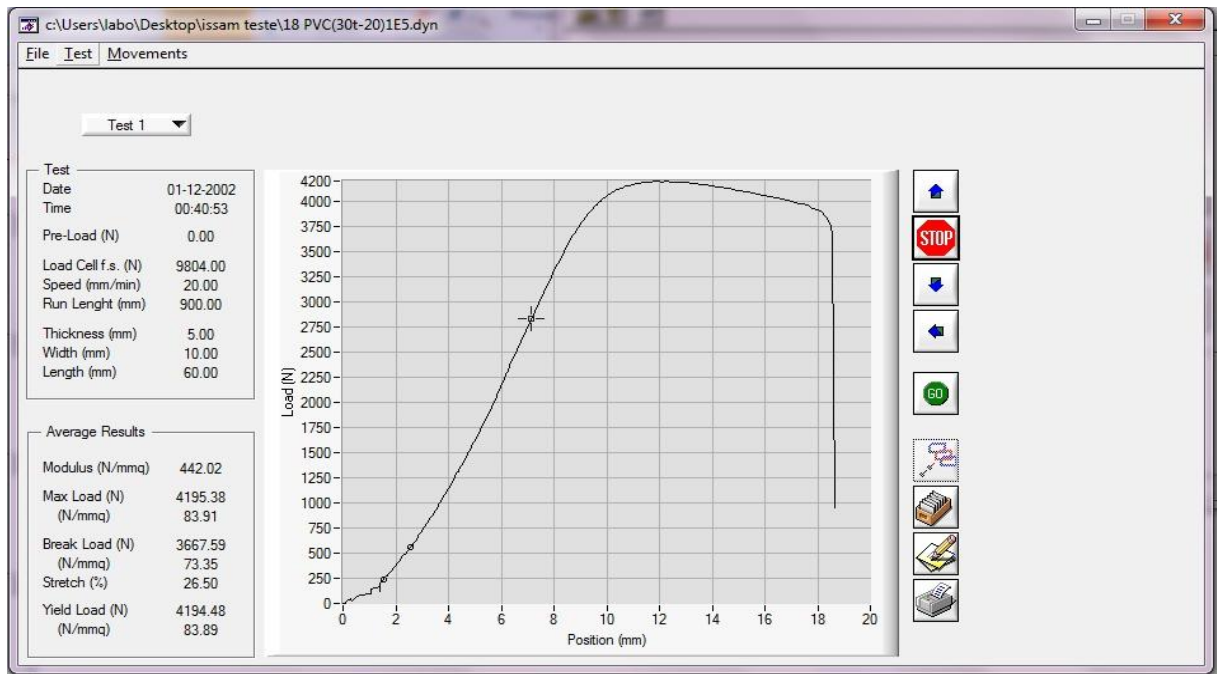


Figure III.12. Premier essai à (30°C-vitesse 20 mm/min).

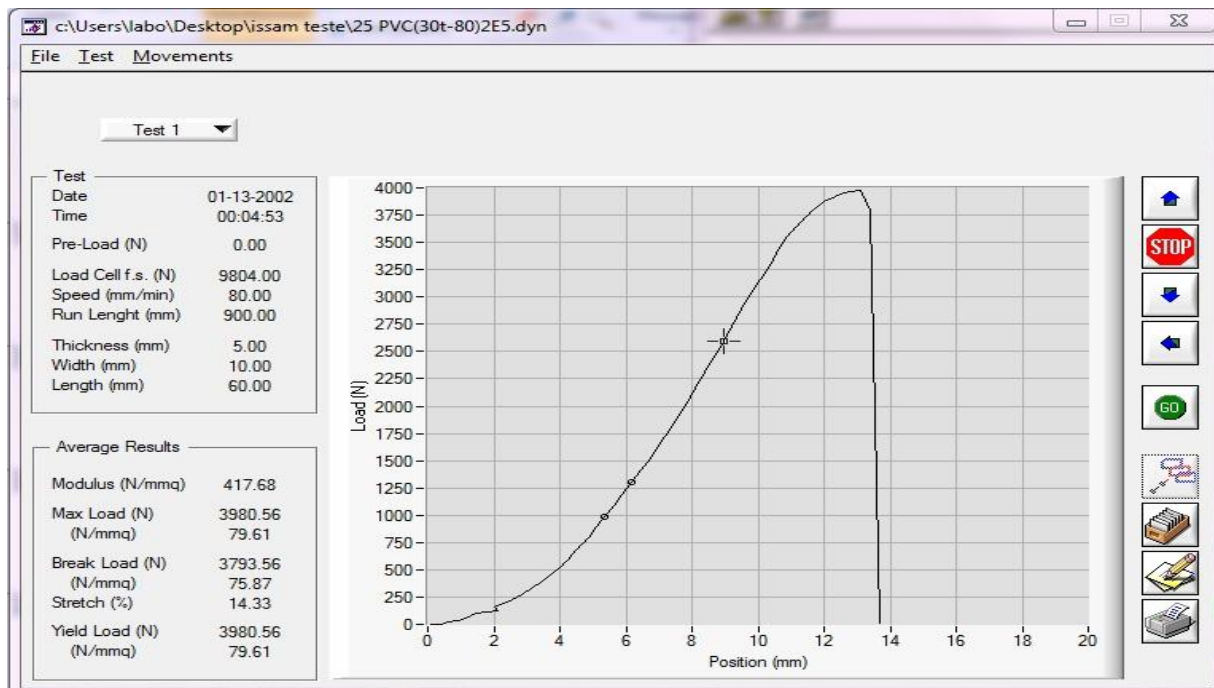


Figure III.13. Deuxième essai à (30°C-vitesse 80 mm/min).

A titre d'exemple, après l'essai de traction, l'éprouvette obtenue est schématisée sur la figure III.14. Nous pouvons constater que la coupure se passe au milieu de l'éprouvette.



Figure III.14. Eprouvette après l'essai de traction.

Les résultats du seuil d'écoulement de traction à 20°C sont affichés dans le tableau suivant :

Tableau III.4. Seuil d'écoulement de traction à 20 °C.

Vitesse (mm/min)	Contrainte N/mm ²
20	89,6
30	75,1
50	68,3
80	67

La Figure III.15 représente la courbe qui donne l'évolution du seuil d'écoulement (ou limite d'élasticité) à 20°C en fonction de la vitesse :

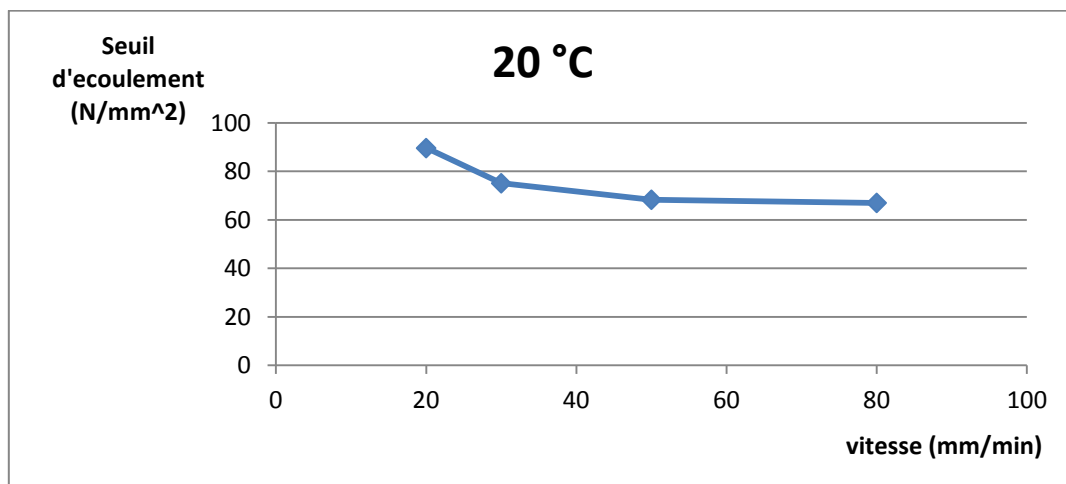


Figure III.15. Seuil d'écoulement à 20 °C en fonction de la vitesse

III.2.11 Seuil d'écoulement à 30°C et à 40°C :

Nos essais ont été effectués à plusieurs températures et à plusieurs vitesses de déformation ;

Les éprouvettes ont été soumises à un dispositif de chaleur à différentes températures.

Pour chauffer notre éprouvette nous avons mis un dispositif de chauffage adéquat (figure III-16) où la température est repérée.

Lors de cette expérience, l'éprouvette a été déposée dans un bac réglé à 30°C et laissée pendant une durée de 30 minutes le temps que la température soit homogène dans tous les points de l'éprouvette ; et pareil à 40°C .

Ensuite, on a refait les mêmes étapes que l'expérience précédente ; avec les mêmes vitesses ce qui nous donne des résultats différents.



Figure III.16. Bac thermique.

Tous les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau III.5. Seuil d'écoulement de la traction à plusieurs températures.

Vitesse (mm/min)	Contrainte (N/mm ²)			moyenne
	à 20 °C	à 40 °C	à 30 °C	
20	87,6	95,1	88,8	90,5
30	75,1	86,8	81,6	81,16
50	68,3	80	76,8	75,03
80	67,8	79,6	75	74,13

Avec le changement de la température, nous avons obtenu des résultats bruts. Les valeurs expérimentales ont été analysées et représentés en utilisant l'Excel.

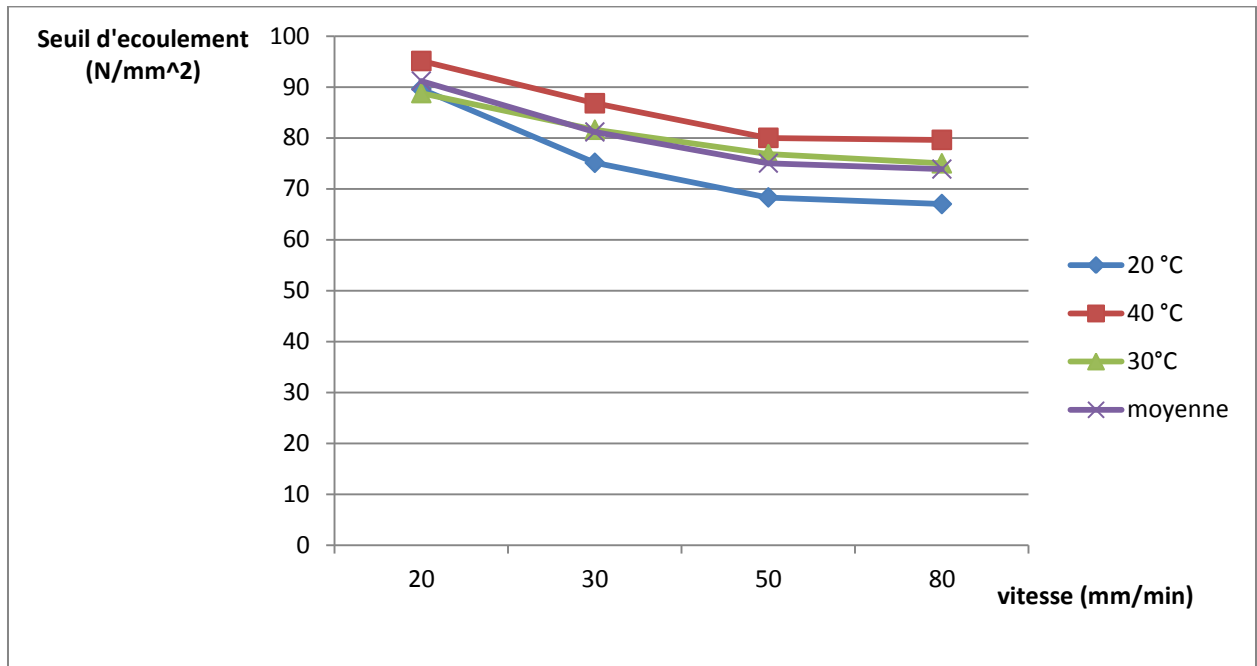


Figure III.17. Seuil d'écoulement à différentes températures en fonction de la vitesse.

D'après les résultats de la figure III.17, nous pouvons remarquer que les courbes ont la même allure et le seuil d'écoulement se stabilise à une vitesse de 50 mm/min.

III.2.12 Contrainte à la rupture à 20°C:

La contrainte à la rupture est définie par la force maximale nécessaire pour que notre matériau se rompt. Cette résistance est calculée à l'aide de l'équation suivante:

$$\sigma_R = \frac{F_{max}}{A}$$

où

σ_R : est la contrainte à la rupture exprimée en N/mm^2 ;

F_{max} : est la force maximale, exprimée en newtons ;

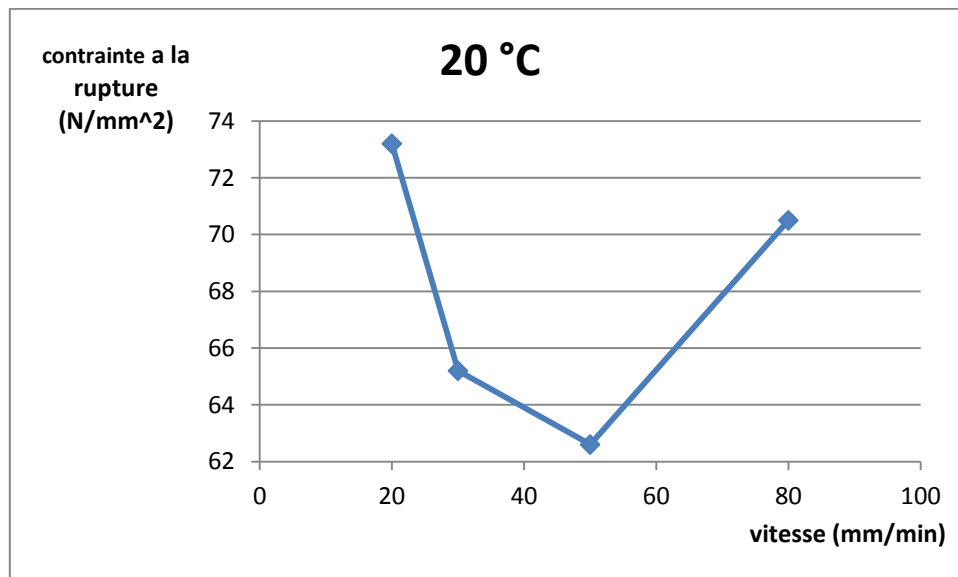
A : est l'aire de la section transversale initiale de l'éprouvette exprimée en millimètres carrés.

Les résultats de la contrainte à la rupture en traction à 20°C sont affichés dans le tableau suivant.

Tableau III.6. Valeurs de la contrainte à la rupture en traction à 20°C.

Vitesse (mm/min)	Contrainte à la rupture (N/mm ²)
20	73,2
30	65,2
50	60,1
80	70,5

Les résultats du tableau III.6 sont représentés sur la courbe de la contrainte à la rupture à 20°C en fonction de la vitesse :

**Figure III.18.** Contrainte à la rupture à 20°C en fonction de la vitesse.

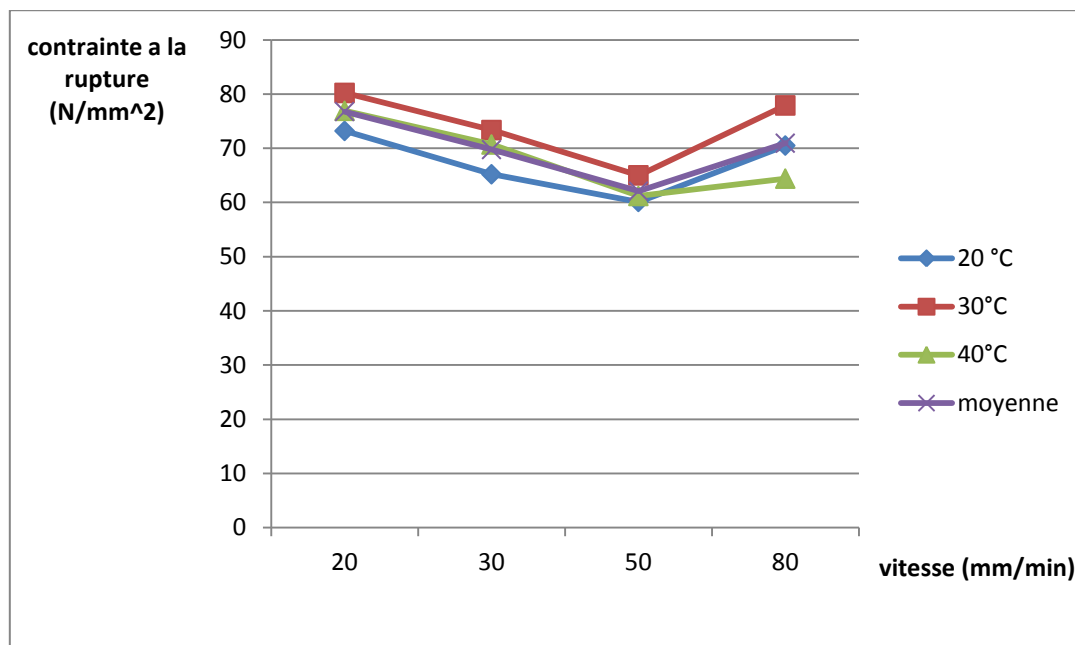
- **Contrainte à la rupture : à 30°C et à 40°C**

Comme indiqué dans le cas de la température de 20°C, la contrainte à la rupture a été mesurée en utilisant les deux températures 30 et 40°C, les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau III.7.

Tableau III.7. Contrainte à la rupture de traction à différentes températures.

Vitesse (mm/min)	Contrainte à la rupture σ_R (N/mm ²)			
	à 20 °C	à 30°C	à 40°C	moyenne
20	73,2	76,91	80.2	76,77
30	65,2	70,7	73.35	69,75
50	60,1	61,2	65	62,1
80	70,5	64,4	77.9	70,93

Les résultats du tableau III.7 sont représentés sur la figure III.19. Cette figure donne l'évolution de la contrainte à la rupture en fonction de la vitesse de déformation mesurée à plusieurs températures.

**Figure III.19.** Contrainte à la rupture à différentes températures en fonction de la vitesse.

A partir de résultats de la figure III.19, nous pouvons constater une stabilité de la décroissance de la contrainte à la rupture jusqu'à la vitesse de déformation de 50 mm/min. Les différentes courbes se croisent à la vitesse de 50 mm/min. Après cette vitesse les courbes adoptent une allure ascendante. La valeur la plus importante de la contrainte à la rupture a été obtenue pour la température de 30°C.

III.3. Essai de l'allongement (%) :

L'allongement est une mesure de ductilité ; il est minime pour les matériau dit fragile .

Ce paramètre est défini comme la capacité d'un matériau à s'allonger avant de se rompre

$$A (\%) = \left(L_f - \frac{L_0}{L_f} \right) \times 100$$

Avec :

Lo : Longueur initiale de l'éprouvette

Lf : longueur de l'éprouvette après rupture

Les résultats de l'allongement en traction à 20°C sont affichés dans le tableau suivant.

Tableau III.8. Allongement en traction à 20 °C.

Vitesse (mm/min)	Allongement (%)
20	31
25	29,3
50	26,6
80	21,2

D'après le tableau III.8, les valeurs de l'allongement varient entre 21,2 % et 31 %. Les résultats du tableau III.8 sont représentés sur la figure III.20. Cette figure donne l'évolution de l'allongement en fonction de la vitesse de déformation mesurée à 20°C.

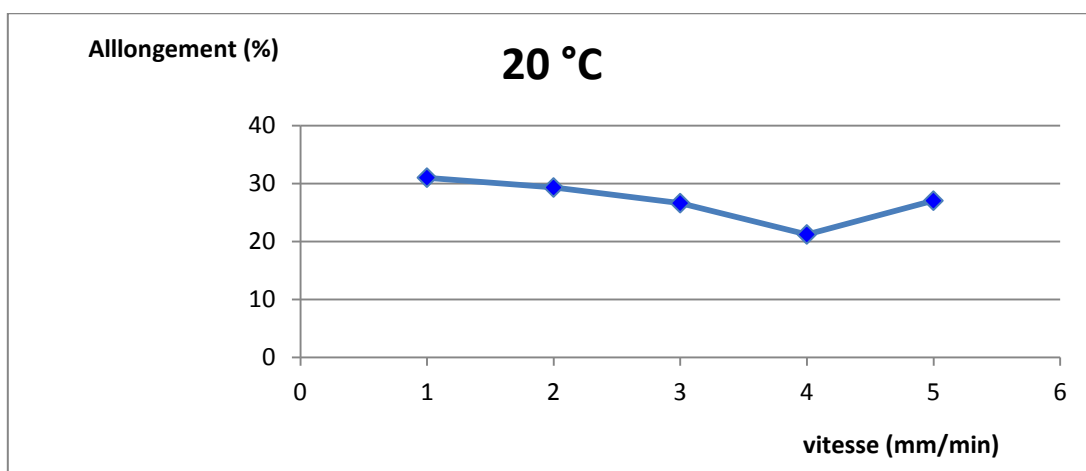


Figure III.20. Allongement à 20°C en fonction de la vitesse.

III.3.2 Essai de l'allongement : à 30°C et 40°C

Comme indiqué dans le cas de la température de 20°C, l'allongement a été mesuré en utilisant les deux températures 30 et 40°C, les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau III.9.

Tableau III.9. Allongement en traction à différentes températures.

Vitesse (mm/min)	Allongement (%)			
	à 20 °C	à 30 °C	à 40 °C	Valeur moyenne
20	31	36	38,8	35,26
25	29,3	33,7	37	33,33
50	26,6	30,3	33,9	30,26
80	21,2	25	30,1	25,43

Ces résultats montrent que la valeur maximale de l'allongement du tube a été obtenue pour la vitesse de 20 mm/min à température de 40°C. Cette valeur est de 38,8 %. Les résultats du tableau III.9 sont représentés sur la figure III.21. Cette figure donne l'évolution de l'allongement en fonction de la vitesse de déformation mesurée à plusieurs températures.

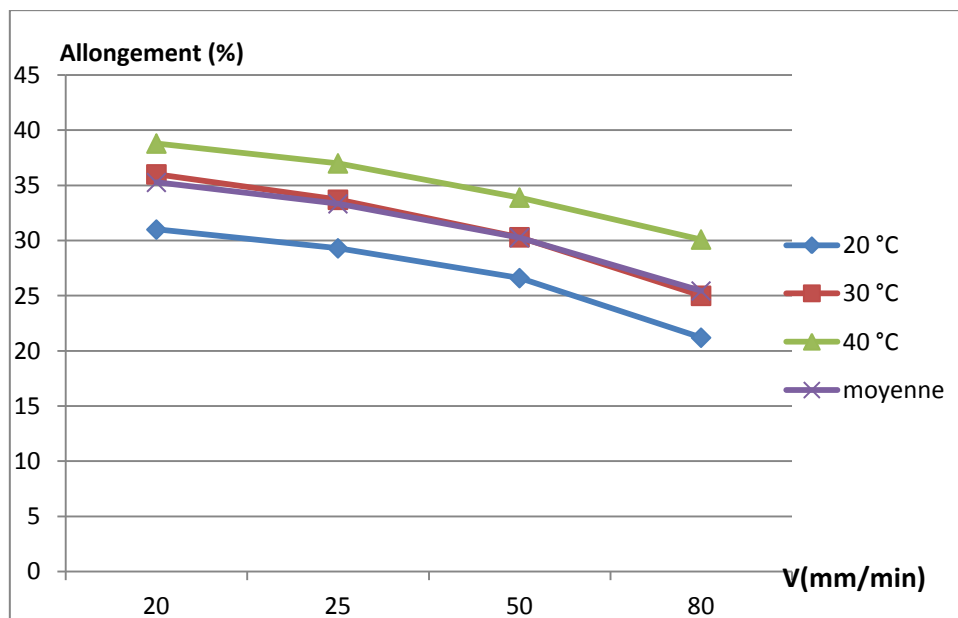


Figure III.21. Allongement à différentes températures en fonction de la vitesse.

Nous pouvons remarquer d'après les courbes de la figure III.21 que l'augmentation de la température conduit à un allongement plus important. Par contre, l'augmentation de la vitesse de déformation réduit l'allongement du tube.

III.4. Discussion et interprétation des résultats :

Les résultats obtenus dans ce travail ont permis d'interpréter l'influence de la température et la vitesse de déformation sur les propriétés mécaniques du tube en PVC. Dans la pratique, le temps et la température sont des paramètres prépondérants dans l'analyse du comportement mécanique d'un polymère. Ce dernier est caractérisé par le type et l'amplitude de sa réponse aux forces extérieures appliquées et aux déformations qui en résultent.

Le comportement spécifique des polymères est lié au fait que les macromolécules ne réagissent pas toujours instantanément à l'application d'une sollicitation. Les différentes chaînes moléculaires consécutives tentent de répartir les contraintes imposées se réarrangeant physiquement jusqu'à atteindre une position d'équilibre. Si la sollicitation appliquée est trop rapide par rapport à la capacité de réarrangement des molécules, les matériaux polymères ont un comportement rigide et fragile, ceci est lié à l'incapacité des macromolécules à se réarranger dans un intervalle de temps adéquat (rupture). Dans le cas contraire, si la sollicitation est lente ; les mêmes matériaux présentent un comportement ductile est souple (allongement), en raison du temps suffisant permettant aux chaînes moléculaires d'atteindre une position d'équilibre correspondant aux contraintes subies.

En général, le tube en PVC a montré des comportements mécaniques différents pour des variations de température et de vitesse de déformation se traduisant par des courbes contrainte-déformation différentes.

Au cours des essais, pour le PVC, la rupture intervient avant toute déformation plastique (= permanente), et se produit de façon brutale, avec une cassure rectiligne.

Nous avons remarqué que les courbes du seuil d'écoulement ont la même allure et se stabilise à une vitesse de 50 mm/min

Les courbes de la contrainte à la rupture se croisent à une vitesse précise de 50 mm/min, après cette valeur les courbes prennent une allure ascendante

Les valeurs de la contraintes à la rupture diminuent en augmentant la température et augmentent pour une augmentation de la vitesse de déformation.

Les courbes des essais de l'allongement sont proportionnelles à la température de l'expérience, plus cette dernière augmente plus l'allongement de l'éprouvette est plus conséquent.

En enregistrant la force (F) appliquée à l'éprouvette par la machine de traction et son allongement progressif, on remarque que l'effort fourni augmente avec l'allongement puis atteint un maximum et commence à décroître.

Le comportement mécanique du PVC amorphe dépend fortement de la température et de la vitesse de déformation. En effet une augmentation de la température entraîne une diminution de la contrainte du seuil d'écoulement et la contrainte à la rupture alors que l'augmentation de la vitesse de déformation augmente ces deux quantités.

Nous avons remarqué lors des différents essais expérimentaux qu'une élévation de la température rompt la chaîne du polymère et augmente les mouvements des vibrations d'atomes; ceci facilite les processus de réarrangement moléculaire pour avoir une position d'équilibre lors de traction.

Conclusion générale :

Ce travail est basé sur des essais expérimentaux, il nous a permis de connaître de proche le pilotage des machines de production des tubes en PVC, faire des essais de traction et de pression pour compléter nos connaissances théoriques sur les polymères.

Nous avons étudié le comportement mécanique d'un polymère, le PVC et ceci par des essais mécaniques de traction uni axiale sur des éprouvettes destinées aux prototypages et de pression sur des tubes en PVC adaptés a l'expérience .

Trois paramètres ont été pris en considération: la pression, la vitesse de déformation et la température. L'étude de l'effet de chaque paramètre est basée sur l'évolution de la géométrie globale des courbes de traction. Un montage pour les essais à différentes températures et a différentes pression est réalisé avec un contrôle de température de plus ou moins un degré Celsius. L'élément essentiel de l'étude a montré que l'effet inverse (de la température et de la vitesse de déformation) est mis en évidence.

A l'issue de ce travail, d'autres conclusions peuvent être tirées :

- La vitesse de déformation caractéristique du tubes en PVC de 5 mm d'épaisseur est de 50mm/min ; la température a peu d'influence au-delà de cette vitesse .
- D'après les essais de pression, la température de la résistance limite des tubes en PVC est de 40°C et la température critique est de 45°C .
- Une stabilité de la décroissance de la contrainte à la rupture jusqu'à la vitesse de déformation de 50 mm/min.
- La valeur maximale de 38,8 % de l'allongement du tube en PVC est obtenue pour une vitesse de déformation de 20 mm/min à température de 40°C.
- L'augmentation de la température conduit à un allongement plus important. Par contre, l'augmentation de la vitesse de déformation réduit l'allongement du tube.
- Le comportement mécanique des tubes en PVC dépend fortement de la température et de la vitesse de déformation.

Bibliographie :

- [1] A. Boudet ; *voyage au cœur des matières plastiques* ; CNRS Edition 2003
- [2] S. Sadoun, *effet de la température, de la vitesse de déformation et de vieillissement sur la structure du PEHD*, thèse de doctorat, Université d'Annaba, 2018.
- [3] *Cours matériaux polymériques et composite ; chapitre I Définition des polymères industriels M2 génie des procédés des matériaux*, université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2018.
- [4] G. W. Ehrenstein F. Montagne, *Matériaux polymères : structure, propriétés et applications*, Edition Hermès science publications, 2000.
- [5] C. Dreistadt ; *structure des polymère* ; thèse de doctorat, université Paul Verlaine Metz, 2007.
- [6] Smithers Rapra ; *REACH for Polymères, meilleures méthodes d'essai et techniques disponibles 2011*,
- [7] R. Deterre, G. Froyer, *Introduction aux matériaux et polymères. Technique et documentations*, 1997, Paris
- [8] P. WEISS, *La chimie des polymères - Université Médicale Virtuelle Francophone Support de Cours (Version PDF) 2009/2010*
- [9] B. James, *Matières plastiques*, NewYork, 1996.
- [10] J. Chéron, *risques présentes par les polymères et leur adjuvants au cours de la mise en œuvre*, *Techniques de l'ingénieur*, AM 3498, Paris, 1996
- [11] M .Carrega et Coll ; *matériaux polymères (7.1 définition et notion de base) 2 éme Edition Dunod avril 2007*
- [12] R. Deterre et G. Froyer, *Introduction aux matériaux polymères, Technique et Documentation (Lavoisier), Paris 1997*
- [13] www.decouvrirlepvc.org/fabrication_transformation Brochure PVC édition aout 2005
- [14] J.-P. Arlie, *les thermoplastiques de grand tournage*, Editions Technip, Paris, 1987.
- [15] S. Maiza, M. Toumi, *Mémoire de fin d'étude (DEUA)*. Université Ferhat-Abbes, Sétif, 1994
- [16] J. Véne, *les plastiques*, France, 1976.
- [17] M. Carrega et Coll., *Matériaux industriels. Matériaux polymères*, Dunod, Paris (2000)
- [18] G'SELL, *Déformation plastique de matériaux amorphe et semi cristallin*. B. Escaig and C. G'Sell (*Les Editions de Physique*) Les Ulis (1982) p. 375.