

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

ⵜⴰⵎⴰⵎⵓⵔⵉⵜ ⵏ ⵏⵓⵔⵓⵣⵓ ⵏ ⵓⵎⵎⵉⵔⵉ

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI OUZOU

FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin de cycle

En vue d'obtention du Diplôme de Master Académique en Génie

Mécanique

Spécialité : Génie Des Matériaux

Thème

**Caractérisation du comportement du PVC extrudé vers la mise
en place d'une démarche de qualité**

Présente par :

M^r MOULOUEL Aghiles

M^r FLISSI Nassim

Devant le jury :

- **Presidente : Mme ABERKANE.T**
- **Encadreur : Mr OULD OUALIM**
- **Examineur: Mr FILALIS**

Promotion : 2023/2024

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions dieux le tout puissant de nous avoir guidé toutes ces années d'étude et de nous avoir données la santé, la volonté, la patience, afin de pouvoir accomplir ce modeste travail.

En premier lieu, nous remercions tout particulièrement notre promoteur Mr oudouali mohand, professeur à l'université de mouloud Mammeri Tizi Ouzou, pour sa patience et son aide tout le long de la réalisation de ce travail, nous lui exprimons notre profonde gratitude.

Nous tenons également à remercier au jury qui nous a fait l'honneur de juger ce travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les enseignants qui nous ont soutenus lors de notre parcours.

Ce travail n'aurait jamais pu voir le jour sans le soutien actif des membres de notre famille surtout nos parents qui nous ont toujours encouragé moralement.

On remercie également la SARL leader profil de nous avoir aidés à faire ce travail, enfin on tient à exprimer vivement nos remerciements avec une profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A ma chère grand-mère et grand père qui nous ont quittée puisé il être accueillie par dieux dans son vaste paradis.

A ma chère maman source de ma vie et de voie, qui incarne la force, la tendresse.

A mon cher père, pour son sacrifice et son soutien, je voudrais témoigner mon profond respect et ma reconnaissance éternelle.

A mon frère son appuis et encouragement.

A toute ma grande famille pour son soutien.

A mes enseignants, depuis le primaire jusqu'à l'université.

A mon binôme et toute sa famille.

A tous les employés de de leader profile

Aghiles

Dédicaces

Je dédie cet humble travail qui m'ont vu grandir à leur cote paix à leurs amés.

A la personne qui est toujours avec moi, mon très cher père qui a sacrifiée ses jours et ses nuits pour mon éducation et mon bien être, et pour tout ce qu'il a fait pour moi.

A ma très chère douce maman, qui est toujours près de moi, m'encourage, me soutien, me conseille et qui n'a jamais cessée de prier pour moi, elle qui a tout fait pour me voir réussir dans ce travail et dans ma vie. Aucun mot ne peut exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu as fait depuis ma naissance à ce jour. Merci maman que dieu te garde à mes cotes et te protèges.

A mon cher frère Syphax qui passe son bac cette année bon courage et que de la réussite pour lui.

A mes chères tantes et sœurs Fatiha, Faizî, Anissa, zamia.

A mon cher cousin julien.

Je n'oublie pas mon binôme agiles, avec qui on a passée de très bon moments je lui souhaite profondément tout le bonheur du monde.

Aux employés de l'entreprise leader profil sans qui ce travail n'aurais jamais vu le jour.

A toute notre promotion éta mes chères amis agiles et massi.

Nassim

Liste des tableaux

Tableau 01.caracteristiques des trois types de polymères. [4].....	8
Tableau 02.Propriétés mécanique du PVC rigide et souple. [4].....	15
Tableau 03.Propriétés électriques du PVC rigide et souple. [5].....	17
Tableau 04. Propriétés du PVC destiné à l'extrusion. [24].....	38
Tableau 05.b Diverses application du pvc rigide et souple.	39
Tableau06 .Dimensions des échantillons découpés.....	47
Tableau07. Dimensions des échantillons découpés.....	49
Tableau 8 dimensions de l'échantillon utilisé pour la flexion.....	55
Tableau 09 la force max et le déplacement de profilé extrudé à t= 187 °C avec variation de taux de charge essai 3.....	63
Tableau 10 force maximal et déplacement du profile extruder a t= 195°C avec variation de taux de charge essai 3.....	63
Tableau 11 force maximal et son déplacement à 40% de charge extruder a 187°C et195°C ...	64
Tableau 12 la force maximal et son déplacement à 50% de charge extruder a 187°C et 195°C	64
Tableau 13 dimensions échantillon utilisé pour l'essai de compression	65
Tableau la force max et le déplacement de profilé extrudé à t= 187°C avec variation de taux de charge en compression essai 2.....	74
Tableau 15 force max et son déplacement de profilé extrudé à t= 197°C avec variation de taux de charge en compression essai 2.....	74
Tableau 16 force maximal et son déplacement à 40% de charge extruder a 187°C 195°C en compression essai 2.....	75
Tableau 17 force maximal et son déplacement à 50% de charge extruder a 187 °C et 195°C en compression essai 2.....	75
Tableau 18 résultats des tests de dureté shore D	76
Tableaux19 résultats des teste de colorimétrie en valeur lab.....	77

Liste des figures

Figure01.Evolution historique des polymères. [14].....	3
Figure02.Exemple d'une structure chimique du polymère et monomère. [14].....	5
Figure03.Distinction entre un monomère et un polymère. [15].....	5
Figure04.Structure chimique de polymérisation du monomère d'éthylène. [14].....	6
Figure05.Structure moléculaire de polymérisation du tétrafluoroéthylène. [14].....	6
Figure06.Structure en chaîne des polymères naturels: ADN et ARN. [16].....	7
Figure07.Structure moléculaire des polymères amorphe et cristallin. [17].....	12
Figure08.Formule chimique du PVC. [18].....	13
Figure09.Schéma de la polymérisation du chlorure de vinyle menant à la formation du PVC..	14
Figure10.Dessin descriptif du processus de polymérisation en émulsion. [4].....	19
Figure11.Stabilisant thermique utilisé par la SARL LEADER PROFIL	21
Figure12.Poudre de plastifiant utilisé par la SARL LEADER PROFIL.....	22
Figure13.Matière lubrifiante utilisé par la SARL LEADER PROFIL.....	23
Figure14.Agent antichocs ou impact employé par la SARL LEADER PROFIL.....	24
Figure15.Colorants et pigments appliqués par la SARL LEADER PROFIL.....	25
Figure16.Titanium pur pour la couleur blanche appliquée par la SARL LEADER PROFIL	25
Figure17.Carbonate de Calcium (Calcite) employé par la SARL LEADER PROFIL.....	26
Figure 18.lignes d'extrusion de profilé pvc.....	28
Figure 19: schéma explicatif du principe vis fourreau dans l'extrudeuse.....	29
Figure 20 : schéma d'une extrudeuse [1]	30
Figure 21 : écran de contrôle d'une extrudeuse.....	31
Figure 22 : schéma simplifié d'une extrudeuse mono vis	32
Figure 23 : vis sans fin.....	33
Figure 24: Profils des vis	34
Figure 25 : extrudeuses de la SARL Leader Profil (mikrosan)	35
Figure 26 : défauts d'extrusion [21]	35
Figure 27: schéma d'une ligne d'extrusion	37
Figure28.Répartition de diverse application du PVC. [19].....	39
Figure 29.L'écart significatif du taux d'utilisation du PVC	40
Figure 30.Polychlorure de vinyle utilisé par la SARL LEADER PROFIL	43
Figure31.Carbonate de Calcium (calcite) utilise par la SARL LEADER PROFIL.....	43

Figure 32.Interface de commande du turbo mixeur de la SARL LEADER PROFIL	44
Figure 33.Mélangeur turbo mixeur de la SARL LEADER PROFIL.....	44
Figure 34. Refroidisseur turbo mixeur de la SARL LEADER PROFIL	44
Figure 35. Découpe des échantillons a 360 mm de longueur avec la scie de la ligne d'extrusion.	45
Figure 36. Fiche technique du profilé utilisé ouvrant fenêtre.....	46
Figure 37. Principe de l'essai de compression.....	47
Figure 38.Essai de compression sur le profilé ouvrant fenetre	48
Figure 39.Essai de flexion.	48
Figure 40.Essai de flexion trois (3) points.....	48
Figure 41.Duromètre shore D de la SARL LEADER PROFIL.....	49
Figure 42.Différents paliers de dureté shore.....	50
Figure 43.pénétrateur shore D	51
Figure 44.Test de dureté sur la surface de notre échantillon.	52
Figure 45.Représentations de l'espace Lab.	53
Figure 46.Interface du colorimètre de la SARL LEADER PROFIL	54
Figure 47 : Evolution de la force en fonction du déplacement pour l'échantillon a 40% de charge extrudé à 187°C temperature de fusion	56
Figure 48 photographie du profilé a 40% de charge et 187°C âpre essai de flexion découpé au point d'application de la charge	57
Figure 49 : Évolution de la force en fonction du déplacement pour l'échantillon a 40% de charge extrudé à 195°C température de fusion.....	57
Figure 50 photographie du profilé a 40% de charge et 195°C âpre essai de flexion découpé au point d'application de la charge.....	58
figure 51 : Evolution de la force en fonction du déplacement pour l'échantillon a 50% de charge extrudé à 187°C temperature de fusion.	59
Figure 52.photographie du profilé a 50% de charge et 187°C âpre essai de flexion découpé au point d'application de la charge.....	61
figure 53 . Evolution de la force en fonction du déplacement pour l'échantillon a 50% de charge extrudé à 195°C température de fusion.	61
Figure 54 photographie du profilé a 50% de charge et 195°C âpre essai de flexion découpé au point d'application de la charge.....	62
Figure essai de compression sur le profile ouvrant fenêtre	66

Figure 55 Evolution de la force en fonction du déplacement pour l'échantillon a 40% de charge extrudé à 187°C température de fusion.....	66
Figure 56 photographie du profilé a 40% de charge et 187°C âpre essai de compression découpé au point d'application de la charge	67
Figure 57 Evolution de la force en fonction du déplacement pour l'échantillon a 40% de charge extrudé à 195°C température de fusion	68
Figure 58 photographie du profilé a 40% de charge et 195°C âpre essai de compression découpé au point d'application de la charge	70
Figure 59. Évolution de la force en fonction du déplacement pour l'échantillon a 50% de charge extrudé à 187°C température de fusion	70
Figure 60 photographie du profilé a 50% de charge et 187°C âpre essai de compression découpé au point d'application de la charge	72
Figure 61. Évolution de la force en fonction du déplacement pour l'échantillon a 50% de charge extrudé à 195°C température de fusion	72
Figure 62 photographie du profilé a 50% de charge et 195°C âpre essai de compression découpé au point d'application de la charge	74

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I Étude bibliographique	
Introduction :	3
I. Généralités sur les polymères:	3
I.1. Historique	3
I.2. Définitions	5
I.2.1. Le polymère.....	5
I.2.2. Le monomère.....	6
I.2.3. La Polymérisation:.....	7
I.3. Types des polymères	8
I.3.1. Les Polymères naturels.....	8
I.3.2. Les Polymères artificiels	8
I.3.3. Les polymères synthétiques.....	9
I.4. Les grandes familles des matériaux polymères.....	10
I.4.1. Les élastomères	10
I.4.2. Les thermodurcissables.....	11
I.4.3. Les thermostables	11
I.4.4. Les thermoplastiques	12
I. Généralités sur le Polychlorure de Vinyle (PVC)	13
II.1. Historique du PVC	13
II.2. Définition du PVC	14
II.3. Structure du pvc	15
II.4. Propriétés générales du PVC	16

II.4.1. Propriétés mécaniques.....	16
II.4.2. Propriétés physico-chimiques	17
II.4.3. Propriétés thermiques.....	17
II.4.4. Propriétés électriques	17
III. Polymérisation du pvc	18
III.1. Monomère.....	18
III.1.1. Obtention à partir de l'éthylène	18
III.1.2. Obtention à partir de l'acétylène.....	19
III 2.Procédés de fabrication du PVC (méthodes de polymérisation):	19
III.2.1. Polymérisation en masse.....	19
III.2.2. Polymérisation en émulsion:.....	20
III.2.3. Polymérisation en suspension (en perles):.....	20
III.2.4. Polymérisation en solution:	21
III.3. Additifs de transformation:	21
III.3.1. Stabilisants	22
III.3.2. Plastifiants.....	23
III.3.3. Lubrifiants.....	24
III.3.4. Agents antichocs	25
III.3.5. Colorants et pigments	26
III.3.6. Charges	27
III 3.7.Retardateurs de feu:	28
IV. Technique de transformation du PVC: La mise en œuvre	28
IV.1. procédé d'extrusion	28
IV.1.1. Description de l'extrusion	28
IV.1.2Description de l'extrudeuse	30
V.1.3 Les différentes zones de l'extrudeuse	32
V.1.4. La vis d'extrusion	33

V.1.5 Les différents profils de vis.....	35
V.1.6 Exemple de Défaut observé en extrusion.....	36
V.1.7 Production de profilé en pvc : figure 26	37
V. Application du PVC:.....	40
V.1. PVC utilisé pour la confection des porte-fenêtre.....	41
VI. Evolution et Perspectives du Marché du PVC.....	41
VII. Impact du PVC.....	42
VII.1. Sur l'environnement.....	42
VII.2. Sur la santé humaine	43

Chapitre II Matériau et techniques expérimentales

Introduction.....	44
I. Échantillons utilisés.....	44
II. Préparation des formules pour les mélanges.....	44
III. Extrusion des échantillons	47
IV. Essai de compression.....	49
V. Essai de flexion trois (03) points	50
VI. Essai de dureté.....	52
VI.1. Définition.....	52
VI.2. Dureté shore	53
VI.3. Mesure de la dureté shore.....	54
VI.4. Colorimétrie.....	55

Chapitre III : Résultats et interprétation

Introduction.....	58
I- Résultats essai de flexion 3-point	58
II- Résultats essai de compression.....	68
III- Résultats essai de dureté.....	79
IV Résultats essai de colorimétrie	80

Conclusion générale.....82

Références bibliographiques

Introduction générale

Introduction générale

Les matériaux composites occupent une place importante dans le panorama des matériaux modernes, notamment en raison de leur polyvalence, leurs propriétés spécifiques et leurs nombreuses utilisations [1-4]. Parmi ces matériaux, les matériaux composites à matrice polymères (les polymères renforcés par les fibres ou charges) se taillent la part du lion dans diverses industries (l'aéronautique, l'automobile, l'énergie éolienne, les composants électroniques, les dispositifs médicaux et implants biomédicaux, les sports de haute performance, ...) en raison notamment de leur faible poids, d'une meilleure tenue thermique et de leur bonne résistance à la rupture, usure, corrosion, ... [5-8]. L'intérêt grandissant porté à ces matériaux a aussi été favorisé par le développement d'outils numérique de modélisation permettant de comprendre, optimiser et concevoir des matériaux adaptés aux défis actuels [9-10]. De plus, les approches de simulation actuelles (mécanique des matériaux, chimie computationnelle, ...) permettent la prédiction du comportement et de la rupture de ces matériaux tout en explorant de nouvelles formulations permettant ainsi de développer un domaine riche en innovations scientifiques et technologiques, en particulier dans une optique de durabilité et de performance accrue.

Le polychlorure de vinyle (PVC), renforcé par des charge et plastifiants, est l'un des polymères les plus utilisés dans le monde. Connu pour sa durabilité, relevant de nombreux défis, dans un environnement de plus en plus contrôlé, en raison de sa reconnaissance comme matériau recyclable et protecteur de l'environnement. Ce qui lui a permis notamment de dominer le marché de fabrication de profilés pour fenêtres, de revêtements de sols et de nombreux autres produits.

Ces dernières années de nombreuses entreprises ont vu le jour en Algérie afin d'équiper et moderniser l'industrie algérienne en exploitant les différents procédés de fabrication et mise en œuvre des polymères et parmi elle l'entreprise ou nous évoluons en tant que contrôleur de qualité dans le domaine d'extrusion des profilés en PVC et de ce fait nous avons décidé de combiner notre expérience professionnelle ainsi que nos acquis durant notre cursus pour étudier de plus près le PVC extrudé et de le caractériser pour à la fois approfondir nos connaissances et aussi espérer améliorer la qualité de nos produits en réalisant différents essais mécaniques et esthétique d'un profilé en PVC en fonction de différents paramètres, notamment le taux de charge et la température d'extrusion pour une démarche d'amélioration de qualité du profilé extrudé.

Introduction générale

Dans un premier temps, nous présenterons les généralités sur les polymères et plus particulièrement sur le PVC. Nous décrirons ensuite le procédé d'extrusion et son influence sur les propriétés du matériau final. Enfin, nous détaillerons les essais mécaniques et esthétiques réalisés sur nos échantillons et discuterons des résultats obtenus. Cette étude permettra d'aider les recherches sur l'influence des variations de certains paramètres sur le produit fini.

Chapitre I

Etude

bibliographique

Introduction :

Les polymères, souvent nommés "matières plastiques", sont omniprésents dans notre quotidien et notre environnement. Ils se retrouvent dans une multitude de domaines: des objets quotidiens aux applications techniques sophistiquées, en passant par les produits d'hygiène et alimentaires. Ces matériaux qui sont majoritairement synthétiques mais parfois naturels, ont gagné en popularité grâce à leur large éventail de propriétés. Ils peuvent être rigides, flexibles ou élastiques, translucides ou opaques, isolants ou conducteurs, avec divers degrés de résistance aux conditions difficiles, tout en étant toujours légers. Cette diversité provient de la structure unique de leurs molécules en chaînes, ainsi que de la multitude de configurations d'assemblage qu'elles peuvent adopter. [11]

L'évolution rapide des matériaux a profondément transformé nos sociétés modernes, illustrant un progrès industriel et technologique majeur avec les polymères en tête de cette révolution, en particulier le polychlorure de vinyle (PVC), ce dernier émerge comme un matériau clé dont la polyvalence et les performances exceptionnelles en font un choix prédominant dans de nombreux secteurs. Depuis son développement initial au début du 20^e siècle, le PVC a évolué pour répondre à des besoins variés allant des infrastructures de construction à l'électronique, en passant par des dispositifs médicaux. [11]

Ce chapitre offre un aperçu général des polymères et de leurs caractéristiques essentielles, en mettant l'accent sur le PVC. Nous examinerons les diverses propriétés de ce dernier, ses différentes méthodes de polymérisation, ainsi que les processus de fabrication et les multiples applications industrielles.

I. Généralités sur les polymères:

I.1. Historique :

Les polymères ont une histoire fascinante qui s'étend sur plusieurs siècles. Leur utilisation remonte à l'Antiquité, bien avant que leur nature chimique ne soit comprise. Les matériaux polymères naturels tels que les fibres textiles, y compris le coton, la laine et la soie ont été employés par les civilisations anciennes pour fabriquer des vêtements et divers objets, Bien que ces matériaux soient utilisés depuis longtemps, l'intérêt scientifique pour eux ne débute véritablement qu'en 1830. Les premiers travaux ont consisté à modifier chimiquement des polymères naturels pour créer des polymères artificiels avec des exemples notables comme la

Vulcanisation du caoutchouc par GOODYEAR en 1844 et la production de nitrocellulose pour remplacer la soie. [12]

Le terme "polymère" a été introduit par BERTHELOT en 1866, et depuis trois grandes catégories de polymères ont été identifiées : les thermoplastiques, les thermodurcissables, et les élastomères . [11]

Une essentielle étape a été franchie avec la création des polymères synthétiques tels que la bakélite en 1910. Bien que la notion de macromolécule ait été envisagée dès le début du 19^e siècle, elle était souvent considérée comme des agrégats ou des micelles par de nombreux chercheurs. Ce n'est que dans les années 1920, grâce aux travaux d'HERMANN STAUDINGER, que la notion moderne de polymère a été développée, établissant ainsi les bases de la science et de la technologie des polymères. STAUDINGER a reçu le prix Nobel en 1953 pour ses découvertes. [11]

Le développement industriel des polymères a connu un coup d'accélérateur pendant la seconde Guerre mondiale, lorsque les États-Unis confrontés à une pénurie de caoutchouc naturel en raison de la guerre, ont lancé un vaste programme de recherche pour trouver des substituts synthétiques. [12]



Figure01.Evolution historique des polymères. [11]

I.2. Définitions :

I.2.1. Le polymère :

Le terme « **polymère** » provient du grec « **poly** », signifiant « **plusieurs** », et « **meros** », qui veut dire « **parties** » ou « **unités** ». Un polymère ou matériau macromoléculaire est une macromolécule, qu'elle soit organique ou inorganique, formée par la répétition successive d'un motif identique, il est constitué de longues chaînes où les unités de répétition peuvent être uniformes (homopolymère) ou variées (copolymère). Les atomes au sein de chaque chaîne sont liés par des liaisons chimiques robustes, tandis que les liaisons entre les chaînes sont plus faibles. Cette combinaison de liaisons fortes et faibles confère aux matériaux polymères leurs propriétés physico-chimiques distinctives. [13]

Une chaîne polymère est composée de nombreuses unités monomères. La viscosité et la résistance mécanique du polymère s'accroissent avec le degré de polymérisation. Cependant, un **monomère** est une petite molécule organique ou inorganique qui peut se lier à d'autres monomères pour former un polymère, c'est ce qu'on appelle: La polymérisation. Et en chimie des matériaux, les monomères sont les unités de base qui se répètent et se connectent entre eux par des liaisons chimiques pour créer des chaînes longues et complexes appelées polymères. Par exemple, l'éthylène est un monomère, qui lorsqu'il se polymérise, forme le polyéthylène. [14]

La formule chimique d'un polymère est semblable à celle du monomère, à laquelle on ajoute la lettre « **n** », indiquant que le monomère se répète n fois dans la chaîne. [11]

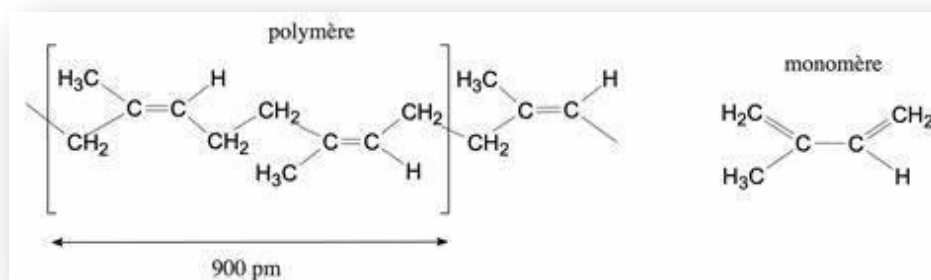


Figure02.Exemple d'une structure chimique du polymère et monomère. [24]

I.2.2. Le monomère :

Le terme « **monomère** » dérive du grec « **mono** », signifiant « **unique** », et « **meros** », qui veut dire « **partie** ». Un monomère est une petite molécule organique ou inorganique qui peut se lier à d'autres monomères pour former un polymère. Ces substances sont les unités fondamentales des polymères. Relevant de la chimie organique, elles combinent des atomes de carbone avec des atomes d'hydrogène, d'oxygène et d'azote et peuvent inclure également des atomes de chlore, de fluor ou de soufre par le biais de liaisons covalentes. Chaque atome de carbone qui peut former quatre liaisons est connecté à ses atomes voisins dans une configuration spatiale semblable à celle d'un tétraèdre régulier. [15]

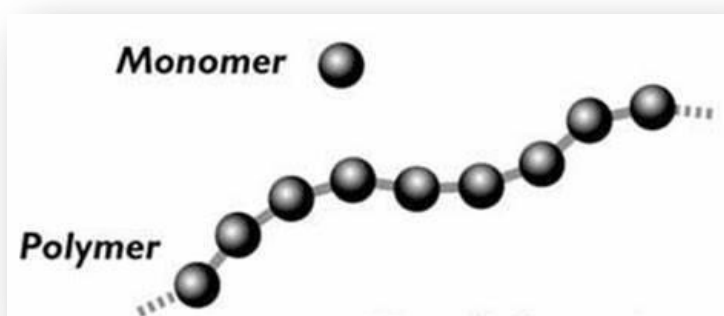


Figure03.Distinction entre un monomère et un polymère. [25]

I.2.3. La Polymérisation:

La polymérisation est un processus chimique au cours duquel des molécules simples appelées monomères se lient ensemble pour former de grandes chaînes ou réseaux moléculaires appelés polymères. Ce processus peut se faire par addition, où les monomères se rejoignent sans produire de sous-produits, ou par condensation dans laquelle la réaction libère des petites molécules comme l'eau. La polymérisation permet de créer des matériaux aux propriétés variées, utilisés dans de nombreux domaines comme les plastiques, les textiles et les caoutchoucs. [16]

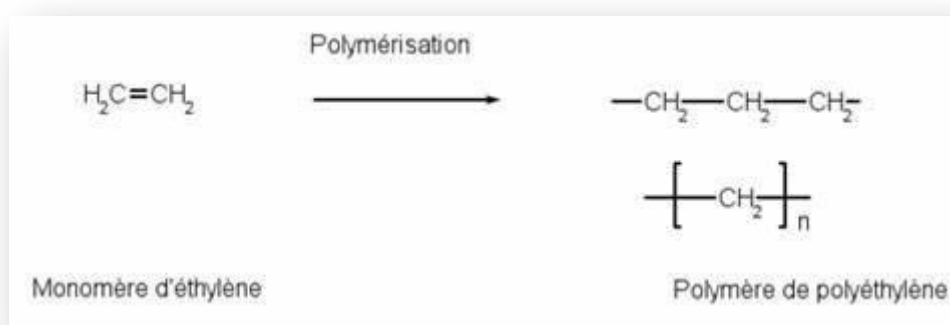


Figure04. Structure chimique de polymérisation du monomère d'éthylène. [24]

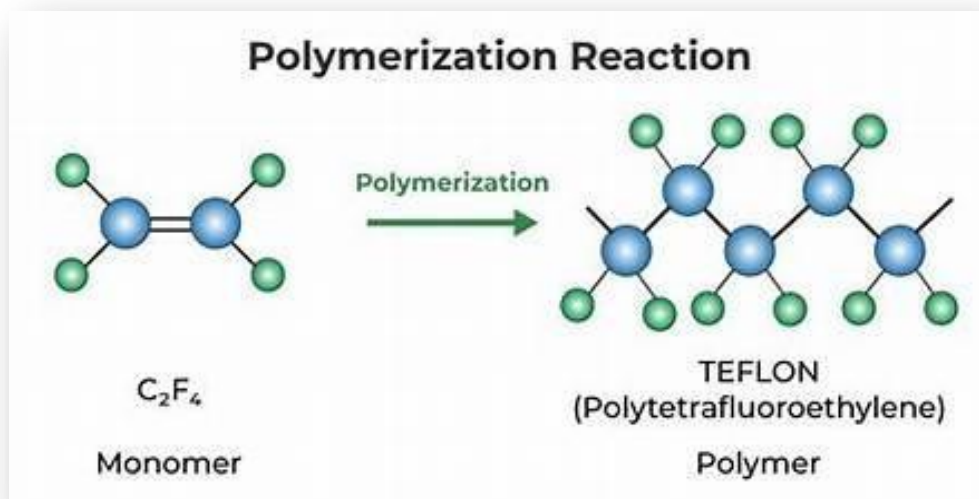


Figure05. Structure moléculaire de polymérisation du tétrafluoroéthylène. [24]

I.3. Types des polymères:

On distingue trois grandes catégories des polymères:

I.3.1. Les Polymères naturels:

Les polymères naturels sont des macromolécules produites par les organismes vivants, constituées de longues chaînes de monomères biologiques. Ils incluent des protéines, des polysaccharides (comme la cellulose et l'amidon) et des acides nucléiques (ADN et ARN), jouant des rôles cruciaux dans les structures et fonctions biologiques.[5]

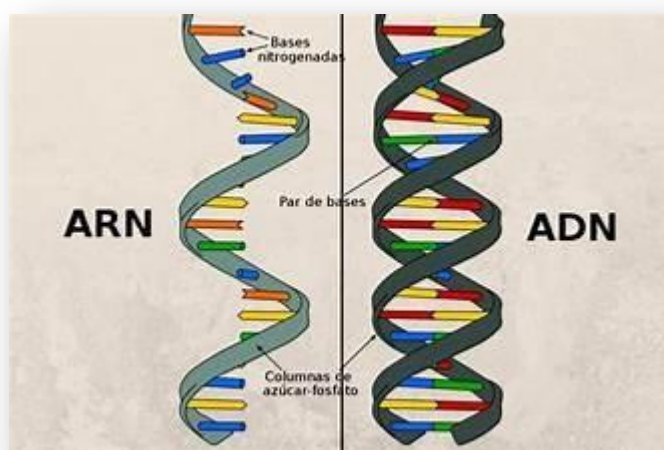


Figure06.Structure en chaîne des polymères naturels: ADN et ARN. [26]

I.3.2. Les Polymères artificiels:

Les polymères artificiels sont créés en modifiant chimiquement des polymères naturels pour en adapter certaines propriétés. Parmi eux on trouve les esters de cellulose, tels que la nitrocellulose et l'acétate de cellulose sont économiquement significatifs. Et à titre d'exemple, on peut associer le coton qui est un polymère naturel à des fibres acryliques, et la laine synthétique est un autre exemple de cette transformation des matériaux. [15]

I.3.3. Les polymères synthétiques:

Entièrement créés par l'intervention humaine, ces polymères résultent de la polymérisation de monomères. Ils incluent des matériaux élaborés à partir de composés chimiques simples et représentent la majorité des polymères essentiels dans l'industrie. [15]

Critère	Polymères naturels	Polymères artificiels	Polymères synthétiques
Origine	D'origine biologique (végétale ou animale)	Fabriqués par des procédés chimiques	Modifiés à partir de polymères naturels ou synthétiques
Exemple	Cellulose, protéines, caoutchouc naturel	Polyéthylène, polystyrène, PVC	Nylon, polyuréthane
Structure	Structures complexes et variées	Structures précises et contrôlées	Structures intermédiaires
Dérivabilité	Biodégradables	Non biodégradables (pour la plupart)	Variable selon le traitement
Propriétés	Généralement flexibles et biodégradables	Durables, résistants, souvent peu coûteux	Propriétés variables, souvent améliorées
Utilisation	Alimentaire, biomédical, textile	Emballage, construction, automobile	Textile, revêtements, adhésifs
Impact environnemental	Généralement moins polluants	Pollution liée à la production et à l'élimination	Peut varier, selon le processus de fabrication

Tableau01.caracteristiques des trois types de polymères. [14]

I.4. Les grandes familles des matériaux polymères:

Effectivement, les scientifiques ont pu diviser les polymères en quatre familles fondamentales, chaque catégorie regroupant des matériaux spécifiquement définis. On peut ainsi identifier :

I.4.1. Les élastomères:

Les élastomères sont des polymères flexibles et élastiques, connus pour leur capacité à s'étirer considérablement et à reprendre leur forme d'origine sans déformation permanente. Ils se caractérisent par une température de fusion relativement basse qui se situe entre 150 et 300 °C, selon le type de polymère et la composition spécifique, ce qui leur permet de conserver leur élasticité à des températures variées. [4]. Souvent appelés « caoutchouc », Ces matériaux présentent des propriétés uniques, telles que l'élasticité et la résistance aux déformations, grâce à un processus de réticulation. Ils sont largement utilisés dans divers secteurs y compris la fabrication de pneus, d'équipements sportifs et de produits pharmaceutiques et peuvent être dérivés de caoutchouc naturel ou synthétique. Dans la famille des élastomères, on trouve plusieurs types de matériaux, notamment : [14]

1. **Caoutchouc naturel (NR)** : Dérivé de la sève d'hévéa, il est largement utilisé dans les pneus et divers articles en caoutchouc.
2. **Caoutchouc synthétique** : Comprend plusieurs variantes, comme :
 - **SBR (Styrène-Butadiène)** : Utilisé dans les pneus et les revêtements.
 - **BR (Butadiène)** : Apporte des propriétés de résistance à l'usure.
 - **NBR (Nitrile)** : Résistant à l'huile, utilisé dans les joints et les gants.
3. **EPDM (Ethylène-Propylène-Diène)** : Résistant aux intempéries, utilisé dans les joints d'étanchéité et les revêtements de toiture.
4. **Silicone** : Connue pour sa résistance à la chaleur et aux produits chimiques, utilisée dans les applications médicales et alimentaires.
5. **TPU (Polyuréthane thermoplastique)** : Flexible et résistant, utilisé dans les chaussures et les revêtements.

Ces élastomères sont choisis en fonction de leurs propriétés spécifiques adaptées à diverses applications industrielles et commerciales. [14]

II.4.2. Les thermodurcissables:

Les thermodurcissables sont des polymères qui prennent leur forme définitive lors du premier refroidissement généralement sous l'action de la chaleur ou de la pression, et dont la transformation physico-chimique est irréversible. Ce processus de durcissement appelé réticulation, aboutit à la formation d'un matériau rigide, insoluble et infusible, marquant l'étape finale de la polymérisation. Les macromolécules de ces matériaux sont orientées dans les trois dimensions, ce qui leur confère une structure fortement réticulée et empêche leur écoulement. [14]

Contrairement aux thermoplastiques, les thermodurcissables présentent une température de dégradation plutôt qu'une température de fusion, car ils ne fondent pas mais se dégradent généralement entre 200 et 350 °C. Ils offrent une dureté élevée et une bonne résistance au fluage à température ambiante, ce qui les rend idéaux pour des applications structurales.

Parmi les types de thermodurcissables, on trouve : [14]

- **Les polyesters insaturés:** comprenant des polyesters condensés, des vinylesters et des dérivés allyliques.
- **Les résines de condensation** (phénoliques, furaniques).
- **Les résines époxydes.**
- **Les aminoplastes** (urées, mélamines, formaldéhydes).
- **Les alkydes.**

II.4.3. Les thermostables:

Ces polymères sont caractérisés par une stabilité mécanique exceptionnelle lorsqu'ils sont exposés à des pressions et à des températures élevées (supérieures à 200 °C) de façon continue. Cette résistance est évaluée en déterminant la température maximale à laquelle la résine peut fonctionner pendant 2000 heures sans perdre plus de 50 % de ses propriétés mécaniques. Ces matériaux sont particulièrement précieux dans des secteurs industriels exigeants comme l'automobile, l'aéronautique et l'électronique, où la capacité à résister à des conditions extrêmes est essentielle. Leur durabilité et leur fiabilité en font des choix privilégiés pour des applications critiques. [14]

II.4.4. Les thermoplastiques:

Les thermoplastiques sont des polymères qui se caractérisent par leur capacité à se ramollir lorsqu'ils atteignent une température de fusion spécifique, généralement comprise entre 100 °C et 300 °C, selon le type de matériau, à cette température ils passent d'un état solide à un état visqueux, ce qui permet leur transformation par divers procédés tels que le moulage par injection, l'extrusion ou le thermoformage. Une fois refroidis, ils se solidifient et conservent la forme prise. Ces matériaux se classifient en deux types : **les amorphes**, caractérisés par l'absence d'ordre moléculaire, et **les cristallins**. [14]

- **Les cristallins:** Les matériaux cristallins possèdent une structure organisée au sein d'une matrice amorphe. Le taux de cristallinité, qui indique la proportion de la structure cristalline par rapport à l'ensemble du matériau joue un rôle crucial dans ses propriétés. Ce taux est influencé par la nature du matériau ainsi que par les conditions de refroidissement lors du moulage. Ces matériaux se distinguent par leur excellente résistance à la fatigue, un faible coefficient de frottement et une bonne stabilité chimique. Parmi les matériaux cristallins, on peut citer: Polyéthylène (PE), Polyamide (PA), Polyoxyméthylène (POM).
- **Les amorphes:** Les matériaux amorphes sont des substances qui ne présentent pas de structure moléculaire ordonnée, ce qui leur confère des propriétés similaires à celles des liquides. Contrairement aux cristallins, ils ne possèdent pas de température de fusion précise, mais montrent plutôt une phase de ramollissement lorsqu'ils sont chauffés, à titre d'exemple: Polystyrène (PS) qui est Utilisé dans l'emballage et l'isolation, le Polycarbonate (PC) utilisé dans les lunettes de sécurité et les fenêtres ou Polychlorure de vinyle (PVC): largement présent dans la construction, notamment pour les tuyaux et les revêtements de sol, ce matériau est considéré comme le polymère amorphe le plus répandu et utilisé de nos jours. [17]

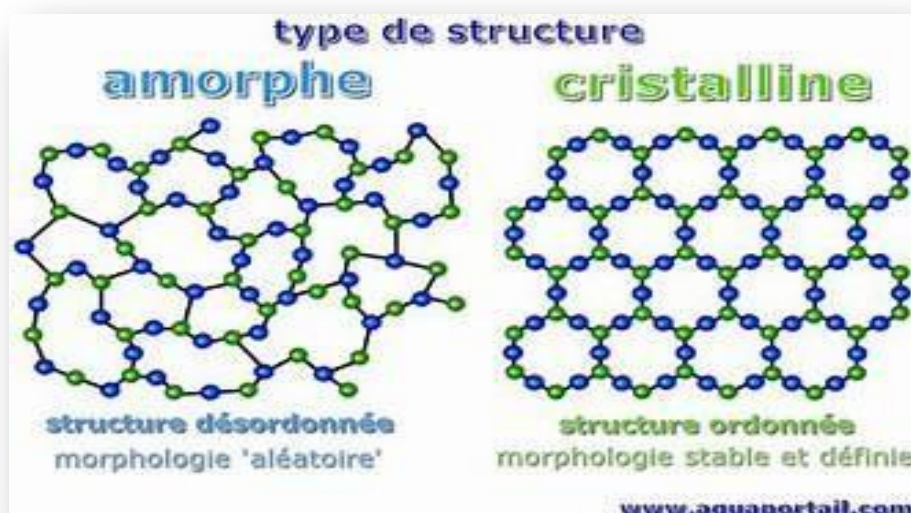


Figure07. Structure moléculaire des polymères amorphe et cristallin. [27]

II. Généralités sur le Polychlorure de Vinyle (PVC):

II.1. Historique du PVC:

Le polychlorure de vinyle, communément appelé PVC, possède une histoire riche qui remonte au 19^e siècle. Bien que l'idée de créer des matériaux synthétiques existe depuis l'Antiquité, le PVC est l'un des premiers polymères à avoir été développé pour un usage industriel. [15]

La première découverte du PVC a eu lieu en 1835, lorsque le physicien français HENRI REGNAULT a accidentellement obtenu du chlorure de vinyle après avoir exposé le gaz à la lumière du soleil. Simultanément en 1872, l'allemand EUGEN BAUMANN a réalisé une découverte similaire produisant un solide blanc à partir du même gaz. Cependant, malgré ces découvertes précurseur, le PVC n'a pas trouvé d'applications pratiques pendant plusieurs décennies, en raison des difficultés liées à sa manipulation et à sa transformation, le chercheur EUGEN BAUMANN n'a pas déposé de demande de brevet sur cette découverte. Mais en 1913 Le chlorure de polyvinyle, également désigné sous le nom de chlorure de polyvinyle chloré a été breveté, lorsqu'une méthode innovante de polymérisation de chlorure par la lumière solaire a été mise au point par l'allemand FRIEDRICH CLATT.

Ce n'est qu'à partir des années 1920 que le PVC a commencé à être commercialisé. Des avancées techniques ont permis de surmonter les obstacles initiaux, ce qui a ouvert la voie à

son utilisation dans divers secteurs. Dans les années 1930, le PVC a commencé à s'imposer dans des applications variées comme les revêtements de sol, les tubes, les câbles électriques et l'emballage. Son utilisation a été renforcée pendant la Seconde Guerre mondiale, où ses propriétés résistantes et durables ont été particulièrement appréciées dans les équipements militaires. Au fil des décennies, le PVC a gagné en popularité surtout dans l'industrie de la construction, où il est devenu un matériau de choix pour les fenêtres, les tuyaux et les revêtements. Sa polyvalence, sa résistance à l'eau et sa facilité d'entretien ont largement contribué à son succès. [15]

II.2. Définition du PVC:

Le polychlorure de vinyle, dont le symbole international PVC provient de l'appellation anglaise « **Poly Vinyle Chloride** » [14], est un thermoplastique largement utilisé dans de nombreuses applications industrielles et domestiques. Présenté sous forme de poudre blanche, ce matériau est inodore et inflammable, sa composition chimique se compose de carbone, d'hydrogène et de chlore, avec environ 43 % des éléments provenant du pétrole et 57 % du sel. Le PVC se distingue par sa structure polymère, qui est formée par la répétition de monomères de chlorure de vinyle ($\text{CH}_2=\text{CH}-\text{Cl}$). Cette longue chaîne moléculaire confère au PVC des propriétés variées, notamment une bonne résistance aux produits chimiques et une durabilité appréciable, de plus, une molécule de PVC se compose de 750 à 1500 unités monomériques. [15]

Le PVC occupe environ 10 % du marché de l'emballage alimentaire, grâce à ses propriétés polyvalentes et à sa capacité à être adapté à divers besoins. Lors de sa fabrication, il est fréquemment mélangé avec des additifs tels que des plastifiants et des stabilisants, qui améliorent ses caractéristiques intrinsèques et facilitent son travail. [5]

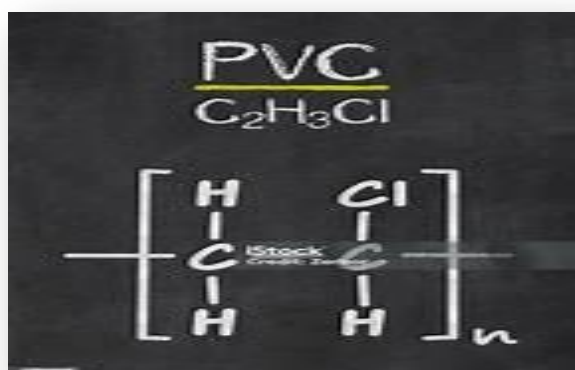


Figure08.Formule chimique du PVC. [28]

II.3. Structure du PVC:

La structure du PVC (polychlorure de vinyle) est constituée de longues chaînes polymériques formées par la répétition de monomères de chlorure de vinyle. Chaque monomère a la formule chimique C_2H_3Cl et se compose d'un atome de carbone lié à un atome de chlore et à deux atomes d'hydrogène.

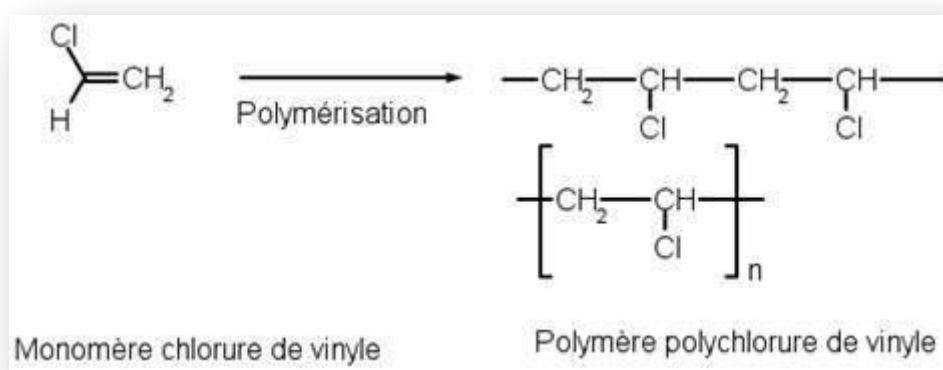


Figure09.Schéma de la polymérisation du chlorure de vinyle menant à la formation du PVC.

Détails de la structure :

- **Chaîne polymère** : Les monomères sont liés par des liaisons covalentes, formant une chaîne linéaire ou légèrement ramifiée.
- **Configuration** : Les atomes de carbone sont arrangés de manière à créer une structure en zigzag, ce qui contribue à la flexibilité et à la résistance du matériau.

- **Chlorure** : Les atomes de chlore, qui sont attachés aux chaînes de carbone, influencent les propriétés physiques et chimiques du PVC, comme sa résistance aux produits chimiques et sa durabilité.

II.4. Propriétés générales du PVC :

Comme tous les polymères, le PVC présente des caractéristiques essentielles qui en font un matériau rigide de qualité. Parmi ces propriétés, on trouve:

II.4.1. Propriétés mécaniques :

Le PVC se distingue par plusieurs propriétés mécaniques importantes. Il présente une bonne résistance à la traction, ce qui lui permet de supporter des charges sans se déformer. Sa dureté varie selon les formulations, offrant rigidité et capacité à résister aux chocs. Le PVC peut également être flexible, adapté pour des applications comme les tuyaux. Sa résistance à l'impact et à l'usure ainsi que sa stabilité dimensionnelle face aux variations de température et d'humidité, en font un matériau très prisé dans de nombreux secteurs, notamment la construction et l'emballage. Mais ces propriétés diffèrent d'un PVC rigide à un PVC souple, ce tableau met en valeur les propriétés mécaniques des deux PVC, rigide et souple: [14]

Propriétés	Unités	PVCrigide	PVCsouple
masse volumique	g/cm ³	1.36	1.16-1.35
module d'élasticité	MPa	2700-3000	25-1600
contrainte à la rupture	MPa	50-60	8-25
Allongement à la rupture	%	10-50	170-400
Température de transition vitreuse	°C	80	-10 et -30

Tableau02.Propriétés mécanique du PVC rigide et souple. [14]

II.4.2. Propriétés physico-chimiques :

Le PVC (polychlorure de vinyle) possède des propriétés physico-chimiques qui le rendent très polyvalent. Sa densité se situe entre 1 et 2 g/cm³, et il résiste bien à de nombreux agents chimiques inorganiques, ce qui le rend adapté à des environnements exigeants. Sa faible conductivité thermique en fait un bon isolant, tandis que sa combustion génère des gaz corrosifs. Avec une température de transition vitreuse entre 75°C et 80°C, le PVC est limité pour certaines applications sans plastifiants. Enfin, il est insoluble dans l'eau mais peut se dissoudre dans certains solvants organiques, ce qui contribue à sa large utilisation dans des secteurs variés, comme la construction et l'emballage. [18]

II.4.3. Propriétés thermiques :

Le PVC (polychlorure de vinyle) se distingue par plusieurs propriétés thermiques importantes qui renforcent sa flexibilité. Sa conductivité thermique, d'environ 0,2 W·m⁻¹·K⁻¹ en fait un excellent isolant. Avec une capacité thermique massique d'environ 1046 J·kg⁻¹·K⁻¹, il est capable de stocker une quantité significative de chaleur. En ce qui concerne la température de ramollissement, les PVC non plastifiés présentent des valeurs allant de 65 à 85°C, tandis que les mélanges contenant du PVC chloré peuvent atteindre des températures supérieures à 100°C, garantissant ainsi une bonne performance sous chaleur. Pour la température de fléchissement sous charge, les PVC non plastifiés montrent des variations entre 55 et 70°C, alors que les formulations avec PVC chloré peuvent atteindre jusqu'à 90°C. Cela indique une capacité à maintenir leurs propriétés mécaniques sous des conditions de chaleur et de pression. Enfin, le coefficient de dilatation linéaire d'environ $5 \times 10^{-5} \cdot K^{-1}$ témoigne de sa faible expansion thermique. [18]

II.4.4. Propriétés électriques :

Le PVC (polychlorure de vinyle) possède d'excellentes propriétés électriques, le rendant idéal pour les applications électriques et électroniques. En tant qu'isolant électrique, il présente une résistance de surface élevée et une faible conductivité, empêchant le passage du courant. Sa constante diélectrique située entre 3 et 4 pour un PVC rigide et de 5 à 9 pour un PVC souple, lui permet de stocker de l'énergie tout en minimisant la dissipation. De plus, le PVC résiste à l'humidité et aux produits chimiques, ce qui en fait un choix durable pour l'isolation de câbles et les composants électroniques. [14]

Propriétés	PVC rigide	PVC souple
Résistivité transversale ($\Omega \cdot \text{Cm}$)	$> 10^{16}$	$10^{11} - 10^{13}$
Facteur de pertes diélectriques (50 à 100 kHz)	$1,4 - 1,8 \cdot 10^{-2}$	0,1 – 0,15
Constante diélectrique à 10^6 Hz	2,8 – 3,1	3,3 – 4,5
Constante diélectrique à 10^3 Hz	3 – 3,3	4 – 8

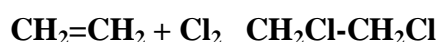
Tableau03.Propriétés électriques du PVC rigide et souple. [15]

III. Polymérisation du PVC:

III.1. Monomère :

III.1.1. Obtention à partir de l'éthylène :

- La chloruration de l'éthylène pour produire du dichloroéthane est réalisée selon la réaction suivante: [14]

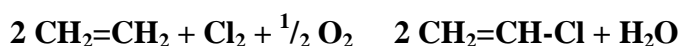


Ensuite, par un procédé de cracking, le dichloroéthane est décomposé pour donner le monomère et de l'acide chlorhydrique: [14]



L'acide chlorhydrique produit peut être utilisé dans un processus mixte impliquant l'acétylène, connu sous le nom de procédé acétylène-éthylène.

- l'oxychloruration de l'éthylène est effectuée selon la réaction suivante: [14]



Ces procédés, développés dans les années 1950 lorsque les produits de cracking du pétrole étaient abordables, sont toujours en usage aujourd'hui. Cependant, leur rentabilité a été compromise par la hausse des prix des produits pétroliers. Envisager un retour au procédé à acétylène impliquerait des investissements considérables et une consommation énergétique élevée, soulevant ainsi des préoccupations économiques et environnementales. [14]

III.1.2. Obtention à partir de l'acétylène:

Le monomère est produit par l'action de l'acide chlorhydrique gazeux sur l'acétylène. Après purification, ces deux réactifs sont introduits dans un catalyseur, généralement composé de charbon actif imprégné de bichlorure de mercure. La réaction est représentée par l'équation suivante: $\text{CH}=\text{CH} + \text{HCl} \quad \text{CH}_2=\text{CH}-\text{Cl}$

Bien que cette transformation puisse sembler simple, sa mise en œuvre à l'échelle industrielle est compliquée par la nécessité de purifications approfondies pour éliminer les sous-produits indésirables, tels que le chlorure d'éthylène et le trichloroéthane. De plus, la production de chlorure de vinyle via ce procédé ne dépend pas des sources de pétrole, ce qui explique pourquoi le développement du PVC a eu lieu avant celui des polyoléfines, qui elles, sont fortement liées à cette matière première. [14]

III 2.Procédés de fabrication du PVC (méthodes de polymérisation):

III.2.1.Polymérisation en masse:

Cette méthode permet de se passer d'eau et de dispersants, mais la gestion de la chaleur dégagée lors de la réaction constitue un défi. Le PVC, qui est insoluble dans son monomère, est précipité dans le milieu réactionnel au fur et à mesure de sa formation. Ce procédé est divisé en deux étapes: [19]

- **Une phase de pré-polymérisation** est mise en œuvre, durant laquelle environ 10 % du monomère est transformé sous des conditions contrôlées. Ce processus vise à créer des grains ayant des caractéristiques morphologiques précises, essentielles pour les étapes suivantes de la fabrication. Cette étape permet d'assurer une uniformité et une qualité dans le produit final.
- **Une phase de polymérisation** est réalisée durant laquelle les grains de semence sont transférés dans le réacteur principal, où le monomère et les initiateurs sont ajoutés. La croissance des grains initiaux se poursuit jusqu'à ce que le monomère non réagi soit éliminé. Par la suite, le chlorure de vinyle est tamisé, présentant des grains avec un diamètre moyen de 120 à 150 μm . Ce procédé permet d'obtenir un polymère de haute pureté.

III.2.2. Polymérisation en émulsion:

Ce procédé est perçu comme similaire à la polymérisation en suspension, permettant la synthèse de polymères présentant de très grandes masses moléculaires, tout en assurant des vitesses de réaction élevées. Le monomère est émulsionné dans un milieu aqueux contenant un agent tensioactif. La polymérisation est réalisée à l'aide d'un initiateur hydrosoluble. À l'issue de la polymérisation, l'émulsion est soit séchée par pulvérisation, soit coagulée par l'ajout d'un électrolyte puis filtrée et enfin soumise à un séchage par vaporisation instantanée. La taille des grains de PVC obtenus par ce procédé peut varier de 15 à 250 μm . [15]

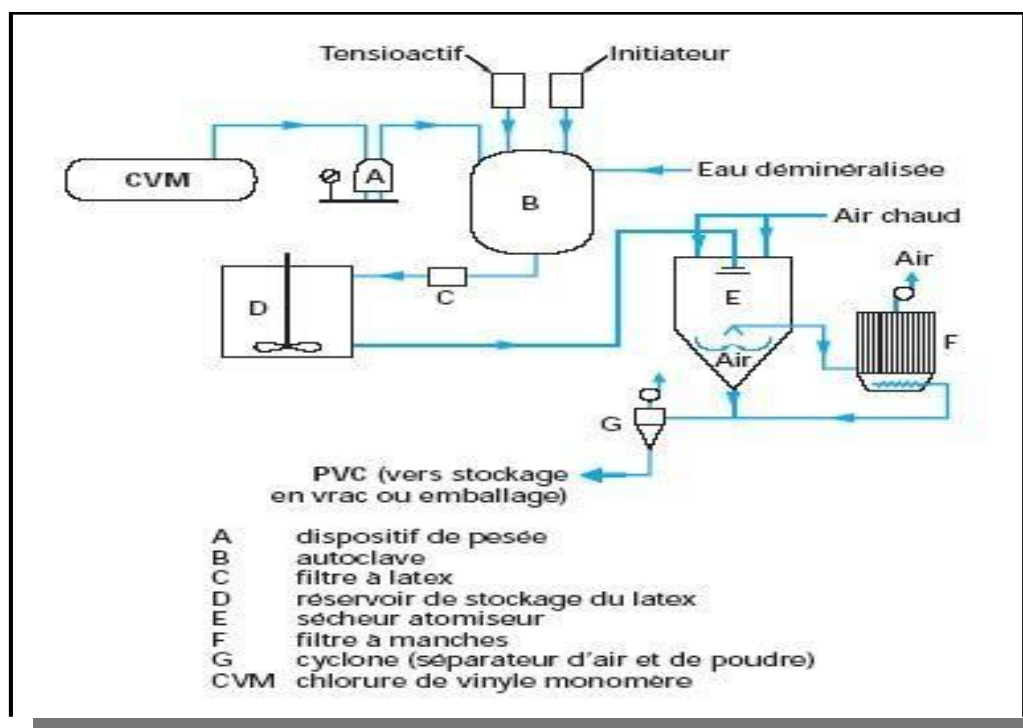


Figure 10. Dessin descriptif du processus de polymérisation en émulsion. [14]

III.2.3. Polymérisation en suspension (en perles):

Le procédé de fabrication le plus couramment employé est celui où le monomère formant la phase organique, est dispersé dans de l'eau. Dans ce système, l'initiateur soluble uniquement dans le monomère, crée des gouttes qui agissent comme des unités de polymérisation isolées. L'agglomération de ces gouttes est évitée grâce à l'ajout d'un agent de suspension soluble dans l'eau. Avec une agitation appropriée, les vitesses de réaction sont maintenues relativement lentes. Après la réaction, le polymère est séparé par filtration, lavé et séché. En raison du

Lavage effectué lors de la séparation, le PVC obtenu présente une bonne pureté. Les grains de PVC ont un diamètre moyen compris entre 100 et 200 μm et peuvent être directement utilisés en extrusion. [14]

III.2.4. Polymérisation en solution:

La polymérisation s'effectue en présence d'un solvant ou d'un diluant, permettant ainsi différentes configurations de solubilité pour les monomères et les polymères. Dans certains cas, le polymère peut précipiter comme c'est le cas du PVC dans le benzène. En phase homogène, la cinétique est comparable à celle de la polymérisation en masse, bien que la vitesse de propagation soit réduite, exprimée par la formule :

$$V_p = [\textit{monomère}][\textit{polymère en croissance}]$$

La présence du solvant modifie les concentrations des réactifs, ce qui impacte directement la vitesse de réaction. De plus, la polymérisation en solution offre l'avantage de mieux contrôler les propriétés des polymères obtenus, notamment en ajustant les conditions de solubilité. On peut également observer que la purification du polymère peut être facilitée, réduisant ainsi la contamination par des sous-produits indésirables. Ces procédés sont souvent utilisés dans l'industrie pour produire des matériaux aux caractéristiques spécifiques adaptées à diverses applications. [15]

III.3. Additifs de transformation:

Le PVC se présente sous la forme d'une poudre blanche, incolore et sans goût. Ce matériau rigide est caractérisé par une stabilité thermique limitée et une forte tendance à adhérer aux surfaces métalliques lorsqu'il est chauffé. Lorsque la température atteint 80 °C, une libération d'acide chlorhydrique (HCl) est observée, tandis que la température de transformation se situe généralement entre 180 et 200 °C. Ce processus peut entraîner la formation de liaisons insaturées telles que: [14]



Ces additifs de transformation sont souvent incorporés pour améliorer les performances du PVC. Ces agents, tels que les plastifiants et les stabilisants, sont ajoutés afin d'optimiser les

propriétés mécaniques, thermiques et chimiques du matériau. Ainsi, le PVC est rendu polyvalent et utilisé dans de nombreux domaines, allant de l'emballage à l'électrotechnique.[19]

III.3.1. Stabilisants:

Les stabilisants sont des additifs essentiels dans le PVC, visant à améliorer sa durabilité et sa résistance à la chaleur. Ils protègent le matériau de la dégradation lors de la transformation à haute température en prévenant la libération d'acide chlorhydrique. De plus, ils offrent une protection contre les rayons ultraviolets, évitant le jaunissement et la fragilisation du PVC. Ainsi, la fonction du stabilisant consiste à retarder, diminuer ou empêcher les processus qui peuvent altérer la structure du matériau durant sa fabrication ou son utilisation. Parmi eux, on peut citer: [14]

- **Stabilisant à base de Plomb:** principalement employé dans la fabrication de tuyaux et de profilés rigides destinés à la construction, ainsi que dans les isolants pour câbles électriques. Mais sont de moins en moins utilisés en raison de préoccupations sanitaires. [9]
- **Stabilisant à base de Calcium et zinc:** Souvent combinés avec d'autres stabilisants d'origine minérale (comme le magnésium ou l'aluminium) ou organique, ils sont choisis en raison de leur faible impact sur l'environnement.[19]
- **Stabilisants à base d'étain:** Ils protègent le PVC contre la dégradation thermique lors des processus de transformation, comme l'extrusion et le moulage. Ils aident à maintenir l'intégrité du matériau lors de son traitement thermique, tout en réduisant la formation des produits nocifs. [14]
- **Stabilisant à base de baryum et cadmium:** Ils offrent une excellente résistance chimique à des températures élevées et garantissent au PVC une remarquable stabilité dans le temps. [19]



Figure11.Stabilisant thermique utilisé par la SARL LEADER PROFIL.

III.3.2. Plastifiants:

Le plastifiant sert à la diminution des forces d'attraction entre les chaînes moléculaires du PVC, rendant ainsi le matériau plus flexible. Cette action abaisse la température de transition vitreuse, qui est généralement de 78 °C, permettant au PVC d'être plus souple et résistant aux chocs à température ambiante. En outre, l'utilisation de plastifiants élargit les possibilités d'application du PVC dans divers domaines. [20]

Les plastifiants les plus fréquemment utilisés incluent: [14]

- Esters de l'acide sébacique.
- Plastifiants polymériques tels les polyesters.
- Elastomères de synthèse.
- Esters de l'acide phosphorique.
- Esters de l'acide adipique.
- Esters de l'acide phtalique.



Figure12.Poudre de plastifiant utilisé par la SARL LEADER PROFIL.

III.3.3. Lubrifiants:

Le lubrifiant est essentiel dans le processus de transformation du PVC, car il permet de maîtriser et de réguler les forces de frottement. En réduisant la friction entre le polymère et les surfaces métalliques des machines, ainsi qu'entre les grains et macromolécules du PVC, il facilite l'écoulement et le traitement du matériau à des températures élevées. L'augmentation de la fluidité du PVC fondu est ainsi assurée, permettant une distribution homogène et un mélange efficace des autres additifs. On distingue trois (03) types de lubrifiants: [14]

- **Lubrifiant interne:** Intégré directement dans la matrice polymère, il agit à l'intérieur du matériau. Ce lubrifiant réduit la friction entre les particules de PVC elles-mêmes, améliorant ainsi la fluidité et la manipulabilité du polymère pendant le traitement. Il contribue également à améliorer les propriétés mécaniques et la stabilité thermique du produit final, tels que: l'Acide Stéarique.
- **Lubrifiant externe:** Appliqué en surface ou utilisé dans le processus de transformation. Il permet de diminuer le frottement entre le PVC et les surfaces des machines, facilitant ainsi le moulage et l'extrusion. Il aide à prévenir l'usure des équipements et à assurer un meilleur écoulement du matériau, à titre d'exemple: Dioléate de Glycérine, Monostéarate de Glycérine.
- **Lubrifiant interne/externe:** Ces lubrifiants remplissent deux fonctions, étant utilisés à la fois comme lubrifiants externe et interne, comme: L'huile de récin hydrogénée, Hydroxystéarate de Calcium, Laurate de Zinc....etc [21]



Figure13.Matière lubrifiant utilisée par la SARL LEADER PROFIL.

III.3.4. Agents antichocs:

Ils visent à renforcer la résistance aux chocs du PVC, surtout par temps froid. Il s'agit généralement de polymères et de copolymères de différentes sortes, on trouve: les copolymères MBS (méthacrylate-butadiène-styrène) ou ABS(acrylonitrile-butadiène-styrène), polyéthylènes chlorés, polyacrylates. [14]



Figure14.Agent antichocs ou impact employé par la SARL LEADER PROFIL.

III.3.5. Colorants et pigments:

Lorsqu'ils sont ajoutés en faibles concentrations, les colorants et pigments permettent d'obtenir une large gamme de couleurs pour le PVC. On distingue: [14] et [19]

- **Pigments organiques** : Offrent des couleurs intenses et éclatantes. Souvent plus translucides que les pigments inorganiques, permettant des effets de superposition, par exemple le rouge quinacridone qui offre une couleur vive et éclatante, idéale pour les jouets ou les articles de décoration; pigments azoïques; pigments phthalocyanines.
- **Pigments minéraux (inorganiques)**: Ils offrent une excellente résistance à la chaleur et aux Ultraviolets, fournissent une couverture solide, souvent utilisés pour leur capacité à masquer d'autres couleurs, et Résistent bien aux conditions environnementales ce qui les rend idéaux pour des applications extérieures, comme: Le dioxyde de titane, souvent utilisé pour donner une opacité blanche et une excellente résistance aux UV, couramment trouvé dans les fenêtres en PVC ou les revêtements extérieurs; Oxyde de fer; Oxyde de chrome...etc.
- **Colorants** : Les colorants de type phthalocyanine, utilisés pour créer des teintes vertes ou bleues translucides, parfaits pour des applications comme les films d'emballage ou les panneaux décoratifs.

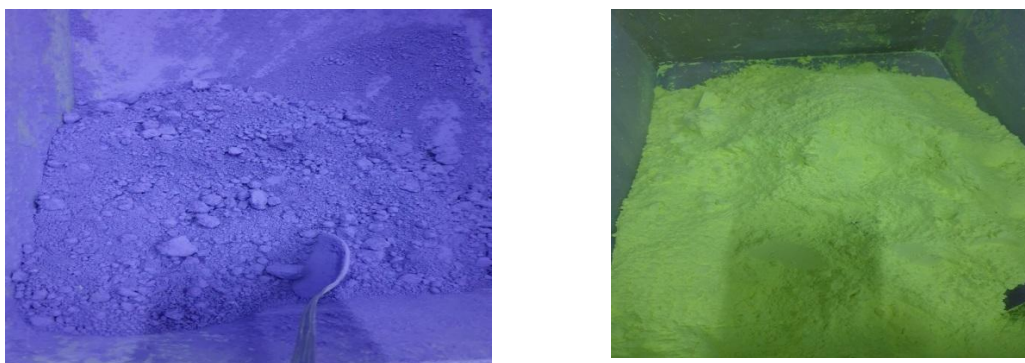


Figure15.Colorants et pigments appliqués par la SARL LEADER PROFIL.

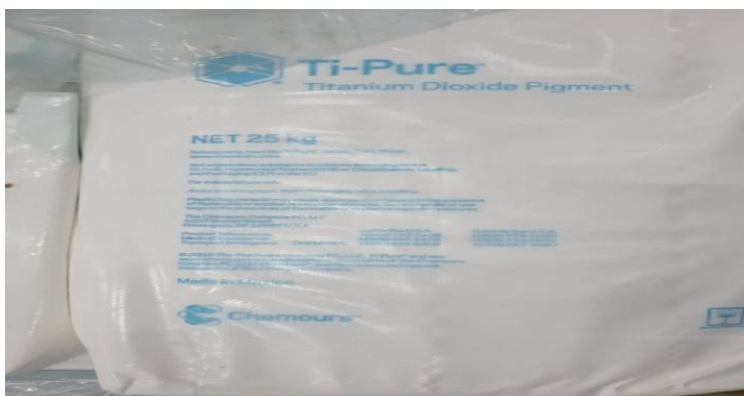


Figure16.Titanium pur pour la couleur blanche appliquée par la SARL LEADER PROFIL.

VI.3.6.Charges:

Ce sont des substances minérales inertes, généralement ajoutées aux mélanges pour modifier certaines propriétés mécaniques, électriques et thermiques, améliorer l'aspect de surface ou réduire le coût des produits finis. Parmi les principales charges utilisées dans le PVC, on trouve le carbonate de calcium, l'oxyde d'aluminium, le quartz et le talc. Ces charges améliorent la fluidité du mélange, la résistance à l'usure et la stabilité dimensionnelle, tout en réduisant l'impact environnemental en diminuant la quantité de PVC nécessaire. [19]

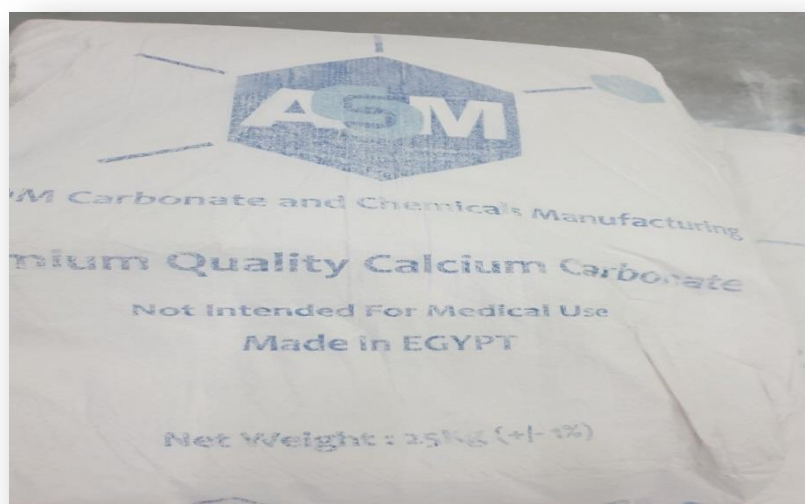


Figure17.Carbonate de Calcium (Calcite) employé par la SARL LEADER PROFIL.

III 3.7. Retardateurs de feu:

Le PVC rigide est naturellement retardateur de feu. En revanche, des retardateurs de flamme sont souvent ajoutés au PVC souple, car l'inclusion de plastifiants peut accroître son inflammabilité. Bien que le PVC présente généralement une résistance au feu supérieure à celle d'autres plastiques, l'ajout de certains retardateurs, tels que les oxydes métalliques peut encore renforcer cette résistance, contribuant ainsi à la sécurité des produits finis. De plus, les réglementations sur la sécurité incendie exigent souvent leur utilisation et des tests standardisés sont réalisés pour garantir leur efficacité. [19]

IV. Technique de transformation du PVC: La mise en œuvre

Les techniques de transformation du PVC incluent plusieurs méthodes comme le soudage, le moulage par injection, le calandrage, le thermoformage, chacune adaptée à des applications spécifiques, mais la technique de transformation la plus utilisée pour le PVC est l'extrusion.

IV.1. procédé d'extrusion

IV.1.1. Description de l'extrusion

L'extrusion du PVC est un processus industriel clé qui permet de transformer des granulés de PVC en divers produits finis sous forme continue. Ce procédé est prisé pour sa rapidité et sa flexibilité, offrant une large gamme d'applications dans des secteurs tels que la construction, l'emballage et l'automobile. [22]

Le processus commence par l'alimentation de granulés de PVC dans une trémie. Ces granulés, souvent enrichis d'additifs, sont ensuite transportés par une vis sans fin à travers un cylindre chauffé. La température contrôlée fait fondre le PVC, le transformant en une masse homogène. À cette étape des additifs peuvent être intégrés: des plastifiants pour accroître la flexibilité, des stabilisants pour améliorer la résistance aux UV, ou des colorants pour obtenir des teintes spécifiques. Une fois que le PVC est fondu, il est poussé à travers une filière qui lui donne la forme souhaitée. Par exemple, des tuyaux en PVC sont fabriqués pour des systèmes de plomberie et d'irrigation, appréciés pour leur légèreté et leur résistance à la corrosion. Les profilés en PVC, utilisés dans la fabrication de fenêtres et de portes, offrent également d'excellentes propriétés d'isolation thermique. Après la formation, le produit

extrudé est refroidi, généralement à l'eau, pour le solidifier. Ce refroidissement rapide aide à stabiliser la forme du produit. Et enfin, le produit est découpé à la longueur désirée, prêt à être expédié ou utilisé. [14] et [22]

L'extrusion du PVC permet de produire une variété d'articles, notamment: tuyaux (souple et rigide); profilés rigides pour les portes, les volets, les plinthes...etc. et profilés souples pour le nez d'escaliers, mains courantes...etc.; feuilles et films en PVC ainsi que d'autres accessoires. [14]

De plus, La sélection des extrudeuses et les paramètres d'exploitation pour la mise en œuvre sont influencés par la manière dont le mélange prêt à l'emploi est conditionné. En effet lors de l'extrusion de poudres sèches peu ou non plastifiées, il est préférable d'opter pour des équipements à double vis, en cas de granulés des extrudeuses à vis simple ou double sont utilisées. [19]



Figure 18 lignes d'extrusion de profilé PVC

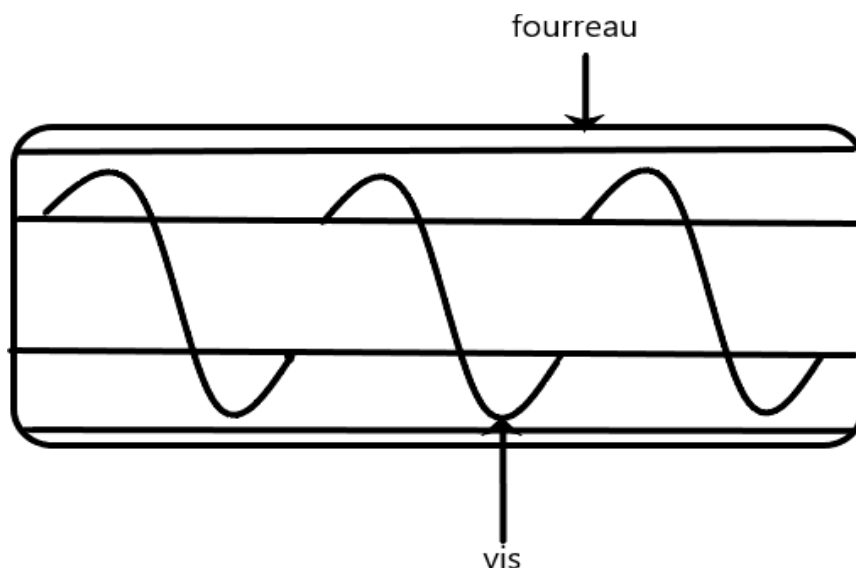


Figure 19: schéma explicatif du principe vis fourreau dans l'extrudeuse

C'est dans l'extrudeuse que se déroule la majeure totalité des réactions chimiques et thermiques comme la polymérisation réaction entre polychlorure de vinyle et le stabilisant thermique.

IV.1.2 Description de l'extrudeuse :

Généralement une extrudeuse (cas extrudeuse mono vis) est composée d'une vis sans fin tournant dans fourreau à température régulée [21].

Après l'alimentation la matière transformée est introduite dans le fourreau surmonté d'un silo de grande capacité généralement composé d'un tamis.

La section au-dessus du fourreau (culasse) est généralement refroidie par circulation d'eau afin de faciliter l'alimentation en matière de la vis. Le fourreau proprement dit est régulé en température (**figure 21**) par un ensemble comprenant généralement un système de chauffage électrique par colliers chauffants, et un dispositif de refroidissement, soit à air, soit à circulation de fluide (eau ou huile thermique selon la température requise), pour certaines machines qu'on appelle dégazeuses. Les constructeurs ont cherché à éliminer les matières volatiles qui peuvent accompagner la matière dans le corps de l'extrudeuse ou qui apparaissent à la température de travail [23].

Une pompe à vide aspire les gaz qui s'échappent du corps de la machine par une cheminée située face à la zone de la vis marquant une modification des filets.

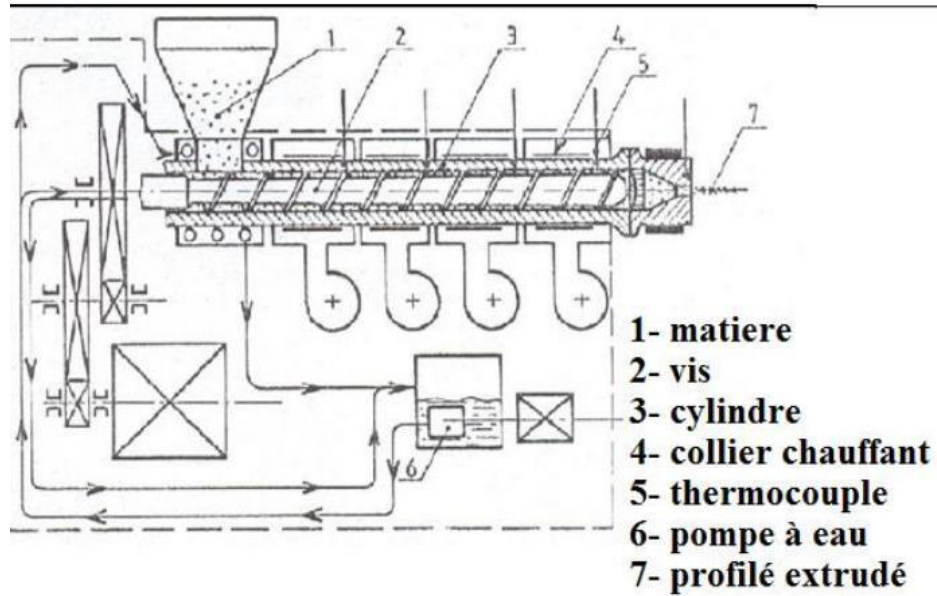


Figure 20 : schéma d'une extrudeuse [28]



Figure 21 : écran de contrôle d'une extrudeuse

1. Température de fusion l'intérieur de l'extrudeuse.
2. Tirage (chenille à traction).
3. Température des colliers chauffant (résistance) de l'extrudeuse .
4. Température des colliers chauffant de la filière .
5. Pompe à vide .

L'écran nous permet de contrôler plusieurs paramètres tels que les températures des résistances des colliers et celle de la filière, le taux de déversement de matière, l'arrêt des moteurs de (la vis, les pompes à vide, le déversement de matière), Même la force de tirage de la chenille à traction. Elle nous permet aussi d'avoir plusieurs informations telles que la température de fusion de la matière, la vitesse de la vis en tr/min, la pression de la matière dans l'extrudeuse, le pourcentage du couple et du courant, ainsi que la force de tirage de la chenille à traction.

V.1.3 Les différentes zones de l'extrudeuse

Le polymère se déplace au long de la vis passant de l'état solide à liquide se changement D'état est causé par deux facteur le frottement entre vis matière et fourreau et les températures régulée de l'extrudeuse, cela nous mène à distinguer trois zone présente dans une extrudeuse

- **Zone d'alimentation** : zone où l'extrudeuse est alimentée par la matière solide telle que des compounds, de la poudre compactée ou des granulés.
- **Zone de plastification** : la zone où coexistent les deux états solide et liquide.
- **Zone de pompage** : dans cette zone le polymère est totalement fondu puis pompé vers la filière. [22]

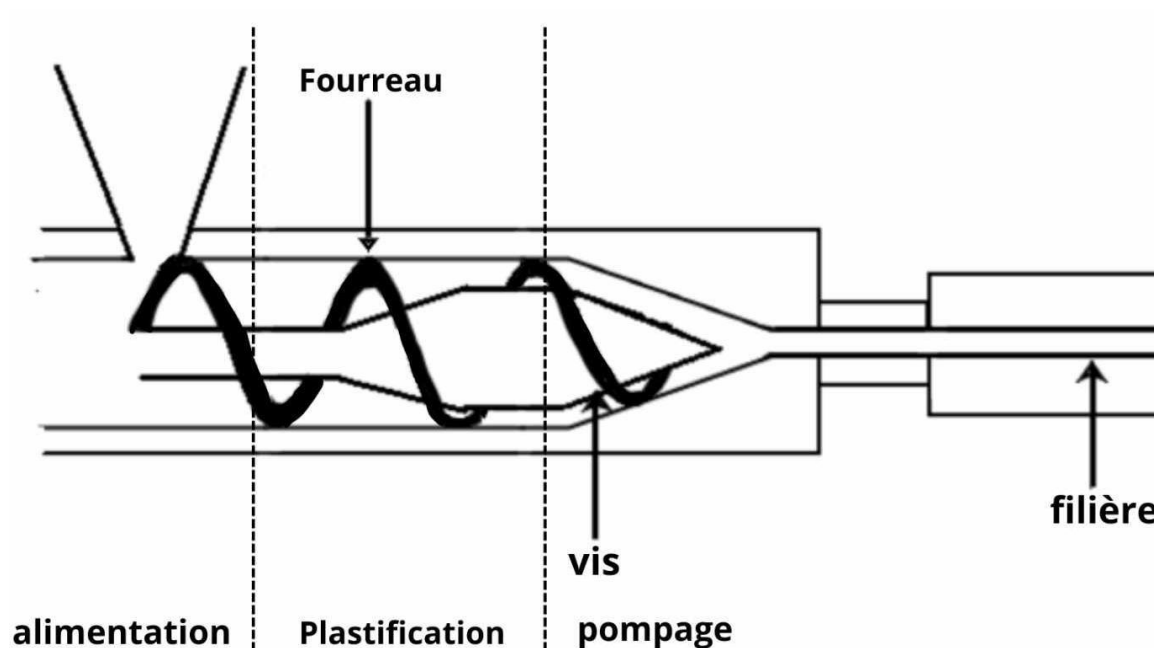


Figure 22 : schéma simplifié d'une extrudeuse mono vis

V.1.4. La vis d'extrusion

Sa principale fonctionnalité est de plastifier la matière plastique tout en la convoyant vers la filière en générale elle possède trois zones **figure 25**. [29]

- **Zone1 Zone d'Alimentation :**
fonction :

Alimenter et convoyer les granulés de plastique vers la zone de compression. C'est dans cette zone que se développe la force de poussée de la matière le long de la vis par le phénomène vis écrou (la matière correspond à l'écrou). Pour que cette force soit suffisante la matière ne doit pas tourner avec la vis (effet de "patinage"). Pour y parvenir, il est nécessaire que : la vis soit polie, la température de la vis soit inférieure à celle du cylindre, la matière ne commence pas à fondre dans cette zone [28-29]

- **Zone 2 Zone de compression :**
Fonction :

Plastifier la matière et la mettre sous pression de façon progressive. C'est dans cette zone que la matière va passer progressivement de l'état solide à l'état fondu. Ce phénomène de plastification est dû à une augmentation de T° de la matière par l'apport de chaleur du fourreau et par le travail des forces de cisaillement au sein du matériau. Le mouvement de circulation de la matière dans le canal de la vis contribue à la répartition uniforme des températures dans la matière. La diminution du volume spécifique entre la matière à l'état solide (en granulé) et la matière à l'état fondu est compensée par le rétrécissement de la section du canal de la vis (taux de compression T_c).

- **Zone 3 Zone d'homogénéisation ou de pompage :**
Fonction :

Mélanger, homogénéiser la matière et augmenter la pression sur le polymère. La rotation de la vis permet d'augmenter la pression sur le polymère afin d'assurer l'écoulement de la matière à travers la grille et la filière à l'avant de l'extrudeuse. Remarque : On introduit souvent dans cette zone une sorte de chicane ou malaxeur pour augmenter l'effet de malaxage et pour assurer une bonne homogénéité de la matière [28,29]



Figure 23 : vis sans fin [29]

Caractéristique de la vis :

- Son Diamètre extérieur.
- Sa longueur active.
- Sa forme ou profil.
- Le rapport L/D (le rapport entre le diamètre de la vis et la longueur active de la vis)
Les extrudeuses les plus courantes ont un rapport L/D de 25 Ce rapport peut aller jusqu'à 35 pour obtenir des pressions et des débits importants d'extrusion.

- Son taux de compression. : Ce taux est défini comme étant le rapport entre le volume du creux entre filets sur un tour en entrée de vis et le volume du creux entre filets sur un tour en sortie de vis.
- Son pas (c'est souvent le diamètre de la vis) [29]

V.1.5 Les différents profils de vis :

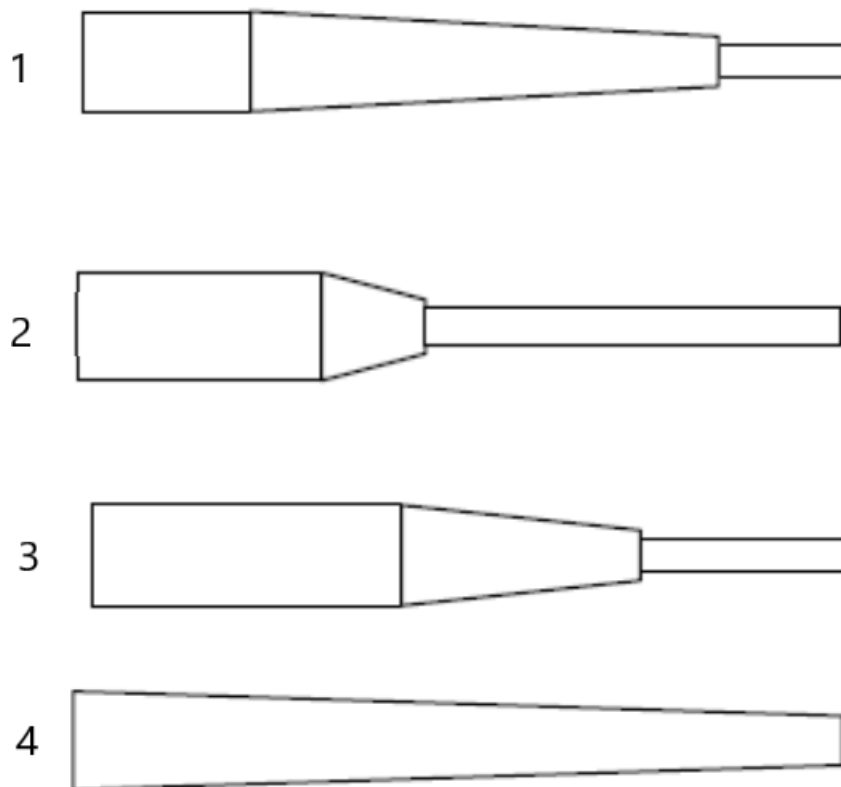


Figure 24: Profils des vis [29]

(1) Amorpha: (PC, PS, PMMA, ABS)

(2) Semi cristallin : (PP, PE, PA, POM, PBT)

(3) Standard

(4) Vis PVC : [29]



Figure 25 : extrudeuses de la SARL Leader Profil (mikrosan)

V.1.6 Exemple de Défaut observé en extrusion :

Présentation : les défauts sont généralement observés après que l'extrudant sort de la filière (condition critique tel que le frottement la température compression sont déplacé ; les défauts suivants sont observés dans des filières cylindriques mais les défauts sont généralement semblables dans tout type de filière.

- **Défaut de surface** : ou communément appeler peau de requin (figure 26 a) ce défaut

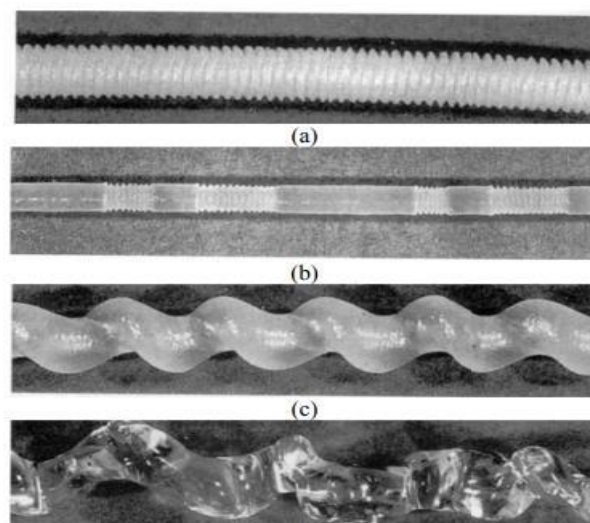


Figure 26 : défauts d'extrusion [28]

est propre aux polymères linéaire. Il se présente sous forme d'un défaut de surface, qui augmente et devient régulier au fur et à mesure que le débit augmente. Son apparition se traduit au départ par une perte de transparence de l'extrudant. Le cas de matière extrudée transparente, dont la surface devient mate. On peut ensuite observer à l'œil nu de petites irrégularités, qui finissent par former des vagues très régulières, de faible période, et perpendiculaires à la direction d'écoulement, donnant à la surface un aspect similaire à des écailles [21, 25]

- **Défaut d'oscillation : figure 26 b** similaire au défaut peau de requin la différence est que le défaut se présente de manière régulière alternant entre surface lisse et la surface comportent ce défaut. [30]
- **Défaut volumique : figure 26 c et d** ce défaut est généralement associé aux polymères ramifiée type pebd polypropylène se présente sous forme régulière hélicoïdale et irrégulière [30]

V.1.7 Production de profilé en pvc :

Après l'alimentation de l'extrudeuse, la matière se déplace à l'intérieur de l'extrudeuse par rotation de la vis, en passant de l'état solide vers l'état liquide. Ce changement d'état est dû au frottement entre la vis + matière + fourreau en plus cause des colliers comportant des résistances thermique qui chauffe le fourreau. Après que la matière est devenue une pâte molle, elle est tamisée puis déplacé vers la filière, celle-ci étant vêtue d'un moule qui donne la forme du profilé. Après avoir donné la forme finale à notre produit, Le déplacement de celui-ci se fait par tirage grâce à la chenille de traction (tireur) qui se situe après le bac de conformation, la chenille tire notre produit pour il soit refroidie dans le bac à eau. Ce refroidissement aide à stabiliser la forme finale de notre produit, le joint et le film plastique de l'entreprise sont assemblés à notre profilé à la fin pour avoir notre produit final.

Un compteur numérique mesure la longueur des barres de notre produit final. Après avoir été mesurée, une scie s'occupe du découpage des barres aux dimensions voulues, Le produit final est prêt à la vente.

Pour une production optimale, une synergie doit se créer entre les trois M (matière, machine, Main-d'œuvre) une bonne matière de qualité supérieure ajoutée à des machines fonctionnelles réviser régulièrement et une bonne coordination et collaboration de la main-d'œuvre.

(Opérateur de machine + technicien de maintenance + manutentionnaire + contrôleur de qualité)

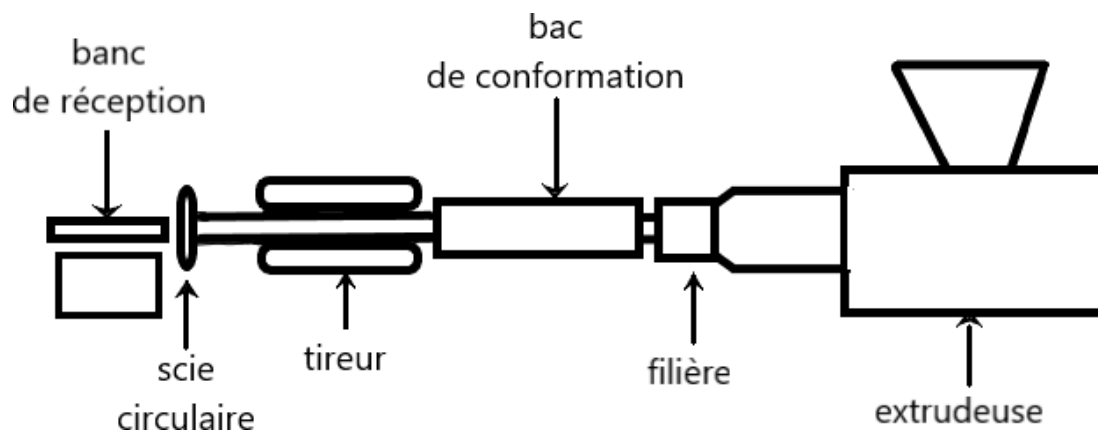


Figure27:schéma d'une ligne d'extrusion .

La figure 27 nous montre la création des profilés en pvc elle se compose de 6 parties essentielles

1. **L'extrudeuse** : elle assure deux fonctions essentielles la plastification du polymère et l'alimentation de la tête d'extrusion, composé d'une ou deux vis et de résistances thermique.
2. **La filière** (tête d'extrusion) : assure la mise en forme de notre polymère extrudé.
3. **Le bac de conformation et de refroidissement** : sa fonction et la conformation c'est la partie qui s'occupe du refroidissement et de la conformation pour stabiliser la géométrie.
4. **Tireur à chenille** : tirage de notre profile (vitesse linière).
5. **Scie circulaire** : sa fonction est le découpage elle détermine le débit de notre profilé (longueur).
6. **Banc de réception** : conditionnement de notre produit [24]

Matières Extrudeuse	Rapport L/D	Taux de compression	Température (entrées) (°C)	Température (Tête) (°C)	Température (Filière) (°C)	Remarques
PVC souple Mono vis	20 à 30	2	110 - 130	130 - 150	150 - 170	Granulés
PVC rigide Double vis	15 à 20	2,5	120 - 140	140 - 160	160 - 190	Mélange sec

Tableau04. Propriétés du PVC destiné à l'extrusion

V. Application du PVC:

Il est difficile de répertorier l'ensemble des applications du PVC. Ce matériau peut être utilisé pour créer des articles à la fois rigides, flexibles et souples, et le tableau 05 illustre les diverses utilisations du PVC en fonction de sa forme rigide ou souple, tout en fournissant des exemples concrets pour chaque application [30]

Application	PVC rigide	PVC souple
Construction	Fenêtres, portes, tuyaux, panneaux de façade.	Revêtements de sol, membranes d'étanchéité.
Emballage	Peu utilisé, principalement pour des produits rigides.	Films, sachets, emballages flexibles et transparents.
Câblage électrique	Conduits et boîtiers rigides.	Gainages de câbles flexibles, protection contre l'humidité.
Mobilier	Meubles rigides, comme les armoires et étagères.	Housses, canapés et tissus d'ameublement.
Automobile	Tableaux de bord, pièces structurelles.	Garnitures intérieures, revêtements de sièges.
Applications médicales	Équipements spécifiques, comme les tubes rigides.	Tubes, sacs et dispositifs médicaux flexibles.
Signalétique	Panneaux rigides et affichages extérieurs.	Bannières et affichages souples.

Tableau05. Diverses application du PVC rigide et souple.

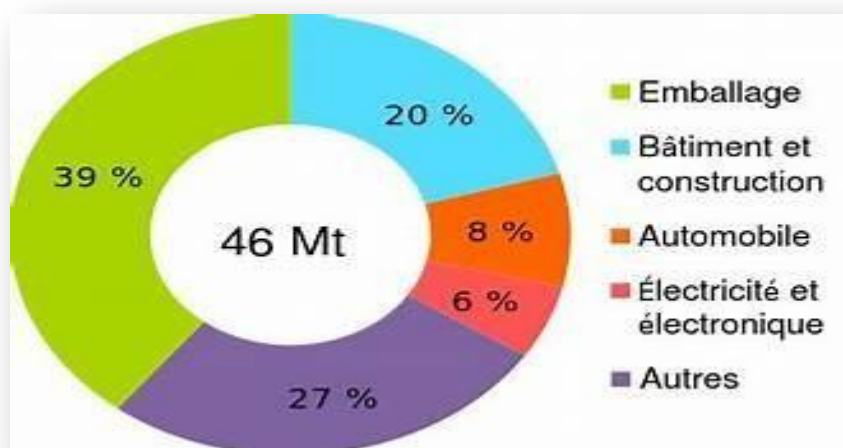


Figure 28. Répartition de diverse application du PVC. [27]

V.1. PVC utilisé pour la confection de la porte-fenêtre:

Le marché mondial du PVC connaît une croissance soutenue, portée par une demande accrue dans divers secteurs tels que la construction, l'emballage et l'automobile. Cette expansion est particulièrement visible dans l'utilisation du PVC rigide, qui est devenu un matériau de choix pour la fabrication de porte-fenêtre. En effet, ce type de PVC offre une excellente durabilité, résistant aux chocs, à la corrosion et aux intempéries, ce qui le rend idéal pour une utilisation extérieure. De plus, il présente de très bonnes propriétés d'isolation thermique et acoustique, contribuant à l'efficacité énergétique des maisons et à un meilleur confort intérieur. Le PVC rigide nécessite également peu d'entretien, car il n'exige ni peinture ni traitement régulier, un simple nettoyage à l'eau étant suffisant pour préserver son apparence. En outre, il est disponible dans une large gamme de couleurs et de finitions, permettant une personnalisation pour s'adapter à différents styles architecturaux. Ainsi, son coût abordable par rapport à d'autres matériaux comme le bois ou l'aluminium en fait une option attrayante pour de nombreux consommateurs. Ces avantages combinés font du PVC rigide un choix privilégié pour la porte-fenêtre moderne.

VI. Evolution et Perspectives du Marché du PVC :

Au cours des dernières années, le marché du PVC a affiché une croissance impressionnante, avec un taux de croissance annuel composé (TCAC) d'environ 4 à 5 % entre 2018 et 2023. Cette tendance devrait se poursuivre avec des prévisions indiquant que le marché mondial du

PVC pourrait atteindre environ 60 milliards de dollars d'ici 2025. Cette croissance est principalement alimentée par la demande accrue dans les secteurs de la construction et de l'emballage, ainsi que par les innovations dans les formulations de PVC. [23]

Le marché du PVC en Algérie a connu une croissance significative aussi, avec une estimation de la demande atteignant environ 500 000 tonnes par an d'ici 2025. Cette augmentation est principalement due à l'urbanisation croissante, aux projets d'infrastructure et à la demande accrue dans le secteur de la construction.

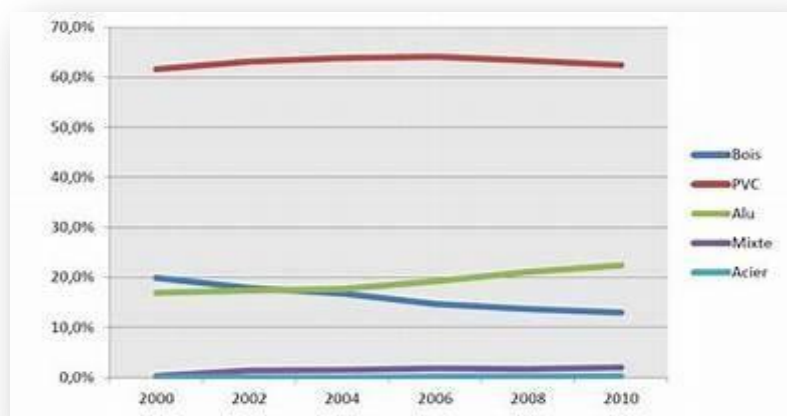


Figure 29.L'écart significatif du taux d'utilisation du PVC. [27]

VII. Impact du PVC:

VII.1. Sur l'environnement:

- La fabrication du PVC nécessite l'extraction et le traitement de matières premières, notamment le pétrole et le sel. Ce processus peut entraîner des émissions de gaz à effet de serre et d'autres polluants dans l'air, contribuant à la pollution atmosphérique et aux changements climatiques.
- Concernant la toxicité des additifs, Le PVC contient souvent des additifs comme des plastifiants, des stabilisants et des pigments dont certains peuvent être toxiques. Des substances telles que les phtalates et le plomb peuvent être libérées dans l'environnement, affectant la faune et la flore.
- Le PVC est difficile à recycler en raison de la diversité de ses formulations. Lorsqu'il est mis au rebut, il peut contribuer à la pollution des sols et des eaux. L'incinération du

PVC peut également libérer des dioxines et d'autres polluants qui sont des substances chimiques hautement toxiques.

VII.2. Sur la santé humaine:

- Le PVC est fabriqué à partir de monomères du vinyle chloré qui est un cancérogène connu. L'exposition à ce monomère peut se produire lors de la production du traitement ou de l'élimination du PVC, augmentant les risques de cancer plus souvent le cancer du foie .
- Les plastifiants, en particulier les phtalates qui sont souvent ajoutés au PVC pour améliorer sa flexibilité. Ces substances sont suspectées de perturber le système endocrinien, ce qui peut entraîner des effets néfastes sur la reproduction, le développement et la santé hormonale.
- Certains stabilisants utilisés dans le PVC, tels que les composés de plomb et de cadmium, peuvent être toxiques. L'exposition à ces métaux lourds peut provoquer des effets néfastes sur le système nerveux, les reins et d'autres organes.

Chapitre II
Matériau et techniques
Expérimentales

Introduction :

Notre recherche expérimentale est basée sur l'étude, la caractérisation et le comportement mécanique d'un matériau thermoplastique à savoir un profilé de polychlorure de vinyle rigide extrudée de la SARL LEADER PROFIL afin d'obtenir un produit de qualité en vue d'une application dans la menuiserie en PVC. Dans ce travail, nous avons choisi de procéder d'une manière expérimentale dans le choix des paramètres matériaux (constituant, pourcentages, ...) afin de constituer une base de données expérimentale pour l'entreprise. Néanmoins, il existe des méthodes permettant d'identifier et sélectionner des paramètres [31,32]

I. Échantillons utilisés :

L'échantillon utilisé pour la caractérisation de notre profilé est un modèle ouvrant fenêtre en polychlorure de vinyle avec une géométrie et des dimensions conçus pour remplir sa fonction en menuiserie en PVC.

Les échantillons ont été réalisés en prenant en compte une différence de taux de charges et une différence de température de fusion lors de l'extrusion.

II. Préparation des formules pour les mélanges :

Les mélanges sont donc préparés dans un turbo-mixeur auquel on programme deux formules qui sont réalisées l'une après l'autre, la première contenant 40% et la deuxième 50% de Carbonate de Calcium (Calcite) par rapport aux taux de PVC et les additifs de transformation à savoir le stabilisant thermique, plastifiant, lubrifiant, l'antichoc, pigment et colorant.



Figure 30. Polychlorure de vinyle utilisé par la SARL LEADER PROFIL.

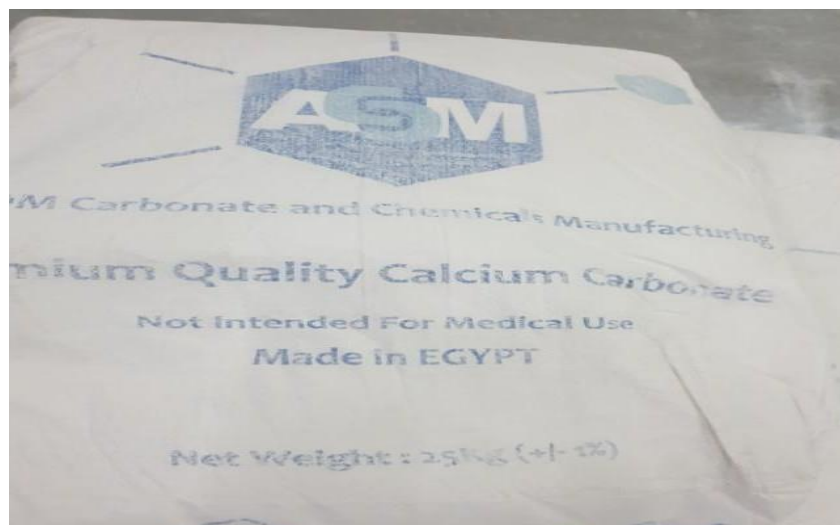


Figure31. Carbonate de Calcium (calcite) utilisé par la SARL LEADER PROFIL.

On procède alors à la validation de la formule par commande à travers l'interface de commande présentée dans la figure 32 interface de la commande turbo mixeur.

La formule est ensuite mélangée dans le turbo mixeur puis refroidie dans un refroidisseur à température ambiante, une fois le mélange refroidi, il est donc prêt pour le procédé d'extrusion et on recommence les mêmes étapes pour la deuxième formule.



Figure 32. Interface de commande du turbo mixeur de la SARL LEADER PROFIL.



Figure 33. Mélangeur turbo mixeur de la SARL LEADER PROFIL.



Figure 34. Refroidisseur turbo mixeur de la SARL LEADER PROFIL.

III. Extrusion des échantillons :

On règle la machine sur les températures de fusion souhaitées au besoin des essais, puis on procède à l'extrusion de nos échantillons en suivant le procédé d'extrusion qui va du déversement de la matière sur le silo d'alimentation jusqu'à son arrivée à la chambre de découpe où on programme l'interface de commande pour faire la découpe des échantillons de

IV. Essai de compression :

L'essai de compression sert à appliquer une charge de compression sur un échantillon reposant sur une surface rigide, cette sollicitation provoque un écrasement (un raccourcissement de l'éprouvette). On mesure simultanément les contraintes et les déformations au cours de l'essai.

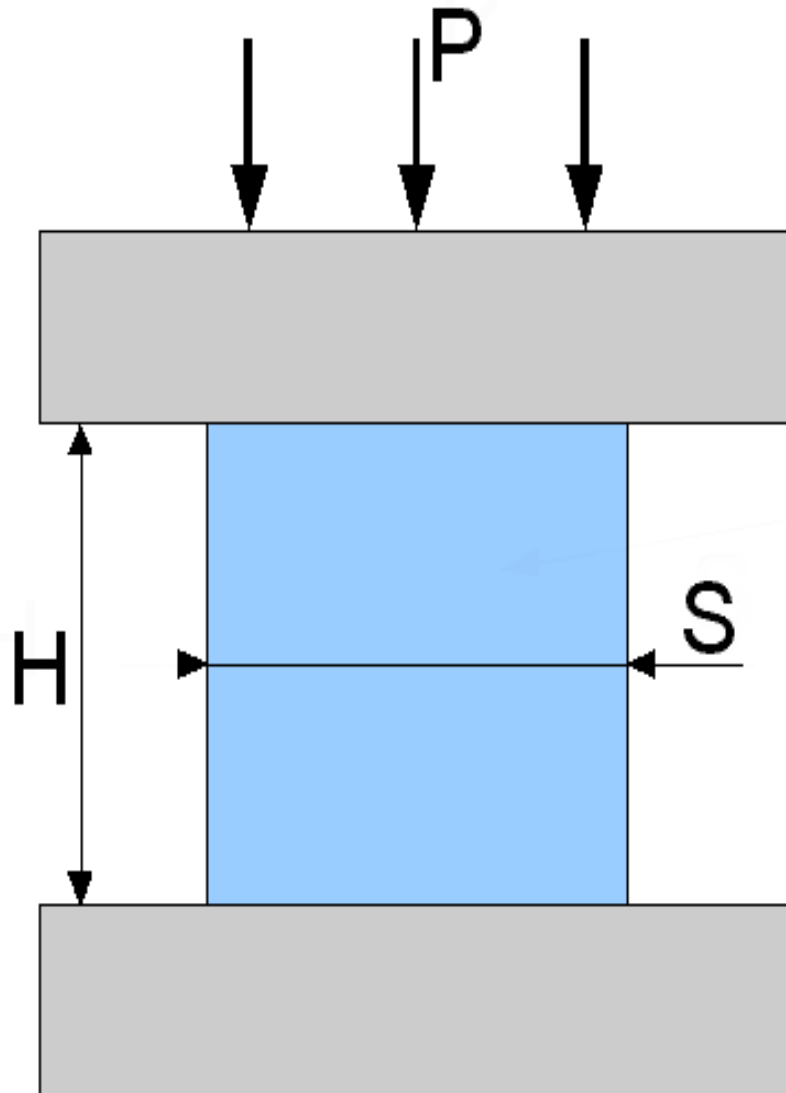


Figure37. Principe de l'essai de compression.

Longueur l	Distance entre appuis L	Largeur B	Epaisseur b
360 mm	320 mm	77 mm	58 mm

Tableau06.Dimensions des échantillons découpés.



Figure 38.Essai de compression sur le profilé ouvrant fenêtre.

V. Essai de flexion trois (03) points :

L'essai de flexion trois points consiste à placer une éprouvette allongée (généralement sous forme de poutre) sur deux appuis fixe et à appliquer une charge au centre de notre

éprouvette, cela nous permet ensuite de mesurer la déformation et la résistance d'un matériau lorsque celui-ci est soumis à une charge constante.



Figure 39. Essai de flexion.

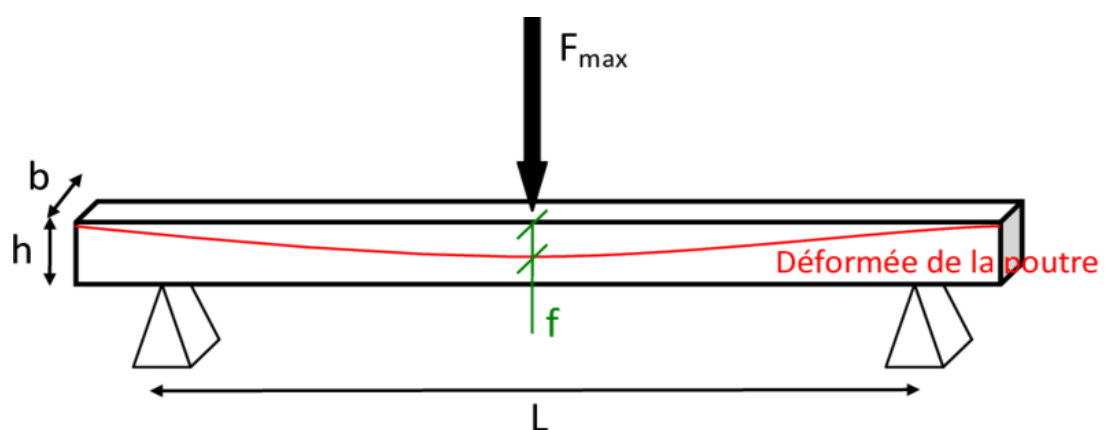


Figure 40. Essai de flexion trois (3) points.

Longueur l	Distance entre appuis L	Largeur B	Épaisseur b
360 mm	320 mm	77 mm	58 mm

Tableau06.Dimensions des échantillons découpés.

VI. Essai de dureté :

VI.1. Définition :

L'essai de dureté est la résistance d'un Corps a la pénétration d'un autre Corps plus dur, la dureté technique est une grandeur mécanique permettant de décrire un matériau ou un état d'un matériau. [22], Ou plutôt la résistance qu'oppose la surface d'un échantillon à la pénétration d'un Corps plus dur [23].La dureté est souvent quantifiée par un instrument nommé « Duromètre ».



Figure 41.Duromètre shore D de la SARL LEADER PROFIL.

VI.2. Dureté shore :

La mesure de dureté shore est une technique utilisée pour évaluer la dureté des matériaux tel que le plastique, les élastomères, les caoutchouc, contrairement aux autres duretés (Rockwell ou brinell) conçues pour les métaux et les matériaux plus durs, l'essai de dureté shore mesure spécifiquement la résistance des matériaux moins dure (flexibles), les duretés shore sont des techniques de mesure polyvalentes, elles peuvent mesurer des duretés des matériaux très mous tel que les élastomères, les thermoplastique et les caoutchoucs allant jusqu'aux matériaux les plus durs comme les thermoplastique et les thermodurcissable, les deux échelles les plus courantes et les plus utilisées dans la dureté shore sont **shore a** et **shore d**.

- Shore a (matériaux mous).
- Shore d (matériaux durs).

Les duretés sont mesurées conformément aux normes **ISO 48-4** et **ASTM d2240**.

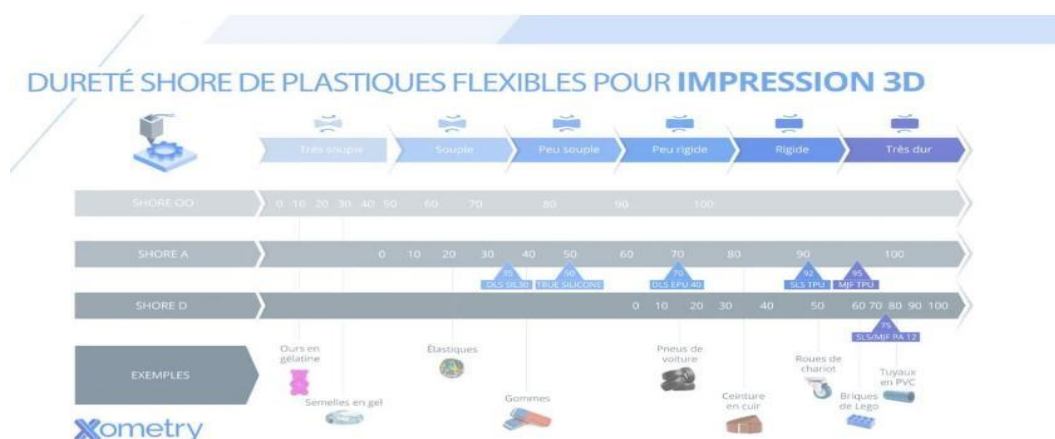


Figure 42. Différents paliers de dureté shore.

Il existe plusieurs paliers pour les tests de dureté shore passant par les matériaux très souples arrivant au matériau durs.

VI.3. Mesure de la dureté shore :

Placer l'échantillon sur le duromètre sur une surface plane et rigide puis actionner le levier de pression, attendre un moment que l'aiguille du duromètre se stabilise puis saisir le résultat.

L'épaisseur de l'échantillon doit être d'au moins 6 mm à température ambiante.

Le test doit se faire au moins cinq (05) fois pour chaque échantillon dans des zones différentes sur la surface.



Figure 43.pénétrateur shore D.



Figure 44.Test de dureté sur la surface de notre échantillon.

VI.4. Colorimétrie :

La couleur est un des paramètres essentiels pour garantir l'esthétique des profilés utilisés en menuiserie de PVC, ainsi on utilise un appareil de colorimétrie pour mesurer la couleur en comptant sur l'espace couleur « Lab » qui est un des espaces universels actuels de mesure de la couleur des objets, largement utilisé dans la plupart des domaines et notamment pour les profilés en PVC. Lab peut être utilisé pour représenter la couleur réfléchie ou transmise de l'échantillon physique et cette espace couleur est conçue pour se rapprocher de la vision humaine et on la caractérise à travers un appareil de colorimétrie qui nous confère trois composant. [26]

- **La composante L^*** est la clarté(ou la luminance des surfaces), qui va de 0(noir) à 100(blanc).
- **La composante a^*** représente une gamme de 600 niveau de couleurs sur un axe partant du vert à rouge.
- **La composante b^*** représente une autre gamme de 600 niveau de couleurs sur un axe partant du bleu à jaune.

Contrairement aux valeurs XYZ, les valeurs $L^*a^*b^*$ ne sont pas des nombres entiers positifs. Les valeurs de a^* et de b^* sont soit négatives, soit positives. Ce sont des valeurs relatives.[27]

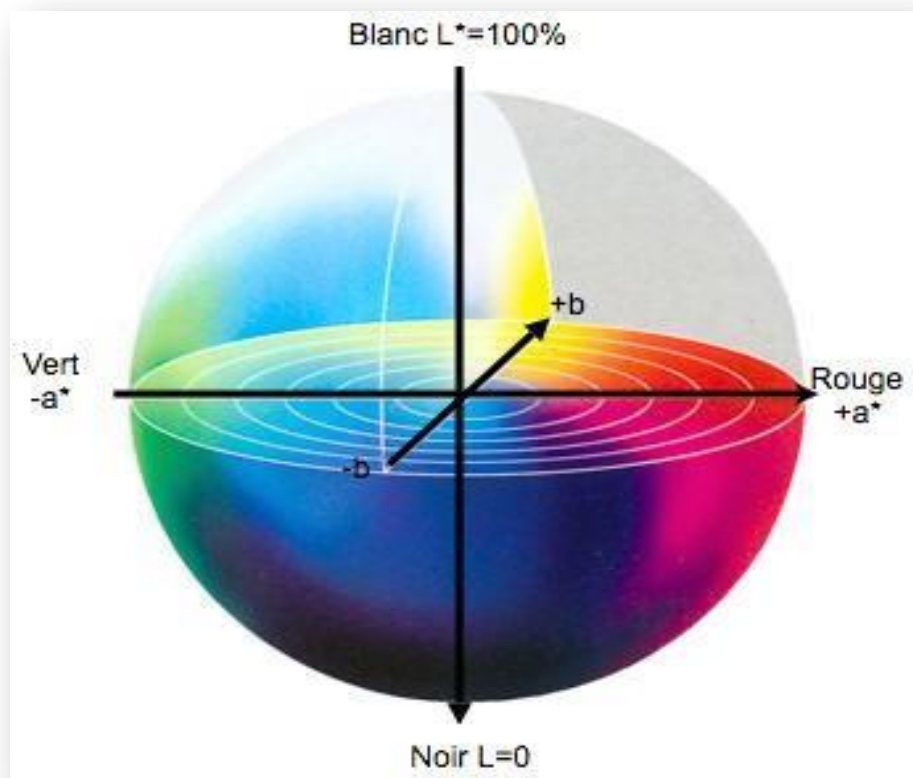


Figure 45. Représentations de l'espace Lab.

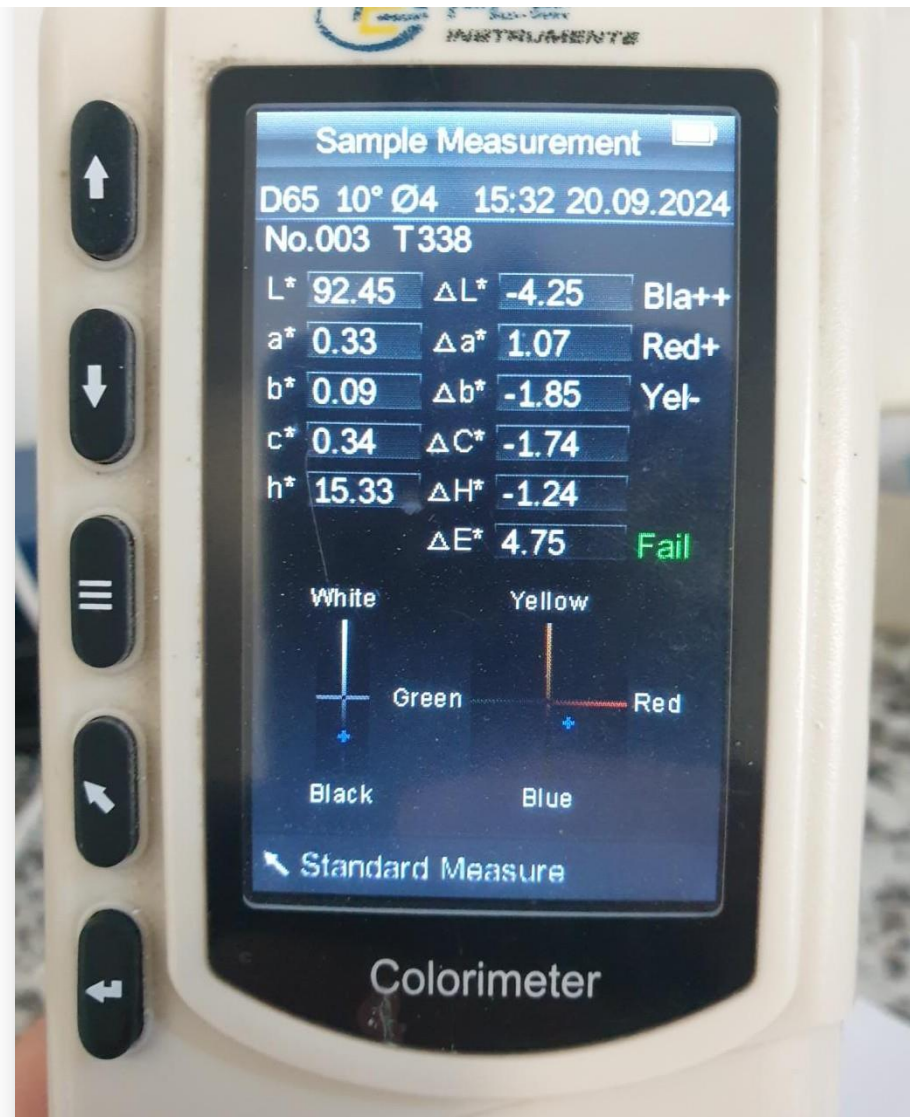


Figure 46.Interface du colorimètre de la SARL LEADER PROFIL.

Chapitre III

Résultats et interprétations

Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats obtenus lors des essais de caractérisation et nous concentrer sur l'interprétation de ces derniers.

I- Résultats essai de flexion 3-point

Nous avons réalisé une caractérisation de notre matériau en appliquant une charge de flexion à trois points sur nos échantillons de profilé extrudé respectivement à 50% et 40% de charge avec deux variations de température (187°C, 195°C)

Longueur l	Distance entre appuis L	Largeur B	Epaisseur b
360 mm	320 mm	77 mm	58 mm

Tableau 8 dimensions de l'échantillon utilisé pour la flexion

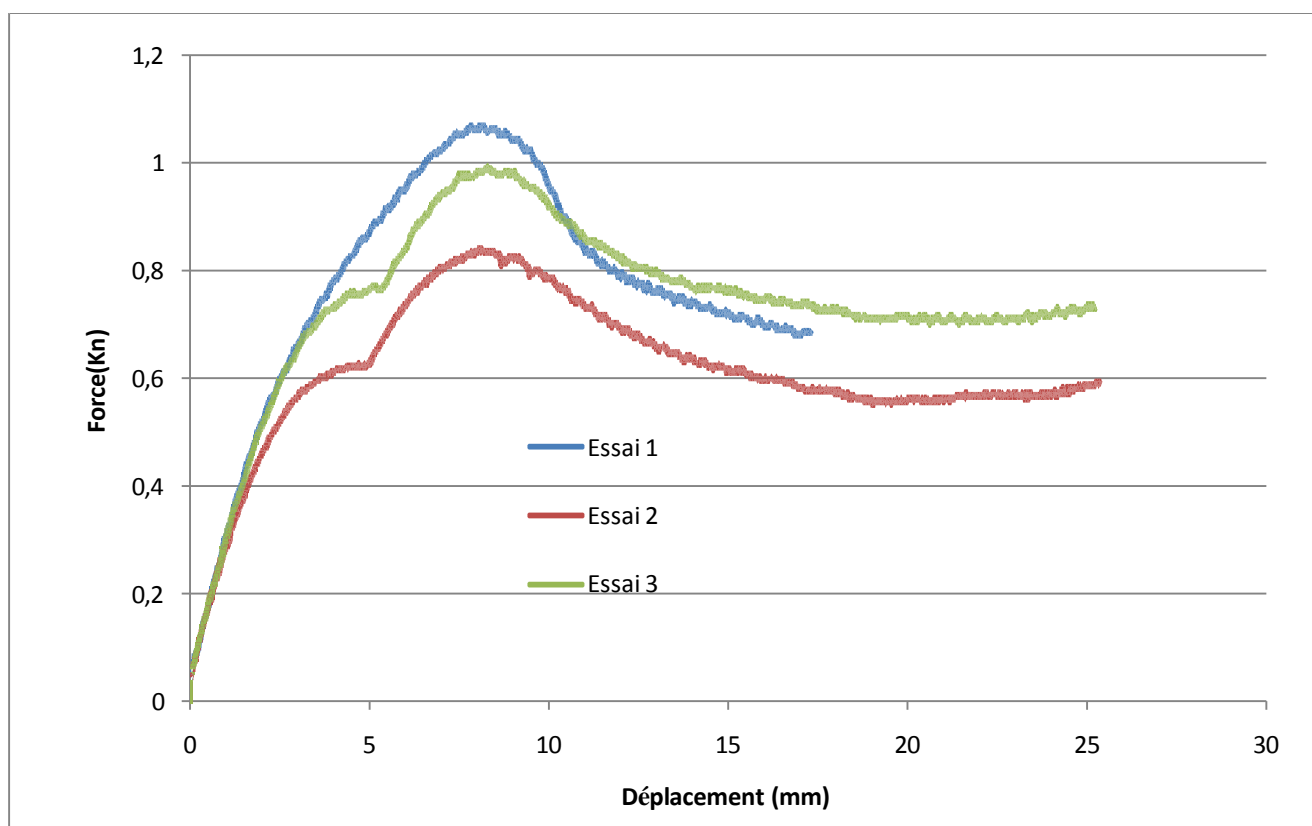


Figure 47 : Évolution de la force en fonction du déplacement pour l'échantillon à 40% de charge extrudé à 187°C température de fusion

Après avoir effectué 3 essais avec 40% de charge et 187 °C de température de fusion On observe sur la figure 3 courbe représentant les 3 essais on a pris comme référence l'essai 3 les courbes comportent deux zones, une zone linéaire avec une flèche max de = (0,994 KN) son déplacement $u(x) = 8,2823$ qui correspond à la réversibilité de notre profilé, une perturbation puis reprise de la force dans la courbe de l'essai 2 et 3 et une deuxième zone non linéaire qui correspond à la non réversibilité de notre profilé, les perturbations peuvent être interprétées par la reprise de charge ou la non plastification de la zone étant donné que l'essai a été effectué sur le profilé.



Figure 48 photographie du profilé à 40% de charge et 187°C après essai de flexion découpé au point d'application de la charge

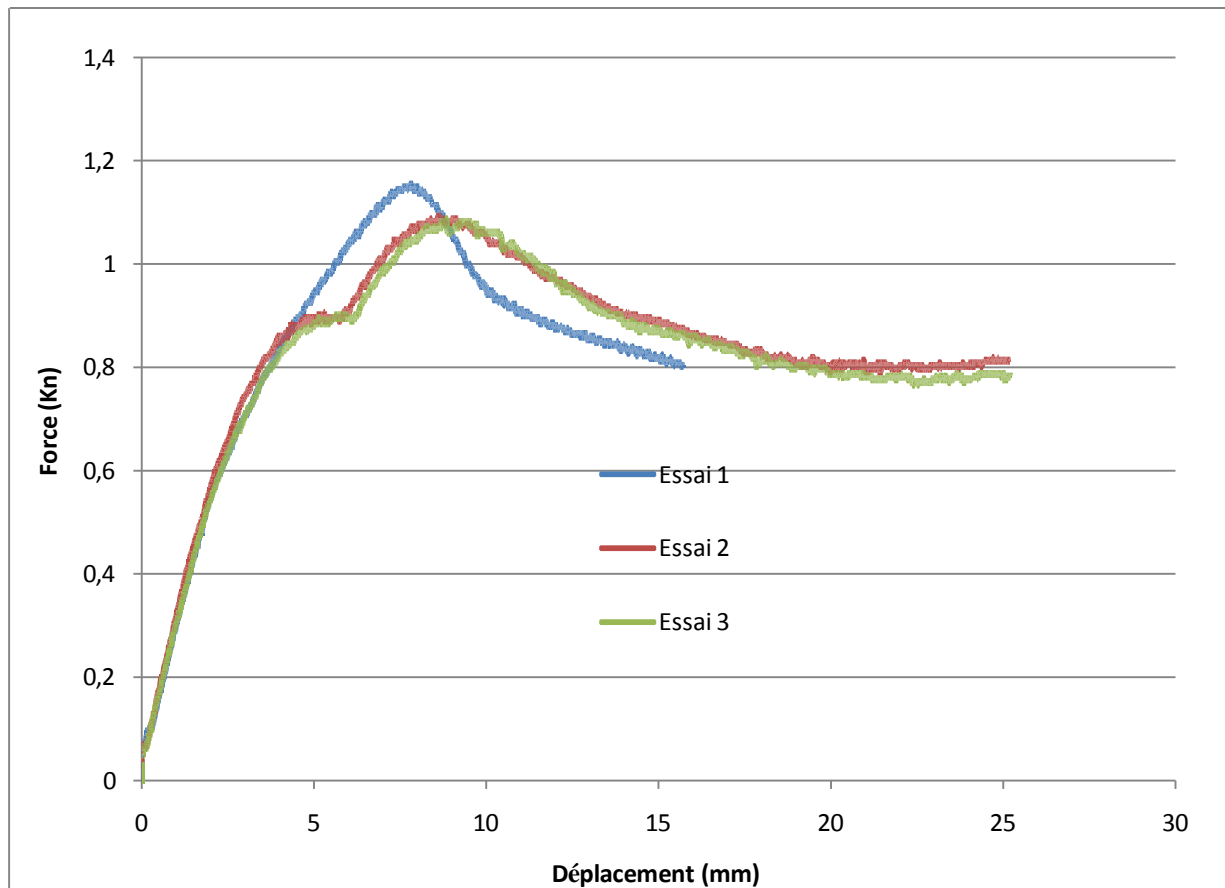


Figure 49 : Évolution de la force en fonction du déplacement pour l'échantillon à 40% de charge extrudé à 195°C température de fusion.

Après avoir effectué nos 3 essais avec 40% de charge et 195°C de température On observe sur la figure 49 , 3 courbe représentant les 3 essais on a pris comme référence l'essai 3 les courbes comportent deux zones , les résultats sont similaire à la figure 48 , une première zone linéaire avec une flèche max (1,082KN) avec un déplacement $u(x) = (8,74 \text{ mm})$, une deuxième zone non linéaire qui correspond à la non réversibilité de notre essai (la forme original ne eux plus être reprise) les perturbations peuvent être interprété par la reprise de charge ou la non plastification de la zone étant donné que l'essai a été effectué sur le profilé



Figure 50 photographie du profilé à 40% de charge et 195°C après essai de flexion découpé au point d'application de la charge

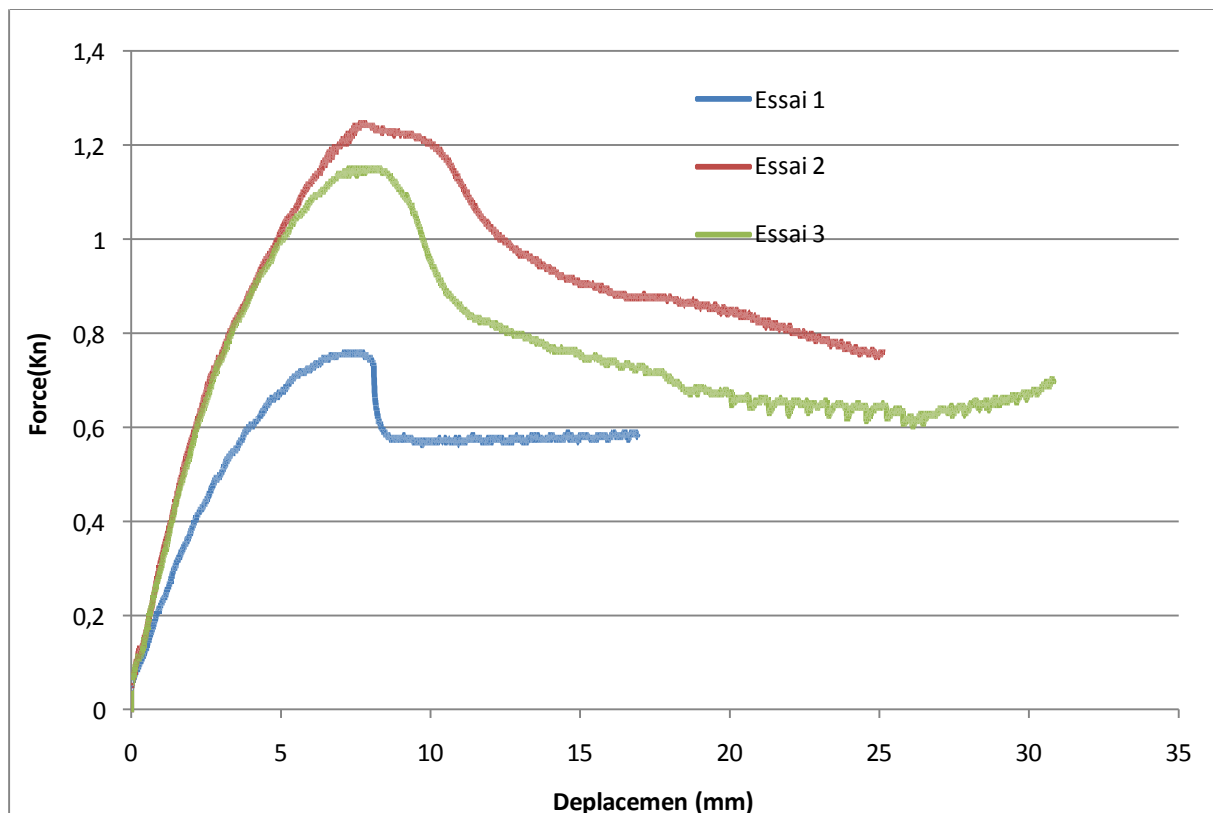


figure 51 : Évolution de la force en fonction du déplacement pour l'échantillon à 50% de charge extrudé à 187°C température de fusion.

Après avoir effectué 3 essais avec 50% de charge et 187°C de température On observe sur la figure 3 courbe représentant les 3 essais on remarque que les courbes comportent deux zones réversible et non réversible, on a pris comme référence l'essai 3 les courbes comportent deux zones, une première zone linéaire avec une flèche max (1,1516 KN) avec un déplacement $u(x) = (7,5548 \text{ mm})$, et une deuxième zone non linéaire qui correspond à la zone non réversible.



Figure 52.photographie du profilé à 50% de charge et 187°C après essai de flexion découpé au point d'application de la charge

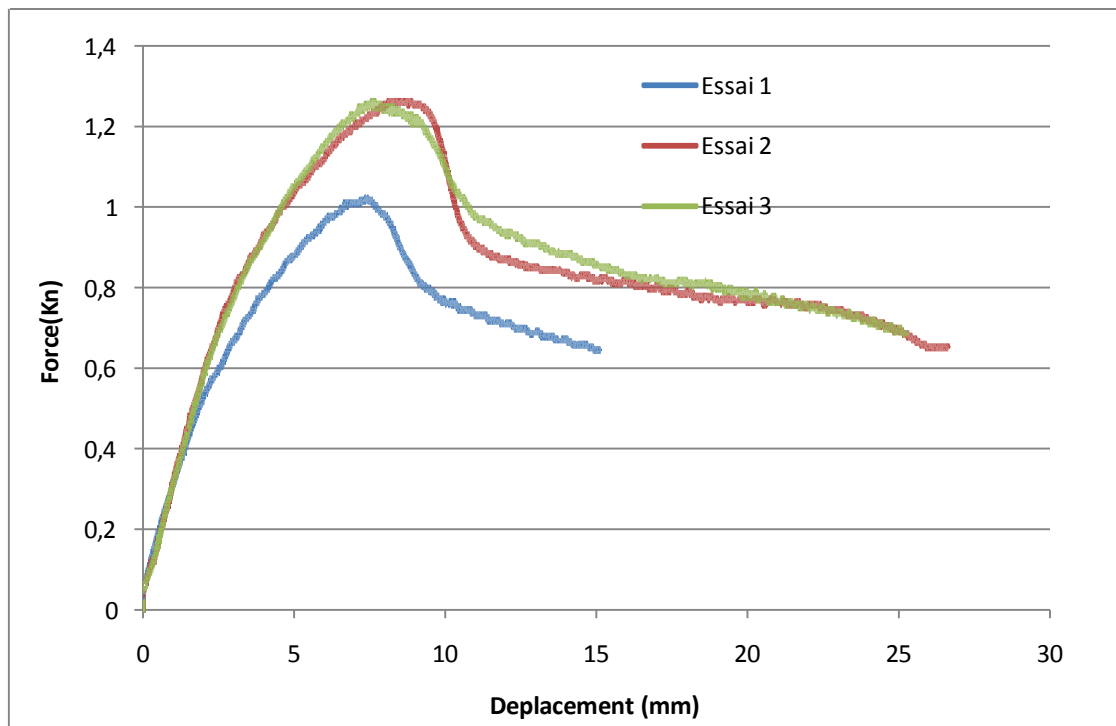


figure 53 . Évolution de la force en fonction du déplacement pour l'échantillon a 50% de charge extrudé à 195°C température de fusion.

Après avoir effectué nos essais sur notre échantillon à 50% de charge et 195°C de température On observe sur la figure 3 courbe représentant les 3 essais avec des courbes comportant deux zones à pris comme référence l'essai 3 les courbes comportent deux zones , une zone linéaire avec une flèche max de = (1,2426 KN) son déplacement $u(x) = (8,5731 \text{ mm})$ qui correspond à la réversibilité de notre profilé et une deuxième zone linéaire qui correspond à la non réversibilité de notre profilé. On remarque une similitude avec le comportement d'une éprouvette normalisée d'un polymère avec un seuil d'écoulement haut et bas.

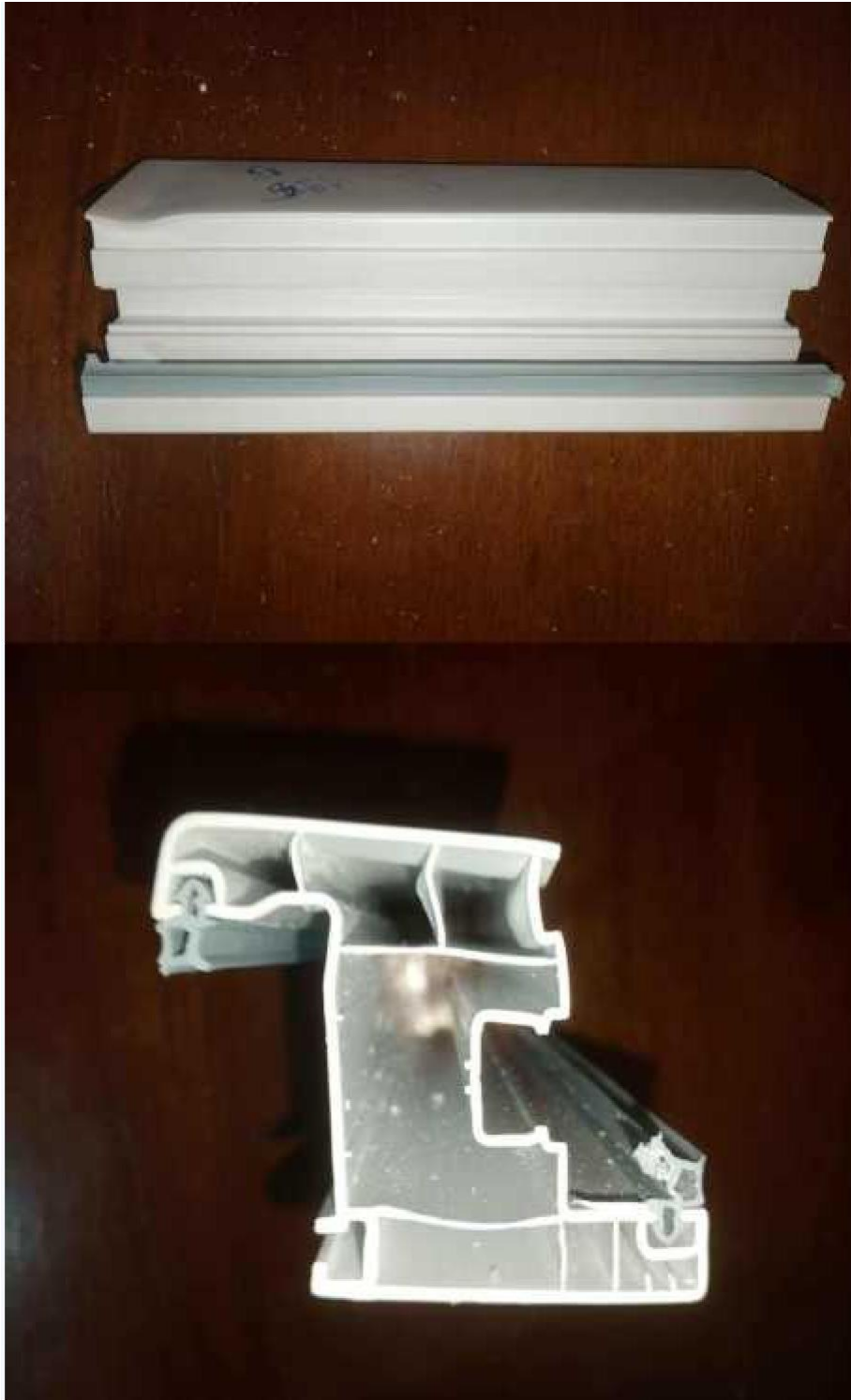


Figure 54 photographie du profilé à 50% de charge et 195°C après essai de flexion découpé au point d'application de la charge

Après la première zone, la déformation est permanente c'est pour cela que l'on s'est concentré sur celle-ci pour interpréter les valeurs

Taux de charge (%)	Force max (KN)	Déplacement U(x) (mm)
40%	0,994	8,2823
50%	1,1516	7,5548

Tableau 09 force max et son déplacement de profilé extrudé à $t= 187\text{ }^{\circ}\text{C}$ avec variation de taux de charge essai 3

Taux de charge (%)	Force max (KN)	Déplacement U(x) (mm)
40%	1,082	8,74
50%	1,2426	8,5731

Tableau 10 force maximal et son déplacement de profile extruder a $t= 195^{\circ}\text{C}$ avec variation de taux de charge essai 3

Température	Force max (KN)	Déplacement U(x) (mm)
187°C	0,994	8,2823
195°C	1,087	8,74

Tableau 11 force maximal et son déplacement à 40% de charge extruder a 187°C et195°C

Température	Force max (KN)	Déplacement U(x) (mm)
187°C	1,1516	7,5548
195°C	1,2426	8,5731

Tableau 12 force maximal et son déplacement à 50% de charge extruder a 187°C et 195°C

D'après les figures et le tableau Les valeurs de force et déplacement on était extrait de l'essai 2 car on observe une similitude de comportement avec l'essai 3 On a pris la première zone car après la première zone le profile se dégrade et on observe avec l'essai de flexion a 3 point une augmentation de la flèche maximale avec l'augmentation de taux de charge.

On augmentant la température, la flèche augmente et le déplacement augmente aussi ainsi on observe un adoucissement de notre profilé. L'augmentation de la température rend le matériau moins rigide

II- Résultats essai de compression

Nous avons réalisé une caractérisation de notre matériau en appliquant une charge de compression sur nos échantillons de profilé extrudé respectivement à 50% et 40% de charge avec deux variations de température (187°C et 195°C)

Longueur l	Distance entre appuis L	Largeur B	Épaisseur b
360 mm	320 mm	77 mm	58 mm

Tableau 13 dimensions échantillon utilisé pour l'essai de compression

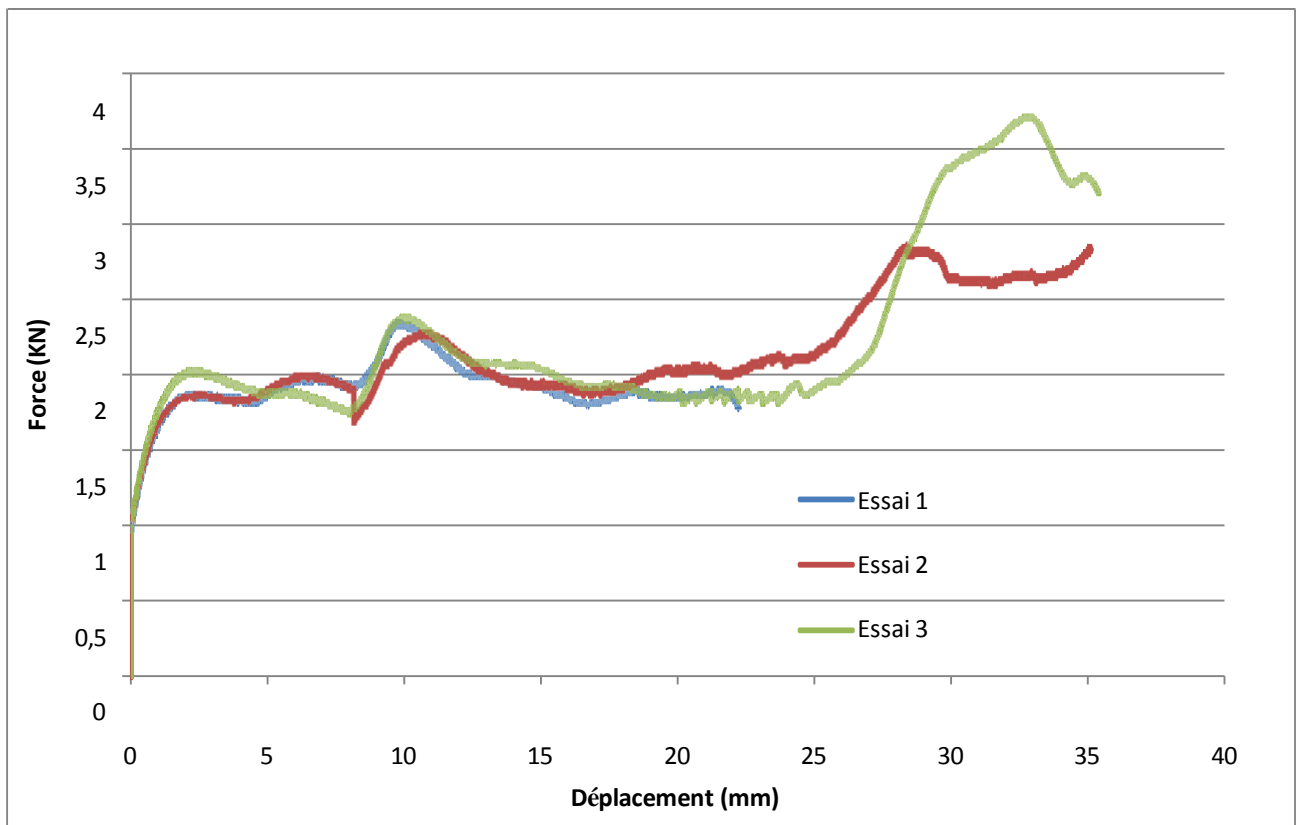


Figure 55 Évolution de la force en fonction du déplacement pour l'échantillon à 40% de charge extrudé à 187°C température de fusion

Après avoir effectué nos essais avec un autre échantillon de 40% de charge et 187°C de température d'extrusion, on observe sur la figure 3 une courbe de compression représentant les 3 essais avec des courbes comportant deux zones, une zone linéaire avec une compression maximale de $(2,0018 \text{ KN})$ et son déplacement $u(x) = (1,9720 \text{ mm})$ qui correspond à la réversibilité de notre profilé et une deuxième zone non linéaire qui correspond à la non réversibilité de notre profilé. On remarque la présence de beaucoup d'instabilité dans la deuxième zone, ce qui est peut-être dû à la reprise de charge.



Figure 56 photographie du profilé à 40% de charge et 187°C après essai de compression
Découpé au point d'application de la charge

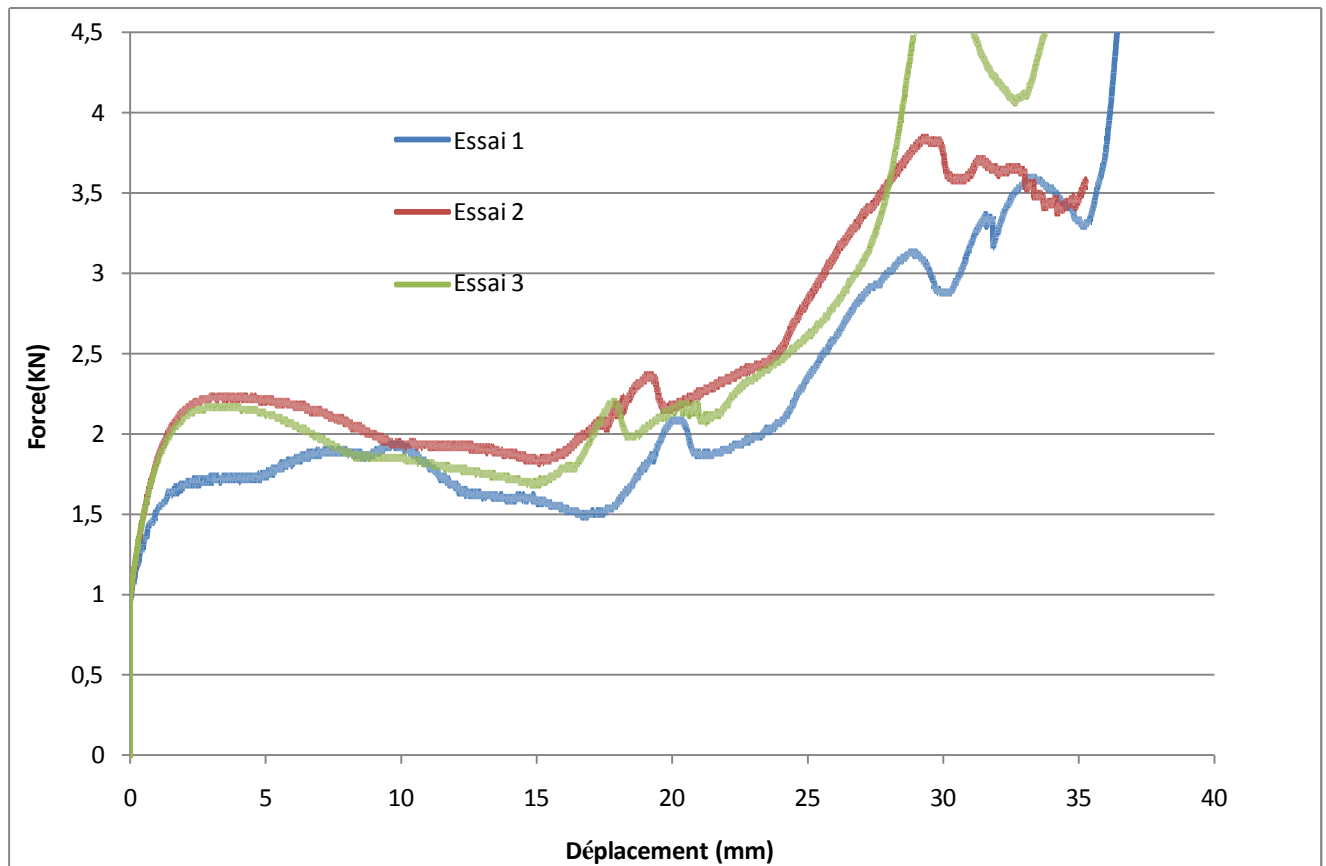


Figure 57 Évolution de la force en fonction du déplacement pour l'échantillon à 40% de charge extrudé à 195°C température de fusion

Après avoir effectué nos 3 essais sur un échantillon qui est composé de 40% de charge et à 195°C de température d'extrusion, on observe sur la figure 3 une courbe de compression représentant les 3 essais. On remarque que chaque courbe comporte deux zones, avec une zone linéaire de compression max de $(2,1153 \text{ KN})$ et son déplacement $u(x) = (1,9911 \text{ mm})$ qui correspond à la force et au déplacement max de la zone réversible de notre profilé. Puis l'arrivée de la deuxième zone non linéaire qui correspond à la non réversibilité de notre profilé.



Figure 58 photographie du profilé a 40% de charge et 195°C après essai de compression découpé au point d'application de la charge

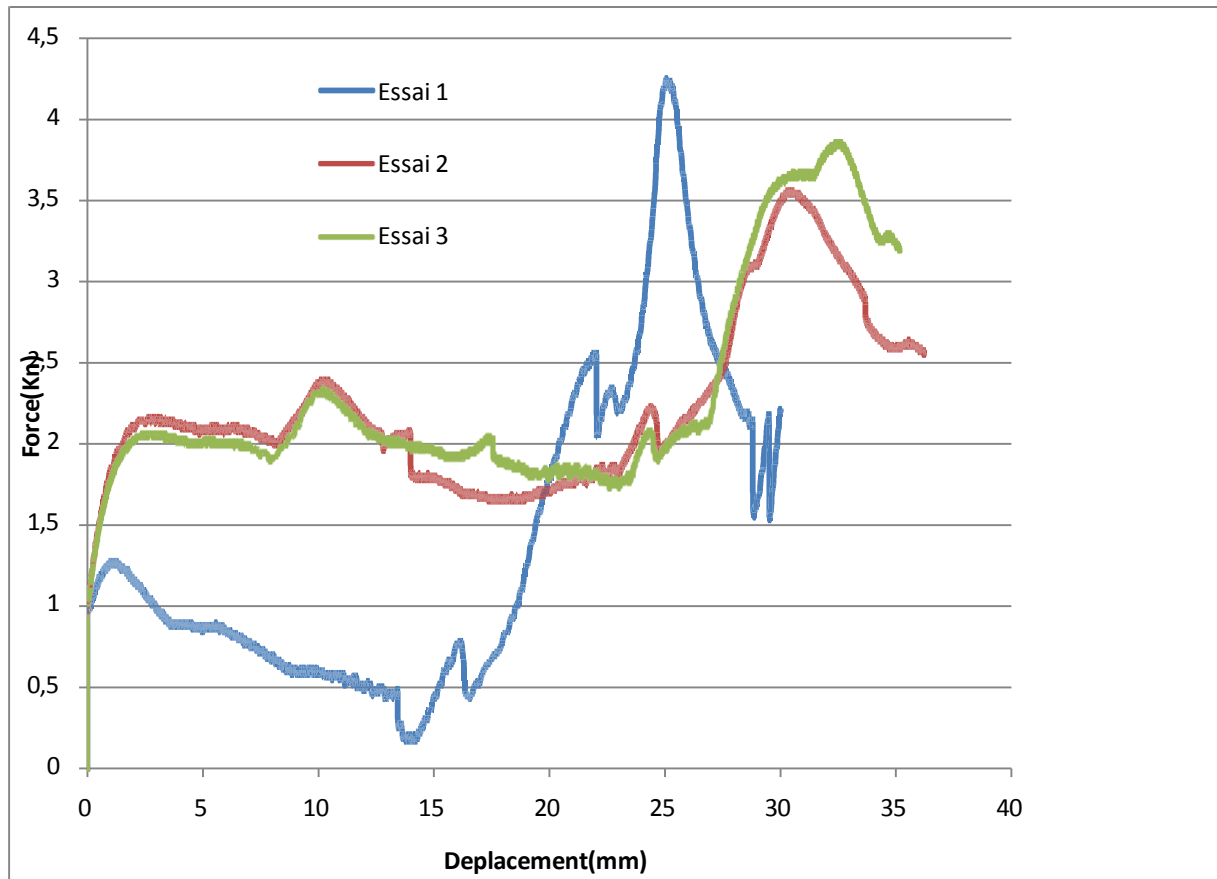


Figure 59. Évolution de la force en fonction du déplacement pour l'échantillon à 50% de charge extrudé à 187°C température de fusion

les trois courbes ci-dessus représentent nos 3 essais sur des échantillons à 50% de charge et 187°C de température d'extrusion. On observe deux zones, une zone linéaire de compression max de $= (2,0154 \text{ Kn})$ et son déplacement $u(x) = (2,0337 \text{ mm})$ qui correspond à la réversibilité de notre profilé et une deuxième zone non linéaire qui correspond à la non réversibilité de notre profilé. On remarque dans la deuxième zone cela est peut-être dû à la concentration de charge donc création d'une résistance par le profilé. Les perturbations peuvent être interprétées par la reprise de charge ou le profilé essai de reprendre sa forme initiale. L'augmentation de la force dans la deuxième zone est due à la géométrie de notre profilé.



Figure 60 photographie du profilé a 50% de charge et 187°C après essai de compression découpé au point d'application de la charge

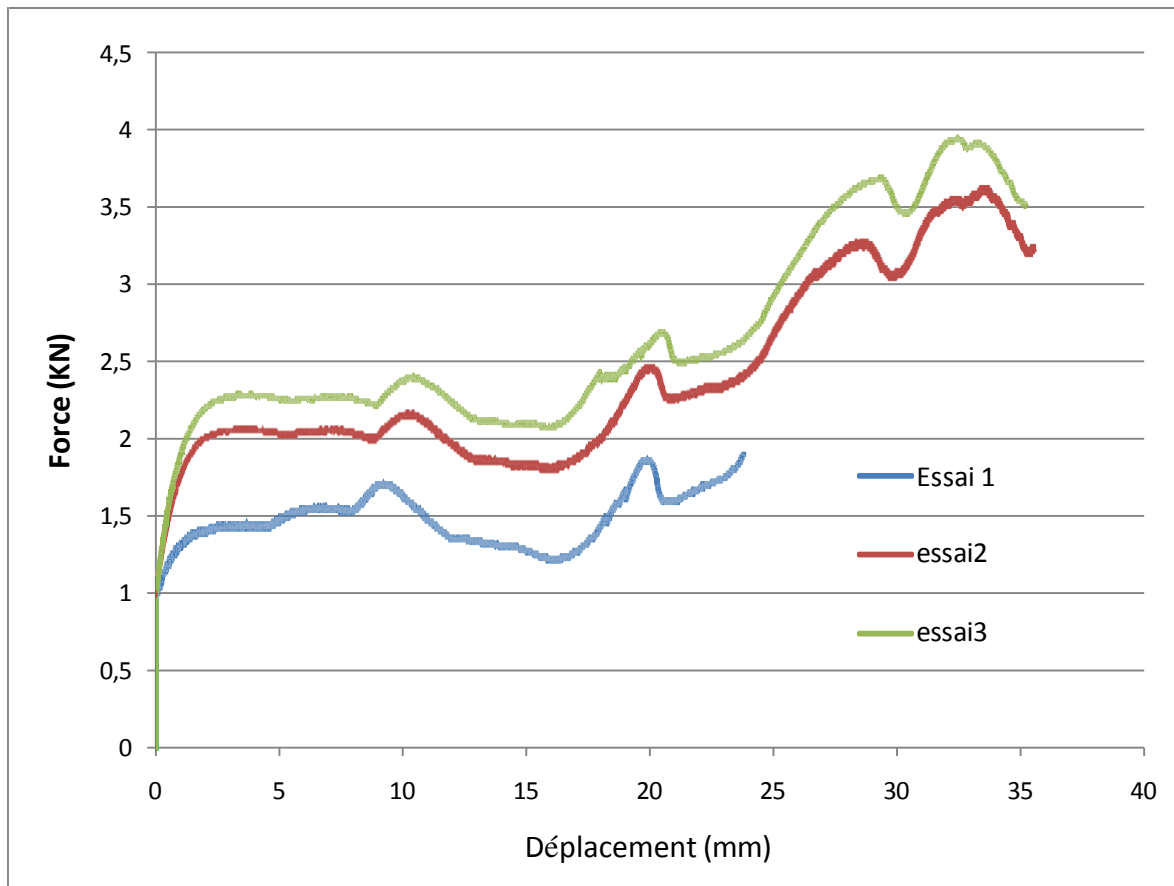


Figure 61. Évolution de la force en fonction du déplacement pour l'échantillon a 50% de charge extrudé à 195°C température de fusion

on remarque une similitude de comportement de nos trois courbes , la zone linéaire sa compression max est de = (2,2595 KN) et son déplacement $u(x) = (2,6995 \text{ mm})$ cette zone correspond a la réversibilité de notre profilé et la deuxième zone non linéaire correspond à la non réversibilité de notre profilé on remarque dans deuxième zone des perturbation dans les courbes cela est peut-être dû à la concentration de charge donc création d'une résistance par le profilée .



Figure 62 photographie du profilé a 50% de charge et 195°C après essai de compression découpé au point d'application de la charge

Taux de charge (%)	Force max (KN)	Déplacement U(x) (mm)
40%	2,0018	1,9720
50%	2,0154	2,0337

Tableau 14 force max et son déplacement de profilé extrudé à $t= 187^{\circ}\text{C}$ avec variation de taux de charge en compression essai 2

Taux de charge (%)	Force max (KN)	Déplacement U(x) (mm)
40%	2,1153	1,9911
50%	2,2595	2,6995

Tableau 15 force max et son déplacement de profilé extrudé à $t= 197^{\circ}\text{C}$ avec variation de taux de charge en compression essai 2

Température	Force max (KN)	Déplacement U(x) (mm)
-------------	-------------------	-----------------------------

187	2,0018	1,9720
195	2,1153	1,9911

Tableau 16 force maximal et son déplacement à 40% de charge extruder a 187°C 195°C en compression essai 2

Température	Force max (KN)	Déplacement U(x) (mm)
187°C	2,0154	2,0337
195°C	2,2595	2,6995

Tableau 17 force maximal et son déplacement à 50% de charge extruder a 187 °C et 195°C en compression essai 2

On observe par les données extrait par les tableaux et les graphe que le déplacement diminue avec le taux de charge, on peut interpréter que la ductilité est réduite.

la température augmente le déplacement ce qui rend notre profilé plus souple et moins résistant à la compression

III- Résultats essai de dureté

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Essai 7	Moyenne des tests
40% charge 187°	69	64	75	67	70	63	67	67,85
40% charge 195°	66	62	65	69	76	65	65	66,85
50% charge 187°	68	75	65	73	72	67	79	72,71
50% charge 195°	69	71	70	67	69	75	68,5	70,07

Tableau 18 résultats des tests dureté shore D

Un déplacement de 5cm sur la surface pour chaque essai de chaque éprouvette pour des résultats optimale.

On observe après calcul de la dureté moyenne de chaque charge que l'augmentation du taux de charge a une influence positive sur la dureté, il augmente la dureté moyenne de notre échantillon.

On peut interpréter cela par La température peut influencer négativement la dureté, elle réduit la dureté moyenne et cela est dû à la dégradation du pvc (les longues chaînes moléculaire se cassent ce qui diminue la cohésion du matériau et donc sa dureté diminue).

La température élevé réduit la viscosité facilitant l'écoulement de la matière dans la filaire mais cela conduit à une perte de certaine propriété mécanique dans notre cas la dureté.

IV Résultats essai de colorimétrie

échantillon	Test 1	Test 2	Test 3
50% de charge (calcite) 187 c	L= 92,45 a=0,33 b=0,09	L=92,55 a=0,27 b=0,07	L=92,33 a=0,33 b=0,11
40% de charge (calcite) 187 c	L=92,50 a=0,42 b=0,47	L=92,50 a=0,55 b=0,23	L=92,66 a=0,44 b=0,23
50% de charge (calcite) 195 c	L=92,12 a=0,26 b=0,32	L=92,09 a=0,26 b=0,30	L=92,15 A=0,20 B=0,27
40% de charge (calcite) 195 c	L=92,91 a=0,35 b=0,58	L=92,88 a=0,40 b=0,45	L=92,96 a=0,33 b=0,55

Tableaux19 résultats des tests de colorimétrie en valeur lab.

D'après le tableau de teste de couleur on peut déduire que la température influence le b. Plus la température augmente plus le b augmente sur l'axe du bleu au jaune donc le profile tend vers les nuances jaunâtre.

Par les résultats La température peut aussi influence le paramètre a plus la température augmente plus le a diminué sur l'axe du vert au rouge donc le profilé tend vers le centre il est moins rougeâtre.

On remarque aussi que le taux de charge (calcite) a une influence positive en diminuant les valeurs du paramètre b et paramètre a.

Les résultats des paramètres L pour la clarté sont plus au moins les mêmes étant donné que ce paramètre dépend du dosage du pigment dioxyde de titan qui est à la même quantité pour les deux formules.

Conclusion générale

Ce travail nous a permis d'approfondir nos connaissances sur le procédé d'extrusions du pvc rigide en , on s'est concentrer dans nos tests sur la variation du taux de charge (40% et 50%) et les températures (185°C et 197°C) pour essayer d'améliorer les caractéristique esthétique (couleur) et mécanique avec l'essai de flexion compression et dureté du pvc extrudé Cela nous a permis de constater l'influence significative de ces paramètres sur les propriétés esthétiques et mécaniques des pièces finales.

Concernant les propriétés mécaniques :

* Dureté : L'augmentation du taux de charge a un effet direct sur la dureté Shore D des profilés, tandis que l'élévation de la température entraîne une diminution de cette propriété.

* Flexion : Les résultats montrent que l'ajout de charge diminue la flèche maximale dans la zone réversible, ce qui suggère une légère augmentation de la rigidité du matériau. Mais l'augmentation de la température rend le matériau moins rigide, favorisant ainsi une déformation plus importante sous charge.

* Compression : L'augmentation du taux de charge a pour conséquence de réduire la ductilité du matériau, se traduisant par un allongement moindre à la rupture.

* En ce qui concerne les propriétés esthétiques :

- Couleur : Les profilés soumis à des températures élevées ont développé une teinte jaunâtre, témoignant d'une dégradation partielle du matériau sous l'effet de la chaleur.

En synthèse, cette étude a permis de déterminer que :

* Le taux de charge influe sur la dureté et la ductilité du matériau, ainsi que sur sa résistance à la flexion et à la compression.

* La température a un impact significatif sur la dureté, la rigidité et la couleur des profilés.

Pour optimiser les propriétés des profilés extrudés en PVC rigide, il est donc nécessaire de trouver un compromis entre les différents paramètres étudiés.

En perspective on espère que nos recherches vont épaulé d'autre recherche sur le sujet en s'intéressant à d'autres paramètres et variation tel que la vitesse d'extrusion ou l'utilisation d'autres charges.

Références bibliographiques

- [1] M. Ould Ouali, P. Poorsolhjoui, L. Placidi and A. Misra. Evaluation of the effects of stress concentrations on plates using granular micromechanics. *Construction and Building Materials*. Vol. 290, 5 July 2021, 123227. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123227>
- [2] Daniel Gay. *Matériaux composites*. Hermes Science Publications. 6e édition revue et augmentée. 06/05/2015. 690 pages. 978-2-7462-4707-9
- [3] Waffa RAKHROUR. Etude et caractérisation des matériaux d'électrodes composites à base d'un semi-conducteur métal. Thèse de doctorat de l'Université de Kasdi Merbah Ouargla. 2022. <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/30348>
- [4] ADDOUR Yakout. Caractérisation expérimentale et numérique du comportement mécanique d'un composite à base d'une matrice thermodurcissable renforcés par des fibres végétales de la région de M'sila. Thèse de doctorat de l'Université de Mohamed Boudiaf - M'sila. 2022/2023
- [5] B. Meghlaoui, M. Ould Ouali and S. Hocine. Effect of chemical treatment of Alfa natural fibers on the mechanical properties of polyethylene matrix composites. *U.P.B. Sci. Bull., Series B (ISSN 1454-2331)*, Vol. 81(2), pp. 115-122, 2019. https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/rez660_633231.pdf
- [6] Nicolas Bigot. Modélisation de la mise en forme incrémentale par thermoformage des matériaux composites à matrice thermoplastique semicristalline. École doctorale Mécanique, Énergétique, Génie Civil, Acoustique. Université de Lyon. Soutenance le 15/12/2022
- [7] R. Djeridi and M. Ould Ouali. Experimental Modeling of Wear Behavior of Filled Elastomer SBR under Dry Friction-Influence of Roughness. *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications. Vol. 640, pp 13-20, 2015. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.640.13>
- [8] Koffi Agbelenko. (2021). Étude des paramètres d'injection des composites de fibres naturelles et de l'amélioration des performances mécaniques du matériau pour l'impression 3D. Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi.
- [9] K. Belouettar, M. Ould Ouali, N. Zeroudi, S. Thibaud. Investigation of the influence of incremental sheet forming process parameters using response surface methodology. *Metallurgical Research & Technology*. Volume 118, Number 4, 2021, 401. <https://doi.org/10.1051/metal/2021039>
- [10] M. Zerouki, M. Ould Ouali and L. Benabou. Metallurgical phase transformation and behaviour of steels under impact loading. *Metallurgical and Materials Transactions A (Springer)*, Vol. 51, pp. 252–262, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11661-019-05527-z>
- [11] MOUDJEB Lydia et MEBROUKI Sabah. Aspect théorique de modification chimique de PVC 4000M avec des amines, synthèse, caractérisation et application. Mémoire de master académique, Université Kasdi Merbah OUARGLA, 2020 /2021.
- [12] M. Nedjar. Influence du vieillissement thermique sur les propriétés du PVC utilisé dans l'isolation des câbles de H.T. Thèse de magister, UMMTO, Décembre 1991.
- [13] D. Bouguedad. Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'éthylène- propylène-diène monomère (EPDM), thèse doctorat, UMMTO, 2010.
- [14] Yousfi, Mohamed Amine. Propriétés et caractérisation d'un matériau PVC pour l'extrusion Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Promotion 2009.
- [15] Nadja Khelifa et Hachoud Ammar. Plastification du PVC. Mémoire de master académique, Université Kasdi Merbah OUARGLA, 2022.

Références bibliographiques

- [16] Marion JANOT. Polymères nanocomposites multifonctionnels. Impact sur les propriétés mécaniques de polymères à mémoire de forme ». Thèse de doctorat, Sorbonne Université, 2018.
- [17] Chr. JANOT. Les matériaux amorphes: que peut apporter la spectrométrie Mossbauer- Première partie- Généralités. Revue de Physique Appliquée, 1980.
- [18] Mémoire du diplôme de master, intitulé « Synthèse de particules polymériques hydrophiles biocompatibles, Modification chimique du polychlorure de vinyl », présenté par ZAIBET Omar et AYADI Saadi, Université Mohammed El Bachir Elibrahimi, 2019/2020.
- [19] Mémoire du diplôme de master, intitulé « Etude mécanique thermique et économique de quelque mélange à base de PVC proposé par l'ENICAB de BISKRA », présenté par BOUTAMINE mimi et RAHAL abir, Université Mohamed Khider BISKRA, Juin 2013.
- [20] South East Europe PVC Forum, Plastifiant-PVC. <https://www.Seepvcforum.com> , consulté le 06 décembre 2024.
- [21] www.quimidroguia.com, Lubrifiant pour PVC, consulté le 02 novembre 2024
- [22] J. BOST. Les matières plastiques. TOM1: Chimie et Application. Technique et document edition, PARIS 1982. ISBN : 2-85206-817-6
- [23] <https://www.modorinintelligence.com> Marché de PVC - Taille, tendance et rapport, consulté le 02 septembre 2024
- [24] Philippe Lours, Fabien Baillon. Au cœur des matériaux cristallins. 19 mars 2024. https://nte.mines-albi.fr/SciMat/fr/co/SM_uc1-5-4.html, consulté le 6 décembre 2024
- [25] www.aquaportail.com Amorphes: définition et explication. Consulté le 04 septembre 2024
- [26] www.Pinterest.Fr , Polychlorure de vinyle. Consulté le 04 septembre 2024
- [27] www.lemoniteur.Fr –Marché de la fenêtre: domination du PVC.
- [28] Jean-François Agassant, Pierre Avenas, Jean-Philippe Sergent, Bruno Vergnes, Michel Vincent. Mise en forme des polymères : Approche thermomécanique de la plasturgie. 4ème édition. Lavoisier - Tech & Doc, XVII-844 p., 2014, 978-2-7430-1549-7. (hal-00975975)
- [29] OUMEDDOUR Bilal. Etude et conception d'une filière d'extrusion de pièces en pvc. Mémoire de Magister en Métallurgie de l'ENP, 2012.
- [30] Bruno Vergnes. Défauts d'extrusion et instabilités d'écoulement des polymères fondus. Rhéologie, 2014, 25, pp.1 – 25. Ffhal-01109308
- [31] K. Belouettar, S. Thibaud, M. Ould Ouali, M. K. Harouche. A numerical-experimental coupled method for the identification of model parameters from μ -SPIF test using a finite element updating method. International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2023). <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12210-6>
- [32] A. C. Messellek, Mohand Ould Ouali, Y. Benabid and A. Beloulla. Material selection process for femoral component of hip prosthesis using finite element analysis and ranking method. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering 20(1), pp. 133-134. October 2017. <http://dx.doi.org/10.1080/10255842.2017.1382897>
- [33] <https://www.guide-gestion-des-couleurs.com/>. Consulté le 08 septembre 2024.
- [34]