

: République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université A. Mira de Bejaia



Faculté de Technologie
Département de Génie des procédés

Mémoire EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE Master

Domaine : Science et Technologie Filière : Génie des Procédés
Spécialité : Génies des procédés des matériaux

Présenté par

BENAZZOUZ Lamia & BEN BELLIL Ahlam

Thème

**Étude de l'effet du recyclage sur les propriétés physico-mécaniques d'un
matériau composite à charge végétale**

Soutenue le 03/ 07 /2024

Devant le jury composé de :

| Nom et Prénom | Grade | Affiliation | Qualité |
|----------------|-------|----------------------|----------------|
| Mme N. CHIBANI | MCA | Université de Bejaia | Présidente |
| Mme L. ZAIDI | MCB | Université de Bejaia | Examinatrice |
| Mme S. SAHI | MCA | Université de Bejaia | Encadrante |
| Mme N. TOUATI | MCB | Université de Bejaia | Co- Encadrante |

Année Universitaire : 2023/2024

Dédicaces

Je dédie ce travail :

*A mon père bien-aimé, source d'inspiration et de la force « **Boudjamâa** », ta sagesse et ton soutien inconditionnel ont été ma lumière tout au long de ce parcours. Ce mémoire est le fruit de ton amour et de ta guidance. Merci pour tout ce que tu as fait pour moi.*

*A la femme qui a sacrifié tant pour moi, ma maman adorée « **KARIMA** », tes sacrifices désintéressés et ton dévouement infini ont été les fondements sur lesquels j'ai pu bâtir ce chemin. Ta force et ta générosité ont été ma lumière dans les moments sombres. Merci ma mère*

*A mon unique, frère bien-aimé « **LOUNIS** ». Merci pour tout ce que tu as apporté à ma vie, ta présence, ton soutien et ta force m'ont guidée tout au long de ce parcours, je suis reconnaissante de t'avoir comme frère*

*A mes deux chères sœurs adorées « **LAHNA & IKRAM** », qui m'ont soutenu tout au long de mon chemin, vos encouragements, vos conseils et votre présence ont été ma force. Merci du fond du cœur pour tout ce que vous avez fait pour moi, je vous suis infiniment reconnaissante.*

*A l'homme de ma vie « **TAHAR** », ta présence dans ma vie est un cadeau inestimable ; Ta fidélité, ton soutien et ta bienveillance sont des trésors précieux. Merci d'être toujours là pour moi, je suis reconnaissante de t'avoir dans ma vie.*

*A ma petite nièce « **SILINE** », ta gentillesse et ta générosité sont des qualités qui te rendent spéciale, je te souhaite une vie remplie de bonheur. Puisses-tu toujours briller comme une étoile dans le ciel*

*Je voudrais exprimer ma profonde gratitude envers toute la famille **BEN AZZOUZ** et **LACHI** et tous mes amis. Votre soutien et votre amour ont été d'une valeur inestimable dans ma vie*

Je vous aime énormément

BENAZZOUZ LAMIA

Dédicaces

Je dédie ce travail :

*A mon père extraordinaire « **Belkacem** », ta présence rassurante et ton exemple inspirant ont été les piliers sur lesquels j'ai construit mes réussites. En témoignage de ma reconnaissance éternelle, je t'offre ces mots sincères et ce travail qui porte l'empreinte de ton influence bienveillante. Merci, cher papa, pour tout ce que tu es et pour tout ce que tu m'as apporté.*

*A la femme la plus exceptionnelle que je connaisse, ma mère « **Malika** », ma roche, mon soutien et ma lumière dans les moments sombres, qui a toujours cru en moi et m'a encouragé à poursuivre mes rêves. Cette réussite est dédiée à toi.*

A mes chers frères et sœurs, votre présence et votre soutien ont été des éléments essentiels dans mon parcours. Chaque moment partagé, chaque épreuve surmontée ensemble a renforcé nos liens familiaux. Cette réussite est le fruit de notre union. A vous, je dédie cette victoire avec tout mon amour et ma gratitude pour tout ce que nous avons vécu ensemble.

*A mon compagnon de vie « **Rahim** », ta présence est mon refuge, ton amour est ma force. Avec toi, je sais que chaque défi peut être surmonté et chaque rêve peut devenir réalité. Merci d'être mon soutien inconditionnel, mon partenaire de vie, mon amour éternel et mon fiancé.*

*A tous les membres de ma famille et toute personne qui porte le nom « **Ben bellil** », je dédie ce travail à tous ceux qui ont participé à ma réussite.*

BEN BELLIL AHLAM

Remerciements

En premier lieu, nous remercions le bon Dieu, le tout puissant, de nous avoir donné autant de courage et de volonté pour réaliser ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre promotrice Mme **SAHI Samira** et notre co-encadrante Mme **TOUATI Naima**, pour leurs soutiens constants, leurs disponibilités et leurs précieux conseils tout au long de ce projet de recherche.

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus chaleureux aux membres du jury Mme **N. CHIBANI** et Mme **L. ZAIDI** qui nous feront l'honneur de juger notre travail.

Nous tenons à remercier également Mme **ALLOUI Katia** ingénieur du laboratoire LMPA de l'université de Bejaia.

Nous tenons à remercier le personnel de laboratoire de l'unité de production des câbleries électriques d'Alger (CABEL).

Nous tenons à remercier tous les enseignants de génie des procédés qui ont contribué à notre formation.

En fin, nos remerciements à nos deux familles **BENAZZOUZ** et **BEN BELLIL** qui ont apporté leur soutien, leurs expertises et leurs encouragements, et à tous nos amis(es).

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

| | |
|---|----|
| Introduction générale | 13 |
| Chapitre I : Synthèse bibliographique | 14 |
| I.1.1. Définition d'un matériau composite..... | 15 |
| I.1.2. Composition des matériaux composites..... | 15 |
| I.1.2.1. Matrice | 15 |
| I.1.2.2. Renfort | 16 |
| I.1.2.3. Différents types de renfort..... | 16 |
| I.1.2.4. Avantages et inconvénients des renforts..... | 17 |
| I.1.3. Types de matériaux composites..... | 18 |
| I.1.4. Procédés de fabrication des matériaux composites..... | 19 |
| a. Moulage au Contact | 19 |
| b. Moulage par projection simultanée..... | 19 |
| c. Le moulage par transfert..... | 20 |
| d. Extrusion..... | 21 |
| I.1.5. Applications des matériaux composites..... | 22 |
| I.1.6. Avantages et inconvénients des matériaux composites..... | 23 |
| I.2. Le polychlorure de vinyle (PVC)..... | 23 |
| I.2.1. Définition..... | 23 |
| I.2.2. Synthèse du PVC | 24 |
| I.2.3. Propriétés du PVC..... | 24 |
| I.2.4. Domaines d'application du PVC | 27 |
| 1. 2. 5. Les avantages du PVC..... | 28 |
| 1. 2. 6. Les inconvénients du PVC | 29 |
| I.3. La farine de maïs..... | 29 |
| I.3.1. Définition..... | 29 |
| I.3.2. Composition de la farine de maïs..... | 29 |
| I.3.3. Utilisation de l'amidon dans le domaine des composites | 32 |
| I.4. Recyclage d'un matériau composite | 32 |
| I.4.1. Définition du recyclage | 32 |
| I.4.2. Procédés de recyclage..... | 32 |

| | | |
|---|--|-----------|
| I.4.3 | Recyclage des composites à base du PVC | 34 |
| I.4.4. | Conséquence du recyclage des composites à base de PVC..... | 35 |
| Chapitre II : Matériaux utilisés et techniques expérimentales | | 36 |
| II.1. | Matériaux utilisés..... | 36 |
| II.1.1. | Polychlorure de vinyle (PVC) | 36 |
| II.1.2. | Additifs du PVC..... | 36 |
| II.1.3. | La farine de maïs (FM)..... | 38 |
| II.2. | Protocole expérimental..... | 40 |
| II.2.1. | Recyclage des composites | 40 |
| II.2.2. | Caractérisations des composites recyclés..... | 41 |
| II.2.2.1. | Tests mécanique | 41 |
| II.2.2.1.1. | Test de traction | 41 |
| II.2.2.1.2. | Test de dureté shore D..... | 42 |
| II.2.2.2. | Test d'absorption d'eau | 43 |
| II.2.2.3. | Analyse infrarouge à transformée de Fourier IRTF | 44 |
| Résultats et discussion | | 43 |
| Chapitre III : Résultats et discussion..... | | 45 |
| III.1. | Caractérisation mécanique | 45 |
| III.1.1. | Caractérisation mécanique par traction | 45 |
| III.1.1.1. | Contrainte à la rupture..... | 45 |
| III.1.1.2. | Allongement à la rupture | 46 |
| III.1.1.3. | Module d'Young..... | 47 |
| III.1.2. | Test de dureté shore D | 48 |
| III.2. | Test d'absorption d'eau..... | 49 |
| III.3. | Analyse spectrale par infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) | 50 |
| Conclusion générale..... | | 59 |
| Perspectives | | 60 |
| Références bibliographiques | | 61 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau I.1 : Principaux avantages et inconvénients des renforts d'origine végétale..... | 18 |
| Tableau I.2 : Propriétés thermiques du PVC..... | 25 |
| Tableau I.3 : Propriétés mécaniques du PVC..... | 26 |
| Tableau II.1 : Propriétés du PVC..... | 36 |
| Tableau II.2 : Propriétés physico-chimiques du plastifiant (DOP)..... | 37 |
| Tableau II.3 : Caractéristiques physiques du stabilisant thermique Ca/Zn..... | 38 |
| Tableau II.4 : Caractéristiques physiques du lubrifiant. | 38 |
| Tableau II.5 : Composition massique du PVC compound..... | 39 |
| Tableau III.1 : Groupement fonctionnels caractéristiques du PVC vierge..... | 53 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure I.1 : Matériau composite | 15 |
| Figure I.2 : Fibre : (a) d'aramide, (b) verre et (c) carbone..... | 17 |
| Figure I.3 : Principe de moulage par contact | 19 |
| Figure I.4 : Principe de moulage par projection simultanée | 20 |
| Figure I.5 : Principe du procédé RTM..... | 21 |
| Figure I.6 : Schéma d'une extrudeuse mono-vis | 21 |
| Figure I.7 : Réaction de polymérisation du monomère de chlorure de vinyle..... | 24 |
| Figure I.8 : Schéma de fabrication du composant de base : la résine PVC | 24 |
| Figure I.9 : Segmentation des applications du PVC..... | 28 |
| Figure I.10 : Composition de la farine de maïs..... | 30 |
| Figure I.11 : Schéma d'un grain d'amidon et molécule D-Glucose (structure)..... | 30 |
| Figure I.12 : Structure chimique de l'amylose et de l'amylopectine | 31 |
| Figure I.13 : Différentes étapes de recyclage | 33 |
| Figure I.14 : Schéma du procédé du recyclage mécanique des matériaux composites à matrice thermoplastique | 34 |
| Figure II.1 : Structure chimique du plastifiant DOP | 37 |
| Figure II.2 : La farine de maïs utilisée..... | 39 |
| Figure II.3 : Brabender de type Gmbh & Co. KG..... | 40 |
| Figure II.4 : Presse hydraulique de type Carver Inc. 260-563-7577 X5237 avec son moule..... | 41 |
| Figure II.5 : Les altères | 41 |
| Figure II.6 : Dynamomètre de type MTS | 42 |
| Figure II.7 : Duromètre shore D..... | 43 |
| Figure II.8 : Test d'absorption d'eau du PVC et des différents composites | 44 |
| Figure II.9 : Spectrophotomètre IRTF..... | 44 |
| Figure III.1 : Contrainte à la rupture du PVC et des composites PVC/FM recyclés et non recyclés en fonction du taux de charge..... | 47 |
| Figure III.2 : Allongement à la rupture du PVC et des composites PVC/FM recyclés et non recyclés en fonction du taux de charge..... | 48 |
| Figure III.3 : Module de Young du PVC et des composites PVC/FM recyclés et non recyclés en fonction du taux de charge..... | 49 |

| | |
|---|----|
| Figure III.4 : Dureté du PVC et des composites PVC/FM recyclés et non recyclés en fonction du taux de charge. | 50 |
| Figure III.5 : Taux d'absorption d'eau du PVC et des composites PVC/FM recyclés et non recyclés en fonction du taux de charge et du temps..... | 51 |
| Figure III.6 : Spectres IRTF de la farine de maïs | 52 |
| Figure III.7 : Spectres IRTF du PVC non recyclé, et du PVC recyclé..... | 53 |
| Figure III.8 : Spectres IRTF des composites PVC/FM à 20% de charge recyclé et non recyclé | 55 |
| Figure III.9 : Spectres IRTF des composites PVC/FM à 30% de charge recyclé et non recyclé | 56 |

Listes des abréviations

DEHP : Diéthylhexylphtalate.

DOP : Dioctylphtalate.

F0 : composite avec 0% de charge.

F20 : composite avec 20% de charge.

F30 : composite avec 30% de charge.

FM : Farine de maïs.

CGD : Composite de grande diffusion.

CHP : Composites de haute performance.

IRTF : Infrarouge à Transformée de Fourier.

m : Masse des échantillons après un temps t (g).

m₀ : Masse initiale des échantillons (g).

Δm : Variation de la masse (%).

PEBD : Polyéthylène basse densité.

PEHD : Polyéthylène haute densité.

PP : Polypropylène.

PS : Polystyrène.

PVC : Polychlorure de vinyle.

Tg : Température de transition vitreuse (°C).

UV : Ultra-violet.

Introduction

Introduction

Les polymères sont très demandés en raison de leurs propriétés physico chimiques, mécaniques, mais aussi optiques et électriques. Cependant, lors de la conception d'objets, les propriétés des polymères ne suffisent souvent pas à elles seules. En effet, la technologie moderne nécessite des matériaux alliant rigidité, résistance mécanique, haute ténacité et bonne légèreté. Il n'existe pas de matériau unique permettant ces combinaisons de propriétés [1]. C'est pour cette raison que les chercheurs sont le plus souvent amenés à améliorer les solutions déjà utilisés, et ils ont créé plutôt des nouvelles associations de matériaux. L'un des résultats de cette association est l'aboutissement à un matériau composite, qui fait le sujet de notre étude.

Les matériaux composites sont créés en combinant deux matériaux qui diffèrent à la fois par leur forme et leurs propriétés mécaniques ou chimiques pour améliorer leurs performances [2]. Les deux composants des matériaux composites sont la matrice et le renfort, qui donnent ensemble un matériau hétérogène, souvent anisotrope, c'est-à-dire que ses propriétés diffèrent selon la direction. Les matériaux qui composent le composite sont généralement choisis en fonction de l'usage prévu [3].

L'accumulation de déchets non biodégradables dans l'environnement a causé un encombrement des décharges, une pollution des sols et des milieux marins. Plusieurs solutions ont alors été mises en place pour réduire leur impact sur l'environnement. Comme donné une nouvelle vie à ces polymères par recyclage. Donc, dans un but écologique, il est nécessaire d'améliorer les procédés de recyclage et d'encourager l'utilisation de matériaux issus des abondantes ressources naturelles recyclables et renouvelables. Dans ce sens, de nombreuses normes environnementales (ISO 14 001) [4], ont été créées pour protéger les ressources de notre planète. Ces normes ont eu un impact majeur sur l'industrie, notamment dans le développement de nouveaux matériaux composites à base de fibres naturelles. Les fibres naturelles constituent une nouvelle tendance de renforts et de suppléments, et utilisées pour remplacer les matériaux synthétiques et ses produits connexes. Le développement de matériaux composites renforcés de fibres naturelles a été l'une des réalisations notables dans le domaine de la science des matériaux au cours du siècle dernier [5].

L'objectif de ce mémoire est l'étude de la faisabilité du recyclage d'un nouveau matériau composite à base de PVC comme matrice polymérique renforcée par la farine de maïs.

Pour simplifier la lecture de ce document, l'étude a été divisée en quatre chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à une recherche bibliographique sur les notions générales sur les matériaux composites, le polychlorure de vinyle (PVC), la farine de maïs ainsi qu'un aperçu sur le recyclage.
- Le deuxième chapitre est consacré aux matériaux utilisés, le protocole expérimental suivi ainsi que les techniques d'analyses utilisées.
- Le troisième chapitre présente les différents résultats expérimentaux enregistrés et leurs interprétations.

Chapitre I : Synthèse Bibliographique

CHAPITRE I : Synthèse bibliographique

I.1. Généralités sur les composites

I.1.1. Définition d'un matériau composite

Un matériau composite est défini comme un mélange d'au moins deux constituants non miscibles. Cette combinaison permet d'obtenir des propriétés mécaniques, physiques supérieures aux matériaux de base. Ils sont généralement composés d'une matrice, qui assure la liaison et la protection des renforts, et d'un renfort, qui apporte la résistance mécanique [6].

La figure I.1 illustre la composition d'un matériau composite.

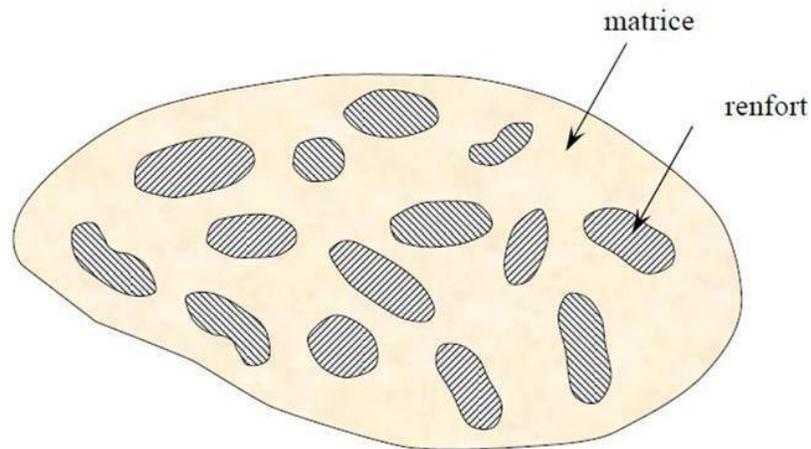


Figure I.1: Matériau composite [6].

I.1.2. Composition des matériaux composites

Les matériaux composites sont constitués de deux éléments principaux :

I.1.2.1. Matrice

La matrice est le matériau de base qui enrobe et lie les renforts. Elle peut être de nature polymère (thermoplastique ou thermodurcissable), céramique ou métallique, chacun offrant des propriétés et des applications spécifiques [7]. On peut les classer comme suit :

- **Matrices organiques** : les plus utilisées sont les résines polyester insaturées, les résines époxydes (thermodurcissables), les polypropylène, polyamide (thermoplastique), etc. [7].
- **Matrices céramiques** : tels que (CaCO_3 , Al_2O_3 , SiO_2 ...) [8], s'adressent aux applications à très haute température : elles peuvent résister à des températures très élevées, sont plus légères que

de nombreux métaux, et présentent une bonne stabilité chimique [9].

- **Matrices métalliques** : Elles apportent de nombreux avantages : grande résistance à la fatigue, faible vieillissement sous l'action de l'humidité, résistance à la chaleur et à la corrosion, insensibles aux produits chimiques comme les graisses, huiles, généralement constitués d'une matrice à base d'un métal léger (aluminium, magnésium, etc...) [10].

I.1.2.2. Renfort

Le renfort est l'élément structural du matériau composite. Il peut se présenter sous différentes formes : fibres, particules, ou de couches. Son rôle consiste à conférer au composite sa rigidité élastique et sa résistance à la rupture et supporter les efforts appliqués [7].

I.1.2.3. Différents types de renfort

Les renforts peuvent être classés selon leurs catégories ou bien selon leurs structures [11] :

a. Suivant leurs catégories

- **Organiques** : peuvent apporter une bonne tenue mécanique.
- **Minérales** : permettent d'améliorer les propriétés mécaniques du composite
- **Métalliques** : améliorent les propriétés électriques et thermiques du composite [11].

b. Suivant leurs structures

- **Les fibres** : Elles peuvent être de (verre, de carbone ou d'aramide (figure 1.2), etc. ...). Elles offrent une excellente résistance et rigidité tout en étant légères [11].

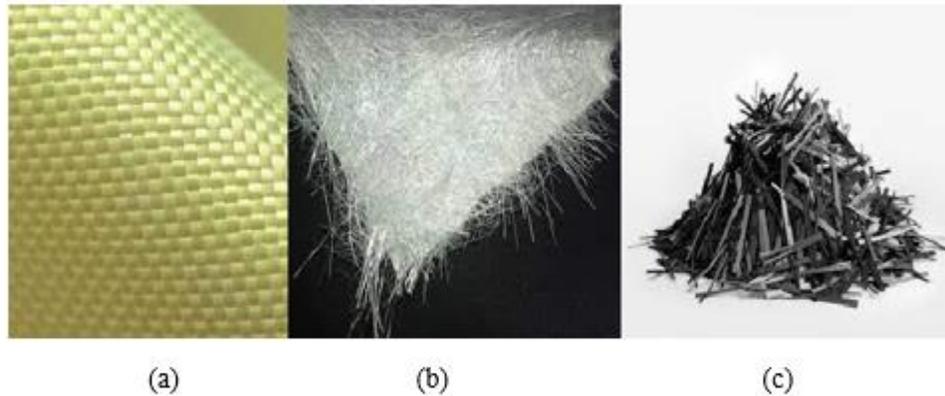


Figure I. 2 : Fibres : (a) d'aramide, (b) verre et (c) carbone [12-14].

- **Les particules :** Les renforts sous forme de particules, tels que le carbure de silicium ou l'alumine, sont utilisés pour améliorer la dureté, la résistance à l'usure et les propriétés thermiques des composites [15].
- **Les tissus :** (tissus taffetas, toiles, serge, satin etc. ...). Ils permettent d'obtenir des propriétés mécaniques élevées dans des directions spécifiques [16].
- **Les fibres végétales :** Les fibres végétales sont des structures fibreuses naturelles issues de plantes. Elles se composent principalement de cellulose, de lignine et d'hémicellulose, qui leur confèrent leurs propriétés mécaniques uniques. La composition exacte varie selon l'espèce végétale [1].

I.1.2.4. Avantages et inconvénients des renforts

Dans cette partie, on s'intéressera sur les principaux avantages et limitations d'utilisation des renforts à charge végétale.

Le tableau I.1 résume les principaux avantages et inconvénients des renforts d'origine végétale.

Tableau I.1. Principaux avantages et inconvénients des renforts d'origine végétale [17-18].

| Avantages | Inconvénients |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Faible densité - Biodégradabilité - Faible coût - Ressource renouvelable - Propriétés mécanique élevés - Séparation plus facile - Disponibilité - Non abrasive vis-à-vis du matériel de transformation. | <ul style="list-style-type: none"> - Absorption d'eau - Faible stabilité dimensionnelle - Sensibles à l'humidité et aux variations de température - Fibres anisotropes - Biodégradable - Faible tenue thermique (200 à 230°C),maximum. |

I.1.3. Types de matériaux composites

On distingue deux grandes familles de matériaux composites :

a. Composites de grande diffusion (CGD)

Occupent une grande part du marché. Les polymères les plus utilisés dans ces composites sont : le polyéthylène haut densité (PEHD) et basse densité (PEBD) ; le polypropylène (PP) ; le polychlorure de vinyle (PVC) et le polystyrène (PS). Ils se caractérisent par leur coût abordable, leur facilité de mise en œuvre et leurs propriétés satisfaisantes pour de nombreux usages [15].

b. Composites de hautes performances (CHP)

À l'opposé des composites de grande diffusion, les composites de haute performance sont conçus pour des applications nécessitant des propriétés exceptionnelles, généralement au prix d'une mise en œuvre plus complexe et d'un coût plus élevé. Qui se trouvent le plus souvent renforcés par des fibres de carbone ou d'aramide. Ils sont caractérisés par leur résistance mécanique et rigidité très élevées, Mise en œuvre plus complexe et coûteuse [15].

I.1.4. Procédés de fabrication des matériaux composites

Parmi les procédés les plus courants de mise en œuvre de composites on trouve :

a. Moulage au Contact

Le moulage au contact est l'une des techniques d'élaboration des matériaux composites. Le principe (figure I.3) consiste à disposer dans un moule les renforts (sous forme de mat ou de tissu) imprégnés manuellement d'une matrice thermodurcissable. Après que les premières couches imprégnées de résine soient gelées, on applique d'autres couches jusqu'à ce que la pièce complète soit imprégnée [19].

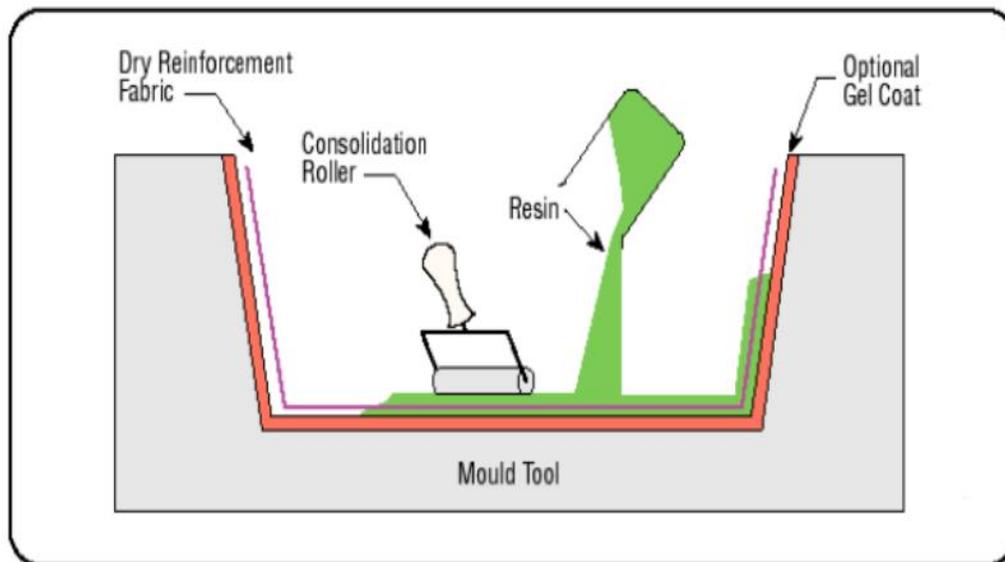


Figure I.3: Principe de moulage au contact [19].

b. Moulage par projection simultanée

Projection simultanée sur un moule de fibres coupées et de résine catalysée à l'aide d'un pistolet (figure I.4). L'ensemble fonctionnant par air comprimé. Ce moulage permet d'obtenir de grandes séries de pièces [20].

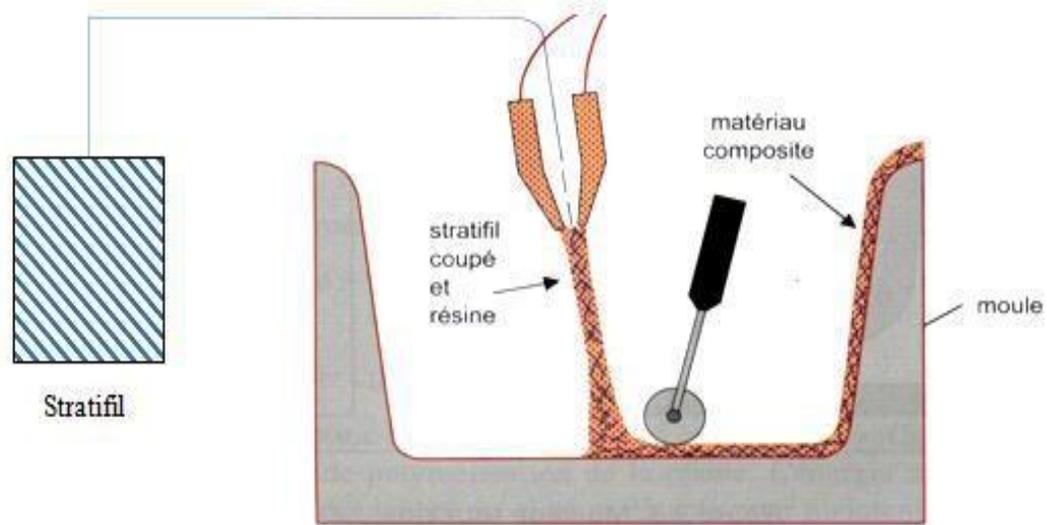


Figure I.4: Principe de moulage par projection simultanée [20]

c. Le moulage par transfert

Cette technique est basée sur l'utilisation d'un moule et d'un contre-moule de manière à avoir une pièce lisse sur ses deux faces (figure I.5). L'empilement de renforts secs sera placé dans le moule, après avoir préparé ces deux surfaces. La résine est ensuite injectée sous pression dans ce moule de façon à imprégner le renfort.

L'avantage de ce procédé est l'élaboration de pièces à géométrie complexe [19].

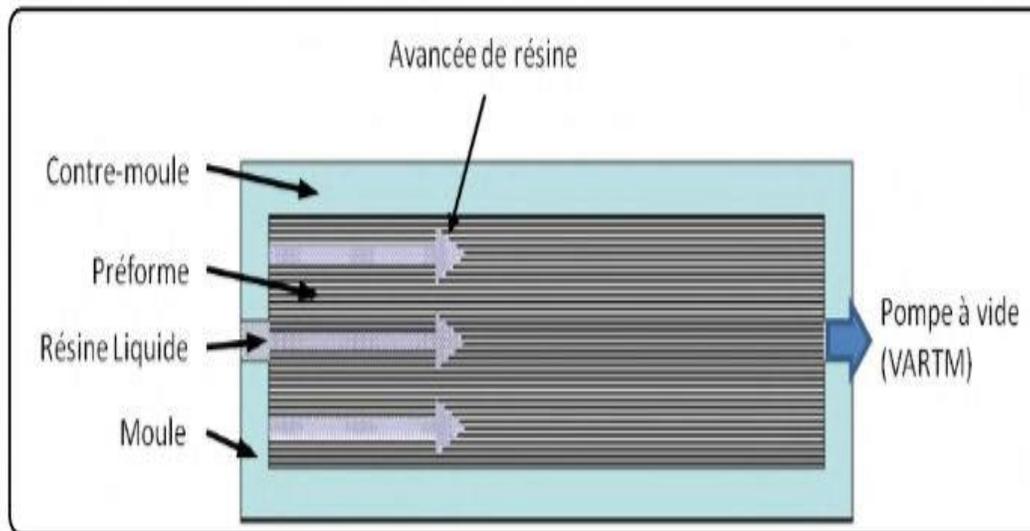


Figure I.5: principe du procédé de moulage par transfert [19].

d. Extrusion

L'extrudeuse est constituée principalement d'une vis d'Archimède qui tourne en continu à l'intérieur d'un fourreau chauffé. L'extrusion est largement utilisée pour la fabrication des plaques, feuilles, tubes etc... ; On trouve deux types :

- Extrusion mono-vis (figure I.6),
- Extrusion bi-vis (les systèmes contrarotatifs) [21].

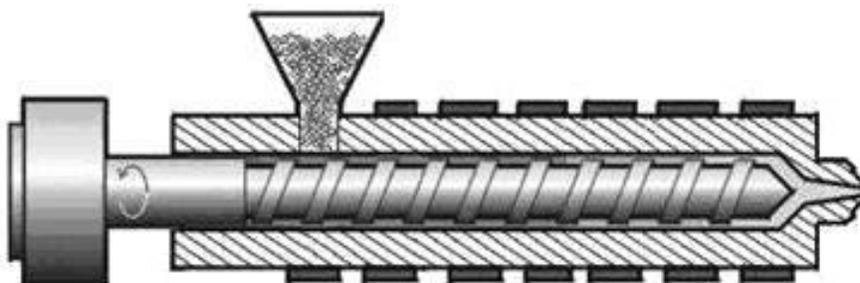


Figure I.6: Schéma d'une extrudeuse mono-vis [21].

- **Le calandrage**

Le calandrage est un procédé de laminage utilisé pour la production de feuilles et de films en plastiques. La matière thermoplastique chauffée et fondue est placée entre deux ou plusieurs cylindres en fonte chauds parallèles qui opèrent comme les anciennes essoreuses. Les cylindres sont de plusieurs tailles et tournent donc à des vitesses légèrement différentes pour transformer le plastique en feuilles [22].

- **Le Casting**

C'est l'une des méthodes les plus utilisées pour former des films minces. Elle consiste à dissoudre la matrice dans un solvant puis à introduire la charge afin de l'activer grâce à un agent, souvent oxydant. L'ensemble subit ensuite une précipitation puis filtré et séché. Cette méthode a été retenue pour la synthèse de matériaux composites possédant des propriétés électriques. L'inconvénient majeur dans ce type de procédé est la nécessité que les constituants possèdent des propriétés chimiques proches, et en particulier, qu'ils soient compatibles avec un même solvant. De plus, il convient que le composite résultant ne soit pas soluble dans ce solvant. Enfin, ce genre de réaction s'effectue souvent en milieu agité, et les conditions d'agitation sont parfois difficiles à contrôler dans le cas d'un milieu évolutif. Cela peut alors générer une inhomogénéité des propriétés d'usage du matériau composite [23].

I.1.5. Applications des matériaux composites

Grâce à leurs grandes polyvalences, les composites trouvent de nombreuses applications dans des domaines très variés, tels que :

- **Energie et transport**

- Les composites sont utilisés dans de nombreuses pièces automobiles. Leur faible poids, leur facilité de mise en forme en font des matériaux de choix pour alléger les véhicules et améliorer leurs performances.

- Dans le domaine nautique, les composites sont utilisés pour la construction de bateaux, de sous-marins et d'équipements marins. Pour leur résistance à l'eau, aux agents chimiques et aux chocs [24].

- **Domaine de construction**

Les composites permettent de réaliser des structures légères et résistantes. Ils sont utilisés dans la fabrication de panneaux de façade, de toitures, de ponts et d'autres éléments structurels et dans l'isolation des bâtiments [25].

- **Aéronautique**

Les matériaux composites sont largement utilisés dans la construction des aéronefs, en particulier pour les pièces structurelles telles que les fuselages, les ailes et les stabilisateurs. Leur légèreté combinée à leur résistance en fait des matériaux de choix pour réduire la consommation de carburant et améliorer les performances [26].

I.1.6. Avantages et inconvénients des matériaux composites

Bien que les matériaux composites présentent de nombreux avantages qui sont [8] :

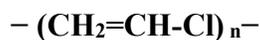
- Légèreté
- Résistance thermique
- Résistance mécanique élevée
- Résistance à la fatigue
- Mise en forme de pièces complexes (principe du moulage)
- Insensibilité aux produits chimiques "mécaniques" comme les graisses, huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvants.

Il existe également certaines limitations à prendre en compte, comme le coût de fabrication, plus élevé que les polymères synthétiques [8].

I.2 Le polychlorure de vinyle (PVC)

I.2.1 Définition

Le poly (chlorure de vinyle), connu sous l'abréviation du PVC (sigle venant de l'appellation anglaise (polyvinylchloride), est un polymère de grande consommation, ~~amorphe~~ ou faiblement cristallin, [27-28]. Le PVC est composé de carbone, d'hydrogène et de chlore. Le carbone et l'hydrogène proviennent de pétrole (43%), tandis que le chlore est issu du sel de mer (57%) [27]. Il est issu d'une polymérisation du monomère de chlorure de vinyle, dont la formule est :



La figure I.7, montre la réaction de polymérisation du chlorure de vinyle :

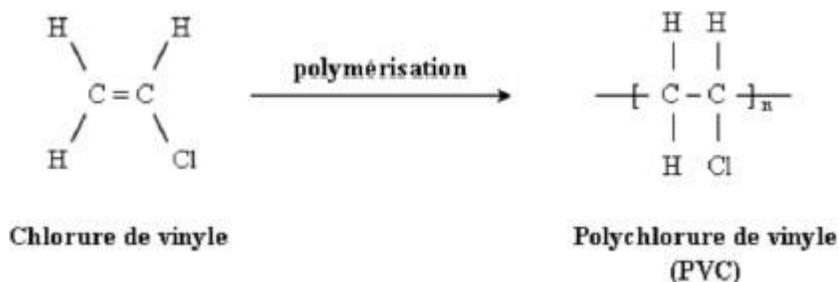


Figure I.7: Réaction de polymérisation du monomère de chlorure de vinyle [29].

I.2.2 Synthèse du PVC

Le monomère de chlorure de vinyle est fabriqué à partir de sel, matière naturelle abondante, à hauteur de 57 %, et de dérivés de pétrole à hauteur de 43 %. Ces dérivés sont des résidus issus de la transformation du pétrole brut en carburant. Après polymérisation, le PVC se présente sous forme de poudre, à laquelle en fonction de son utilisation finale sont ajoutés différents adjuvants : lubrifiants, stabilisants, plastifiants, charges [30].

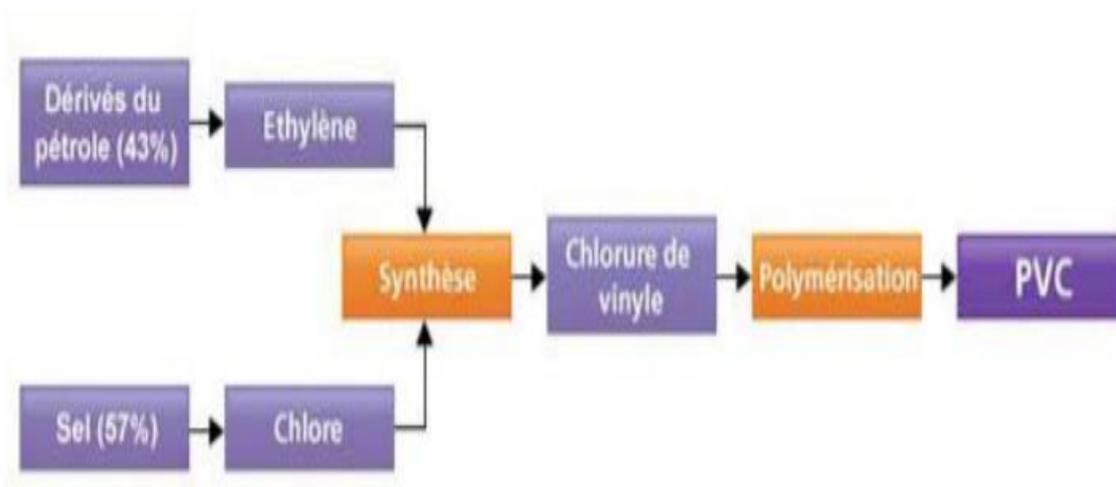


Figure I.8: Schéma de fabrication du composant de base : la résine PVC [30].

I.2.3 Propriétés du PVC

Le PVC se présente sous forme d'une poudre blanche, inodore et inflammable et il présente les caractéristiques suivantes :

- **Propriétés thermiques**

Le tableau suivant montre quelques propriétés thermiques du PVC.

Tableau I.2 : Propriétés thermiques du PVC [31].

| Propriétés thermiques | Caractéristiques |
|--|--|
| Conductivité thermique | 0,2 W. m ⁻¹ K ⁻¹ . |
| Capacité thermique massique | 1 046 J.kg ⁻¹ K ⁻¹ . |
| Pouvoir calorifique | 17 kJ/kg pour les PVC non plastifiés d'une valeur supérieure et variable pour les PVC plastifiés. |
| Température de ramollissement Vicat | Pour les PVC non plastifiés 65-85 °C. Pour des mélanges de PVC et de PVC chloré, > 100°C. |
| Température de fléchissement sous charge | Elle ne s'applique qu'aux PVC non plastifiés. 55 à 70 °C selon les formulations peut atteindre 90 °C pour les mélanges de PVC et de PVC chloré. |
| Comportement au feu | Le PVC se décompose dans une flamme en libérant de l'acide chlorhydrique gazeux mais il est auto extinguable. Les PVC plastifiés brûlent plus facilement. |

- **Propriétés électriques**

Le PVC a des bonnes propriétés isolantes mais les pertes électriques dans les matériaux sont suffisamment importantes pour permettre le soudage par haute fréquence [31].

- **Propriétés mécaniques**

Le PVC résiste à l'abrasion et aux chocs à basse température, il présente une bonne résistance à la rigidité jusqu'au voisinage de sa température de transition vitreuse (Tg). L'ajout de plastifiants peut abaisser la Tg ce qui permet de proposer un PVC souple à des températures ambiantes [31].

Le tableau I.4 résume les différentes propriétés mécaniques du PVC.

Tableau I.3: Propriétés mécaniques du PVC.

| Type de PVC Propriétés | PVC rigide | PVC souple |
|-------------------------------|------------|------------|
| Contrainte à la rupture (MPa) | 50 | 10-20 |
| Allongement à la rupture (%) | 10-50 | 200 à 500 |
| Résistance à la flexion (MPa) | 70-80 | - |
| Module de traction (MPa) | 2400 | - |
| Module de flexion (MPa) | 2000 | - |
| Dureté shore D | 70-80 | 20-40 |

- **Propriétés physiques**

Le PVC présente les propriétés physiques suivantes :

- Couleur naturelle transparente (cristal),
- Amorphe dans la majorité des cas,
- Présence de la phase cristalline qui varie de 5 à 15% en masse, à température ambiante 23 à 25 °C, la phase amorphe est rigide,
- La température de transition vitreuse(Tg) : 75 °C-80°C, c'est -à dire qu'il est rigide à température ambiante, et qu'au-dessus de 90°C, il est caoutchouteux (faible résistance, grande déformation) [31].

I.2.4 Domaines d'application du PVC

Le polychlorure de vinyle trouve aujourd'hui de nombreuses utilisations dans l'industrie. On le trouve dans de nombreux secteurs tels que [32] :

- Dans la construction (Bâtiment) : tubes et raccords, châssis de fenêtre, portes, gouttières, revêtements de sols ou de murs, piscines, canalisation, toitures, dalles de sol, ...
- Dans le transport : La consommation du PVC dans ce secteur représente environ 3% de sa consommation totale. Dans le secteur automobile, le PVC souple est principalement utilisé pour les pièces suivantes : protections de soubassements, carrosseries, tableaux de bord, airbag, ...
- Dans l'emballage : C'est le troisième débouché pour ce polymère. 15% des matières plastiques sont utilisées dans l'emballage sont en PVC. En pratique, le PVC non plastifié se retrouve dans : des flacons pour produits d'entretien et cosmétiques, films, feuilles, bouteilles, récipients pour l'industrie alimentaire en sac, ... Et le PVC plastifié, plutôt dans :
 - Des films étirables pour produits alimentaires (protection et conservation) ;
 - Des films rétractables pour palettes de transports ;
 - Des films de protection d'articles de quincaillerie ;
- Dans le secteur de la Santé : Elles en font le premier des matériaux plastiques utilisés dans le secteur médical, principalement pour la fabrication de :
 - Poche pour la conservation du sang, des solutés ;
 - Cathéters ;
 - Gants chirurgicaux ;
 - Champs opératoires ;
 - Matelas ;
 - Sols hospitaliers ;
 - Revêtement externe de flacons nébuliseurs en verre.
- Équipements électriques et électroniques : Le PVC est utilisé pour le gainage et isolant de câble d'énergie électrique jusqu'à 10 KV environ et des câbles de télécommunications basse fréquence, les séparateurs de batterie, les accessoires de bureautique et micro-informatique divers matériaux d'électroménager et de bricolage, etc.

La figure I.9, montre la segmentation des applications du PVC dans le monde.

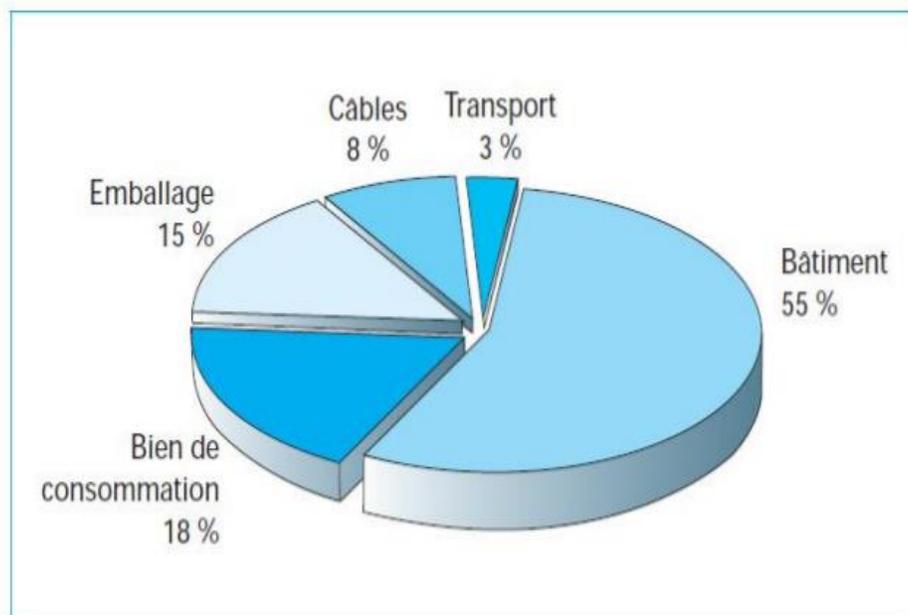


Figure I.9: Segmentation des applications du PVC [32].

1.2.5 Les avantages du PVC

Le PVC est un matériau qui offre de multiples avantages [33] :

- Résistant aux intempéries, à l'usure du temps, aux flammes et à la plupart des agents agressifs ;
- Imputrescible (matériaux qui ne risquent pas de pourrir au contact de l'eau)
- Insensible aux variations climatiques (contrairement à l'aluminium ou au bois) ;
- Bon isolant électrique, thermique et phonique ;
- Étanche aux gaz et aux liquides ;
- Léger ;
- Malléable, le PVC se plie à toutes les contraintes ;
- Choix important de couleurs, motifs et finitions (imitation d'autres matériaux comme le bois, la pierre, le marbre, le béton, etc.) ;
- Économique (moins cher que l'acier, le bois ou l'aluminium) ;
- Facile à entretenir ;
- Difficilement inflammable ;
- 100% recyclable.
- Isolant thermique et il supprime les phénomènes de condensation sur les vitres.

1.3.5 Les inconvénients du PVC

Le PVC présente d'importants avantages, cependant il possède également certains inconvénients qui sont [33] :

- Peu résistant aux UV, le PVC vieillit mal (jaunissement avec le temps) ;
- Toxique en cas d'incendie ou de combustion (contient de l'acide chlorhydrique) ;
- Non biodégradable ;
- Peu résistant à l'usure en tant que revêtement de sol.

I.3. La farine de maïs

I.3.1. Définition

La farine de maïs est un produit obtenu en broyant des grains de maïs séchés en poudre, produisant des farines plus ou moins fines allant de très fines à grossières-Elle est sans gluten et riche en fibres, vitamines et minéraux. Elle donne à la nourriture une saveur distinctive de maïs et une couleur jaune. La farine de maïs est également un agent épaississant, elle peut donc être utilisée comme substitut à la farine de blé [34]

I.3.2. Composition de la farine de maïs

La composition chimique de la farine de maïs comprend principalement les éléments suivants :

- Amidon : constituant majeur, représentant entre 65% et 70% de la farine,
- Protéines, dont le gluten : présentent en moyenne entre 10% et 13% dans la farine de maïs,
- Eau : avec une teneur généralement comprise entre 13% et 16%,
- Sucre : présent en faible quantité, entre 1% et 2%,
- Matières grasses : en quantité réduite, entre 1,2% et 1,4%.

Ces éléments constituent les composants principaux de la farine de maïs, avec l'amidon en tant que composant prédominant, suivi des protéines, de l'eau, du sucre et des matières grasses [35].

La figure I.10 montre la composition de la farine de maïs.



Figure I.10: Composition de la farine de maïs [36].

I.3.3. L'amidon

L'amidon est un glucide, c'est à dire une molécule organique, il est composé de molécules de D-glucose (figure I.11). Sa formule est $C_6H_{10}O_5$, sa température de fusion est de $200^{\circ}C$ et sa solubilité dans l'eau est à partir de 50g/l [37].

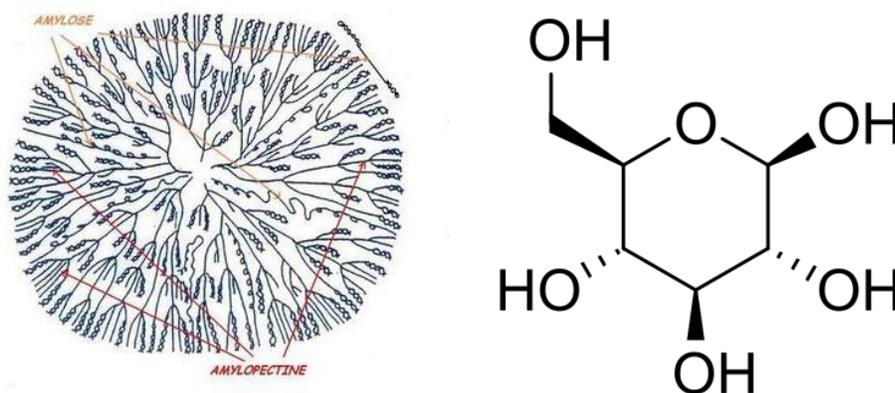


Figure I.11: Schéma d'un grain d'amidon et molécule D-Glucose (structure) [37].

L'amidon est composé principalement de deux homopolymères de glucose :

- ✓ L'amylose qui représente 5 à 30% de l'amidon ;
- ✓ L'amylopectine qui représente 70 à 95% de l'amidon.

Les proportions respectives de ces deux constituants varient suivant l'origine botanique de la plante.

L'amidon contient également d'autres matières non polysaccharidiques dans des proportions très faibles : des lipides, des protéines et des matières minérales.

- **L'amylose**

L'amylose est un polymère lié par des liaisons de type α -(1,4). Il contient de 600 à 1000 unités glucose réparties en plusieurs chaînes. Il a une masse molaire moyenne comprise entre 10^5 - 10^6 g.mol⁻¹. Il constitue généralement 5 à 30 % de l'amidon. Sa masse moléculaire varie entre 10^5 et 10^6 g/mol. Il est présent de 20 à 30% dans le blé et la pomme de terre, et à hauteur de 70% dans le maïs [37].

- **L'amylopectine**

L'amylopectine est également composée de molécules de glucose. Elle est constituée de courtes chaînes d'unité glycosidique rattachées par des liaisons α -(1-4) qui portent des ramifications reliées entre elles par des liaisons α -(1-6). La masse moléculaire est de 10^8 g/mol, ce qui fait d'elle la plus grosse macromolécule connue à ce jour. Elle est responsable de la cristallisation de l'amidon [37].

La figure I.12 montre les structures de l'amylose et de l'amylopectine.

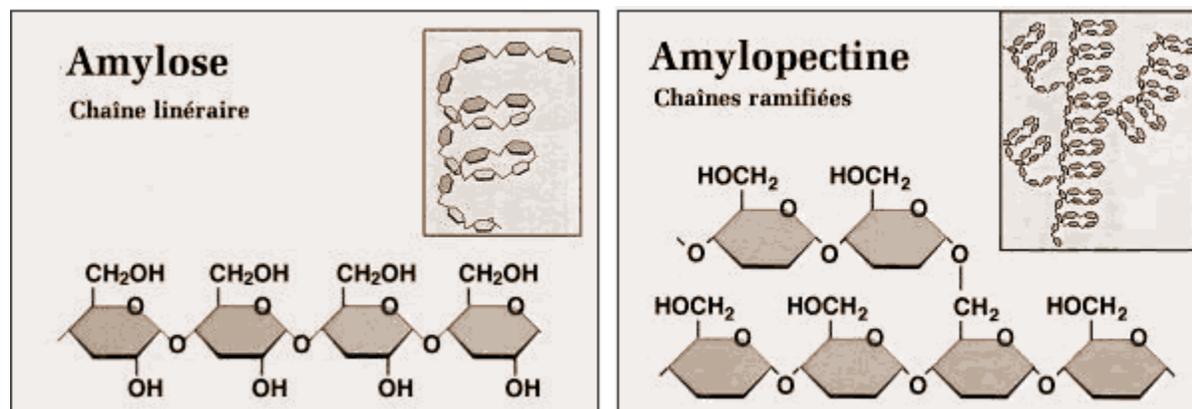


Figure I.12: Structure chimique de l'amylose et de l'amylopectine [37].

I.3.3. Utilisation de l'amidon dans le domaine des composites

Les principaux avantages liés à l'utilisation de charges naturelles dans la fabrication de matériau composite peuvent être résumés dans les aspects suivants :

- Présentent une source renouvelable et biodégradable qui donne une dimension écologique aux matériaux composites développés.
- Contribuent à réduire la dépendance aux polymères synthétiques à base de pétrole. Réduisent considérablement le coût de ces bio-composites [38].

I.4. Recyclage d'un matériau composite

Au cours des dernières années les matériaux composites prennent une place prépondérante dans différents domaines. Toutefois, l'essor de ces matériaux doit s'accompagner de la mise en place de solutions industrielles aptes à traiter les rebuts de productions, ainsi que les produits en fin de vie dans le respect du cadre réglementaire, et leur capacité de recyclage doit encore être améliorée [39]

I.4.1. Définition du recyclage

Le recyclage est un procédé qui consiste à valoriser des déchets pour les réutiliser comme une matière première et obtenir un nouveau matériau réutilisable ou de l'énergie. Ce processus permet de réduire les déchets, de diminuer la consommation d'énergie et de matières premières, donc le recyclage est une activité à la fois économique et écologique [40].

I.4.2. Procédés de recyclage

Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage [41] :

- **Chimique** : Lorsque le déchet est traité par une réaction chimique, (par exemple pour séparer certains composants).
- **Organique** : consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz.
- **Mécanique** : La transformation des déchets à l'aide d'une machine, (par exemple pour broyer).

Ces techniques sont toujours précédées de ces trois étapes :

a) Collecte

Le recyclage commence par la collecte des déchets usagés. Selon l'article du code de l'environnement de la législation française « collecte toute opération de ramassage des déchets en vue de leur transport vers une installation de traitement des déchets » [42].

b) Tri

Les matériaux collectés sont ensuite triés et séparés selon leurs natures, afin de faciliter leur transformation ultérieures. La séparation se fait de deux manières [43] :

- La séparation manuelle des articles
- Les machines trient les articles.

c) Transformation

Les matériaux recyclables triés sont ensuite envoyés aux recycleurs pour les transformer en nouveaux produits, en utilisant des procédés spécifiques à chaque type de matériau [44].

La figure I.13 illustre les différentes étapes de recyclage.



Figure I.13: Différentes étapes de recyclage [43].

I.4.3 Recyclage des composites à base du PVC

Le recyclage des composites à base du PVC présente des défis particuliers, car ces matériaux sont souvent composés de plusieurs couches de différents matériaux, rendant leur séparation et leur traitement plus complexes. Ainsi, en raison de leur capacité fondamentale à se reformer lors du chauffage, les composites à matrices thermoplastique peuvent être recyclés directement par refusion et remoulage en offrant la possibilité de réutiliser indifféremment la charge et la matrice ce qui est la technique utilisée pour le recyclage des composites élaborés dans ce travail [44].

La figure I.14, montre un schéma de procédé utilisé pour le recyclage mécanique des matériaux composites à matrice thermoplastique.

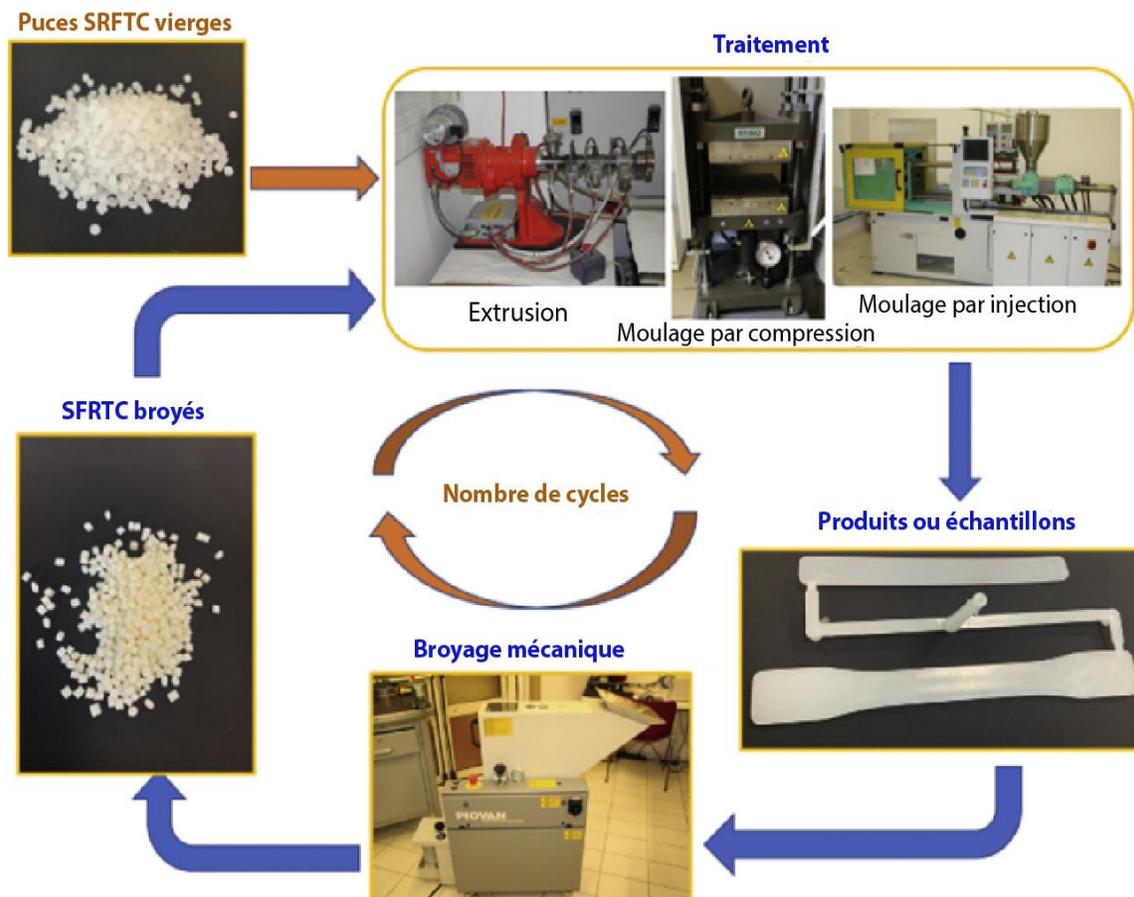


Figure I.14 : Schéma du procédé du recyclage mécanique des matériaux composites à matrice thermoplastique [45].

I.4.4. Conséquence du recyclage des composites à base de PVC

- **Avantages**

Le recyclage du PVC offre les avantages suivants :

- L'utilisation du PVC recyclé aide à atteindre les objectifs d'utilisation rationnelle et permet de préserver les matières premières ;
- L'utilisation du PVC recyclé réduit les émissions de gaz à effet de serre [44].

- **Inconvénients**

Sous l'effet des opérations de séparation, des changements de phase exercées sur la matière, les macromolécules des polymères sont raccourcies, ce qui dégrade leurs propriétés physico-chimiques. La matière plastique issue du recyclage sera donc de qualité inférieure à la matière vierge. Par exemple, elle n'offre pas les mêmes possibilités en matière de couleur puisqu'il n'est pas possible de retirer le colorant d'un plastique à recycler. La matière plastique issue du recyclage sera donc souvent grise ou noire, en raison du mélange de plastiques de différentes couleurs [46].

Chapitre II : Matériaux utilisés et techniques expérimentales

Chapitre II : Matériaux utilisés et techniques expérimentales

Le présent chapitre est consacré à la description de l'ensemble des matériaux utilisés, le protocole expérimental ainsi que les méthodes de caractérisation des composites élaborés dans ce travail.

La préparation du PVC compound et les plaques utilisées dans ce travail a été fait par **SADOUKI** Kenza, **SAHARI** Asma à l'entreprise CABEL.

II.1. Matériaux utilisés

II.1.1. Polychlorure de vinyle (PVC)

Le polymère utilisé dans ce travail est le polychlorure de vinyle (PVC SE-1200), dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau II.1.

Tableau II.1 : Propriétés du PVC

| Caractéristiques | Méthode de mesure | Spécification |
|----------------------------|-------------------|----------------|
| Aspect | - | Poudre blanche |
| Viscosité (cSt) | ASTM D 1243 | 0,995 – 1,025 |
| Densité | ASTM D 1895 | 0,48 – 0,56 |
| Taille des particules (µm) | ASTM D 1921 | 400 – 500 |

II.1.2. Additifs du PVC

- **Plastifiant**

Le plastifiant ajouté est l'ester dioctylique d'acide phtalique, connu aussi sous le nom phtalate de di-éthylhexyle (DEHP) ou phtalate de dioctyle (DOP), sa formule moléculaire $C_{24}H_{38}O_4$ dont la structure chimique est la suivante :

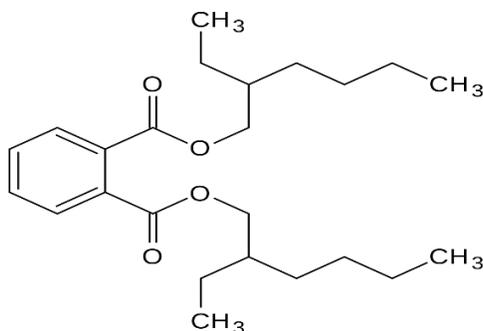


Figure II.1 : Structure chimique du plastifiant DOP.

Les spécifications physico-chimiques du (DOP) sont illustrées dans le tableau II.2.

Tableau II.2 : Propriétés physico-chimiques du plastifiant (DOP).

| Caractéristiques | Méthode de mesure | Valeurs |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------|
| Aspect | - | Liquide huileux |
| Densité à 20°C | DIN 51757/D 4052 | 0,983 - 0,985 |
| Viscosité à 20 °C (mPa.s) | DIN 51562/D 445 | 77 – 82 |
| Acidité (mg KOH/g) | DIN EN ISO 2114/ D 1045 | < 0,07 |
| Teneur en ester (% par surface) | Chromatographie (HPLC) | > 99,5 |
| Teneur en eau (% par poids) | DIN 51777. Part 1/ E 203 | ≤ 0.05 |
| Indice de réfraction | DIN 51423/D 1045 | 1,486 - 1,487 |

• **Stabilisant thermique à base de Ca/Zn**

Les principales caractéristiques physiques de ce stabilisant sont données dans le tableau II.3.

Tableau II.3 : Caractéristiques physiques du stabilisant thermique Ca/Zn.

| Caractéristiques physiques | Valeur |
|----------------------------|----------------|
| Densité | 0,37 |
| Apparence | Poudre blanche |
| Teneur en Zn (%) | 2,25 |

- **Lubrifiant**

Le lubrifiant utilisé est l'acide stéarique (lubrifiant interne $C_{17}H_{35}COOH$) dont les caractéristiques sont représentées dans le tableau II.4.

Tableau II.4 : Caractéristiques physiques du lubrifiant.

| Caractéristiques | Spécification | Unité |
|--------------------------|---------------|----------|
| Taux d'humidité | 0,1 | % |
| Indice de saponification | 54 – 55 | mg KOH/g |
| Point d'inflammabilité | > 100 | °C |
| Indice d'acide | 207 – 201 | - |
| Indice d'iode | < 1 | - |

II.1.3. La farine de maïs (FM)

La farine de maïs utilisée dans notre travail (figure II.2) est fabriquée en Algérie par EURL Wam food dont le siège se trouve à Djebel El-Ouahch, Constantine. La granulométrie de la farine est $\leq 400 \mu\text{m}$.



Figure II.2 : La farine de maïs utilisée.

- **Préparations du PVC compound et des composites PVC/FM**

Les différents composites ayant des taux de charge de 0% (F0) 20 % (F20) et 30% (F30) (% massique) recyclés dans cette étude ont été préparés dans une étude précédente [45] par deux méthodes de traitement, à savoir le calandrage et le moulage par compression, comme suit : Le mélange (PVC Compound et FM) a été introduit dans un turbo-mélangeur de type T6HK8 pendant 15 minutes à une vitesse de 2000 tr/min et à une température de 80°C. Avant le déchargement, le mélange a été refroidi à 40°C. Le mélange est ensuite introduit dans un mélangeur à deux cylindres à une température de 140°C. Le mélange préparé est introduit dans les plateaux de la presse de table de marque TONJINE à une température de 135°C sous une force de pression de 250 kN pendant 5 minutes. Des plaques de 250×250×2 mm³ sont obtenues et refroidies à température ambiante, qui seront utilisées pour découper des échantillons sous forme d'haltères.

La composition massique du PVC compound est donnée dans le tableau suivant.

Tableau II.5 : Composition massique du PVC compound [45].

| Produits | PVC | DOP | Ca/Zn | Acide stéarique |
|----------------------|------------|------------|--------------|------------------------|
| Quantité (Kg) | 7,92 | 3,48 | 0,58 | 0,12 |

II.2. Protocole expérimental

II.2.1. Recyclage des composites

Le recyclage des différents composites PVC/FM est réalisé en utilisant un brabender et une presse hydraulique au niveau du laboratoire de recherche des matériaux polymériques avancée (LMPA) de l'université de Bejaia.

- **Brabender**

L'étape du recyclage a été réalisée en utilisant un mélangeur interne « Brabender de type Gmbh & Co. KG » Les plaques préparées précédemment qui ont été coupés en petits fragments, ont été versées dans la chambre de brabender (trémie) à une température de 180°C, à une vitesse de 50 tr/min et un taux de séjour de 5min afin d'obtenir une pâte (figure II.3). Le Brabender est piloté par un ordinateur qui fonction avec un logiciel de type WIN MIX.

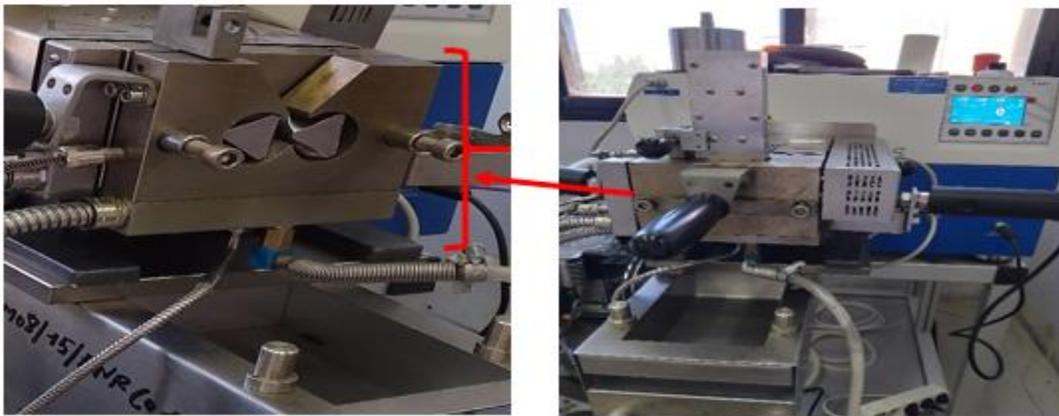


Figure II.3 : Brabender de type Gmbh & Co. KG.

- **Moulage par compression**

La pâte extraite du Brabender est coupée en petits fragments avant d'être placée dans une presse hydraulique de type Carver Inc. 260-563-7577 X5237

La température est fixée à 180°C sous une force de 30000N pendant 5min (Figure II.4) suivant ces étapes :

- Un préchauffage pendant 2 min,
- Un dégazage pendant 2 min,
- Une compression pendant 1 min.



Figure II.4 : Presse hydraulique de type Carver Inc. 260-563-7577 X5237 avec son moule.

Après compression du mélange, les échantillons ont été démoulés sous forme d'altères et de disques normalisés (Figure II.5).



Figure II.5 : Les altères et les disques

II.2.2. Caractérisations des composites recyclés

II.2.2.1. Tests mécaniques

II.2.2.1.1. Test de traction

Ce test permet d'obtenir des informations sur le comportement élastique, le comportement plastique et le degré de résistance à la rupture d'un matériau, lorsqu'il est soumis à une sollicitation uni-axiale.

L'essai de traction a été réalisé au niveau du laboratoire de l'entreprise privée des câbles électriques « CABEL » d'Alger sur une machine de type MTS Criterion selon la norme NFC 32-200, pilotée par ordinateur à l'aide d'un logiciel de type TXW (Figure II.6). L'éprouvette est étirée

à vitesse constante de 50 mm/min. Ce test nous a permis de déterminer : le Module d'Young, la contrainte et l'allongement à la rupture



Figure II.6 : Dynamomètre de type MTS.

II.2.2.1.2. Test de dureté shore D

Les essais de dureté Shore D ont été réalisées au niveau du laboratoire de l'entreprise privée de câbles électriques « CABEL » à Alger selon la norme NF T51-109. Cette technique consiste à appliquer une force destinée à forcer l'aiguille en acier pointue (poinçon) du duromètre Shore-D (Figure II.7) sur une plaque de 1x6 cm².

Le duromètre mesure entre 100 et 0. Plus le pénétrateur pénètre profondément dans le matériau, plus le matériau est mou et plus sa limite d'élasticité est faible. La pénétration est reflétée par une lecture directe du duromètre après 15 secondes.



Figure II.7 : Duromètre shore D.

II.2.2.2. Test d'absorption d'eau

L'essai a été réalisé au niveau du laboratoire de génie des procédés de l'université de Bejaia. Avant d'effectuer ce test, les échantillons ont été séchés dans une étuve à 60 °C pour éliminer l'humidité absorbée, puis refroidis dans un dessiccateur. Après refroidissement, on mesure le poids à l'aide d'une balance analytique avec une précision de 0,0001 g (m_0), ensuite on les trempe dans de l'eau distillée à une température ambiante. Les échantillons sont prélevés toutes les 24 heures, essuyer avec du papier absorbant pour éliminer toute eau de surface et pesés à nouveau (m). Ce processus se poursuit jusqu'à ce que la masse (m) se stabilise. Deux échantillons ont été testés pour chaque formulation. La variation de la masse différents échantillons est déterminée par la relation suivante :

$$\Delta m (\%) = \frac{m - m_0}{m} \times 100$$

Avec :

m_0 : Masse initiale des échantillons (g).

m : Masse des échantillons (g) après un temps t (jours).

Δm : Variation de la masse (%).

La figure II.8, montre le test d'absorption d'eau des différents échantillons recyclés.



Figure II.8 : Test d'absorption d'eau du PVC et des différents composites.

II.2.2.3. Analyse infrarouge à transformée de Fourier IRTF

L'analyse des différents échantillons par IRTF a été effectuée au niveau du laboratoire de génie des procédés de l'université de Bejaia à l'aide d'un appareil IRTF de type SHIMADZU FTIR-8301 piloté par un ordinateur doté d'un logiciel de traitement avec une résolution de 4 cm^{-1} dans la région de $4000\text{ à }400\text{ cm}^{-1}$ (figure II.9).



Figure II.9 : Spectrophotomètre IRTF.

Chapitre III : Résultats et discussion

Chapitre III : Résultats et discussion

Ce chapitre illustre l'effet du nombre de cycle du recyclage sur les propriétés chimiques, physiques et mécaniques des composites élaborés à base du polychlorure de vinyle (PVC) comme matrice et de la farine de maïs (FM) comme charge.

III.1. Caractérisation mécanique

III.1.1. Caractérisation mécanique par traction

III.1.1.1. Contrainte à la rupture

La figure III.1, illustre l'évolution de la contrainte à la rupture des composites PVC/FM en fonction du taux de charge et du nombre de cycle du recyclage. On remarque que cette grandeur a tendance à diminuer avec l'ajout de la FM dans la matrice PVC et que cette diminution augmente avec l'augmentation du taux de charge, cela, est peut-être dû à une mauvaise dispersion de la FM dans la matrice PVC avant recyclage, ce qui infère un mauvais transfert de contrainte dans la matrice PVC. Ces résultats sont en accord avec d'autres travaux de recherches [23-45].

Pour les matériaux recyclés (figure III.1), on a constaté que le recyclage n'a pas affecté cette propriété pour le PVC vierge, mais une augmentation de la contrainte est enregistrée sur les composites après le premier cycle de recyclage par rapport à ceux avant recyclage. Cela est peut-être dû au renforcement de la matrice par la charge après recyclage et à l'augmentation des forces de liaisons entre la charge et la matrice [17].

Après le deuxième et le troisième recyclage, on a enregistré une légère diminution de la contrainte pour des taux de charge de 20% en FM, par contre pour des taux de charge de 30% nous n'avons pas enregistré de changement significatif sur ce paramètre.

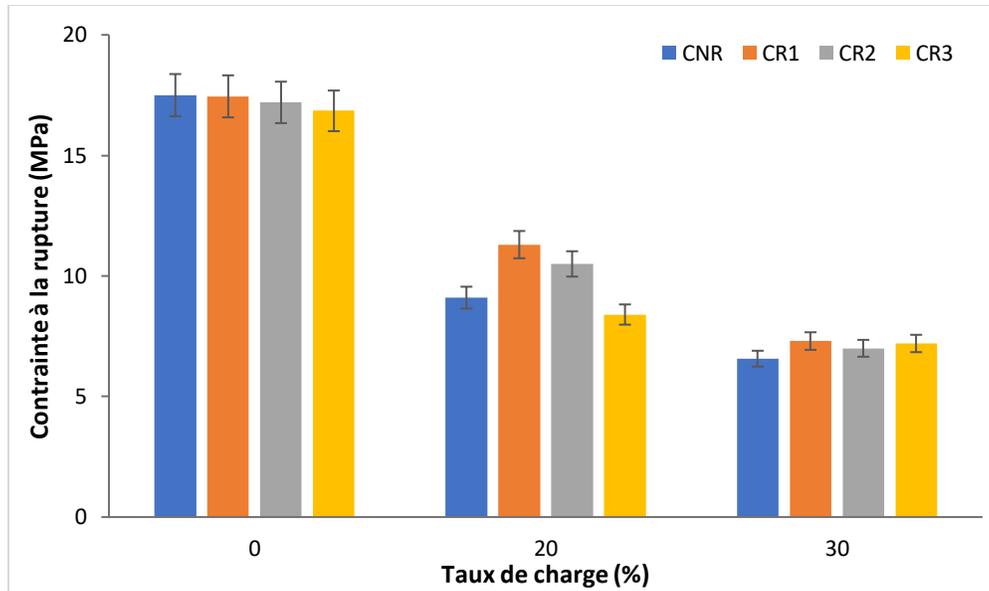


Figure III.1 : Contraite à la rupture du PVC et des composites PVC/FM recyclés et non recyclés en fonction du taux de charge.

III.1.1.2. Allongement à la rupture

La figure III.2 montre l'évolution de l'allongement à la rupture du PVC et des composites PVC/FM en fonction du taux de charge et du nombre de cycle du recyclage. On remarque que l'ajout de la charge de la FM réduit considérablement l'allongement à la rupture des composites par rapport à la matrice. Cette diminution est due à la rigidité de la charge, ce qui engendre une faible mobilité des chaînes macromoléculaires [47].

Après le premier et le deuxième recyclage, on a remarqué que l'allongement à la rupture du PVC et des composites PVC/FM à 20% de taux de charge a enregistré une augmentation, ce qui nous amène à dire que le recyclage a amélioré l'interaction entre la matrice et la farine de maïs [17]. Par contre, après le troisième cycle de recyclage ce paramètre a eu tendance à diminuer.

Pour des taux de charge de 30%, on a observé que l'allongement à la rupture augmente continuellement avec le nombre de recyclage. Cela, est peut-être dû à l'auto-renforcement des composites par la réduction des dimensions de la charge avec le recyclage ce qui a augmenté la taille de l'interphase charge-matrice [48].

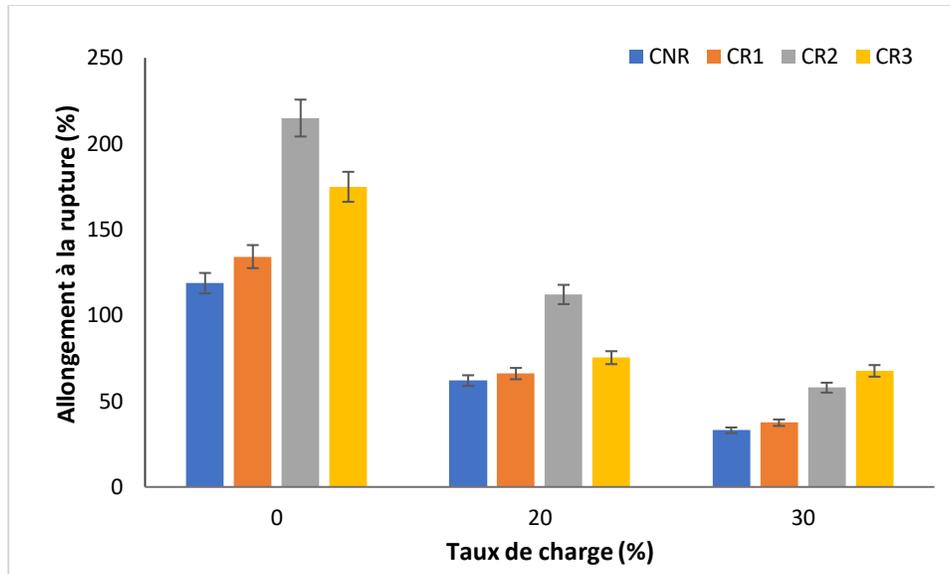


Figure III.2 : Allongement à la rupture du PVC et des composites PVC/FM recyclés et non recyclés en fonction du taux de charge.

III.1.1.3. Module d'Young

La variation du module d'Young en fonction du taux de charge est présentée sur la figure III.3. Les résultats enregistrés montrent que le module d'Young augmente avec l'incorporation et l'augmentation de la quantité de la FM dans la matrice PVC. Ce comportement est attribué à la phase rigide des charges dispersée qui confère une grande rigidité à la matrice PVC. Cette augmentation pourrait être expliquée aussi par l'augmentation de la cristallinité du matériau après ajout de la charge. Manshor et al. [49] ont indiqué que le module d'Young augmente généralement lorsque la teneur en charge cellulosique augmente.

Cependant, on remarque que le module d'Young du PVC et des composites PVC/FM à 20% de charge a enregistré une diminution après le deuxième et le troisième cycle de recyclage. Par contre, pour des taux de charge de 30%, on a enregistré une augmentation du module d'Young avec le nombre de recyclage.

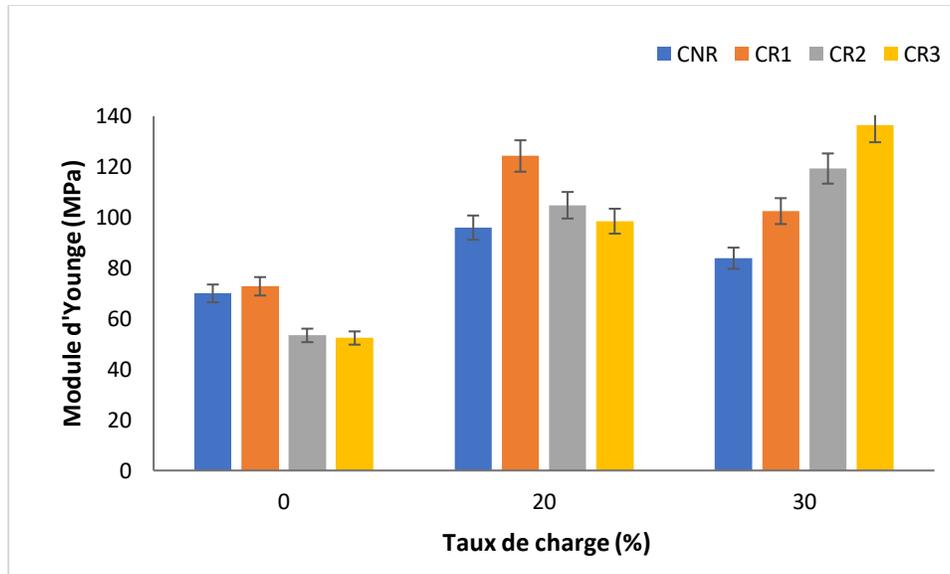


Figure III. 3 : Module de Young du PVC et des composites PVC/FM recyclés et non recyclés en fonction du taux de charge.

III.1.2. Test de dureté shore D

Les variations de la dureté du PVC et des composites PVC/FM, en fonction du taux de charge et du nombre de cycle du recyclage sont représentées sur la figure III.4. On remarque que la dureté augmente en fonction du taux de charge par rapport au PVC non recyclé et cette augmentation peut être expliquée par le fait que l'ajout de charge organique à un matériau peut renforcer sa structure et améliorer sa dureté [51, 52].

Pour la matrice PVC recyclé, la dureté a augmenté après le premier cycle, ensuite une diminution a été enregistrée à partir du deuxième cycle. Par contre, pour les différents composites, la dureté diminue continuellement avec le nombre de cycle. Cela peut être expliqué par le fait que le processus de recyclage peut introduire des impuretés ou des défauts dans la structure cristalline du matériau, de plus le recyclage peut entraîner des cycles de chauffages qui peuvent altérer la microstructure du matériau, influençant ainsi sa dureté [53, 54].

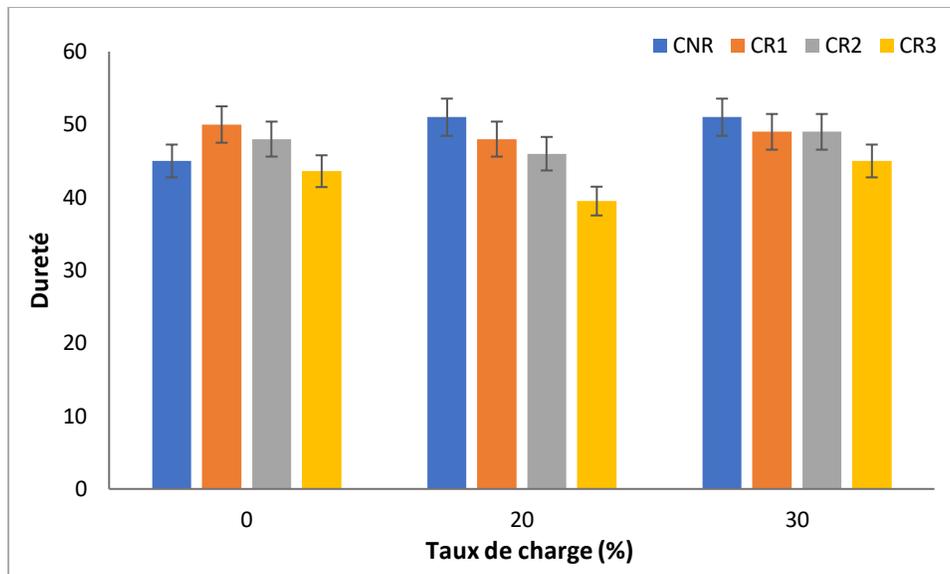


Figure III.4 : Dureté du PVC et des composites PVC/FM recyclés et non recyclés en fonction du taux de charge.

III.2. Test d'absorption d'eau

La figure III.5 illustre l'évolution de l'absorption d'eau du PVC et des composites PVC/FM non recyclés et recyclés en fonction du taux de charge et du temps d'immersion dans l'eau. On constate que le PVC vierge (F0) n'absorbe pas d'eau. Ceci est dû au fait que le PVC est un polymère hydrophobe qui enregistre souvent une très faible absorption d'eau [54].

Les résultats enregistrés sur les différents composites recyclés et non recyclés, montre que tous les matériaux enregistrent la même allure qui se traduit par une augmentation notable dans le taux d'absorption d'eau avec le temps d'immersion et avec l'augmentation du taux de charge en FM. On a aussi remarqué que la vitesse d'absorption d'eau pour tous les matériaux est rapide pour les premiers jours d'immersion, qui est peut-être due au fait que tous les groupements hydroxyles disponibles sont utilisés dans cette période et après elle diminue graduellement avec le temps. Des résultats semblables ont été enregistrés par d'autres chercheurs [55].

Après recyclage, on remarque que pour les formulations F20, l'absorption d'eau a augmenté après le troisième cycle du recyclage ; elle est passée de 5.20 % pour la formulation F20 NR à 5.48 %, 5.84 % et à 11.68 % pour les formulations F20 1RC, F20 2RC et F20 3RC respectivement. Par contre, pour les formulations F30, une augmentation de l'absorption d'eau a

été enregistrée dès le deuxième cycle de recyclage. Elle passe de 11.07 % pour la formulation F30 NR à 11.27 %, 15.87 % et à 20.80 % pour les formulations F30 1RC, F30 2RC et F30 3RC respectivement. Ces résultats peuvent être attribués aux modifications structurelles produites par le recyclage ce qui peut rendre le composite PVC/FM plus perméable à l'eau.

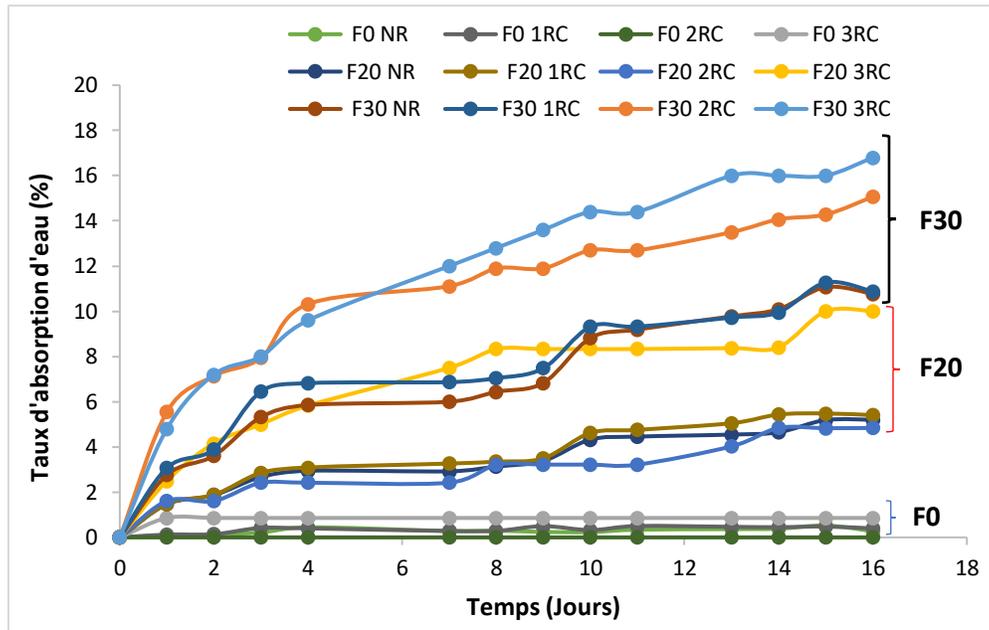


Figure III.5 : Taux d'absorption d'eau du PVC et des composites PVC/FM recyclés et non recyclés en fonction du taux de charge et du temps.

III.3. Analyse spectrale par infrarouge à transformée de Fourier (IRTF)

Ce test est effectué afin de permettre la détection des bandes caractéristiques des composites PVC/FM et étudier les différentes interactions lors du processus du recyclage et l'ajout de la farine de maïs sur ce dernier.

Les attributions des fonctions chimiques pour chaque bande d'absorption qui apparaît sur les spectres IRTF de la farine de maïs sont comme suit [23, 56] :

Il y a trois bandes caractéristiques de l'amidon entre 990 cm^{-1} et 1160 cm^{-1} qui sont attribuées aux vibrations d'élongation des liaisons C-O. Les bandes à 1150 cm^{-1} , 1080 cm^{-1} sont caractéristiques des liaisons C-O-H de l'amidon et les bandes entre 990 cm^{-1} et 1030 cm^{-1} sont caractéristiques de la vibration de déformation des liaisons C-O d'anhydroglucose. La bande à 1650 cm^{-1} est attribuée à l'absorption d'eau dans la région amorphe de l'amidon. La bande à 2920 cm^{-1} est caractéristique de la vibration d'élongation asymétrique des liaisons C-H. une large bande

due à la liaison hydrogène du groupement hydroxyle apparaît à 3400 cm^{-1} et qui est caractéristique de la vibration d'élongation des hydroxyles O-H de l'amidon.

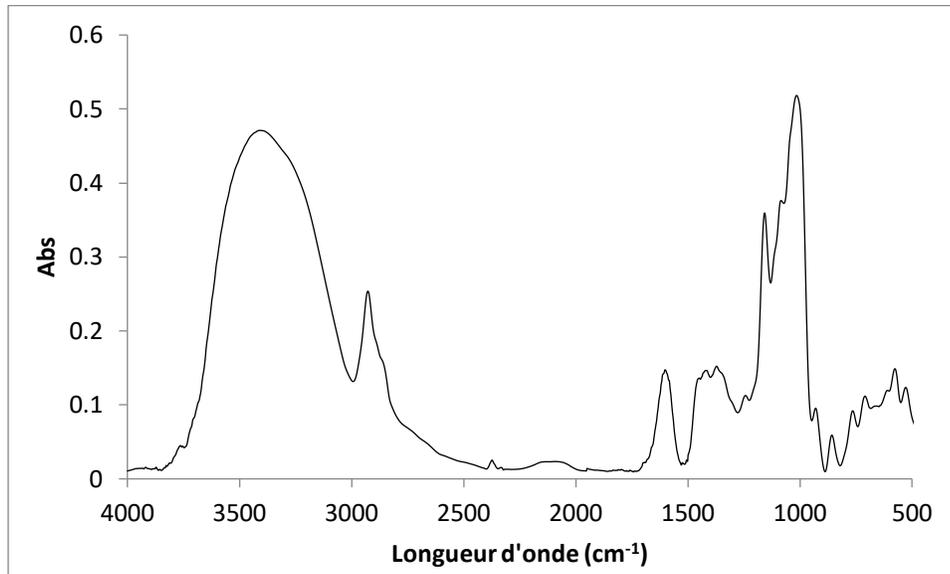


Figure III.6 : spectres IRTF de la farine de maïs [23]

La **Figure III.7** montre les spectres IRTF du PVC avant et après recyclage. Les principales bandes qui caractérisent le PVC non recyclé sont illustrées dans le tableau III.1

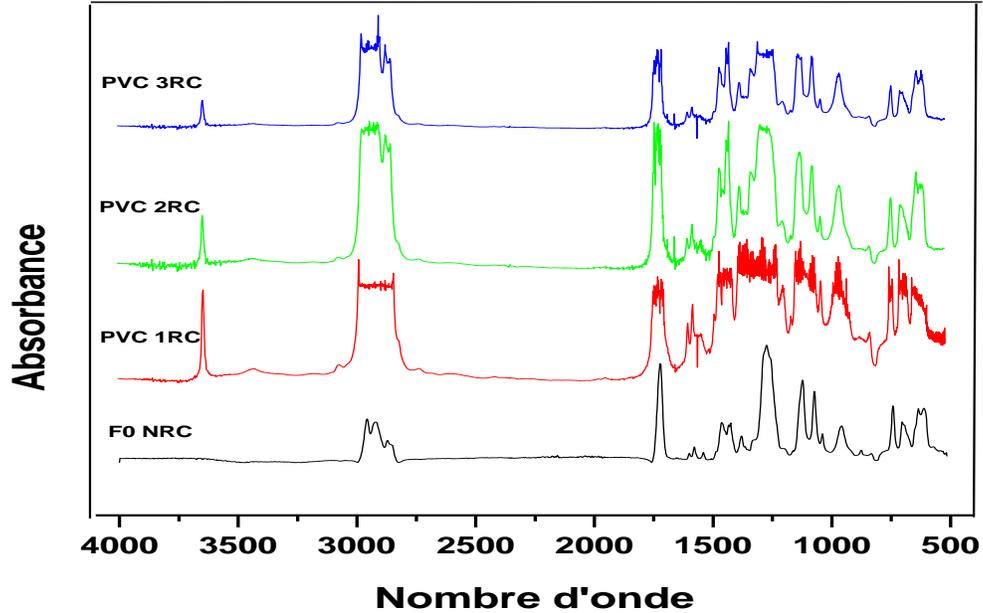


Figure III.7 : Spectres IRTF du PVC non recyclé, et du PVC recyclé.

Le tableau III.1 illustre les groupements fonctionnels caractéristiques du PVC vierge.

Tableau III.1 : Groupements fonctionnels caractéristiques du PVC vierge [57-58].

| | | | | | |
|--|------------|----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| Nombre d'onde (cm⁻¹) | 630 et 704 | 742 | 770-840 | 830-970 | 831 |
| Attributions | C-Cl | Déformation CH | Elongation C-Cl | Déformation CH ₂ | Elongation C-Cl |

| | | | | | |
|--|-----------------------------|----------------|---|---------------------------------|---------------|
| Nombre d'onde (cm⁻¹) | 970 | 1037, 1070 | 1340-1224 | 1427 | 1467 |
| Attributions | Elongation -CH ₂ | Elongation C-C | Déformation CH, CH ₂ , CH ₃ | Déformation CH ₂ -Cl | Vibration -CH |

Le spectre du PVC non recyclé relève l'existence de plusieurs autres bandes d'absorption relatives aux groupements fonctionnels des additifs :

- Une bande d'absorption située alentours de 3640 cm^{-1} et 3420 cm^{-1} , qui correspondent aux groupements $-\text{OH}$ présents dans le plastifiant DEHP
- Le pic à l'environ de 3060 cm^{-1} attribué aux vibrations d'élongation des groupements $-\text{CH}$ du plastifiant.
- On remarque l'apparition d'une bande large entre $2840\text{-}2970\text{ cm}^{-1}$ qui correspond aux élongations des CH_2 du plastifiant (DOP).
- Une bande large centrée à 1720 cm^{-1} correspondants au groupe carbonyle ($\text{C}=\text{O}$) de l'acide stéarique.
- Un pic est observé à 1570 relative aux fonctions ester des stabilisants Ca/Zn .

La **figure III.8** représente les spectres IRTF du composite PVC/FM avec un taux de charge de 20% recyclés et non recyclé. Sur le spectre du composite PVC/FM non recyclé on peut constater une augmentation significative de l'intensité de la bande d'absorption située entre $3560\text{-}3100\text{ cm}^{-1}$ par rapport au spectre du PVC seul. Cette augmentation est relative aux vibrations d'élongation des groupements hydroxyde de la farine de maïs.

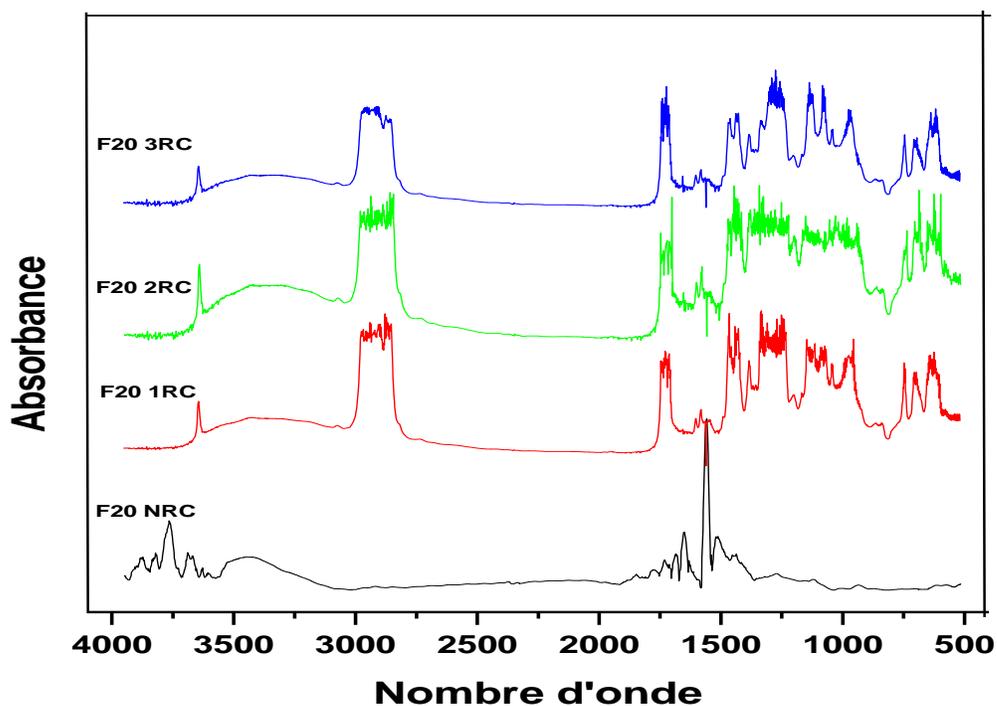


Figure III.8 : Spectres IRTF du composite PVC/FM à 20% de charge recyclé et non recyclé.

Les spectres IRTF de composites PVC/FM de taux de charge 30% recyclés et non recyclés sont représentés sur la figure III.9. Le spectre F30 non recyclé est presque identique à celui F20 non recyclé avec cependant une intensité de la bande d'absorption centrée à 3417 cm^{-1} plus élevée due à un taux de charge en farine de maïs plus important.

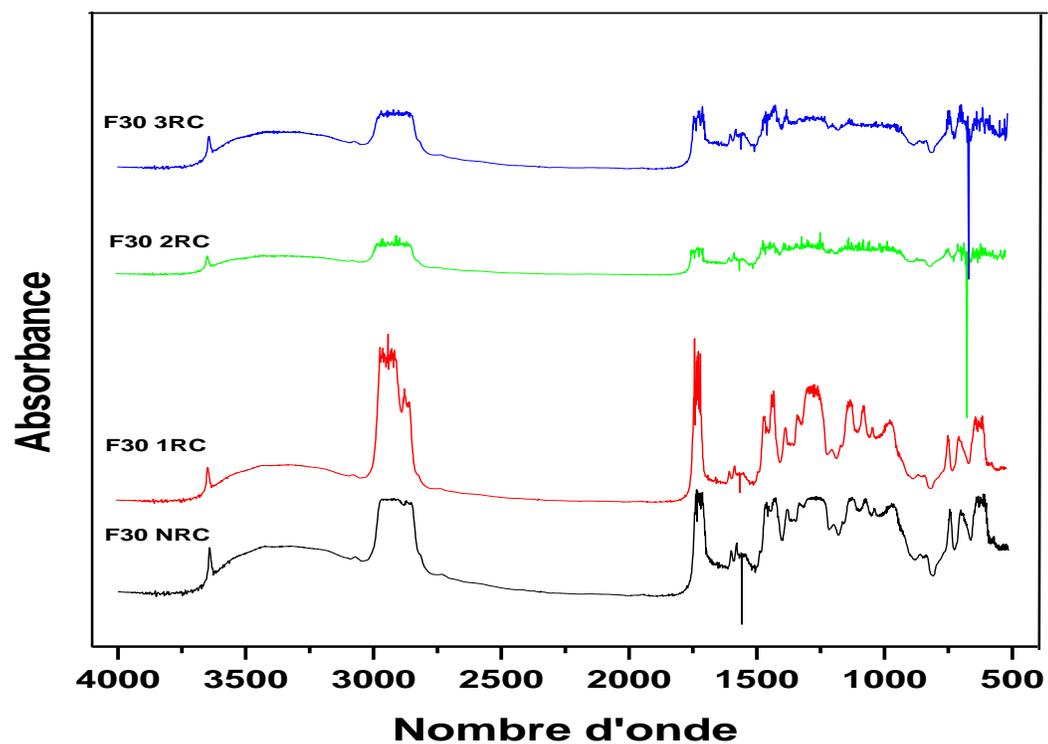


Figure III.9 : Spectres IRTF du composite PVC/FM à 30% de charge recyclé et non recyclé.

Conclusion

On a pas pu avoir des résultats concernant l'évolution du recyclage.

Conclusion générale

Conclusion générale

Du PVC a été composé avec différentes concentrations de farine de maïs (0%, 20% et 30% en poids). Le PVC pur et les composites PVC/FM, ont ensuite été soumis à trois cycles de recyclage dans le but d'étudier l'effet de ce dernier sur les propriétés physiques, chimiques et mécaniques de ces matériaux en fonction du taux de charge en FM.

L'analyse des résultats expérimentaux enregistrés avant et après trois cycles de recyclage, nous a permis de tirer les principales conclusions suivantes :

- La contrainte à la rupture du PVC et des composites PVC/FM n'a pas été affectée par le recyclage.
- Une amélioration de l'allongement à la rupture après chaque cycle de recyclage pour les différents taux de charge.
- Le module de Young du PVC et des composites PVC/FM à 20% de charge a enregistré une diminution après le deuxième et le troisième cycle de recyclage. Par contre une augmentation continue de la rigidité a été observée après chaque cycle de recyclage pour un taux de charge de 30%.
- La dureté du PVC a enregistré une augmentation après le premier recyclage, suivie d'une légère diminution après le deuxième et troisième recyclage. Pour les matériaux chargés, une augmentation de la dureté est observée après chaque cycle.
- Le test d'absorption d'eau a révélé que l'absorption d'eau du PVC a enregistré une augmentation négligeable après les trois cycles de recyclage et qu'une augmentation de ce paramètre a été enregistrée après le troisième et le deuxième recyclage pour les matériaux chargés avec 20 % et 30 % en FM.
- L'analyse des spectres IRTF nous a permis de déterminer les principales modifications induites par les trois cycles de recyclage du PVC et des composites PVC/FM et de constater l'existence de l'oxydation du PVC lors du recyclage.

Perspectives

Pour compléter et développer mieux cette étude nous recommandons les perspectives suivantes :

- Augmenter le nombre de test effectué pour chaque paramètre pour plus de fiabilité des résultats telle que DRX, ATG.
- Faire des études sur la dégradation de ces composites sous l'actions de micro-organismes.
- Etudier la capacité de traitement physique de la surface des charges.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **AISSA, ZOUAOUI. MONCEF, LARGUET.** Les composites à hybrides à fibres végétale. Mémoire master. Université Bordj Bou Arreridj, 2021.
- [2] **AZERRADJ, Thiziri. KHALDI, Yasmina.** Elaboration et caractérisation de matériaux composites à base de Polypropylène et fibres de bambou. Mémoire master. Université de Bejaia, 2022.
- [3] **BAKHOUCHE, Bouchra.** Caractérisation d'un matériau composite stratifié à fibre de verre/époxy en flexion 3 points statique. Mémoire master. Université de Annaba, 2018.
- [4] **GENDRON, Corinne.** La gestion environnementale et la norme ISO 14001. PUM, 2004.
- [5] **BELKHIR, Zohra.** Amélioration des propriétés mécaniques des composites à différentes matrices à base de fibres naturelles locales. Thèse de doctorat. Université de Tébessa, 2022.
- [6] **HADJER, BOUAZZA.** Recyclage des matériaux composites thermodurcissables à usage naval. Thèse de doctorat. Université Mohamed Boudiaf, 2011.
- [7] **DUPEUX, Michel.** « Aide-mémoire sciences des matériaux », 2005.
- [8] **BOUDJEMA, Hayet Latifa.** Elaboration de matériaux composites biodégradables issus de ressources renouvelables. Mémoire de doctorat. Université de Annaba 2016.
- [9] **GENDRE, Lionel.** Les grandes familles de matériaux composites. Document de cours, Ecole Nationale Supérieure de Cachan, France, 2011.
- [10] **METTOUCHI, Lotfi.** Influence de la charge particule de cuivre et du renfort couches de fibres de verre sur le comportement mécanique d'un composite. Mémoire de fin d'étude. Université de Tizi-Ouzou, 2018.
- [11] **SEYNI, Abdoulaye.** Propriétés physico-chimiques et d'usage de matériaux composites à charge dégradable produits par co-broyage. Thèse de doctorat. Université de Toulous 2008.
- [12] **Imattec.** Les fils et tissus techniques d'aramides pour les applications de protection thermique et mécanique [en ligne]. Disponible sur : <https://imattec.com/aramides.php>. [Consulté le 23/03/2024].

-
- [13] **SIKA, schweiz ac.** Fibre de verre premium [en ligne]. Disponible sur : <https://che.sika.com/fr/construction/systemes-toiture/toiture-plate/composants/etanchieite-liquide/sika-fibre-de-verrepremium.html> [Consulté le 23/03/2024].
- [14] **AGATHE, Beaujon.** Recycler les composites en fibres de carbone, le défi qui attise l'appétit des start-ups. Challenges [en ligne]. Disponible sur : https://www.challenges.fr/green-economie/recycler-les-composites-en-fibres-de-carbone-le-defi-qui-attise-l-appetit-des-start-up_812296. [Consulte le 23/03/2024].
- [15] **MOUMENE, Taqiyeddine.** Les composites, 2022 [en ligneDisponible sur : http://fsm.univtiaret.dz/docs/cours/C_M1_CM_les%20composites.pdf]. [Consulté le 25/03/2024].
- [16] **CHINESTA, Francisco.** La Vie intime des matériaux composites. Editions Publibook, 2011.
- [17] **TOUNSI, DJOUMANA. ZERGANE, Khaoula.** Effet des agents oxydants sur les propriétés mécaniques et thermiques des composites de polypropylène renforcés par des fibres de palmier. Mémoire master. Université de Biskra, 2020.
- [18] **FLORENT, ilczyszyn.** Caractérisation expérimentale et numérique du comportement mécanique des agro-composites renforcés par des fibres de chanvre. Thèse de doctorat. Université de Troyes, 2013.
- [19] **TOSSOU, Éric.** Développement de nouveaux composites hybrides renforcés par des fibres de carbone et de lin : mise en œuvre et caractérisation mécanique. Thèse de doctorat. Université de Normandie, 2019.
- [20] **HADBI, Zineb.** Etude du comportement mécanique du matériau composite des prothèses orthopédiques. Mémoire master. Université de Annaba,2018.
- [21] **GOSSELIN, Ryan.** « Injection de mousses composites bois-plastiques d'origine post-consommation ». Mémoire fin d'étude. Université Laval, Québec, 2005.
- [22] **ALMI, Marou a. MOUZA, Nabila.** Elaboration, caractérisation et étude de la biodégradabilité d'un matériau issu de ressources renouvelables. Mémoire fin d'étude. Université de Ecole Nationale Polytechnique,2018.
- [23] **SAHI, Samira.** Effet de l'introduction d'une charge végétale sur les propriétés de la biodégradabilité des composites PEBD/farine de maïs. Thèse de doctorat. Université de BEJAIA, 2016.

- [24] **RENAULT, Thierry.** Les matériaux composites dans l'automobile. Mécanique & industries, 2001, vol. 2, no 3, p. 211-218. [Consulté le 26/03/2024].
- [25] **HAMELIN, Patrice.** Polymères renforcés de fibres (FRP)-Identification et champs d'application, 2010.
- [26] **RIGNY, Paul, et al. (Ed.)**. Chimie, aéronautique et espace. EDP sciences, 2018.
- [27] **Z, HRUSKA. PATRICE, GUESNET. CHRISTIAN, SALIN. J-J, COUCHOUD** « Poly (chlorure de vinyle). Technique de l'ingénieur (AM 3325). France, 2007.
- [28] **TABLET, SARRA. DJOUAD, AMIRA.** Etude de la thermo dégradation et stabilisation de polychlorure de vinyle (PVC). Mémoire de licence. Université de Sétif, 2015.
- [29] **INRS.** Polychlorure de vinyle. Plastique, risque et analyse thermique [en ligne]. [Consulté le 30/03/2024]. Disponible sur : www.inrs.fr/plastiques.
- [30] **AROUN, Ouahiba. AGROUCHE, Djedjiga.** Elaboration et caractérisation d'un nouveau matériau composite à base de PVC et farine de roseau commun et de grignon d'olive. Mémoire d'un master académique. Université de Tizi-Ouzou, 2017.
- [31] **OUAIL, KOUSSAILA. TADJROUNI, BILA.** Recyclage des matériaux composites PVC /FARINE de grignon d'olive. Mémoire master. Université de Bejaia, 2022.
- [32] **DOUBAKH, Farouk.** Etude de l'influence de la concentration du stabilisant Ca/Zn sur les propriétés du PVC. Mémoire master. Université de Biskra, 2016.
- [33] **MÂACHE, Nardjes. MOUAKI BACHIRI, Abir.** L'influence des anti-UV sur les mélanges à base de PVC. Mémoire master. Université de Biskra, 2016.
- [34] **Foodcom.** Amidon de Maïs et Farine de Maïs – quelle est la différence ? [En ligne]. Disponible sur : <https://foodcom.pl/fr/amidon-de-mais-et-farine-de-mais-quelle-est-la-difference/>. [Consulté le 09/05/2024].
- [35] **Agir.** Caractéristiques physico-chimiques de la farine [en ligne]. Disponible sur : <https://www.agir-crt.com/blog/caracteristiques-physico-chimiques-farine/>. [Consulté le 09/05/2024].
- [36] **Slide serve.** Analyse de la farine et de produits de céréales [en ligne]. Disponible sur : <https://www.slideserve.com/jesus/analyse-de-la-farine-et-de-produits-de-c-r-ales> [Consulté le 09/05/2024].

- [37] **Wix.** Peut-on marcher sur l'eau ? les propriétés de la farine de maïs [en ligne]. Disponible sur : <https://tpeaumaizena.wixsite.com/tpemarchersurleau/un-melange-propice> [Consulté le 12/05/2024].
- [38] **ZIGHED, Mohammed.** Elaboration et caractérisation de bio composites à base de PEHD/ amidon renforcés par les fibres de lin. Thèse de Doctorat. Université de Boumerdes, 2022.
- [39] **Crecof.** Guide-du-recyclage-des-composites, mars 2017 [en ligne]. [Consulté le 28/03/2024].
- [40] **RENÉ, Moletta.** Le traitement des Déchets. Lavoisier, P 18-26, 2009
- [41] **CHERMAK, Sara.** Comportement mécanique et thermique d'un biton à base de déchets de recyclage. Thèse de Doctorat. Université de Tizi-Ouzou, 2023.
- [42] **Légifrance.** Article L541-1-1 Version en vigueur depuis le 31 juillet 2020 [en ligne]. Disponible sur : https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000048286387. [Consulté le 28/03/2024].
- [43] **Tri-facile.** Quelles sont les différentes étapes du recyclage des déchets ? [En ligne]. Disponible sur : <https://tri-facile.fr/quelles-sont-les-differentes-etapes-du-recyclage-des-dechets/>. [Consulté le 28/03/2024].
- [44] **Vinyl plus.** Technologies de recyclage du PVC [en ligne]. Disponible sur : https://vinylplus.eu/wp-content/uploads/2017/02/2015-07-08_PVC_Recycling_Technologies_-_French.pdf. [Consulté le 29/03/2024].
- [45] **SADOUKI, Kenza. SAHARI, Asma.** Etude de la faisabilité du recyclage d'un nouveau matériau polymère à renfort végétal. Mémoire master. Ecole nationale polytechnique, 2022.
- [46] **PREVILLE, Angèle. BOLO, Philippe.** Pollution plastique : une bombe à retardement ? Rapport n° 217 (2020-2021), déposé le 10 décembre 2020 [en ligne]. Disponible sur : <https://www.senat.fr/rap/r20-217/r20-21718.html>. [Consulté le 24/04/2024].
- [47] **SID, Hamza. IGHOUDANE, Salim.** Effets de cycles d'extrusion répétés sur les propriétés physico-chimiques du polypropylène renforcé par des fibres de papier journal. Mémoire master. Université de Bejaia, 2014.

- [48] **KARTALIS, C. PAPASPYRIDES, C. PFAENDNER, R.** Recycling of post-used PE packaging using the restabilization technique. *Polymer Degradation and Stability*. P 189-197. 2000
- [49] **BEN JAMEAA, Abdelmajid.** Elaboration, procédé et caractérisation des composites renforcés avec haute teneur en fibre de cellulose. Mémoire fin d'étude. Université du Québec, 2019.
- [50] **Repolyfine.** Il Existe Deux Manières De Modifier Le PVC : La Modification Chimique Et La Modification Physique [en ligne]. Disponible sur : <https://fr.repolyfinechem.com/news/there-are-two-ways-to-modify-pvc-chemical-mod-52926949.html>. [Consulté le 20/06/2024].
- [51] **NAUDIN, Cécile-Anne. CLOZZA, Claude.** Incorporation des charges [en ligne]. Disponible sur : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-plastiques-et-composites-tiaam/archive-1/charges-a3220/incorporation-des-charges-a3220niv10004.html>. [Consulté le 20/06/2024].
- [52] **Studocu.** Physiques des matériaux cristallins [en ligne]. sur : <https://www.studocu.com/fr/document/institut-des-sciences-et-technologies-de-paris/sciences-de-lingenieur/physique-des-materiaux-cristallins/53528498>. [Consulté le 20/06/2024]. Disponible
- [53] **ADEME.** Guide du recyclage et de l'écoconception des composites [en ligne]. [Consulté le 20/06/2024].
- [54] **Omnexus.** Absorption d'eau 24 heures [en ligne]. Disponible sur : <https://omnexus.specialchem.com/polymer-property/water-absorption-24-hours>. [Consulté le 22/06/2024].
- [55] **EZZROUG, Kaouther.** Formulation et évaluation de vecteurs particulières à base de polysaccharides natifs et modifiés. Applications pharmaceutiques. Thèse de Doctorat. Université de Médéa, 2019.
- [56] **SAHI, S. DJIDJELLI, H.** Utilisation de l'amidon comme charge biodégradable dans les matériaux composites polyéthylène basse densité/amidon. *Annale de Chimie et Science des matériaux* 38 (2013) 189-202. [En ligne]. [Consulté le 24/06/2024].

- [57] **MIRAR, Asma. BERKANE, Imene.** Valorisation des déchets lignocellulosiques pour la préparation de nouveaux matériaux polymères. Mémoire master. Ecole Nationale Polytechnique, 2019.
- [58] **MAZA, Amina.** Détermination de la résistance aux agents chimiques du PVC stabilisé à l'huile de tournesol époxydée. Mémoire fin d'étude. Ecole National de génie de l'environnement, 2007.

Résumé

L'objectif de ce travail est l'élaboration d'un nouveau matériau composite à base de PVC comme matrice polymérique renforcée par la farine de maïs avec différents taux de charge et d'étudier la faisabilité du recyclage de ce composite. Différentes techniques de caractérisation (tests mécaniques, physiques et chimiques) ont été utilisées pour étudier l'effet du nombre de cycle de recyclage sur les propriétés mécaniques, physiques et chimiques des matériaux élaborés. Les résultats enregistrés montrent que le recyclage n'a pas affecté ces différentes propriétés.

Mots clés : Composites, recyclage, PVC, charge végétale.

Abstract

The objective of this work is the development of a new composite material based on PVC as a polymer matrix reinforced by corn flour with different loading rates and to study the feasibility of recycling this composite. Different characterization techniques (mechanical, physical and chemical tests) were used to study the effect of the number of recycling cycles on the mechanical, physical and chemical properties of the materials developed. The results recorded show that recycling did not affect these different properties.

Keywords: Composites, recycling, PVC, vegetable filler.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو تطوير مادة مركبة جديدة تعتمد على البولي كلوريد الفينيل كمصفوفة بوليميرية معززة بدقيق الذرة وبنسب تحيل مختلفة ودراسة جدوى اعادة تدوير هذه المادة. ثم است خدام تقنيات التوصيف المختلفة (الاختبارات الميكانيكية والفزيائية والكيميائية) لدراسة تأثير عدد دورات التدوير على الخواص الميكانيكية والفزيائية والكيميائية للمواد المطورة. وتظهر النتائج المسجلة ان إعادة التدوير لم تؤثر على الخصائص المختلفة.

الكلمات المفتاحية: المواد المركبة، المواد المركبة، بولي كلوريد الفينيل، حشو نباتي.