

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département Génie des Procédés



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN GENIE DES PROCEDES

Spécialité : Génie Chimique

Intitulé du Mémoire

**Application des bioplastique dans l'industrie
médicale**

Présenté par :

HADJADJ Rachda

MILOUDI Chourouk

Encadré par :

Mme CHABANE Leila

Mr BOURAS Omar

Année Universitaire 2024/2025

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire "**Eau, Environnement et Développement Durable**" rattaché au Département de Génie des Procédés de l'Université Blida 1, sous la direction de Madame **LEILA CHABANE** et Monsieur **OMAR BOURAS**.

Au terme de ce modeste travail, nous tenons à rendre grâce à Dieu Tout-Puissant pour la détermination et la volonté qu'Il nous a accordées, sans lesquelles ce travail n'aurait jamais vu le jour.

Nous adressons nos sincères remerciements à notre promotrice Madame **Leïla Chabane** ainsi qu'à notre co-promoteur Monsieur **Omar Bouras**, professeurs à l'Université Saad Dahlab de Blida, pour leur encadrement et leur guidance tout au long de ce projet.

Leurs précieux conseils nous ont été d'une grande utilité et nous leur exprimons notre profonde gratitude pour leur dévouement, leur générosité et la confiance qu'ils nous ont témoignée, nous apprécions grandement leur disponibilité ainsi que leurs remarques pertinentes et constructives.

Nous remercions également tous les membres du jury qui nous ont honorés en acceptant la mission qui leur a été confiée et qu'ils ont accomplie avec exemplarité.

Nous n'oublions pas d'exprimer notre reconnaissance à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation tout au long de notre parcours universitaire, qu'ils trouvent dans ce travail le fruit de leurs efforts et notre gratitude sincère.

Nous remercions aussi tous les techniciens ainsi que l'ensemble du personnel administratif du Département de Génie Chimique, en particulier Monsieur **Tahar** et Madame **Karima**.

Enfin, nous adressons nos remerciements les plus chaleureux à tous nos collègues qui ont partagé avec nous le même laboratoire, pour leur compréhension et la collaboration dont ils ont fait preuve.

Merci du fond du cœur.

DÉDICACE

C'est un sentiment étrange d'être ici aujourd'hui, avec un stylo et une seule feuille blanche, pour avoir le droit d'exprimer ma gratitude envers toutes les personnes et toutes les choses qui m'ont menée là où je suis aujourd'hui.

Je sais qu'une seule feuille ne suffira pas, même plusieurs ne pourraient contenir tout ce que mon cœur veut dire ; Mais aujourd'hui, je saisis cette opportunité pour rendre hommage aux personnes les plus importantes et les plus chères de ma vie, dans l'espoir de leur rendre un peu de ce qu'elles m'ont offert.

Avant toute chose, louange et gratitude à Dieu Tout-Puissant. À mes yeux, les détails de ma vie relèvent du miracle, et le premier de ces miracles, c'est ma famille.

Je tiens ici à adresser un remerciement particulier à mes chers parents, Monsieur et Madame **HADJADJ** je remercie Dieu du fond du cœur d'être née votre fille ; ma reconnaissance pour vos sacrifices est infinie.

Que Dieu vous protège et vous garde.

Un grand merci également à mes tantes, mes oncles, et ma chère grand-mère. Mon amour pour vous est immense, et Dieu seul connaît la place que vous occupez dans mon cœur.

À mes frères et sœurs, les joyaux de mon cœur : merci du fond du cœur.

Et à d'autres personnes chères à mon cœur : à l'époux de ma sœur et à ses enfants, ainsi qu'aux enfants de mon oncle merci sincèrement pour votre présence.

À tous ceux que mon cœur a perdus dans cette vie, mais qui restent gravés en moi jusqu'au Jour du Jugement : merci pour ce que vous avez été. Que Dieu vous accorde sa miséricorde.

Une immense gratitude également à tous les amis que j'ai croisés dans ma vie, et une pensée toute particulière pour mon amie de cœur ; Merci pour votre fidélité et votre affection.

Je n'oublie pas non plus mes professeurs, à toutes les étapes de ma vie, en particulier mes enseignants à l'université. Vous avez toute ma considération et ma gratitude.

Enfin, je remercie mes camarades d'université. Que Dieu vous accorde réussite et protection.

Hadjadj rachda

DÉDICACE

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de mémoire, **Madame Chabanne**, et à mon co-promoteur, **Monsieur Bouras**, pour leur encadrement, leur soutien constant et leurs conseils éclairés tout au long de cette aventure scientifique. Leur disponibilité et leur bienveillance ont été une source d'inspiration et de motivation inestimable.

À **ma chère mère, Braouni Samia**, mon pilier, ma force et mon refuge : merci pour ton amour inconditionnel, ta patience infinie et tes sacrifices silencieux. J'espère de tout cœur que cette réussite soit à la hauteur de tes espérances et te rende fière.

À la mémoire de **mon père, Miloudi Mohamed Salah**, dont l'absence me pèse chaque jour. J'espère que, de là où tu es, tu vois mon parcours et que tu en es fier. Tu restes à jamais dans mon cœur et dans chacune de mes réussites.

Je dédie également ce travail à mes chers grands-parents, **Miloudi Said** et **Saidani kheira**, pour leur sagesse, leur tendresse et leur présence apaisante à chaque étape de ma vie.

À **mes adorables sœurs, Miloudi Nadia** et **Miloudi Sabrina**, merci pour votre amour, votre patience et votre soutien indéfectible. Votre présence constante m'a donné la force de continuer, même dans les moments les plus éprouvants.

À mes amies précieuses, **Sami Rofaida**, **Hadjadj Rachda** et **Bougessa Nedjema**, celles qui m'ont tendu la main dans les jours difficiles, qui m'ont écoutée, encouragée, et n'ont jamais cessé de croire en moi. Votre amitié est un trésor que je chéris profondément.

À toutes celles et ceux qui ont cru en moi et m'ont encouragée dans ce parcours, je vous dédie ce travail avec gratitude, respect et affection.

Miloudi chourouk

الملخص

في ظلّ الانتقال نحو اقتصاد أكثر احتراماً للبيئة، وتزايد التحديات المرتبطة بتلوث البلاستيك، يندرج هذا البحث في إطار السعي لإيجاد حلول مستدامة. يهدف هذا العمل إلى تطوير بلاستيك حيوية انطلاقاً من نفايات زراعية غذائية، كقشور البطاطا والذرة وقشور الجوز، باعتبارها مصادر رئيسية للنشاء والسليلوز. بعد الاستخلاص والتنقية، تم خلط هذه المكونات مع ملدنات قابلة للتحلل مثل الجليسرين و PVA للحصول على عينات من البلاستيك الحيوي. أظهرت نتائج التحاليل الفيزيائية والكيميائية خصائص مشجعة من حيث المرونة، والاستقرار الكيميائي، والقابلية للتحلل. وتؤهل هذه الخصائص المواد المُحضّرة لتطبيقات طبية واعدة، خاصة في صناعة القفازات والضمادات القابلة للتحلل.

الكلمات المفتاحية : بلاستيك حيوي، نفايات زراعية، نشاء، سليلوز، تحلل حيوي، تطبيقات طبية.

RÉSUMÉ

Dans un contexte de transition vers une économie plus respectueuse de l'environnement et face aux défis croissants liés à la pollution plastique, ce mémoire s'inscrit dans une démarche de recherche orientée vers des solutions durables.

Il vise à développer des bioplastiques à partir de déchets agroalimentaires. Les résidus de pommes de terre et de maïs, ainsi que les coquilles de noix, ont été valorisés et sélectionnés comme principales sources d'amidon et de cellulose.

Après extraction et purification, ces composants ont été combinés à des plastifiants biodégradables tels que la glycérine et le polyalcool vinylique (PVA) pour formuler différents échantillons de bioplastiques.

Les résultats des tests de caractérisation physico-chimique ont révélé des performances globalement satisfaisantes : bonne flexibilité, élasticité, stabilité chimique et biodégradabilité. Ces propriétés confèrent aux bioplastiques développés un potentiel prometteur pour des applications médicales, notamment la fabrication de gants et de pansements biodégradables.

Mots-clés : bioplastique, déchets agroalimentaires, amidon, cellulose, biodégradabilité, dispositifs médicaux.

ABSTRACT

In a context of transition toward an environmentally friendly economy and increasing plastic pollution, this research is part of a sustainable development approach.

The goal is to develop bioplastics from agro-food waste. Potato and corn residues, along with walnut shells, were selected and valorized as sources of starch and cellulose.

After extraction and purification, these were combined with biodegradable plasticizers such as glycerin and polyvinyl alcohol (PVA) to formulate bioplastic samples.

Physico-chemical characterization showed promising results, including good flexibility, elasticity, chemical stability, and biodegradability.

These properties make the developed materials suitable for medical applications, especially for the production of biodegradable gloves and wound dressings.

Keywords: bioplastic, agro-waste, starch, cellulose, biodegradability, medical applications.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

PLA : l'acide polylactique

PVA : Polyvinyl Alcohol

PHA : le polyhydroxyalcanoate

PS : le polystyrène

PVC : le polychlorure de vinyle

PP : les polyoléfines le polypropylène

PMMA : le poly méthacrylate de méthyle

PEHD : le polyéthylène haute densité

PET : polyéthylène téréphtalate

Bio-PE : le bio-polyéthylène

Bio-PET : le bio-polyéthylène téréphtalate

EPA : Eicosapentaenoic Acid

NE: Norm Européen

PHB : Polyhydroxybutyrate

PBAT : Polybutylene Adipate Terephthalate

PBS : Polybutylene Succinate

PHBHv: hydroxybutyrate co-hydroxyvalérate

TPS: Thermo plastic Starch

PLS: Platicized Starch

PCL: le poly-carprolactone

ABS : le caoutchouc acrylonitrile-butadiène

EVA : l'éthylène-acétate de vinyle

TPU : le polyuréthane thermoplastique

PHBV: Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate)

HDT: Heat Deflection Temperature

ABS: Acrylonitrile Butadiene Styrene

PC: Polycarbonate

BUR: Bubble Blow-Up Ratio

PVOH : Poly (alcool vinylique)

TGA : thermogravimétriques

IR-TF : Infrarouge à Transformée de Fourier

m_0 : masse initiale de l'échantillon sec (g)

m_t : masse de l'échantillon à l'instant t (g)

m_{24} : masse de l'échantillon après 24 h

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Matrice des bioplastiques.

Figure I.2 : Une classification des bioplastiques selon leurs ressources respectives.

Figure I.3 : les voies d'obtention des biopolymères d'origine végétale.

Figure I.4 : Machine de moulage par injection conventionnelle.

Figure I.5 : Installation d'extrusion de film soufflé.

Figure I.6 : Procédé de moulage par injection-soufflage.

Figure I.7 : Arrangement de moulage par compression.

Figure I.8 : Gamme d'options d'emballage en plastique biodégradable.

Figure II.1 : Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (IR-TF).

Figure III.1 : a) amidon de pomme de terre, b) amidon de maïs c) cellulose de coquilles de Noix.

Figure III.2 : Evolution du taux de gonflement des échantillons.

Figure III.3 : Les échantillons après 24 h dans l'étuve

Figure III.4: Evolution du taux d'humidité des échantillons.

Figure III.5 : Échantillons 4 et 5 de bioplastique avant le test d'élasticité.

Figure III.6 : Échantillons 4 et 5 de bioplastique après test d'élasticité à température ambiante.

Figure III.7 : Échantillons 4 et 5 de bioplastique après test d'élasticité à température élevée.

Figure III.8 : Résistance à la dissolution de trois échantillons dans l'acétone et l'éthanol pendant 24 heures.

Figure III.9 : Échantillons de bioplastique immergés dans des milieux acides et basiques de différents pH

Figure III.10 : Des échantillons de bioplastique après 24 h d'immersion dans des milieux acides et basiques

Figure III.11 : La perte de masse des trois échantillons de bioplastique après 24h d'immersion

Figure III.12 : Montage expérimental du test de perméabilité à l'eau du bioplastique

Figure III.13 : spectre de trois échantillons : maïs, manioc et pomme de terre.

Figure III.14 : spectre de l'amidon extrait de déchets de maïs

Figure III.15 : spectre de l'amidon extrait de déchets de pomme de terre

Figure III.16 : spectre des gants médicaux

Figure III.17 : spectre des pansements médicaux

Figure III.18 : spectre de solide

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Techniques de production des bioplastiques.

Tableau I.2 : Biodégradabilité des bioplastiques dans différents environnements.

Tableau I.3 : Applications des bioplastiques.

Tableau I.4 : Propriétés physiques et chimiques des biopolymères et leurs Applications.

Tableau I.5 : Principales propriétés des bioplastiques.

Tableau II.1 : Présentation du matériel et appareillages.

Tableau II.2 : Présentation des réactifs et produits chimiques.

Tableau II.3 : Procédures de fabrication de bioplastiques à base d'amidon et de Cellulose.

Tableau III.1 : Rendement d'extraction de l'amidon et cellulose.

Tableau III.2 : Résultats de taux de gonflement des échantillons de bioplastique.

Tableau III.3 : Résultats de taux d'humidité de différents échantillons de Bioplastique

Tableau III.4 : Résultats du test d'élasticité des bioplastiques à température Ambiante.

Tableau III.5 : Résultats du test d'élasticité des bioplastiques à température Elevée.

Tableau III.6 : Résultats du test de résistance à la dissolution dans l'éthanol et L'acétone pour l'échantillon 3.

Tableau III.7 : Résultats du test de résistance à la dissolution dans l'éthanol et L'acétone pour l'échantillon 4.

Tableau III.8 : Résultats du test de résistance à la dissolution dans l'éthanol et L'acétone pour l'échantillon 5.

Tableau III.9 : Résultats du test de stabilité du bioplastique en milieu acide et Basique.

Tableau III.10 : résultats du test de biodegradabilité pour 2 échantillons

Tableau III.11 : tableau comparative amidon de maïs et celui de l'amidon de maïs commercial (corn starch)

Tableau III.12 : tableau comparative amidon de maïs et celui de l'amidon de pomme de terre commercial (potato)

Table des matières

REMERCIEMENTS

DÉDICACE

RÉSUMÉ

LISTE ABRÉVIATIONS

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLAUX

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE I	3
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	3
I.1. INTRODUCTION	3
I.2 BIOPLASTIQUES	3
I.2.1. Définition des bioplastiques	3
I.2.2. Catégories des bioplastiques	3
I.2.3. Historique et évolution des bioplastiques	4
I.2.4. Matières premières et techniques de production des bioplastiques	5
I.2.4.1. Matières premières	5
I.2.4.2. Techniques des productions des bioplastiques	6
I.2.5. Bioplastiques- Biodégradabilité et Compostabilité	7
I.2.5.1. Bioplastiques biodégradables	7
I.2.5.2. Bioplastiques compostables	8
I.2.5.3. Bioplastiques biosourcés	9
I.2.6. Domaine d'applications des bioplastiques	11
I.3. BIOPLASTIQUES A BASE DES BIOPOLYMERS	12
I.3.1. Définition des biopolymères	12
I.3.2. Types de biopolymères	13
I.3.3. Bioplastiques obtenus à partir de diverses sources	14
I.3.3.1. Bioplastiques à base d'amidon	14
I.3.3.2. Bioplastiques obtenus à partir de la cellulose	15
I.3.3.3. Bioplastiques issus de micro-organismes	15
I.3.3.4. Bioplastiques obtenus à partir d'inventions biotechnologiques	17
I.3.4. Modification des biopolymères pour améliorer leurs propriétés plastiques	18

I.3.4.1. Dureté	18
I.3.4.2. Aptitude au traitement	18
I.3.4.3. Résistance à la chaleur	19
I.3.4.4. Propriétés mécaniques	19
I.4. TECHNIQUES DE MISE EN FORME DES BIOPLASTIQUES A L'ECHELLE INDUSTRIELLE	20
I.4.1. Moulage par injection	20
I.4.2. Extrusion de film soufflé	21
I.4.3. Thermoformage	22
I.4.4. Moulage par soufflage	22
I.4.5. Moulage par compression	23
I.5. CARACTERISTIQUES MECANQUES ET PHYSICOCHIMIQUES DES BIOPLASTIQUES A BASE D'AMIDON	24
I.5.1. Caractéristiques Mécaniques	24
I.5.1.1. Résistance à traction	24
I.5.1.2. Allongement à la rupture	25
I.5.1.3. Module de Young	26
I.5.1.4. Résistance aux Chocs	26
I.5.2. Caractéristiques Physico-chimiques	26
I.5.2.1. Masse volumique (densité) :	26
I.5.2.2. Absorption d'eau et taux d'humidité	27
I.5.2.3. Solubilité :	27
I.5.2.4. Température de transition vitreuse (Tg)	27
I.5.2.5. Stabilité thermique et température de dégradation	28
I.5.2.6. Biodégradabilité	28
I.5.3. Analyse comparative entre différents types de bioplastique :	28
I.6. APPLICATIONS DES BIOPLASTIQUES DANS DIVERS SECTEURS	30
I.6.1. Emballage	30
I.6.2. Articles Ménagers Jetable :	31
I.6.3. Agriculture et Horticulture :	31
I.6.4. Dispositifs Médicaux :	31
I.6.5. Électronique grand public	31
CHAPITRE II	34
TECHNIQUE EXPERIMENTALES ET MATERIAUX	34

II.1. Introduction	34
II.2 Matériel et méthodes utilisées	34
II.3. Préparation de matériaux précurseurs	37
II.3.1. Extraction de l'amidon à partir de déchets agro-alimentaires	37
II.3.1.1. Présentation de la matière première	37
II.4. Préparation des bioplastiques	39
II.5. Caractérisation physico-chimique	41
II.5.1 Calcul du rendement d'extraction de l'amidon et de la cellulose	41
II.5.2. Taux de gonflement	41
II.5.3. Taux d'humidité	42
II.5.4 Test d'élasticité du bioplastique	43
II.5.5 Test de la résistance du bioplastique à la dissolution dans un solvant	43
Organique	43
II.5.6 Test de perméabilité à l'eau du bioplastique	44
II.5.7 Test de stabilité chimique du bioplastique en milieu acide et basique	44
II.5.8 Test de biodégradabilité du bioplastique	45
II.5.9 Spectroscopie Infrarouge à Transformé de Fourier (IR-TF) :	46
CHAPITRE III	48
RESULTATS ET DISCUSSIONS	48
III. 1 Introduction	48
III.2. Résultats de caractérisation physico-chimique	48
III.2.1. Rendement d'extraction de l'amidon et de la cellulose	48
III.2.2. Taux de gonflement	50
III.2.3. Test d'humidité	51
II.2.4. Test d'élasticité des bioplastiques	53
III.2.4. Test de la résistance du bioplastique à la dissolution dans un solvant	55
III.2.5. Test de stabilité du bioplastique en milieu acide et basique	59
III.2.6. Test de biodégradabilité	61
III.2.8. Spectroscopie Infra-Rouge (IR) :	63
Conclusion Générale	71
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	72

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Lorsqu'on aborde le sujet de la vie sur Terre, le premier point à traiter est sans doute l'environnement, qui est la condition sine qua non de cette vie.

Cependant, il devient de plus en plus difficile, à notre époque, d'évoquer un environnement sain, en raison des progrès industriels et technologiques rapides qu'a connus l'humanité. Ces évolutions ont entraîné l'apparition de l'une des menaces les plus graves pour l'homme et l'environnement : le plastique.

Omniprésent dans tous les secteurs industriels, le plastique représente un réel danger pour la santé humaine en raison des substances toxiques qu'il contient, ainsi que pour l'environnement à cause de sa dégradation extrêmement lente, provoquant ainsi une pollution généralisée.

C'est pourquoi il est devenu indispensable de sensibiliser l'être humain aux dangers de cette matière qui dissimule de nombreux effets nocifs, et de lui apprendre à préserver un environnement sain et propre pour lui-même et pour les générations futures. Réduire les déchets, les recycler et choisir des matériaux respectueux de l'environnement sont quelques-unes des responsabilités que nous devons assumer collectivement.

Dans cette optique, notre recherche a visé à établir un équilibre en extrayant des matières premières à partir de déchets agricoles, tels que l'amidon et la cellulose, afin de fabriquer un bioplastique écologique, respectueux de l'environnement et de la santé humaine. Ainsi, nous avons atteint deux objectifs principaux : réduire et valoriser les déchets, et remplacer les substances chimiques toxiques par des matériaux appartenant à la chimie verte.

Dans notre travail, nous avons extrait de l'amidon à partir de déchets de maïs et de pommes de terre, et de la cellulose à partir de coquilles de noix. Ces matériaux ont ensuite été mélangés avec certains plastifiants tels que la glycérine et le PVA, afin d'élaborer et d'obtenir le bioplastique souhaité.

Ce mémoire comporte trois chapitres : le premier présente des généralités sur les bioplastiques, en mettant l'accent sur leurs propriétés physico-chimiques, leurs avantages écologiques, ainsi que leurs méthodes de fabrication. Il introduit également des notions relatives à la chimie verte et aux enjeux environnementaux et sanitaires liés à l'utilisation du plastique conventionnel.

Le deuxième est consacré à la présentation du matériel et des méthodes utilisés lors de la réalisation de la présente étude, notamment l'extraction de matières premières à partir de déchets agricoles et la formulation du bioplastique à base d'amidon, de cellulose et de plastifiants biodégradables.

Le troisième chapitre présente et regroupe les résultats obtenus, avec une discussion sur les propriétés du bioplastique élaboré et ses potentielles applications dans le domaine médical, telles que la fabrication de dispositifs à usage unique, d'emballages stériles ou de supports biodégradables[1].

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. INTRODUCTION

Les bioplastiques sont une nouvelle catégorie de matériaux qui suscitent de plus en plus d'intérêt en raison de leur potentiel à réduire l'impact environnemental des plastiques conventionnels.

Ils se divisent principalement en deux catégories : les bioplastiques biosourcés, fabriqués à partir de matières premières renouvelables comme le maïs, le blé, la canne à sucre ou les huiles végétales, ce qui permet de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et les émissions de carbone lors de la production ; et les bioplastiques biodégradables, qui peuvent se décomposer naturellement sous l'action des micro-organismes dans certaines conditions (chaleur, humidité et bactéries).

Des exemples typiques incluent le polyhydroxyalcanoate (PHA) et l'acide polylactique (PLA). Certains bioplastiques combinent ces deux propriétés, étant à la fois biosourcés et biodégradables, offrant ainsi une alternative bénéfique pour l'environnement.

Dans ce chapitre, nous examinerons en détail les différents types de biopolymères, leurs procédés de production, leurs caractéristiques ainsi que leurs utilisations potentielles dans divers secteurs industriels.

Cette synthèse bibliographique nous aidera à comprendre comment les bioplastiques peuvent contribuer à la création d'un avenir plus durable et respectueux de l'environnement.

I.2 BIOPLASTIQUES

I.2.1. Définition des bioplastiques

Les bioplastiques sont des plastiques innovants fabriqués à partir de matières premières renouvelables telles que l'amidon de maïs, la cellulose, les huiles végétales, les déchets agricoles ou les algues.

Contrairement aux plastiques traditionnels issus du pétrole, ils offrent l'avantage d'être biodégradables ou compostables, ce qui leur permet de se décomposer naturellement sans générer de résidus nocifs dans l'environnement [2].

En tant qu'alternative écologique, les bioplastiques connaissent une adoption croissante dans de nombreux domaines, notamment les emballages alimentaires, les sacs en plastique, les bouteilles, les couverts jetables et les articles ménagers [3].

I.2.2. Catégories des bioplastiques

Leur classification repose sur divers critères, tels que leur composition chimique, leurs méthodes de synthèse, leurs procédés de fabrication, leur importance économique ou leurs applications.

Cette flexibilité souligne leur potentiel pour remplacer les plastiques conventionnels tout en respectant les exigences environnementales.

Les principales catégories des bioplastiques sont présentées dans la Figure I.1

Et elles sont regroupées selon leur biodégradabilité en trois catégories :

1. Biodégradables et réalisées à partir des matières premières renouvelables ;
2. Biodégradables et réalisées de matières non renouvelables ;
3. Non biodégradables et réalisées à partir des matières premières renouvelables [4].

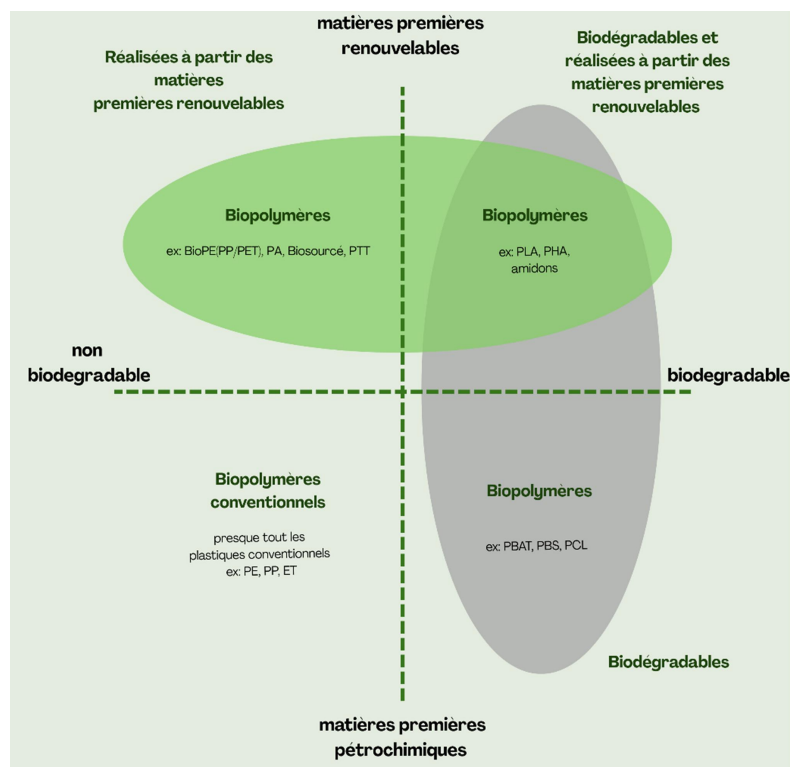


Figure I.1 : Matrice des bioplastiques.

I.2.3. Historique et évolution des bioplastiques

Entre 1930 et 1940, les principaux plastiques industriels dérivés de l'éthylène ont été créés : le polystyrène (PS) ; le polychlorure de vinyle (PVC) ; et les polyoléfines le polypropylène (PP) et le poly méthacrylate de méthyle (PMMA).

Au milieu des années 1950, le polyéthylène haute densité (PEHD) a été produit, suivi du polypropylène.

À la fin des années 1990, l'éthylène, le propylène et le styrène ont été introduits pour la première fois. Dans les années 2000, le domaine des plastiques s'est concentré sur les matériaux produits à partir de sources végétales.

Des recherches considérables ont été menées sur les bioplastiques tels que le polyhydroxyalcanoate et l'acide poly lactique (PLA) extraits de la canne à sucre, du maïs et du riz. Ils étaient considérés comme des alternatives aux plastiques à base de pétrole et pouvaient être biodégradés.

Des polymères biosourcés tels que le bio-polyéthylène (bio-PE) et le bio-polyéthylène téréphtalate (bio-PET) ont été produits pour leur fonctionnalité et leur capacité considérable dans les applications d'emballage.

En 2019, le polypropylène biosourcé a été produit à l'échelle commerciale [5] avec le début de la nouvelle décennie en 2020, les innovations dans le domaine des bioplastiques se sont accélérées, atteignant une capacité de production mondiale de 2,1 millions de tonnes, avec un fort accent sur les technologies de fermentation biologique et l'ingénierie métabolique pour améliorer la production de PLA et de PHA à partir de matières premières végétales et de déchets organiques, réduisant ainsi la dépendance aux cultures alimentaires[6].

En 2021, les premières matières ont été diversifiées pour inclure des déchets agricoles et industriels comme les noyaux d'avocat, ce qui a permis de créer des polymères biosourcés plus durables. En 2022, les avancées en biotechnologie ont permis l'utilisation de micro-organismes génétiquement modifiés pour convertir le dioxyde de carbone et les déchets agricoles en matières premières pour les bioplastiques, augmentant ainsi leur durabilité environnementale. De nouveaux développements dans les matériaux PLA à haute performance ont émergé en 2023, tandis que les usages des bioplastiques s'étendent à de nouveaux secteurs comme l'automobile, l'électronique et le textile. La capacité de production mondiale a atteint 2,47 millions de tonnes en 2024, soutenue par des investissements en recherche,développement visant à améliorer la biodégradabilité et la résistance mécanique des polymères biosourcés [7].

I.2.4. Matières premières et techniques de production des bioplastiques

I.2.4.1. Matières premières

Les bioplastiques sont généralement composés d'un biopolymère (matrice plastique, souvent protéine et/ou polysaccharide), d'un plastifiant et parfois d'additifs.

Le choix du biopolymère dépend de l'application : hydrophile pour retenir l'eau (acides glutamique/aspartique des protéines, polyacrylates), interactions covalentes pour retenir engrais/pesticides (bonnes propriétés mécaniques et libération contrôlée), ou bonnes propriétés mécaniques pour le remplissage (protéines/polysaccharides favorisant les interactions).

Des additifs (fibres, agents de réticulation, nano'argiles) renforcent les propriétés mécaniques, mais leur biodégradabilité et leur impact sur les plantes sont cruciaux pour les applications agricoles.

Les polymères biodégradables peuvent être classés en quatre classes : ceux obtenus à partir de la biomasse et des ressources naturelles ; les polymères produits par les microbes par fermentation de produits agricoles ; les polymères polymérisés à partir d'oligomères ou de

monomères obtenus par fermentation ; et des polymères dérivés de combustibles fossiles. Ces dernières années, d'autres sources sont utilisées pour produire des bioplastiques.

En général, les matériaux tels que l'amidon, la cellulose, le bois, le sucre et la biomasse ont été utilisés comme substituts des ressources de combustibles fossiles pour produire des bioplastiques [8].

I.2.4.2. Techniques des productions des bioplastiques

Les bioplastiques biosourcés sont produits à partir de sources naturelles ou renouvelable après une série d'étapes.

Les matières premières telles que la canne à sucre, le maïs et les pommes de terre sont collectées dans leurs champs et traitées pour en extraire leurs amidons.

Les amidons sont traités davantage dans les raffineries en utilisant la fermentation ou des enzymes spéciales pour synthétiser les constituants chimiques qui réagissent pour fabriquer du bioplastique.

Le **Tableau I.1** ci-dessous donne une liste exhaustive des techniques les plus utilisées pour produire des bioplastiques selon leur matériau de base.

Ces techniques varient en fonction des caractéristiques chimiques de chaque matière première et de ses propriétés physiques, permettant ainsi d'optimiser le rendement et la biodégradabilité des produits finaux.

Tableau I.1 : Techniques de production des bioplastiques

Matériau	Technique	Matière première
PHA	Fermentation	Bactéries/ déchets organique /Résidus agricoles
PLA	Polymérisation	Acide lactique (maïs/ canne à sucre /betterave) / Déchet de papier
PVA	Moulage	PVA commercial (Polymérisation de l'acétate de polyvinyle)
Cellulose	Polymérisation	Paille de riz /régime de palmier à huile / Déchets d'agrumes /biomasse de feuille de maïs
Amidon	Moulage	Amidon de maïs / épluchures de pomme de terre / épluchure de banane / manioc
Protéines	Injection	Huile de colza /fibres de mésocarpe de palmier à huile

I.2.5. Bioplastiques- Biodégradabilité et Compostabilité

Les bioplastiques se répartissent en trois groupes principaux : les polymères issus de ressources renouvelables et compostables (tel que l'EPA/PHA), les polymères également biosourcés mais non compostables (un axe de développement majeur axé sur des monomères verts aux performances équivalentes aux plastiques traditionnels), et les polymères d'origine pétrolière qui, eux, sont biodégradables (à l'image des sacs plastiques courants enrichis en amidon) [9].

I.2.5.1. Bioplastiques biodégradables

Les bioplastiques synthétisés à partir des polymères biodégradables sont des matériaux qui se décomposent en biomasse, en gaz tels que le CO₂ et le CH₄, ainsi qu'en eau, grâce à l'action de micro-organismes comme les bactéries et les champignons. Cette dégradation peut se produire en présence d'oxygène (conditions aérobies) ou en son absence (conditions anaérobies).

Ces polymères biodégradables doivent être suffisamment stables et durables pendant leur utilisation afin d'assurer leur fonctionnalité, mais ils doivent également pouvoir se dégrader facilement une fois éliminés.

Cela commence souvent par les groupes d'extrémité des chaînes polymères, car la structure carbonée des polymères est très résistante.

Les conditions environnementales, telles que la température et l'humidité, jouent un rôle important dans la vitesse et la manière dont ces polymères se décomposent.

Ils sont utilisés dans de nombreuses applications, notamment dans les emballages compostables, les dispositifs médicaux résorbables, et les produits agricoles, ce qui en fait une solution prometteuse pour réduire l'impact environnemental des plastiques traditionnels.

Leur capacité à combiner durabilité lors de l'utilisation et dégradabilité lors de l'élimination en fait un choix crucial dans le développement de matériaux écologiques [10].

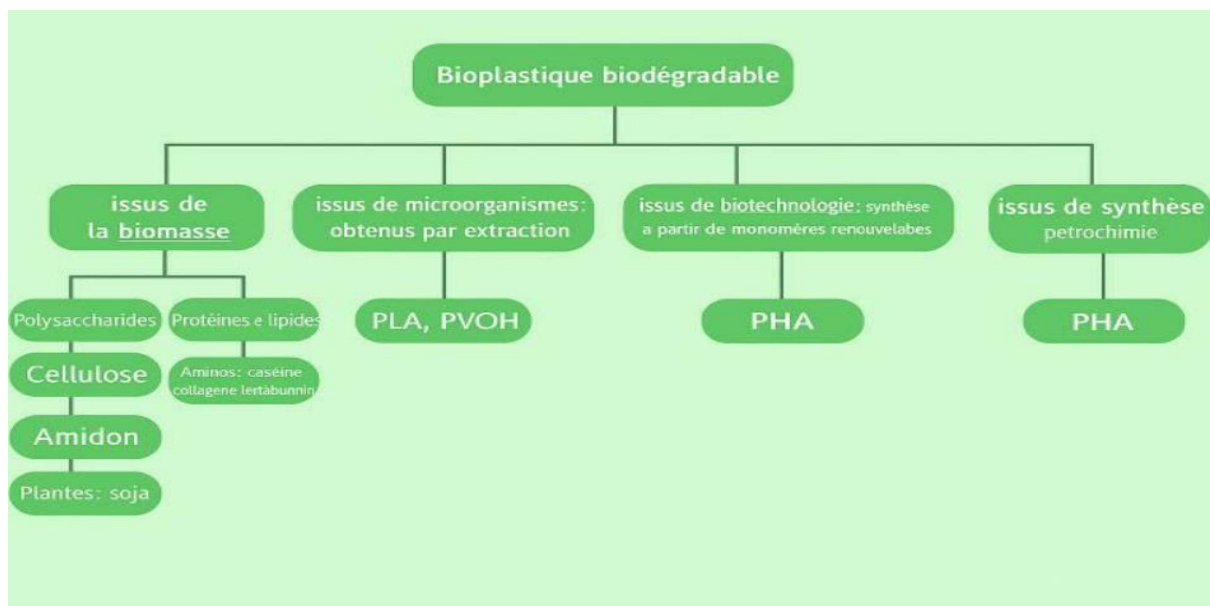


Figure I.2 : Une classification des bioplastiques selon leurs ressources respectives.

I.2.5.2. Bioplastiques compostables

La compostabilité d'un plastique, tout comme sa biodégradabilité, est encadrée par des normes rigoureuses qui définissent sa capacité à se décomposer dans des conditions de compostage spécifiques.

Un plastique est considéré comme compostable s'il subit une dégradation biologique lors du compostage, aboutissant à la production de dioxyde de carbone (CO_2), d'eau, de composés inorganiques et de biomasse.

Cette décomposition doit se produire à une vitesse comparable à celle d'autres matières organiques reconnues comme compostables, sans laisser de résidus toxiques, visibles ou reconnaissables [11].

Il est crucial de prendre en considération le facteur temps lors de la mise en place de la compostabilité d'un plastique.

Contrairement à la simple biodégradation, qui peut se produire sur des échelles de temps très variables, la compostabilité implique une dégradation significative dans un délai spécifié.

Il est donc essentiel de comprendre qu'un bioplastique biodégradable n'est pas automatiquement compostable.

La biodégradation peut se produire dans divers environnements (sol, eau, etc.) et sur des périodes potentiellement longues, tandis que la compostabilité est un processus plus spécifique, se déroulant dans des conditions contrôlées de température, d'humidité et d'oxygénation, et dans un intervalle de temps bien défini.

Inversement, un bioplastique compostable est toujours biodégradable, car le processus de compostage est une forme spécifique de biodégradation.

Pour qu'un matériau soit certifié compostable, il doit répondre à plusieurs critères précis, notamment :

- Composition : La norme (Norme Européenne) 13432 exige qu'un bioplastique compostable contienne au moins 50 % de matière organique et respecte des limites strictes pour les concentrations de métaux lourds (zinc, cuivre, nickel, cadmium, plomb, mercure, etc.) afin d'assurer un compost final de qualité, sans contamination toxique.
- Biodégradation dans un délai déterminé : Un seuil de biodégradabilité d'au moins 90 % doit être atteint dans une période maximale de six mois dans des conditions de compostage standardisées. Cela assure une décomposition efficace et rapide[12].
- Désintégration et absence de pollution visuelle : Le matériau doit se fragmenter de manière significative lors du compostage. Après une période donnée, de 12 semaines[13].

I.2.5.3. Bioplastiques biosourcés

Un bioplastique biosourcé est un type de plastique dont la particularité réside dans l'origine de sa matière première : au lieu de provenir de ressources fossiles comme le pétrole, il est fabriqué, en tout ou en partie, à partir de biomasse.

La biomasse englobe une vaste gamme de matières organiques renouvelables d'origine végétale ou animale, telles que l'amidon de maïs, la canne à sucre, la cellulose, les huiles végétales ou encore certains déchets agricoles.

L'attrait principal de ces matériaux réside dans leur capacité à réduire notre dépendance aux ressources non renouvelables et à potentiellement diminuer l'empreinte carbone associée à la production de plastique.

Il est cependant crucial de comprendre que le caractère biosourcé d'un plastique ne détermine pas sa capacité à se biodégrader ou à être composté.

La biodégradabilité est une propriété distincte qui dépend de la structure chimique du polymère, tandis que la compostabilité implique une décomposition dans des conditions de compostage spécifiques et dans un délai défini.

Ainsi, un bioplastique peut être d'origine biologique sans être nécessairement biodégradable, et inversement.

Le Tableau I.2 présente la compostabilité et la biodégradabilité de certains des bioplastiques les plus courants dans différents environnements.

La capacité de biodégradation des bioplastiques est influencée par leur structure physique et chimique, par exemple la longueur de la chaîne polymère, la cristallinité et la complexité de leur formule[14].

Tableau I.2 : Biodégradabilité des bioplastiques dans différents environnements.

Bioplastique	Environnement	Condition	Biodégradabilité (%)	Méthode	Période de Test (Jours)
PLA	Compost	58 °C, 60% HR	60–70	CO ₂ produit	30
	Sol	10–25 °C	0	CO ₂ produit	120
	Environnement marin simulé	25 °C	3–4	CO ₂ produit	180
PHB	Compost	55 °C, 70% HR	80	CO ₂ produit	28
	Sol	20 °C, 60% HR	48,5	CO ₂ produit	280
	Environnement marin simulé	25 °C	38–45	CO ₂ produit	180
À base d'amidon	Compost (thermoplastique d'amidon)	58 °C	73,1	CO ₂ II	56
	Sol (plastique à base de blé)	20 °C, 60% HR	14,2	CO ₂ produit	110
	Marin (amidon pur)	26 °C	100	Perte de poids	50
À base de cellulose	Compost (acétate de cellulose)	53 °C	100	CO ₂ produit	18
	Sol (cellulose bactérienne/végétale)	25 °C	100	Perte de poids	180
	Environnement marin simulé (cellulose pure)	Température ambiante	75	Oxygène consommé	150
PBAT	Compost	58 °C	34–67	CO ₂ produit	45
	Sol	10–25 °C	6,6	Teneur en carbone organique	120
	Environnement marin	29 °C	1–1,4	Demande biologique en	28

	simulé			oxygène	
PBS	Compost	65 °C, 50–55% HR	90	CO ₂ produit	160
	Sol	20 °C, 60% HR	1 (film), 16,8 (solide)	Perte de poids	28
	Environnement marin simulé	27 °C	1	Demande biologique en oxygène	28

I.2.6. Domaine d'applications des bioplastiques

Le Tableau I.3 montre les différentes applications des bioplastiques avec les avantages et les inconvénients dépendent de leur matériau de base[15].

Tableau I.3. : Applications des bioplastiques.

Gamme	Origine	Avantages	Inconvénients	Applications
Base amidon	Amidon (maïs, blé, pomme de terre...) + copolymères pétrole	Souple, biodégradation contrôlée, facilité de mise en œuvre (extrusion gonflage sur ligne standard)	Additifs à base de pétrole, opaque, sensibilité à l'eau	Principalement extrusion de films et sacs, applications en injection moulage
PLA	Amidon (maïs)	Le plus économique, transparence proche cristal, facilité de mise en œuvre (thermoformage, injection, moulage et soufflage)	Faible résistance thermique, rigide, faibles propriétés barrières	Emballages agroalimentaires (barquettes, films, gobelets...), cosmétique, composites avec fibres naturelles
PHA	Amidon (maïs), sucre (canne à sucre, betterave), travaux de recherche sur les déchets et la biomasse	Résistance thermique, souplesse et propriétés barrières les plus performantes	Opaque, le moins économique	Cosmétique, flacons, composites avec fibres naturelles
Copolymères biodégradables	Pétrole	Souple, biodégradation contrôlée, facilité	Ressource pétrole, souvent	Sacheterie, film de paillage, flacon,

		de mise en œuvre (extrusion, injection)	translucides	formulation
Cellulose	Pulpe de bois	Souple, transparent, bonnes propriétés barrières	Additifs à base de pétrole	Film agroalimentaire

I.3. BIOPLASTIQUES A BASE DES BIOPOLYMERS

I.3.1. Définition des biopolymères

Les biopolymères sont de longues chaînes de monomères liés chimiquement. On distingue principalement les polysaccharides (chaînes de sucres), les protéines (chaînes d'acides aminés), les acides nucléiques (chaînes de nucléotides) et les lipides (assemblages non polymériques d'acides gras et de glycérol).

La nature des monomères et leurs liaisons déterminent la structure et la fonction de chaque biopolymère.

Les Propriétés physiques et chimiques des biopolymères et leurs applications sont illustrée dans le Tableau I.4 ci-dessous.

Tableau I.4 : Propriétés physiques et chimiques des biopolymères et leurs applications[16].

Biopolymère	Propriétés physiques et chimiques	Applications
Cellulose	Insoluble dans l'eau Haute résistance à la traction Haute résistance à la compression Faible élasticité et résilience Biodégradable	Industrie de l'emballage alimentaire Industrie textile Fabrication de papier Pansements Ingénierie tissulaire Administration de médicaments Comme matériau de support principal
Chitine/ chitosane	Insoluble dans l'eau Soluble dans les solutions acides aqueuses Haute viscosité Clarté optique	Ingénierie tissulaire Transport de médicaments et de gènes Cicatrisation Technologie des cellules souches Applications capillaires Industrie cosmétique Formation de films biodégradables

Gélose	Insoluble dans l'eau froide, mais dans l'eau bouillante. Faible viscosité en solution. Haute transparence. Haute résistance à faible concentration.	Industrie de l'emballage alimentaire Formation de films minces Agent épaississant Émulsifiant Stabilisant
Amidon	Insoluble dans l'eau Blanc Inodore	Industrie papetière Industrie textile Industrie pharmaceutique Adhésifs Traitement des eaux
Collagène	Haute résistance à la traction Excellente biocompatibilité et biodégradabilité Structure en réseau	Produits de comblement cutané Pansements Régénération tissulaire Prothèses vasculaires Applications cardiaques Chirurgie esthétique Greffes osseuses Administration de médicaments Implants oculaires
Soie	Élasticité modérée à faible Bonne rétention d'humidité Insoluble dans l'eau Bonne résistance à la traction	Ingénierie tissulaire Administration de médicaments Ligaments artificiels Comme polymère composite biodégradable Revêtements

I.3.2. Types de biopolymères

Selon leur mode de production et leurs sources, les biopolymères peuvent être classés comme suit :

- a) **Polymères dérivés de la biomasse**, notamment les polysaccharides (amidon, cellulose, produits lignocellulosiques, chitine et ses dérivés, pectines), les protéines (d'origine végétale comme la zéine, le gluten, le soja, et animale comme la caséine, la gélatine et le lactosérum) et les lipides (huile de ricin, graisses animales).
- b) **Polymères produits par des microbes** (PHA, PHB et poly (hydroxybutyrate

co-hydroxyvalérate (PHBHv).

- c) **Polymères préparés chimiquement à partir de monomères d'origine biologique** comme le PLA.

La **Figure I.3** résume les voies d'obtention des biopolymères d'origine végétale.

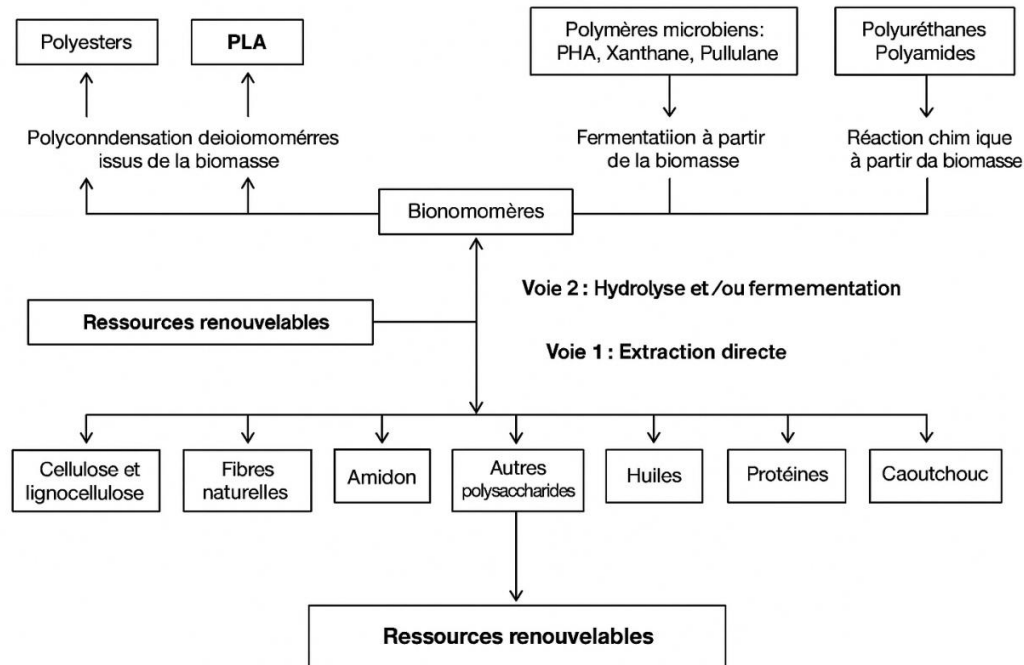


Figure I.3 : Résume les voies d'obtention des biopolymères d'origine végétale.

I.3.3. Bioplastiques obtenus à partir de diverses sources

I.3.3.1. Bioplastiques à base d'amidon

- **Amidon thermoplastique**

En plasturgie, l'amidon peut être utilisé de deux manières, soit (1) comme amidon déstructuré, en entrant dans la composition de mélanges, soit (2) comme polymère de grande masse moléculaire, en modifiant sa structure moléculaire à l'aide d'un plastifiant.

Dans le deuxième cas, les termes « Thermo plastic Starch » (TPS) ou « Plasticized Starch » (PLS) sont employés pour désigner cette utilisation.

Cette section traite le deuxième cas, c'est-à-dire l'utilisation directe de l'amidon en tant que polymère pouvant constituer un thermoplastique bio-source [17].

- **Mélanges de polymères**

Le mélange de polymères s'est révélé être une méthode alternative importante et utile dans l'optique de développer de nouveaux matériaux ayant des propriétés améliorées.

Le mélange de l'amidon thermoplastique (TPS) avec d'autres polymères se fait souvent en utilisant une extrusion à double vis à des températures élevées.

Le TPS lorsqu'il est mélangé avec d'autres polymères biodégradables, tels que le PVA ou les polyesters aliphatiques comme l'acide polylactique (PLA), le poly-carprolactone (PCL) et le poly (3- hydroxybutyrate) (PHB), produit un mélange de polymères complètement biodégradable [18].

I.3.3.2. Bioplastiques obtenus à partir de la cellulose

La cellulose est un polysaccharide biodégradable naturellement présent dans les cellules végétales.

Le violoncelle-phane est un matériau biodégradable synthétisé chimiquement qui est fabriqué en dissolvant la cellulose dans le mélange de disulfure de carbone et d'hydroxyde de sodium et le produit obtenu est du xanthate de cellulose qui est ensuite plongé dans la solution acide (H_2SO_4), et le produit final produit est un film de cellophane.

Une autre méthode est adoptée pour obtenir les dérivés de la cellulose par le processus d'estérification et d'éthérification des groupes hydroxyyles[19].

I.3.3.3. Bioplastiques issus de micro-organismes

Les bioplastiques sont des types particuliers de biomatériaux. Ils sont généralement de nature polyester et peuvent être produits par des microbes dans différentes conditions nutritionnelles et environnementales.

La plupart des polyesters sont produits à l'intérieur des microbes en raison du manque de certains nutriments importants.

Il s'agit généralement d'une substance de stockage produite par des microbes dans des conditions de stress.

Le nombre de granules, la taille des granules et les propriétés physicochimiques varient d'une espèce à l'autre[20].

- **Polyhydroxyalcanoate (PHA)**

Le polyhydroxyalcanoate (PHA) est un biopolymère bien connu pour sa capacité de biodégradation, généralement présent à l'intérieur des micro-organismes en tant que source d'énergie.

Le PHA a été obtenu à partir de plus de 90 genres de bactéries à Gram négatif et à Gram positif dans des conditions anaérobies et aérobies.

Les bactéries peuvent être divisées en deux groupes en fonction des conditions requises pour la production de PHA. Le premier groupe a besoin de certains nutriments tels que l'oxygène, l'azote, le phosphore et le magnésium pour l'accumulation de PHA, mais ce groupe n'accumule pas de PHA pendant la phase de croissance.

Le deuxième groupe n'a pas besoin d'une limitation des nutriments et peut accumuler des PHA pendant la phase de croissance [21].

Suszkiw a expliqué que les polyhydroxyalcanoates sont linéaires et sont produits comme sous-produit par la fermentation bactérienne des lipides et du sucre.

Les bactéries produisent des polyhydroxyalcanoates comme produit pour stocker le maximum d'énergie sous forme de carbone.

À grande échelle au niveau industriel, les conditions optimales fournissent les bactéries pour obtenir le polyester purifié par la fermentation du sucre.

Au cours de la fermentation, plus de 150 types de monomères sont combinés dans cette production de polyhydroxyalcanoates, et ces monomères modifient l'ensemble des propriétés de cette famille.

Le PHA est un matériau moins élastique et plus ductile que la matière plastique, et il est également biodégradable. En raison de l'efficacité de ces matériaux, ils sont plus largement utilisés dans l'industrie médicale [22].

- **Polyhydroxybutyrate (PHB)**

Le polyhydroxybutyrate (PHB) est une macromolécule présente à l'intérieur de la bactérie, qui agit comme des corps d'inclusion.

Ce sont des réserves d'énergie qui sont utilisées par les bactéries dans des conditions défavorables.

Ce sont des polymères et leurs propriétés sont similaires à celles du plastique synthétique comme le polypropylène.

Ces propriétés font de ce polymère un produit pour la synthèse de bioplastique pouvant remplacer le plastique pétrosourcé.

L'un des principaux obstacles à la production de PHB est son coût de production élevé par rapport au plastique pétrosourcé.

Différentes techniques telles que l'optimisation de la fermentation, le processus de récupération et le développement d'une souche bactérienne efficace ont été utilisées pour réduire le coût de production du PHB.

Le PHB s'accumule généralement dans les bactéries sous un niveau élevé de carbone et de faibles niveaux d'azote, d'oxygène et de phosphore.

Le PHB est produit par l'activité de l'acétyl coenzyme-A qui se déroule en trois étapes.

Dans la première étape, deux acétyl-CoA sont convertis en acétoacétyl-CoA par l'activité de l'acétyl-CoA acétyltransférase. Dans la deuxième étape, l'acétoacétyl-CoA est converti en hydroxybutyryl-CoA à l'aide de l'acétoacétyl-CoA réductase, et dans la dernière étape, l'étape finale de polymérisation est catalysée par la PHB synthase.

Suszkiw a déclaré que la production du biopolymère poly-3 hydroxybutyrate (PHB) est basée sur le traitement des bactéries qui utilisent le substrat brut sous forme de glucose, d'amidon de maïs ou d'eaux usées.

La production de poly-3-hydroxybutyrate par les bactéries augmente chaque année, et les propriétés du PHB sont assez similaires à celles du polypropylène pétroplastique.

Chen et Patel ont également déclaré que l'industrie sucrière sud-américaine va certainement améliorer la production de PHB au niveau industriel. Au niveau primaire, à l'échelle industrielle, l'isolation du PHB est basée sur les caractéristiques physiques, et après cela, il peut être développé en un film apparent avec un point de fusion élevé de plus de 130°C [23].

I.3.3.4. Bioplastiques obtenus à partir d'inventions biotechnologiques

La biotechnologie joue un rôle important dans l'invention de diverses méthodes pour obtenir un produit en grande quantité dans un court laps de temps.

En utilisant la biotechnologie, nous pouvons modifier le produit en fonction de nos besoins et la qualité du produit peut être améliorée.

La biotechnologie consiste à convertir le sucre végétal en plastique, à cultiver du plastique dans diverses cultures et à produire du plastique à l'intérieur de micro-organismes.

L'effort de la biotechnologie fait des bioplastiques un produit plus utile et plus respectueux de l'environnement par rapport au plastique conventionnel [24].

- **Acide polylactique (PLA)**

L'acide polylactique est un polymère aliphatique biodégradable fabriqué à partir d'acides hydroxyles, principalement de l'acide polyglycolique.

L'acide polylactique est l'un des monomères renouvelables les plus importants de la matière bioplastique, qui sont dérivés de la fermentation de sous-produits agricoles tels que des substances riches en amidon comme le sucre ou l'amidon de blé et de maïs.

Le processus de fermentation est suivi pour la conversion du maïs et d'un autre glucide en dextrose et enfin en acide lactique obtenu à partir de l'acide lactique par deux méthodes différentes.

Dans la première méthode, le cycle de l'acide lactique produit du lactide dimère d'acide lactique cyclique qui produit en outre du PLA avec une masse molaire élevée.

La deuxième méthode est la polymérisation directe de l'acide lactique, généralement la polymérisation par condensation, qui donne un polymère PLA de faible masse molaire[25].

Le PLA est bien connu pour sa biodégradabilité dans la nature en raison de la présence de liaisons ester qui agissent comme son épine dorsale.

Il est très similaire aux polyoléfinés et peut être converti en plastique par certaines méthodes standard telles que l'extrusion et le moulage par injection.

Le PLA est couramment utilisé à des fins d'emballage car le PLA est présent dans notre corps en tant que matériau non toxique. Ainsi, lorsque le PLA est utilisé dans l'emballage, la contamination des aliments est négligée [26].

I.3.4. Modification des biopolymères pour améliorer leurs propriétés plastiques

I.3.4.1. Dureté

La dureté est un paramètre important pour déterminer l'adéquation d'un biopolymère à une application donnée.

Elle représente la capacité du matériau à absorber de l'énergie et à se déformer sans se briser. Pour améliorer cette propriété, des modificateurs d'impact, tels que **le caoutchouc acrylonitrile-butadiène (ABS)**, **l'éthylène-acétate de vinyle (EVA)** ou **le polyuréthane thermoplastique (TPU)**, sont généralement utilisés. Ces additifs augmentent généralement la viscosité du polymère, et influencent d'autres caractéristiques de performance telles que les propriétés optiques, la résistance aux intempéries, la capacité de transformation, les propriétés mécaniques, l'inflammabilité et la résistance thermique.

Ces modificateurs renforcent la résistance aux chocs des biopolymères et peuvent même compenser les effets négatifs d'autres additifs sur cette propriété.

Ils agissent en facilitant la capacité de la matrice polymère à former des microfissures (crazing), un mécanisme de dissipation d'énergie lors d'un impact.

Cependant, les modificateurs d'impact ont des effets variables sur la rhéologie à l'état fondu. Lors de l'extrusion, un ajustement inadéquat des lubrifiants en présence de ces additifs peut entraîner une fusion excessive ou insuffisante de l'extrudât, compromettant la résistance aux chocs. Certains modificateurs peuvent même nécessiter un degré de fusion spécifique pour atteindre leur efficacité optimale [27].

I.3.4.2. Aptitude au traitement

Typiquement, des adjuvants de transformation sont utilisés lors de la transformation d'un biopolymère qui manque de résistance à l'état fondu. À titre d'exemple, le PLA a une faible résistance à l'état fondu qui diminue avec le poids moléculaire.

Cela rend le PLA difficile à transformer et, par conséquent, des adjuvants de transformation sont utilisés dans des procédés tels que l'extrusion et le moulage par injection pour réduire la friction entre le biopolymère fondu et le métal, ce qui facilite la transformation.

De plus, des améliorateurs de résistance à l'état fondu sont également ajoutés pour améliorer la transformation des biopolymères. D'autres additifs qui sont utilisés pour améliorer la transformabilité des polymères comprennent :

- Stabilisant thermique
- Lubrifiants
- Adjuvants de transformation

Il est important d'atteindre un équilibre entre ces additifs pour obtenir une transformabilité et une stabilité thermique adéquate, des propriétés satisfaisantes et un niveau de performance acceptable.

En général, les additifs contenant un ester, un époxyde ou des groupes diépoxy-polyéther sont capables d'améliorer la transformabilité du PLA [28].

I.3.4.3. Résistance à la chaleur

L'une des principaux inconvénients, des biopolymères, est leur manque de résistance à la déformation à des températures plus élevées.

Le HDT est souvent utilisé pour déterminer la résistance à la chaleur à court terme des matériaux et correspond à la température à laquelle un échantillon d'essai dévie sous une charge constante.

L'amélioration de la résistance thermique d'un biopolymère dépend de la structure du polymère. Pour augmenter le HDT des semi-cristallins, les polymères peuvent être obtenus en augmentant la cristallinité du polymère en utilisant des agents de nucléation à des niveaux optimaux. Cela permet d'augmenter le HDT la plus près de la température de fusion du polymère.

Le PLA est également mélangé à d'autres polymères, y compris d'autres biopolymères tels que le PHBV qui peuvent améliorer la résistance à la chaleur du PLA [29].

I.3.4.4. Propriétés mécaniques

Les mauvaises propriétés mécaniques des biopolymères vierges sont un sujet de préoccupation. En modifiant chimiquement le polymère, en introduisant des groupes réactifs supplémentaires et en ajoutant des additifs, les propriétés mécaniques d'un polymère peuvent être obtenues. Les propriétés mécaniques dépendent également du poids moléculaire, de la cristallinité et de l'orientation des biomolécules. Les charges, généralement sous forme particulaire ou fibreuse, sont mélangées avec le polymère.

Ces additifs modifient la structure moléculaire du polymère ou ajoutent une seconde phase au polymère, affectant les propriétés mécaniques.

Les composites à base de biopolymères offrent une voie vers des matériaux résistants sans réduire leur capacité à se biodégrader.

En combinant des additifs de réticulation et de fibres, les polymères à base de protéines ont observé des propriétés mécaniques similaires à celles du polystyrène.

Le mélange avec des plastifiants améliore les biopolymères qui sont cassants avec une plage d'allongement de 2 à 5 % en poids.

Un plastifiant est couramment utilisé pour améliorer la transformabilité, la flexibilité et l'extensibilité d'un polymère, car il peut réduire la force intermoléculaire et augmenter la mobilité intermoléculaire.

Dans certains cas, l'amélioration de la résistance à la traction et de la résistance à la traction peut être obtenue en utilisant un maximum de 20 % en poids de plastifiant [30].

I.4. TECHNIQUES DE MISE EN FORME DES BIOPLASTIQUES A L'ECHELLE INDUSTRIELLE

La plupart des polymères biodégradables peuvent être traités à l'aide de diverses méthodes de traitement.

I.4.1. Moulage par injection

Le moulage par injection est la méthode la plus couramment utilisée pour les articles thermoplastiques, en particulier ceux de forme complexe et nécessitant une haute précision dimensionnelle.

Les matériaux biodégradables peuvent être transformés comme les thermoplastiques traditionnels tels que le PC ou l'ABS et peuvent être utilisés sur des machines conventionnelles.

Les vis à cisaillement élevé, comme les vis pour nylon, ne sont pas recommandées car elles peuvent générer beaucoup de chaleur par cisaillement.

Comme pour les thermoplastiques standard, le volume d'injection recommandé devrait être de 30 à 80 % du volume du cylindre, et les points chauds ne sont pas recommandés [31].

Bien que les polymères biodégradables soient semi-cristallins et aient de basses températures de fusion, leur cristallisation est relativement lente.

Le temps de cycle et la résistance à la chaleur peuvent être améliorés en utilisant la technologie de nucléation. Les polymères biodégradables ont tendance à coller aux surfaces métalliques pendant la transformation et à absorber l'humidité de l'air ambiant, ce qui dilue l'effet du séchage du polymère [32].

Les polymères biodégradables sont hygroscopiques et doivent être séchés pour éviter une diminution du poids moléculaire, de la viscosité à l'état fondu, ainsi qu'un risque accru de bavures et de pièces cassantes.

Étant donné que le PLA et le PHA sont des polyesters, les exigences de séchage sont plus strictes que pour l'ABS, le nylon ou le polycarbonate.

Une température de séchage trop élevée ramollirait le matériau et l'agglomérerait dans la trémie de séchage. Si elle est trop basse, le séchage ne sera pas aussi efficace [33].

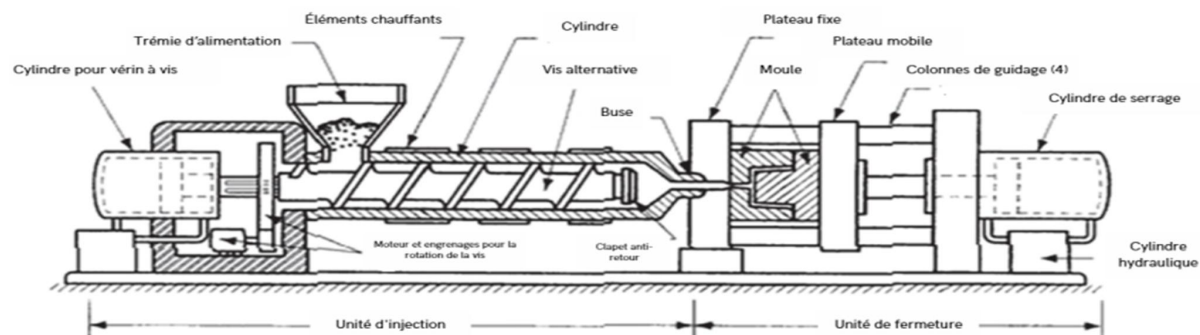


Figure I.4: Machine de moulage par injection conventionnelle.[34]

I.4.2. Extrusion de film soufflé

Le processus d'extrusion de film soufflé passe désormais de la fabrication de films fabriqués à partir de polymères standard à des polymères biodégradables.

Dans ce procédé, le polymère fondu sort de la tête d'extrusion dans une filière annulaire et émerge à travers une ouverture circulaire (également appelée anneau) pour former un tube.

De l'air est ensuite soufflé à travers la tête de filière dans l'anneau, gonflant le tube en une bulle tubulaire mince. Ce tube est ensuite aplati par des rouleaux pinceurs (nip rolls) et ensuite enroulé par l'enrouleur [35].

Le rapport de gonflement de la bulle (BUR) est défini par :

$$BUR = \frac{\text{Diamètre de la bulle}}{\text{Diamètre de la matrice}} \quad (I.1)$$

Des rapports BUR de 2 :1 à 4 :1 sont utilisés pour l'extrusion de film soufflé de films PLA en variant le BUR, la vitesse de la vis, la pression de l'air, et la vitesse de l'enrouleur, on peut obtenir des films de différentes épaisseurs (10-150 μm) et un certain degré d'orientation, un polymère biodégradable comme le PLA a une résistance à l'état fondu plus faible, et par conséquent, la formation d'une bulle stable pendant l'extrusion est plus difficile, en fonction de la température de fusion, cela pourrait également limiter le taux global de film calibré qui peut être produit.

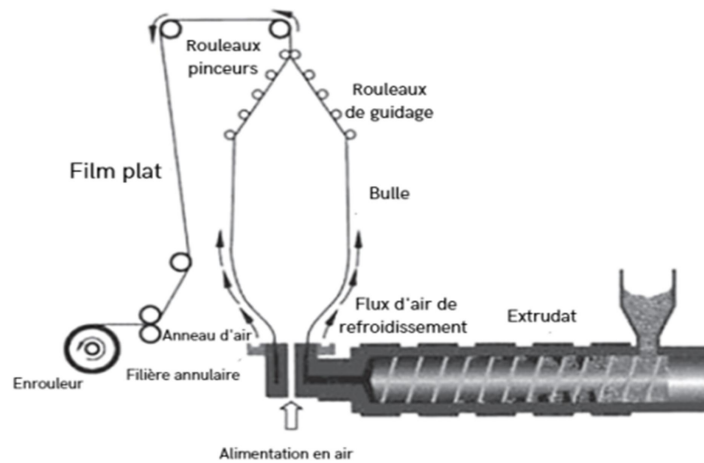


Figure I.5: Installation d'extrusion de film soufflé

I.4.3. Thermoformage

Le thermoformage est un processus qui consiste à chauffer une feuille de plastique jusqu'à une température spécifique (légèrement au-dessus de la transition vitreuse pour les polymères amorphes ou juste en dessous du point de fusion pour les semi-cristallins).

Une fois chauffée, la feuille est forcée contre la forme d'un moule, soit par aspiration du vide, soit mécaniquement.

Un défi courant est d'obtenir une épaisseur uniforme de la pièce, ce qui peut être amélioré par l'utilisation d'un bouchon mécanique.

Les biopolymères, comme le PLA, sont thermoformés pour créer divers produits tels que des gobelets, des plateaux alimentaires et des emballages.

Le chauffage de la feuille de PLA se fait généralement par rayonnement infrarouge, avec des températures typiques entre 80 et 110 °C.

Les moules en aluminium sont préférés pour leur bonne conductivité thermique. Il est possible d'utiliser des moules et des équipements conçus pour d'autres plastiques comme le PET et le polystyrène pour le thermoformage des biopolymères [36].

I.4.4. Moulage par soufflage

Le moulage par soufflage est le procédé le plus courant, idéal pour les pièces creuses comme les bouteilles en plastique à épaisseur de paroi uniforme, où la forme extérieure est primordiale.

Il existe deux types principaux de moulage par soufflage :

1. Le moulage par injection-soufflage
2. Le moulage par extrusion-soufflage

Le moulage par injection-soufflage est utilisé pour la production en grande quantité d'objets creux.

Les principales applications sont les bouteilles, les pots et autres contenants.

Un processus typique de moulage par injection-soufflage comprend quatre étapes :

- Pré-injection : le polymère est introduit dans l'extrudeuse et les granulés de plastique sont plastifiés en polymère fondu.
- Injection : le polymère fondu est acheminé dans un collecteur où il est injecté à travers des buses dans un moule de préforme creux et chauffé.

Le moule de préforme forme la forme externe et est serré autour d'un noyau qui forme la forme interne de la préforme.

- Soufflage : le moule de préforme s'ouvre, le noyau pivote et est serré dans le moule de soufflage creux et refroidi.

Le noyau s'ouvre et permet à de l'air comprimé de pénétrer dans la préforme, qui se gonfle pour prendre la forme du produit fini.

- Éjection : après le cycle de refroidissement, le moule de soufflage s'ouvre et le noyau pivote vers la position d'éjection. Le produit fini est éjecté du noyau [37]

Le processus de moulage par extrusion-soufflage est légèrement différent. Dans ce procédé, le polymère est plastifié dans une extrudeuse et un ensemble vis standard.

La paraison est coupée au sommet par un couteau avant que le moule ne soit déplacé latéralement vers une deuxième position où de l'air est soufflé dans la paraison pour la gonfler à la forme du moule. Après le cycle de refroidissement, le moule est ouvert et le produit est éjecté [38].

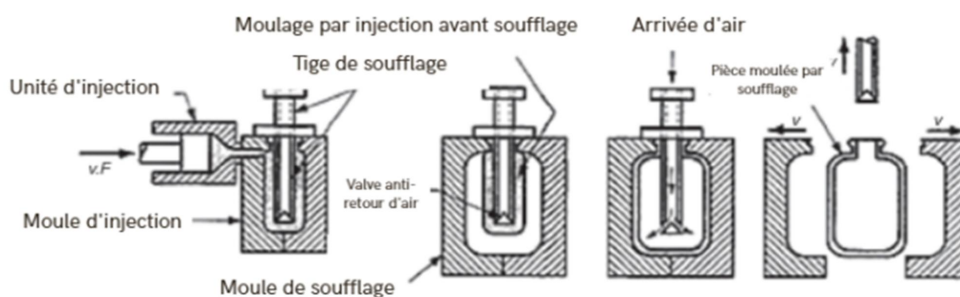


Figure I.6 : Procédé de moulage par injection-soufflage

I.4.5. Moulage par compression

Des composites peuvent être fabriqués par moulage par compression de PLA renforcé avec des fibres de kénaf ainsi que des fibres de lin.

Les granulés de PLA peuvent être introduits dans le moule soit sous forme de film, soit sous forme de charge en vrac.

Le moulage par compression est un procédé dans lequel deux moules métalliques appariés sont utilisés.

Un moule est utilisé pour fabriquer un produit composite. Un renfort et une matrice sont placés dans l'assemblage du moule et l'ensemble est maintenu entre les plateaux de la presse de moulage par compression.

Dans ce cas, le renfort est une fibre ou un matériau textile tandis que la matrice est un polymère biodégradable.

Les deux moitiés du moule sont conçues ensemble pour avoir la forme et la taille souhaitées du produit.

Le moule est placé entre les plateaux de la presse où une force de pression est appliquée et acquiert la forme de la cavité du moule en raison de la pression et de la précision.

Le cycle de cuisson peut être effectué soit à température ambiante, soit à une température élevée. Après la cuisson, le moule est refroidi et le composite produit est ensuite retiré du moule [39].

Les polymères biodégradables tels que le PLA, l'alcool polyvinylique (PVA), les plastiques à base de soja et d'amidon peuvent être traités avec succès en utilisant le moulage par compression.

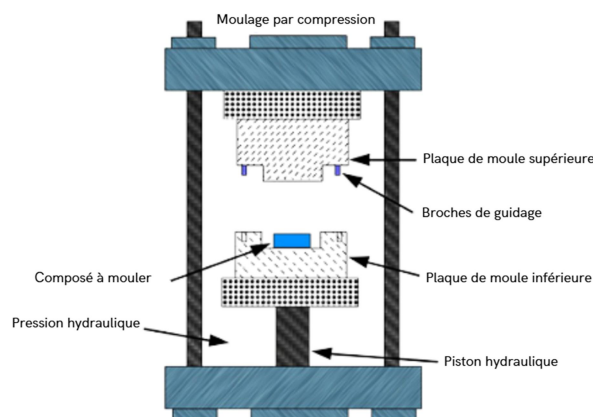


Figure I.7 : Arrangement de moulage par compression.

I.5 CARACTERISTIQUES MECANIQUES ET PHYSICOCHIMIQUES DES BIOPLASTIQUES A BASE D'AMIDON

I.5.1. Caractéristiques Mécaniques

I.5.1.1. Résistance à traction

La résistance à la traction est la contrainte maximale qu'un matériau peut supporter avant de se rompre lorsqu'il est soumis à une force de traction.

Pour les bioplastiques à base d'amidon, la source de l'amidon et sa teneur en amylose jouent un rôle important : une teneur plus élevée en amylose est généralement associée à une plus grande résistance.

Cependant, l'ajout de plastifiants, bien qu'il améliore la flexibilité, tend souvent à diminuer la résistance à la traction.

Par exemple, une étude sur les bioplastiques à base d'amidon de manioc renforcé par des fibres de mésocarpe de coco a montré que l'ajout de ces fibres améliorait les propriétés mécaniques des films.

Des valeurs de résistance à la traction variables ont été rapportées dans la littérature pour différents types de bioplastiques à base d'amidon.[40].

Un bioplastique à base d'amidon de graines d'avocat a présenté une résistance à la traction maximale de 3,381 MPa avec l'ajout de chitosan et de glycérol.

Un film bioplastique à base d'amidon renforcé au chitosane a atteint une résistance à la traction optimale de 5,19 MPa.

Pour les bioplastiques à base d'amidon de maïs, la résistance à la traction peut varier considérablement en fonction des concentrations d'amidon et de glycérol, allant de 0,15 à 1,28 MPa dans certaines formulations.

Les bioplastiques à base d'amidon de pomme de terre peuvent présenter une résistance à la rupture de 1,43 MPa, tandis que ceux à base d'amidon de tapioca peuvent atteindre 0,8231 MPa dans des conditions de traitement spécifiques.

L'utilisation d'agents de renforcement comme l'argile, les fibres ou les nanoparticules est une stratégie courante pour améliorer la résistance à la traction des bioplastiques à base d'amidon. L'ajout d'aloë vera et de graphène a également montré une amélioration des propriétés mécaniques[41].

I.5.1.2. Allongement à la rupture

L'allongement à la rupture est la mesure de la ductilité ou de la flexibilité d'un matériau, représentant la déformation qu'il peut subir avant de se fracturer sous tension.

En général, une plus grande quantité de plastifiant conduit à un allongement à la rupture plus élevé pour les bioplastiques à base d'amidon par exemple, l'ajout de poly(alcool vinylique) (PVOH) à un bioplastique à base d'amidon de tapioca a entraîné une augmentation de l'allongement.

Des études ont rapporté des valeurs d'allongement à la rupture variées pour différents bioplastiques à base d'amidon.

Les bioplastiques à base d'amidon de graines d'avocat peuvent présenter des taux d'allongement allant de 21,9% à 134,7% en fonction de la formulation. [42].

Un film bioplastique à base d'amidon renforcé au chitosane a montré un allongement à la rupture de 44,6%. Pour les bioplastiques à base d'amidon de maïs, l'allongement à la rupture se situe généralement entre 12,69% et 20,09% avec différentes concentrations d'amidon et de glycérol.

Les bioplastiques à base d'amidon de pomme de terre peuvent atteindre un pourcentage d'allongement de 36,67%, et ceux à base d'amidon de tapioca peuvent avoir un allongement de 68,75% dans certaines conditions.

Contrairement à la tendance générale, les amidons à haute teneur en amylose peuvent parfois présenter un allongement plus faible que les amidons normaux[43].

I.5.1.3. Module de Young

Le module d'Young, ou module d'élasticité, est une mesure de la rigidité d'un matériau. Il indique la résistance d'un matériau à la déformation élastique sous contrainte.

Le module d'Young des bioplastiques à base d'amidon est influencé par le type d'amidon, la teneur en plastifiant et la teneur en humidité.

Les plastifiants ont tendance à diminuer la résistance et le module, tandis qu'une teneur accrue en eau a un effet similaire.

Des exemples de valeurs de module d'Young pour les bioplastiques à base d'amidon comprennent 4,1515 MPa pour un bioplastique à base de graines de durian, et une gamme de 3,55 à 14,67 MPa pour les bioplastiques à base d'amidon de maïs avec différentes concentrations d'amidon et de glycérol.

Les bioplastiques à base d'amidon de pomme de terre ne présentent pas de données spécifiques sur le module d'Young dans les extraits fournis, mais la résistance à la rupture et le pourcentage d'allongement sont indiqués.

De même, les bioplastiques à base d'amidon de tapioca ne fournissent pas de valeur de module d'Young explicite dans les extraits consultés[44].

I.5.1.4. Résistance aux Chocs

La résistance aux chocs est la capacité d'un matériau à absorber l'énergie d'un impact soudain sans se fracturer.

Les extraits fournis ne contiennent pas de données spécifiques sur la résistance aux chocs des bioplastiques à base d'amidon.

Cependant, l'utilisation d'agents de renforcement tels que les fibres et les nanoparticules, qui améliorent la résistance à la traction et la rigidité, pourrait potentiellement avoir un effet positif sur la résistance au choc.

I.5.2. Caractéristiques Physico-chimiques

I.5.2.1. Masse volumique (densité) :

La masse volumique, ou densité, représente la masse d'un matériau par unité de volume. Pour les bioplastiques élaborés à partir d'amidon de maïs, la densité des films plastifiés se situe entre 1,34 et 1,49 g/cm³.

Cette valeur est inférieure à la densité de 1,69 g/cm³ observée pour un film témoin non plastifié.

Il est établi que le type et la concentration de plastifiant peuvent influencer la densité, une légère diminution étant généralement constatée avec l'augmentation de la concentration en plastifiant[45].

I.5.2.2. Absorption d'eau et taux d'humidité

L'amidon présente une nature intrinsèquement hydrophile en raison de la présence de groupements hydroxyle au sein de sa structure moléculaire.

L'eau agit comme un agent plastifiant, ce qui peut accroître la flexibilité du matériau. Cependant, cette absorption d'eau peut compromettre la résistance mécanique et les propriétés barrières du bioplastique.

La quantité d'eau absorbée par les bioplastiques à base d'amidon varie en fonction du type et de la concentration du plastifiant utilisé.

Les films de fécule de maïs non plastifiés manifestent la plus forte capacité d'absorption d'eau, tandis que l'incorporation de certains plastifiants, notamment à des concentrations élevées, peut améliorer la résistance à l'eau.

À titre d'exemple, l'absorption d'eau d'un bioplastique à base d'amidon renforcé au chitosane était de 251%, comparativement à 302% pour un amidon pur.

Des concentrations plus importantes d'amidon et de glycérol peuvent entraîner une absorption d'eau accrue.

Afin de réduire l'absorption d'eau, des modifications chimiques telles que l'estérification ou le mélange avec des polymères hydrophobes peuvent être employées.

I.5.2.3. Solubilité :

La solubilité des bioplastiques à base d'amidon dans l'eau et d'autres solvants est directement liée à leur caractère hydrophile et à la présence de plastifiants.

On observe une tendance à l'augmentation de la solubilité avec la concentration en amidon, tandis qu'une quantité importante de plastifiant peut diminuer la résistance à l'eau.

La modification chimique de l'amidon, comme l'acétylation, peut réduire la teneur en eau et la capacité de rétention d'eau des bioplastiques.

De plus, la solubilité peut être ajustée en mélangeant l'amidon avec des polymères insolubles dans l'eau.[46].

I.5.2.4. Température de transition vitreuse (Tg)

La température de transition vitreuse (Tg) correspond à la température à laquelle un matériau amorphe passe d'un état rigide, de type verre, à un état plus souple et caoutchouteux.

Pour les bioplastiques à base d'amidon, la Tg est fortement influencée par la présence de plastifiants, qui ont généralement pour effet de l'abaisser.

L'eau et les polyols de faible masse moléculaire, tel que le glycérol, sont des plastifiants courants qui réduisent la Tg de l'amidon.

Les informations fournies ne spécifient pas de valeurs de Tg pour les différents types de bioplastiques à base d'amidon.

I.5.2.5. Stabilité thermique et température de dégradation

Les bioplastiques à base d'amidon présentent typiquement une température de dégradation autour de 250°C.

Cependant, l'amidon modifié peut tolérer des températures allant jusqu'à 230°C lors de la transformation thermoplastique.

L'ajout de certains additifs, comme l'argile (kaolin ou métakaolin), peut améliorer la résistance thermique de ces bioplastiques.

Des analyses thermogravimétriques (TGA) ont démontré que le renforcement au chitosane peut conférer une stabilité thermique raisonnable jusqu'à 290°C, et que l'incorporation de nanoparticules de ZnO peut également accroître cette stabilité.

De même, un biocomposite à base d'amidon de tapioca et d'extrait d'herbe de Siam a montré une utilisation sûre jusqu'à 300°C.

I.5.2.6. Biodégradabilité

L'un des avantages majeurs des bioplastiques à base d'amidon réside dans leur capacité à se biodégrader dans des conditions environnementales appropriées.

Le processus de biodégradation est influencé par des facteurs tels que la température, l'humidité, la présence de micro-organismes, ainsi que la structure chimique du polymère.

Des études ont mis en évidence la biodégradabilité des bioplastiques à base d'amidon de manioc dans le sol.

Un bioplastique à base d'amidon renforcé au chitosane a montré une dégradation de 52,1% de sa masse initiale après 28 jours. Les bioplastiques à base d'amidon de tapioca peuvent se dégrader complètement en 18 jours. Il est important de distinguer la biodégradabilité de la compostabilité ; la compostabilité se réfère spécifiquement à la dégradation dans des conditions de compostage définies. Certains bioplastiques, bien que d'origine biologique, ne sont pas nécessairement biodégradables[47].

I.5.3. Analyse comparative entre différents types de bioplastique :

Le PLA et les bioplastiques à base de cellulose présentent souvent une meilleure transparence que l'amidon et certains types de PHA, ce qui les rend préférables pour les applications où la clarté visuelle est importante.

La transparence est une exigence esthétique et fonctionnelle clé pour de nombreuses applications d'emballage, influençant l'attrait pour le consommateur et la visibilité du produit.

Le PHA se distingue par sa biodégradabilité dans un large éventail d'environnements, y compris marins et terrestres, offrant un avantage dans les applications où l'élimination incontrôlée est une préoccupation.

La capacité du PHA à se dégrader dans divers milieux naturels, y compris les environnements marins où la pollution plastique est un problème majeur, en fait une option plus polyvalente sur le plan environnemental par rapport au PLA qui nécessite un compostage industriel ou aux plastiques à base d'amidon dont le taux de dégradation peut varier considérablement.

Le Tableau I.5 résume les principales propriétés entre les bioplastiques préparés à partir de matériaux de base différents.

Tableau I.5: Principales propriétés des bioplastiques[48].

Propriété	Bioplastiques à base d'amidon	Acide Polylactique (PLA)	Polyhydroxyalcanoates (PHA)	Bioplastiques à base de cellulose
Source de matière première	Maïs, pomme de terre, manioc, blé, etc.	Sucres végétaux (maïs, canne à sucre)	Fermentation microbienne de sucres ou de lipides	Pâte de bois, autres sources végétales
Méthode de production	Gélatinisation, moulage par coulée/extrusion/injection	Fermentation, polymérisation par ouverture de cycle	Fermentation microbienne	Dérivation chimique (acétate), régénération (viscose, lyocell)
Résistance à la traction (MPa)	Variable (amélioration possible avec charges et modifications)	15.5-150	15-40	Variable (ex : acétate : ~10, régénérée : >30)
Allongement à la rupture (%)	Variable (augmentation possible avec plastifiants)	2-10	1-15	Variable
Solubilité dans l'eau	Généralement soluble, sensible à l'humidité	Faible	Faible	Variable

Conditions de biodégradabilité	Facilement biodégradable dans divers environnements	Compostage industriel (conditions spécifiques)	Biodégradable dans divers environnements (marin, sol, compost)	Biodégradable (taux variable selon le dérivé)
Applications typiques	Emballage jetable, couverts, films agricoles, médical	Emballage, impression 3D, implants médicaux, textiles	Emballage, films agricoles, médical	Emballage, textiles, électronique
Coût général	Faible à moyen	Moyen	Moyen à élevé	Moyen

I.6. APPLICATIONS DES BIOPLASTIQUES DANS DIVERS SECTEURS

I.6.1. Emballage :

Les plastiques biodégradables, à l'instar des plastiques conventionnels, offrent une vaste gamme d'applications dans le domaine de l'emballage.

Parmi les options d'emballage, on trouve les sacs pour compost, les films agricoles, horticoles et pour les produits de pépinière, les emballages pour les jouets et les textiles.

D'autres domaines incluent l'emballage pour les articles en contact avec les aliments, tels que les couverts jetables, les gobelets, les saladiers, les assiettes, les films de suremballage et de lamination, les pailles, les agitateurs, les couvercles et les tasses, les assiettes et les contenants[49].

On s'attend à ce que les matériaux bioplastiques utilisés dans les applications d'emballage alimentaire protègent les aliments de l'environnement et maintiennent leur qualité.

Ces fonctions de protection sont essentielles, car il est important de pouvoir contrôler et modifier leurs propriétés mécaniques et barrières, qui dépendent de la structure du biopolymère.

Il est également crucial d'étudier l'évolution des propriétés du matériau d'emballage pendant sa durée de contact avec les aliments.[50]



FigureI.8: Gamme d'options d'emballage en plastique biodégradable.

1.6.2. Articles Ménagers Jetable :

Les articles ménagers jetables fabriqués à partir de plastiques biodégradables sont de plus en plus considérés comme des options commercialisables, remplaçant les plastiques traditionnels tels que le polystyrène et la polyoléfine.

Des articles tels que les ustensiles de cuisine, les contenants et gobelets lavables, les accessoires de salle de bain, les jouets, les cintres et les crochets sont désormais produits à l'aide de plastiques biodégradables[51].

1.6.3. Agriculture et Horticulture :

Les bioplastiques offrent un potentiel important pour les applications agricoles et horticoles, notamment dans la production de paillis, de bandes d'ensemencement et de rubans biodégradables.

Ces produits se décomposent dans le sol, ce qui est bénéfique pour la germination des graines et la croissance des jeunes plants.

Les films de paillage en bioplastique aident à conserver l'humidité, à augmenter la température du sol et à contrôler les mauvaises herbes.

Des feuilles et des filets en bioplastique sont également utilisés dans la culture des champignons et pour protéger les racines des plantes de l'érosion.

Des paniers et des pots de plantes biodégradables sont couramment utilisés dans les cimetières, et les tees de golf biodégradables offrent une solution pratique pour les terrains de golf car agils se décomposent dans le sol[52].

1.6.4. Dispositifs Médicaux :

Les chirurgiens utilisent couramment des sutures biodégradables non toxiques pour diverses interventions, notamment cardiaques, faciles à stériliser, elles maintiennent leur solidité jusqu'à la cicatrisation, puis se résorbent et sont métabolisées par l'organisme sans laisser de résidus.

D'autres dispositifs tels que broches, clous et vis en plastique biodégradable servent au maintien des fractures, à la réparation ligamentaire et à la chirurgie reconstructive.

Dans le domaine dentaire, des implants biodégradables en polymères poreux comblent les alvéoles post-extractionnelles.

Des membranes biodégradables sont utilisées pour la régénération tissulaire guidée, prévenant la formation de croûtes et favorisant la repousse des tissus conjonctifs[53].

1.6.5. Électronique grand public

Une part importante du marché de l'électronique grand public est constituée de plastiques, utilisés pour les boîtiers, les circuits imprimés et le stockage de données en raison de leur durabilité, robustesse, légèreté et mobilité.

Cependant, on observe une augmentation des produits en bioplastique dans ce secteur en évolution rapide, tels que les boîtiers d'ordinateurs à écran tactile, les haut-parleurs, les éléments de clavier, les boîtiers de téléphones portables, les aspirateurs et les souris d'ordinateurs portables.

Les mélanges de PLA utilisés pour les écrans d'ordinateurs offrent également une résistance aux chocs améliorés, une excellente finition brillante et un traitement stable et précis.

D'autres exemples de produits électroniques grand public biodégradables incluent les claviers d'ordinateurs, les écouteurs, les téléphones portables, les ordinateurs portables, les consoles de jeux et les tablettes[54].

TECHNIQUE EXPERIMENTALES ET MATERIAUX

CHAPITRE II

TECHNIQUES EXPERIMENTALES ET MATERIAUX

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous sommes basés sur la description de l'ensemble des expériences effectuées afin d'élaborer des bioplastiques à partir de déchets agroalimentaires (épluchures et résidus de pommes de terre, de maïs, coquilles de noix ;... etc.) en citant les produits, le matériel et les protocoles expérimentaux utilisés pour effectuer les différentes étapes d'extraction et de purification des matériaux précurseurs (amidon, cellulose, etc.) ainsi que les méthodes d'élaboration des bioplastiques et leur méthodes de caractérisation.

En utilisant les déchets agricoles, nous contribuons à la valorisation de sous-produits alimentaires tout en réduisant l'impact environnemental lié à l'usage de plastiques conventionnels.

Notre étude a été effectuée au niveau du laboratoire « Eau Environnement et Développement Durable » Département de Génie des Procédés de l'Université Blida 1.

II.2 Matériel et méthodes utilisées

a) Matériel et appareillages

Le Tableau II.1. ci-dessous présente le matériel et l'appareillage utilisés pour la réalisation de cette étude.

Tableau II.1: Présentation du matériel et appareillages

Matériel	Appareillage
• Bêchers • Erlenmeyer • Cristallisoir • Fiole (1000mL ,250mL, 100mL, 50mL). • Pissette d'eau distillée • Pipette graduée (10mL ,25mL) • Boite de pitre • Tube à essai • Thermomètre • Barreau magnétique • Éprouvette graduée • Burette • Verre de montre • Entonnoir • Moules en silicone • Papier sulfurisé /film plastique • Spatule / pince • Chronomètre / montre • Papier filtre • Tamis • Gants	• Agitateur mécanique HEIDOLPH • Balance électronique :OHAUS, précision 0,001g • Étuve MEMMERT • Bain-marie • Ph mètre type HANNA instruments • IR-TF_8900 SHIMADZU • Plaque chauffante • Spectromètre IR-TF • Agitateur magnétique • Support de burette • Thermomètre • Mixeur

b) Réactifs et produits chimiques utilisés

Le Tableau II.2 ci-dessous présente les produits chimiques utilisés pour les différents procédés d'extraction, de purification et de modification de l'amidon et cellulose.

Tableau II.2: Présentation des réactifs et produits chimiques

Produits	Formule Chimiques	Masse Molaire (g/mol)	Pureté (%)	Densité à 25 °C (g/cm ³)	Producteur
				Viscosité mPaS	
Acétone	C ₃ H ₆ O	58,08	95 à 97	0,784	Sigma-Aldrich
Acide chlorhydrique	HCl	36,458	36	1,19	VWR
Hydroxyde de sodium	NaOH	39,997	98,9	-	panreac
Glycérine	C ₃ H ₈ O ₃	92,09	95- 99,5	1,26 /~945	Sigma-Aldrich
Acide acétique	CH ₃ COOH	60,05	80–99	1,05 /~1,22	Fisher Scientific
Alcool polyvinylique PVA	CH ₃ CHO	364,45	-	~1,19	Kuraray
Chlorite de sodium	NaClO	74,442	-	2,5	Coyne Chemical Co Inc. (USA)
Éthanol	C ₂ H ₆ O	46,07	96-99,9	0,789 /1,2	Carlo Erba Reagents
Sorbitol	C ₆ H ₁₄ O ₆	182,17	>98	1,49 /108	Roquette
Cire d'abeille	C ₁₅ H ₃₁ COOC ₃₀ H ₆₁	703	>95	~0,93	Koster Keunen ou Cargill

II.3. Préparation de matériaux précurseurs

II.3.1. Extraction de l'amidon à partir de déchets agro-alimentaires

II.3.1.1. Présentation de la matière première-

L'amidon provient de deux types de déchets alimentaires : les résidus de pommes de terre et les résidus de maïs. L'amidon, qui est très présent dans les résidus de pommes de terre, est isolé par un traitement physique simple.

De même, les déchets de maïs, naturellement riches en amidon, sont exploités dans le même but. Ces matières premières permettent d'obtenir un polymère naturel, lequel est essentiel à la fabrication du bioplastique.

1) Méthode d'extraction de l'amidon

a) Extraction de l'amidon à partir de résidu de pommes de terre

Les étapes de préparation de l'extrait d'amidon à partir de déchets de pommes de terre consistent à effectuer les opérations suivantes:

- **Lavage et séchage des déchets** : Une quantité de déchets de pommes de terre est soigneusement lavée à l'eau pour éliminer les impuretés. Les déchets sont ensuite placés dans un four à 60 °C pendant 30 à 45 minutes. Cette étape vise uniquement à réduire l'humidité superficielle sans provoquer un séchage complet.
- **Pesée** : Une fois le matériau est partiellement séché, une masse de 100 grammes de matière est prélevée à l'aide d'une balance de précision.
- **Préparation de la suspension** : Une masse de 100 g de déchets est introduits dans un mixeur avec 200 mL d'eau distillée. Le mélange est mixé pendant 20 minutes jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène. L'agitation sert à améliorer le rendement d'extraction.
- **Filtration et lavage** : Le mélange est versé dans un bécher à travers un tamis de maille fine afin de séparer la fraction liquide.
- **Décantation de la suspension** : La matière filtrée est transférée dans un bécher propre et laissée décanter au repos pendant 24 heures à température ambiante (24 °C).
- **Purification de l'amidon** : Après décantation, l'amidon est récupéré et transféré dans une boîte de Pétri, puis lavé à l'aide d'un mélange d'acétone et d'eau distillée à 10 % afin d'obtenir une purification satisfaisante (jusqu'à l'obtention d'une couleur blanche).

- **Séchage et conservation** : Le sédiment blanc (amidon) est d'abord récupéré, puis séché à l'air libre, et enfin conservé dans un récipient propre et hermétiquement fermé, et ce, jusqu'à prochaine utilisation.

b) Extraction de l'amidon à partir des déchets de maïs

L'extraction de l'amidon à partir des déchets de maïs s'effectue en suivant une série d'étapes spécifiques décrites ci-dessous :

- **Pesée** : Une masse de 100 grammes de déchets de maïs humides est prélevée directement, sans lavage préalable.
- **Broyage** : Les déchets pesés sont introduits dans un mixeur avec 200 mL d'eau distillée. Le mélange est broyé jusqu'à obtention d'une pâte homogène.
- **Filtration et lavage** : Le mélange est filtré à l'aide d'un tamis fin ou d'un tissu filtrant de maille = 0.5mm . Le résidu solide est ensuite rincé avec 200 mL supplémentaires d'eau distillée.
- **Décantation** : Le liquide filtré est laissé au repos dans un bécher propre pendant 24 heures à température ambiante (24 °C) afin de permettre à l'amidon de se déposer au fond de bécher.
- **Purification de l'amidon se fait en deux temps** :
 - Première étape : l'amidon est d'abord décanté, puis récupéré et transféré dans une boîte de Pétri.
 - Deuxième étape : l'amidon est ensuite lavé à l'acétone pur, jusqu'à ce qu'il soit parfaitement blanc.
- **Séchage et conservation** : L'amidon de maïs est récupéré, séché à l'air libre, puis conservé dans un récipient propre en vue d'une utilisation ultérieure.

2) Extraction de cellulose à partir de coquilles de noix

La cellulose est extraite de coquilles de noix selon la procédure d'extraction suivante :

- **Broyage des coquilles de noix** : Les coquilles de noix ont été broyées à l'aide d'un moulin électrique jusqu'à l'obtention d'une poudre fine et homogène.
- **Lavage initial** : 100 grammes de poudre ont été pesés et ajoutés à 1 litre d'eau distillée pour un lavage initial. Le mélange a ensuite été filtré à l'aide de papier filtre, puis laissé à égoutter.
- **Traitement alcalin (NaOH, 1 M)** La poudre lavée de coquilles de noix a été introduite dans la solution de NaOH, et le mélange a été chauffé à 90 °C et maintenu sous agitation

pendant 2 heures. Après refroidissement, le mélange a été filtré pour récupérer le résidu solide.

- **Traitement acide (HCl, 1M) :** Le résidu obtenu a été placé dans une solution d'acide chlorhydrique et chauffé à 70 °C pendant 60 minutes, puis filtré à nouveau après refroidissement, pour isoler la cellulose purifiée.
- **Blanchiment :** Le résidu a été blanchi dans une solution à 5%. Le mélange a été chauffé à 50 °C, et l'opération répétée plusieurs fois jusqu'à obtention d'une cellulose blanche.
- **Lavage et séchage final :** La cellulose blanchie a été lavée plusieurs fois à l'eau distillée jusqu'à atteindre un pH neutre (≈ 7). Elle a ensuite été séchée à température ambiante pour obtenir une poudre blanche fine représentant la cellulose purifiée.

II.4. Préparation des bioplastiques

L'amidon utilisé dans la préparation des bioplastiques a été extrait à partir d'épluchures de pommes de terre et de maïs, puis utilisé comme matière de base dans différentes formulations.

Le Tableau II.3 résume les différentes procédures utilisées lors de l'élaboration des échantillons de bioplastique de différents matériaux (amidon, cellulose).

Tableau II.3: Procédures de fabrication de bioplastiques à base d'amidon et de cellulose.

Essai	Procédure	Référence
1	Mélanger 3% d'amidon, 1% de sorbitol, 1% de glycérine et 1% de HCl dans l'eau distillée. Chauffer le mélange à 70 °C pendant 15 min. Ajouter 1% de NaOH. Puis laisser sécher à l'air libre pendant 1 semaine.	[55]
2	Mélanger 9% d'amidon, 2% de vinaigre blanc et de glycérine, 1 % de sorbitol, dans l'eau distillée. Chauffer jusqu'à épaississement. Étaler sur papier sulfurisé et sécher au four à 50 °C.	[56].
3	Mélanger 9% d'amidon en présence de solution de PVA et d'acide acétique, 2% de glycérine dans l'eau distillée. Chauffer à 70 °C pendant 30 min. Verser dans des moules en silicone. Sécher à l'air libre.	[57]
4	Mélanger de PVA et 5% d'amidon, 1% d'acide acétique et de glycérine. Chauffer à 90 °C pendant 15 min. Verser dans moules. Sécher à l'air libre 48 h	[58]
5	Même protocole que l'essai 4, et on ajoutant 1% en masse de cire d'abeille pour améliorer élasticité et résistance à l'eau.	[59]
6	Mélanger de PVA, de cellulose à 1%, et de glycérine, 1 % d'acide acétique et de cire, dans l'eau. Chauffer à 70 °C jusqu'à dissolution. Verser dans moules. Sécher à l'air libre.	[60]

II.5. Caractérisation physico-chimique

II.5.1 Calcul du rendement d'extraction de l'amidon et de la cellulose

Afin de déterminer la quantité d'amidon extraite à partir des déchets de pomme de terre, de déchet de maïs ou de coquilles de noix, nous avons calculé le rendement d'extraction en utilisant l'équation suivante :

$$R(\%) = \left(\frac{ma}{mt} \right) \times 100 \quad (\text{II.1})$$

Avec :

- ma : Masse d'amidon extrait (g).
- mt : Masse totale de matière première utilisée (pomme de terre) (g)

II.5.2. Taux de gonflement

L'objectif de cette analyse est d'évaluer la capacité d'absorption d'eau des échantillons de bioplastiques préparés à travers la mesure de leur taux de gonflement. Cette propriété est importante pour déterminer le comportement du matériau dans des milieux humides, notamment pour des applications biomédicales ou environnementales.

La procédure à appliquer est la suivante :

- Peser l'échantillon de bioplastique et noter sa masse initiale (m_0).
- Placer l'échantillon dans un bécher contenant 5ml d'eau distillée à température ambiante.
- Après 1 heure, retirer l'échantillon, l'essuyer délicatement à l'aide de papier absorbant, puis le peser (m_1). Le replacer immédiatement dans l'eau.
- Répéter la même opération après 2 heures (m_2) et 3 heures (m_3), en suivant les mêmes étapes : retrait, essuyage, pesée et réintroduction dans le milieu aqueux.
- Laisser ensuite l'échantillon immergé pendant 24 heures. Au terme de ce temps, le retirer, l'essuyer soigneusement, puis mesurer sa masse finale (m_4).

Le taux de gonflement à un instant donné $G(t)$ est calculé selon la formule suivante :

$$G(t)(\%) = \frac{mt - m_0}{m_0} \times 100 \quad (\text{II.2})$$

Avec :

- m_0 : masse initiale de l'échantillon sec (g)
- m_t : masse de l'échantillon à l'instant t (g)

Cette mesure est répétée pour chaque temps de pesée (1h, 2h, 3h, 24h) afin d'établir une courbe cinétique de gonflement (% de gonflement en fonction du temps).

II.5.3. Taux d'humidité

Nous déterminons la quantité d'eau présente dans un échantillon de bioplastique en mesurant son taux d'humidité. Nous suivons une cinétique de séchage à température constante.

La procédure à appliquer est la suivante :

1. Peser l'échantillon humide et noter sa masse initiale.
2. Placer immédiatement l'échantillon dans une étuve réglée à 70 °C.
3. Après 1 heure, retirer l'échantillon, le laisser refroidir légèrement, puis le peser (m_1) remettre l'échantillon dans l'étuve, répéter la même opération après 2 heures (m_2) et 3 heures (m_3).
4. Laisser ensuite l'échantillon en étuve jusqu'à 24 heures, puis effectuer une dernière pesée (m_4).

Calcul du taux d'humidité

À chaque étape, le taux d'humidité est donné par la formule :

$$H(\%) = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \times 100 \quad (\text{II.3})$$

Avec :

- m_0 : masse initiale (g)
- m_t : masse après 24 heures de séchage (g)

II.5.4 Test d'élasticité du bioplastique

Ce test permet d'évaluer l'élasticité du bioplastique à température ambiante et à température élevée à 80 °C, en observant sa capacité d'allongement, de récupération ou de déformation permanente.

Ce test est réalisé selon les deux étapes suivantes :

❖ À température ambiante (25°C)

1. Mesurer la longueur initiale de l'échantillon (L_0).
2. Étirer l'échantillon à la main ou à l'aide de poids légers.
3. Relâcher doucement et mesurer la longueur finale (L_1).

❖ À température élevée (à 80°C)

1. Plonger un échantillon similaire dans un bain-marie chauffé à 80 °C pendant 5 à 10 minutes.
2. Retirer l'échantillon chaud et répéter les étapes précédentes :
3. Mesurer la longueur initiale, l'étirer, relâcher, puis mesurer la longueur finale.

II.5.5 Test de la résistance du bioplastique à la dissolution dans un solvant

Organique

Cette méthode de caractérisation sert à déterminer la résistance du bioplastique à la dissolution dans un solvant organique, pour déterminer sa stabilité chimique dans différents environnements.

Les étapes de cette méthode de caractérisation sont présentées ci-dessous :

- Découper des carrés de bioplastique de dimensions 3 cm × 3 cm.
- Peser chaque échantillon sec et noter la masse initiale m_0 .
- Placer chaque échantillon dans un bécher contenant 30 mL de solvant (éthanol ou acétone pur).
- Agiter doucement le contenu à la main toutes les 10 minutes pendant 1 heure.
- Toutes les 10 minutes, retirer l'échantillon :
- L'essuyer doucement avec du papier absorbant,
- Le peser (mt_1 , mt_2 , $mt_3...$),
- Puis le remettre immédiatement dans le même bécher.
- Après 1 heure d'agitation, laisser l'échantillon immergé sans agitation pendant 24 heures.
- À la fin des 24 heures, retirer l'échantillon, l'essuyer, le peser (mt).

En utilisant l'équation suivante pour le calcul de la résistance du bioplastique à la dissolution :

$$\text{Perte de masse (\%)} = \frac{m_0 - mt}{m_0} \times 100 \quad (\text{II.4})$$

Avec :

m_0 : masse initiale du bioplastique (avant immersion)

m_t : masse après 24 h.

II.5.6 Test de perméabilité à l'eau du bioplastique

L'objectif de ce test permet d'évaluer la capacité du bioplastique à laisser passer ou non l'eau, en mesurant la quantité d'eau traversant l'échantillon sur une période donnée.

La procédure relative à ce test est présentée par les étapes suivantes :

1. Préparation du montage

- Placer le film de bioplastique à plat au fond de l'entonnoir Büchner (bien ajusté pour couvrir totalement l'ouverture).
- Installer l'entonnoir au-dessus d'un bécher vide.
- Fixer la burette verticalement au-dessus du Büchner, et la remplir avec de l'eau distillée.

2. Débit contrôlé

- Ouvrir légèrement la burette pour laisser tomber 1 goutte toutes les 5 secondes (environ 12 gouttes/minute).
- Laisser couler pendant 30 minutes à 1 heure.

3. Observation et collecte

- Observer et noter si des gouttes d'eau traversent le film de bioplastique et s'accumulent dans le bécher[61].

II.5.7 Test de stabilité chimique du bioplastique en milieu acide et basique

La présente méthode consiste à évaluer la stabilité chimique du bioplastique lorsqu'il est exposé à différents milieux acides et basiques, en observant les changements de masse ou d'aspect après 24 heures d'immersion.

- Pour la préparation les échantillons : Découper 6 morceaux identiques de bioplastique et les peser et noter la masse initiale m_0 .
- Verser 5 mL de chaque solution dans un tube à essai.
- Placer un morceau de bioplastique dans chaque tube.
- Laisser reposer 24 heures à température ambiante.
- A la fin de l'expérience : Retirer les échantillons et les essuyer délicatement avec du papier absorbant puis peser à nouveau et noter la masse finale m_{24} .

L'équation suivante permet d'estimer la perte de masse en fonction de la variation du pH de milieu :

$$\text{Perte de masse (\%)} = \left(\frac{m_0 - m_{24}}{m_0} \right) \times 100 \quad (\text{II.4})$$

Avec :

m_0 : masse initiale du bioplastique

m_{24} : masse de l'échantillon après 24 h

II.5.8 Test de biodégradabilité du bioplastique

Le test est destiné pour étudier la biodégradabilité de bioplastiques à base d'amidon et de cellulose en les enterrant dans un sol humide pendant une période donnée, et en mesurant la perte de masse après 5 et 10 jours. (sa dégradation par voie biologique).

La procédure de ce test est expliquée en détail ci-dessous ref

1. Pesée initiale :

- Peser chaque échantillon de bioplastique et noter le poids initial (W1)

2. Préparation des gobelets :

- Dans chaque gobelet, ajouter 80 g de terre de jardin.
- Ajouter 10 mL d'eau dans chaque gobelet.
- Mélanger la terre pour bien répartir l'humidité.

3. Répartition des échantillons :

- **Gobelets A1 et A2** : enterrer 1 morceau échantillon 1 dans chaque gobelet (2 cm de profondeur).
- **Gobelets B3 et B4** : enterrer 1 morceau échantillon 2 dans chaque gobelet (2 cm de profondeur).
- Étiqueter les gobelets pour ne pas les confondre (A1, A2, B1, B2).

4. Incubation :

- Laisser les gobelets à température ambiante (**20–25 °C**).
- Maintenir le sol humide (vérifier chaque jour, ajouter quelques gouttes d'eau si nécessaire).
- Durée d'exposition au sol : à définir (**ex. 10 jours**).

5. Récupération :

- Après 5 jours, retirer les échantillons des 2 premiers gobelets.
- Après 10 jours, retirer ceux des 2 autres gobelets.
- Laver doucement à l'eau pour enlever la terre.
- Sécher sur papier absorbant puis placer dans une étuve à 85 °C pendant 24 h.

6. Pesée finale (W2) :

- Peser chaque échantillon sec et noter le poids final (W2).

Calcul de la biodégradabilité (%) : [62]

Pour chaque échantillon :

$$\text{biodégradabilité} = \left(\frac{w1-w2}{w1} \right) \times 100 \quad (\text{II.5})$$

II.5.9 Spectroscopie Infrarouge à Transformé de Fourier (IR-TF) :

La technique FT-IR utilisée pour découvrir les groupes fonctionnels présents dans les échantillons de bioplastique, en utilisant une plage de nombres d'ondes de 4000 à 400 cm^{-1}

❖ Principe de fonctionnement de la technique infrarouge (IR-TF)

La spectroscopie infrarouge est largement utilisée pour l'étude de la structure des molécules pour des applications chimiques, c'est une technique simple à mettre œuvre qui peut permettre d'obtenir des informations rapides sur tous types d'échantillons.

Cette technique est une spectroscopie vibrationnelle basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par l'échantillon. Toute molécule émet, à travers ses liaisons chimiques, des vibrations de différents types (élongation, déformation...), ces vibrations vont absorber le rayonnement infrarouge à des longueurs d'ondes différentes selon la nature de la liaison et le type de vibration. La position (longueur d'onde convertie en nombre d'ondes) et la forme des bandes d'absorption d'un spectre sont donc caractéristiques des groupements chimiques d'où elles proviennent, ainsi un composé particulier (par exemple un polymère) donne une empreinte spectrale d'absorption dans l'infrarouge qui lui est propre et pourra être identifié.



FigureII.1: Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (IR-TF)

Résultats et discussions

CHAPITRE III

RESULTATS ET DISCUSSIONS

III. 1 Introduction

Ce chapitre regroupe les interprétations et les discussions des résultats obtenus de la caractérisation physicochimique et structurale de différents échantillons préparés.

Dans cette section, les résultats de trois échantillons sélectionnés de bioplastiques élaborés sont présentés en respectant l'appellation suivante :

- **Échantillon 3** (le bioplastique solide en vue de son application en tant que matériau de base pour les dispositifs médicaux à usage unique) ;
- **Échantillon 4** (le bioplastique résultant plus ou moins solide est utilisé pour fabriquer des pansements médicaux) ;
- **Échantillon 5** (le bioplastique résultant est flexible et il est utilisé pour fabriquer des gants médicaux).

III.2. Résultats de caractérisation physico-chimique

III.2.1. Rendement d'extraction de l'amidon et de la cellulose

Les rendements d'extraction de différents échantillons synthétisés sont présentés dans le tableau III.1 ci-après.

Tableau III.1 : Rendement d'extraction de l'amidon et cellulose

Source de déchet	Masse de matière première (g)	Masse extraite (g)	Type de matériau extrait	Rendement (%)
Pommes de terre	200	19,8	Amidon	9,90
Maïs	300	82,0	Amidon	27,33
Coquilles de noix	30	6,8	Cellulose	22,67

- Le maïs offre le meilleur rendement en amidon (27,33 %) grâce à sa richesse naturelle en glucides complexes facilement extrayables, il est donc très adapté à la fabrication de bioplastiques.
- Les pommes de terre fournissent un rendement modeste (9,90 %), typique de ce tubercule dont la teneur en amidon dépend fortement du type et de l'état du déchet utilisé.

- Les coquilles de noix offrent un rendement d'extraction élevé en cellulose (22,67 %), ce qui confirme leur potentiel en tant qu'agent de renforcement fibreux dans des matériaux composites biodégradables.

Ces résultats montrent que le maïs est la meilleure source d'amidon, tandis que les coquilles de noix sont idéales pour extraire de la cellulose. L'utilisation combinée de ces deux types de biopolymères pourrait permettre de fabriquer des bioplastiques présentant des propriétés mécaniques et biodégradables équilibrées.

La Figure III.1 présente les différents échantillons de l'amidon et de la cellulose extraite à partir de différentes sources.



Figure III.1 : a) amidon de pomme de terre, b) amidon de maïs
c) cellulose de coquilles de noix

À partir de cette figure III.1, l'amidon extrait de pomme de terre et les déchets de maïs sont caractérisés par une couleur blanche, contrairement à la cellulose de coquilles de noix qui possède une couleur marron.

Une étape de blanchiment a été appliquée pour éliminer complètement les impuretés pour l'échantillon de coquilles de noix.

III.2.2. Taux de gonflement

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau III.2.

Tableau III.2 : Résultats de taux de gonflement des échantillons de bioplastique

Échantillon	m ₀ (g)	m ₁ (g, 1h)	H ₁ (%)	m ₂ (g, 2h)	H ₂ (%)	m ₃ (g, 3h)	H ₃ (%)	m ₄ (g, 24h)	H ₄ (%)
Échantillon 3	0,1163	0,1892	62,68	0,1934	66,31	0,1959	68,44	0,204	75,41
Échantillon 4	0,1289	0,1830	41,97	0,1850	43,50	0,1913	48,41	0,1901	47,48
Échantillon 5	0,1312	0,2537	93,36	0,2523	92,33	0,2934	123,61	0,2820	114,94

- **L'échantillon 3** montre une augmentation progressive et modérée du gonflement, atteignant environ 75 % à 24 heures, indiquant un équilibre satisfaisant entre la capacité d'absorption et stabilité mécanique.
- **L'échantillon 4** se caractérise par un profil de gonflement stable avec une légère progression, révélant une absorption contrôlée et constante dans le temps.
- **L'échantillon 5** affiche un taux de gonflement élevé mais régulier, suggérant une forte capacité de rétention d'eau avec une stabilité structurelle acceptable.

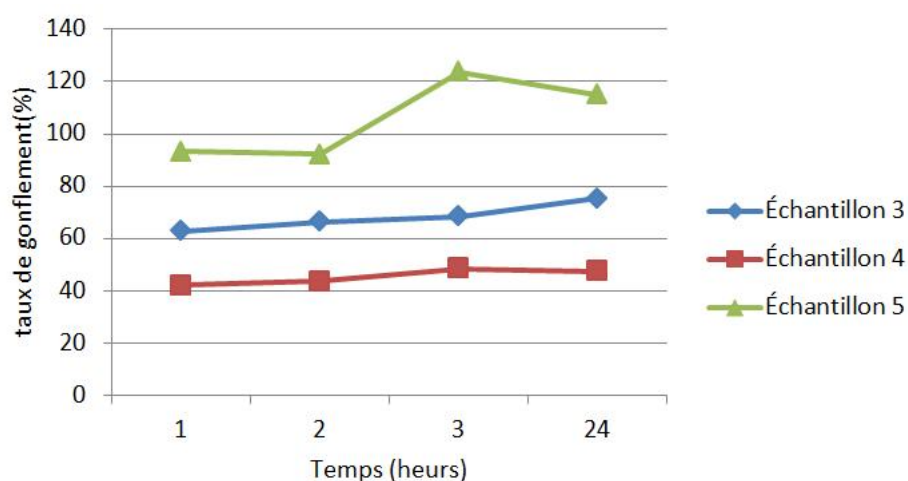


Figure III.2: Evolution du taux de gonflement des échantillons.

Le graphique montre l'évolution du taux de gonflement de trois échantillons (3, 4 et 5) mesurée à différents temps (1h, 2h, 3h, 24h).

Échantillon 3: présente un taux de gonflement modéré, allant de ~65 % à ~75 %, avec une légère augmentation au fil du temps. Cette faible absorption d'eau et cette stabilité indiquent que ce matériau est adapté à des applications rigides ou structurelles, où une bonne résistance à l'humidité est essentielle.

Échantillon 4: montre le taux de gonflement le plus faible (~42 % à ~50 %), mais relativement constant. Cela reflète une absorption contrôlée, suffisante pour absorber des fluides sans compromettre la structure du matériau, ce qui est attendu pour un pansement médical.

Échantillon 5 : affiche un gonflement élevé, atteignant un pic à environ 120 % après 3 heures, puis une légère baisse à 24 heures (~115 %). Ce comportement traduit une forte capacité d'absorption initiale suivie d'une stabilisation, caractéristique d'un matériau souple, élastique et perméable, comme requis pour des gants médicaux.

III.2.3. Test d'humidité

Tableau III.3 : Résultats de taux d'humidité de différents échantillons de bioplastique

Échantillon	m₀ (g)	m₁ (g, 1h)	H₁ (%)	m₂ (g, 2h)	H₂ (%)	m₃ (g, 3h)	H₃ (%)	m₄ (g, 24h)	H₄ (%)
Échantillon 3	0,4363	0,3989	8,57	0,3971	8,98	0,3928	9,97	0,3809	12,70
Échantillon 4	0,3476	0,3082	11,33	0,3008	13,46	0,2979	14,30	0,2764	20,48
Échantillon 5	0,4553	0,3832	15,84	0,3822	16,06	0,3772	17,15	0,3552	21,99

- **Échantillons 3, 4 et 5** ont des taux d'humidité plus faibles, avec Échantillon 3 montrant la meilleure résistance à l'humidité (< 13 %). Ces échantillons sont donc plus adaptés à des usages où l'humidité doit être limitée (ex. emballage, usage externe).

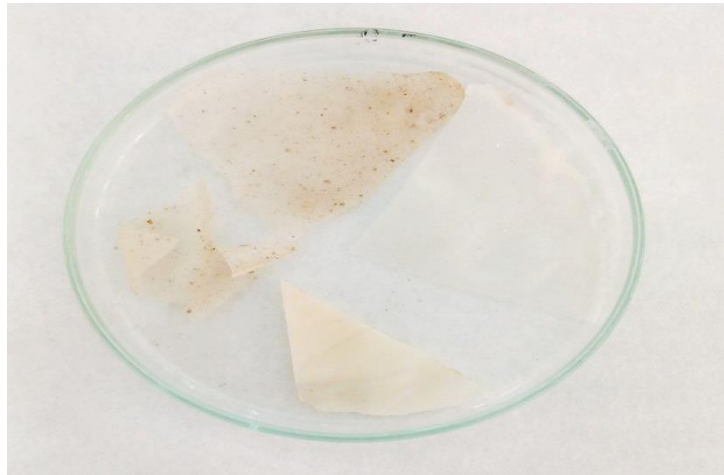


Figure III.3 : Les échantillons 3,4,5 après 24 h dans l'étuve

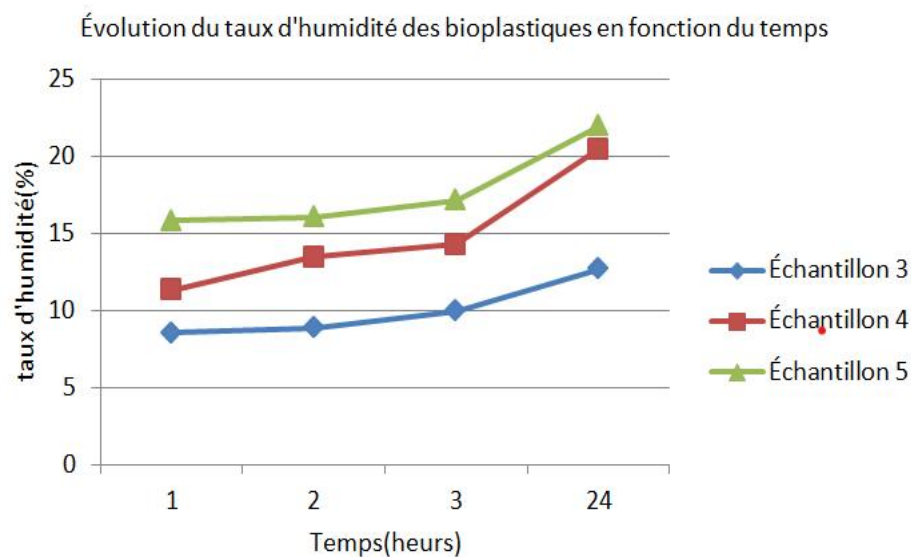


Figure III.4: Evolution du taux d'humidité des échantillons

Le graphique représentant l'évolution du taux d'humidité en fonction du temps pour les différents échantillons de bioplastique

- **Échantillon 3:**

- Le taux d'humidité reste très bas oscillant entre 8,57 % à 12,70 % seulement en 24 h.
- Ce profil démontre une excellente résistance à l'humidité et une stabilité structurelle dans le temps.
- C'est le matériau le plus imperméable parmi tous les autres échantillons , idéal pour les applications nécessitant une barrière et une rigidité, comme des dispositifs solides ou pièces techniques.

- **Échantillon 4:**

- Taux évoluant de 11,33 % à 20,48 % en 24 h.
- Ce niveau d'absorption modéré est cohérent avec un matériau destiné au contact cutané, apportant un certain confort tout en conservant une relative résistance à l'humidité.
- Le compromis absorption/stabilité semble adapté à des usages médicaux temporaires.

- **Échantillon 5:**

- Taux variant de 15,84 % à 21,99 % en 24 h.
- Bien qu'il absorbe un peu plus que l'échantillon 4, il reste relativement stable sur le long terme.
- Ce comportement indique une bonne tolérance à l'humidité ambiante, adapté à un usage médical où un contact temporaire avec l'humidité est possible sans perte d'intégrité.

II.2.4. Test d'élasticité des bioplastiques

1. Test à température ambiante

Deux types d'échantillons de bioplastique ont été soumis à un test d'élasticité à température ambiante (environ 20–25 °C), à savoir :

- Échantillon 4 : destiné à la fabrication de gants médicaux
- Échantillon 5 : destiné à la fabrication de pansements médicaux

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.4 : Résultats du test d'élasticité des bioplastiques à température ambiante

Échantillon	Longueur initiale (L ₀)	Longueur finale (L ₁)	Allongement (%)
Échantillon 4	3 cm	3 cm	0 %
Échantillon 5	3 cm	3 cm	0 %

À température ambiante, aucun des deux échantillons n'a présenté de déformation mesurable. Le pourcentage d'allongement étant nul (0 %), cela indique une absence totale d'élasticité dans ces conditions. Le matériau présente donc un comportement rigide à froid, ce qui peut limiter son application dans des dispositifs nécessitant de la flexibilité sans chauffage préalable.

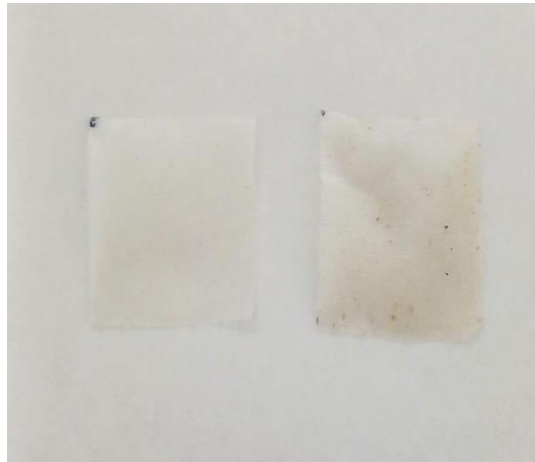


Figure III.5 : Échantillons 4 et 5 de bioplastique avant le test d'élasticité

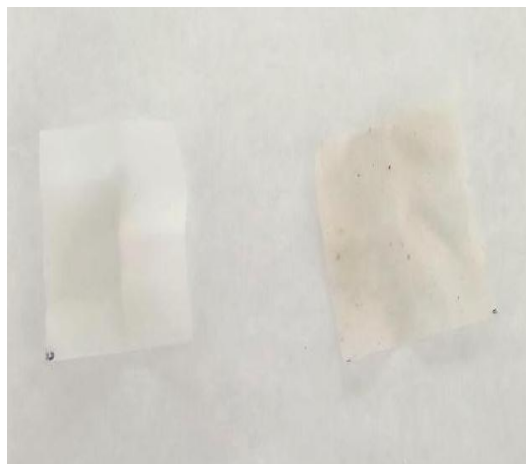


Figure III.6 : Échantillons 4 et 5 de bioplastique après test d'élasticité à température ambiante

2. Test à température élevée (80 °C)

Le même protocole a été répété après immersion des échantillons dans un bain-marie chauffé à 80 °C pendant 5 à 10 minutes. Les- résultats suivantes ont été obtenues :

Tableau III.5 : Résultats du test d'élasticité des bioplastiques à température élevée

Échantillon	Longueur initiale (L_0)	Longueur finale (L_1)	Allongement (%)
Échantillon 4	3 cm	≈2,3 cm	≈10 %
Échantillon 5	3 cm	3 cm	0 %

Après chauffage, l'échantillon destiné aux gants médicaux conserve ses dimensions initiales, indiquant une bonne résistance thermique et une stabilité dimensionnelle.

En revanche, l'échantillon prévu pour les pansements médicaux présente un allongement d'environ 10 %, ce qui suggère que le matériau devient plus souple et malléable sous l'effet de la chaleur. Cette propriété est intéressante pour des applications nécessitant une certaine conformabilité, comme l'adaptation aux courbes du corps lors de l'application sur la peau.

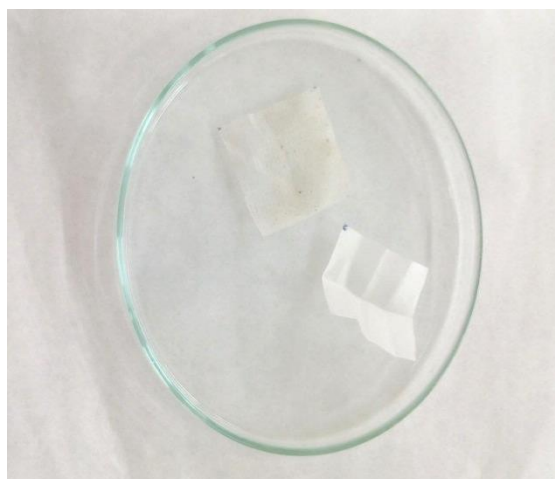


Figure III.7 : Échantillons 4 et 5 de bioplastique après test d'élasticité à température élevée

III.2.4. Test de la résistance du bioplastique à la dissolution dans un solvant

Les résultats obtenus sont présentés comme suit :

- **Échantillon 3 :**

Tableau III.6 : Résultats du test de résistance à la dissolution dans l'éthanol et l'acétone pour l'échantillon 3

Temps (min)	Masse (g) Acétone	Perte de masse (%) Acétone	Masse (g) Éthanol	Perte de masse (%) Éthanol
0	0,4116	0,00	0,3672	0,00
10	0,4100	0,39	0,3588	2,29
20	0,3956	3,89	0,3535	3,74
30	0,3944	4,18	0,3501	4,66
40	0,3915	4,88	0,2598	29,29
50	0,3866	6,07	0,2588	29,53
60	0,3800	7,68	0,2523	31,30
1440	0,3611	12,28	0,2511	31,64

- Dans l'acétone : l'échantillon a d'abord légèrement absorbé l'acétone (masse presque stable au début), puis a commencé à perdre de la masse progressivement. Après 24 h, la perte atteint 12,28 %, ce qui témoigne d'une bonne résistance à l'acétone. Il y a d'abord eu un gonflement, suivi d'une dégradation lente.
- Dans l'éthanol : la perte de masse est plus importante, atteignant 31,64 % après 24 h. Cela montre que l'échantillon est moins résistant à l'éthanol, avec une dégradation rapide dès les premières minutes. Ce bioplastique n'est pas adapté à un usage prolongé en présence d'éthanol.
- **Échantillon 4 :**

Tableau III.7 : Résultats du test de résistance à la dissolution dans l'éthanol et l'acétone pour l'échantillon 4

Temps (min)	Masse (g) Acétone	Perte de masse (%) Acétone	Masse (g) Éthanol	Perte de masse (%) Éthanol
0	0,4660	0,00	0,3495	0,00
10	0,2378	48,97	0,3306	5,41
20	0,2340	49,79	0,3252	6,95
30	0,2307	50,49	0,3237	7,38
40	0,2300	50,64	0,3209	8,18
50	0,2298	50,69	0,3190	8,73
60	0,2285	50,97	0,3185	8,87
1440	0,2038	56,27	0,3083	11,79

- Dans l'acétone : l'échantillon a subi une forte perte de masse dès les premières minutes (près de 49 % en seulement 10 minutes), indiquant une solubilité très élevée. Après 24 h, la perte atteint 56,27 %, ce qui indique une dégradation rapide et importante. Cela montre que ce bioplastique est très sensible à l'acétone et possède une faible résistance chimique dans ce solvant.
- Dans l'éthanol : la perte de masse reste modérée et progressive, atteignant 11,79 % après 24 h. Cela indique une meilleure stabilité du matériau dans l'éthanol, avec une dégradation lente. Le bioplastique est donc plus résistant à l'éthanol, ce qui peut convenir pour des usages en environnement alcoolisé modéré.

- **Échantillon 5 :**

Tableau III.8 : Résultats du test de résistance à la dissolution dans l'éthanol et l'acétone pour l'échantillon 5

Temps (min)	Masse (g) Acétone	Perte de masse (%) Acétone	Masse (g) Éthanol	Perte de masse (%) Éthanol
0	0,6284	0,00	0,5614	0,00
10	0,6117	2,65	0,5600	0,25
20	0,6100	2,93	0,5560	0,96
30	0,6083	3,20	0,5480	2,39
40	0,5955	5,23	0,5330	5,05
50	0,5900	6,10	0,5200	7,38
60	0,5834	7,10	0,5168	7,94
1440	0,5643	10,20	0,5088	9,36

- Dans l'acétone : le bioplastique présente une perte de masse progressive, atteignant 10,20 % après 24 heures. Cela indique une résistance modérée à l'acétone. Le matériau n'est pas immédiatement dégradé, mais montre une certaine sensibilité chimique à long terme.
- Dans l'éthanol : la perte de masse est faible, avec seulement 9,36 % après 24 heures. Cela montre que le bioplastique résiste mieux à l'éthanol qu'à l'acétone. Il conserve sa structure pendant toute la durée du test, ce qui est favorable pour des applications en présence d'éthanol.

Le graphique de la figure III.9 ci-dessous montre la résistance à la dissolution de trois échantillons dans l'acétone et l'éthanol pendant 24 heures.

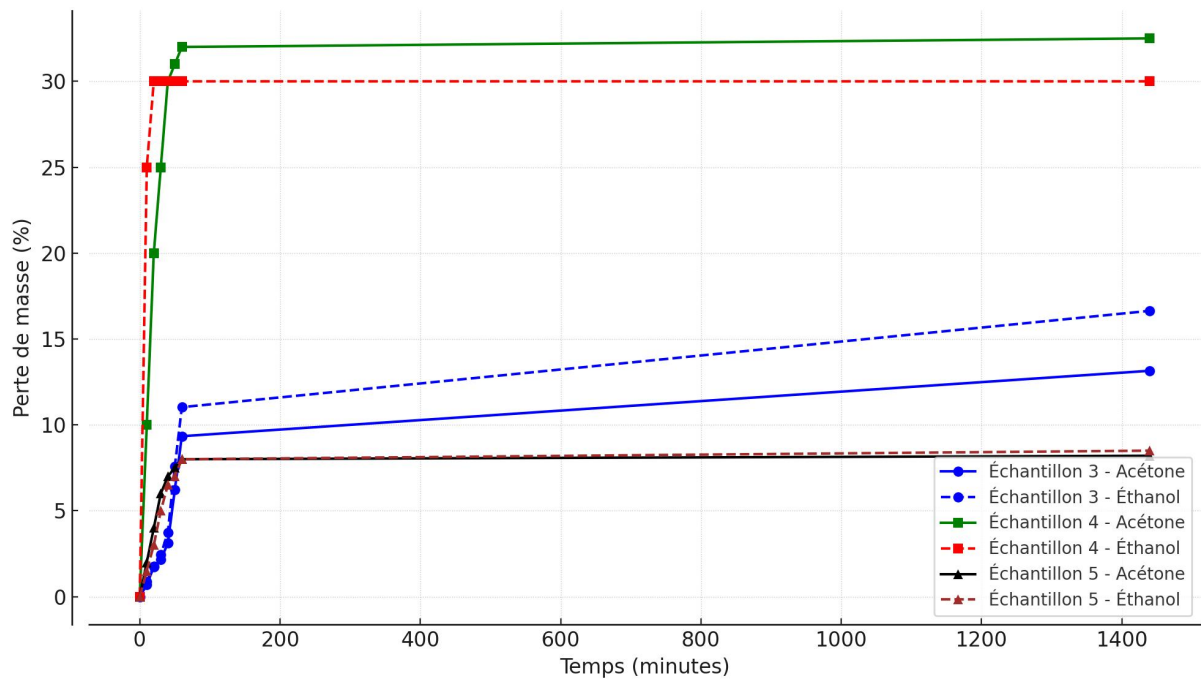


Figure III.8 : Résistance à la dissolution des échantillons dans l'acétone et l'éthanol sur 24 h.

• Échantillon 3:

On observe une faible perte de masse dans l'acétone (~12 %) et encore moins dans l'éthanol (<10 %) après 24 heures.

Cela traduit une excellente résistance chimique, notamment à la dissolution dans les solvants organiques testés.

Ce type de matériau est donc idéal pour des applications structurelles ou techniques, comme des contenants, des pièces rigides, des outils ou des dispositifs réutilisables exposés à des milieux chimiques.

• Échantillon 4:

On note une dégradation rapide initiale, suivie d'une stabilisation, avec une perte de masse d'environ 32 % dans l'acétone comme dans l'éthanol.

Cela indique une résistance modérée aux solvants, adaptée à des applications médicales de courte durée, notamment en contact avec des produits antiseptiques ou des solutions alcoolisées.

Ce matériau reste utilisable pour des usages temporaires sur la peau, où une haute durabilité chimique n'est pas nécessaire.

- **Échantillon 5 :**

On observe une perte de masse importante dans l'acétone (~56 %) dès les premières minutes, et une perte plus modérée dans l'éthanol (~9 %) après 24 h.

Ce comportement indique une forte sensibilité à l'acétone, ce qui rend ce matériau inadapté aux environnements exposés à des solvants puissants.

En revanche, sa meilleure stabilité dans l'éthanol en fait un bon candidat pour des gants médicaux à usage temporaire, notamment dans des milieux légèrement alcoolisés comme les solutions hydroalcooliques.

III.2.5. Test de stabilité du bioplastique en milieu acide et basique

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau III.9 et la figure III.9 ET figure III.10 ci-après.

Tableau III.9 : Résultats du test de stabilité du bioplastique en milieu acide et basique

pH	Échantillon 5			Échantillon 4			Échantillon 3		
	m ₀	m ₂₄	Perte (%)	m ₀	m ₂₄	Perte (%)	m ₀	m ₂₄	Perte (%)
1	0,136	0,068	50,00	0,345	0,286	17,10	0,073	0,068	6,85
3	0,421	0,255	39,67	0,324	0,203	37,35	0,223	0,146	34,53
5	0,180	0,131	27,22	0,450	0,285	36,67	0,250	0,116	53,60
9	0,163	0,122	25,15	0,350	0,214	38,86	0,320	0,206	35,63
11	0,123	0,094	23,58	0,295	0,159	46,10	0,420	0,247	41,19
13	0,451	0,211	53,21	0,255	0,186	27,05	0,322	0,166	48,45



Figure III.9 : Échantillons de bioplastique immergés dans des milieux acides et basiques de différents pH



Figure III.10 : des échantillons de bioplastique après 24 h d'immersion dans des milieux acides et basiques

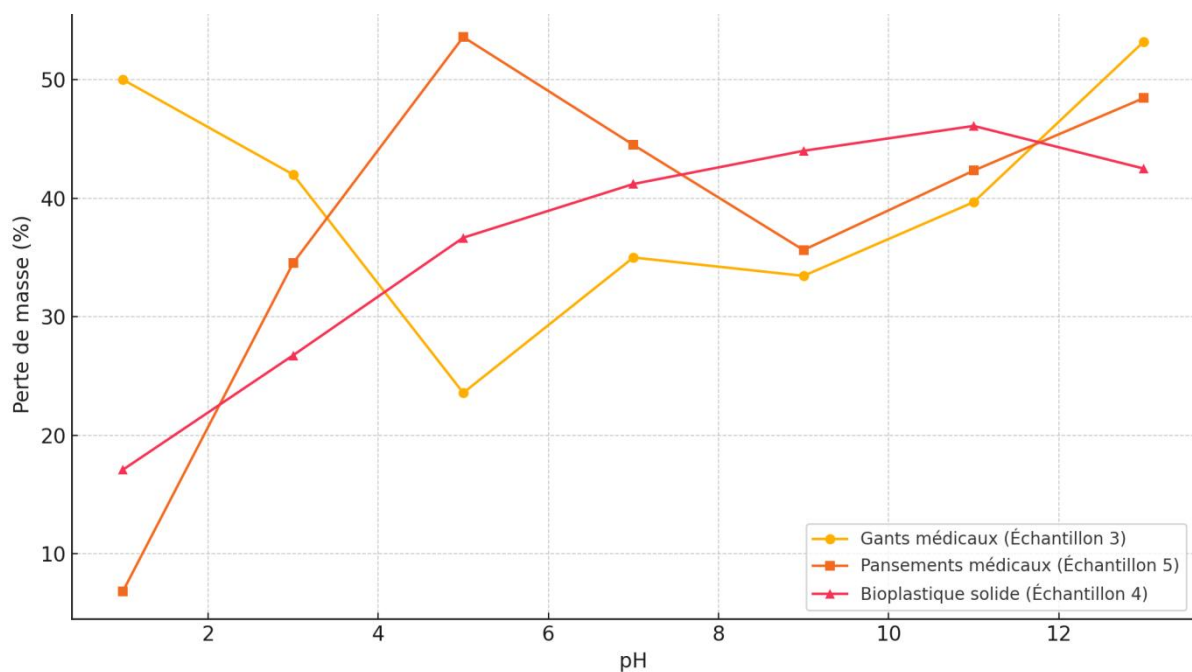


Figure III.11 : la perte de masse des trois échantillons de bioplastique après 24h d'immersion

Le graphe représenté la **perte de masse (%)** des trois échantillons de bioplastique après 24h d'immersion dans des milieux de pH différents.

- **Échantillon 5 : (Gants médicaux)**

- La perte de masse est très élevée en milieux extrêmes : 50,00 % à pH 1 et 53,21 % à pH 13, ce qui révèle une sensibilité à l'acidité et à l'alcalinité fortes.
- Entre pH 5 et 11, la perte reste modérée à faible (23,58 % à 39,67 %), indiquant une bonne stabilité dans cette plage.

Ce matériau est adapté aux environnements physiologiques (pH ~7,4), ce qui en fait un bon candidat pour des gants médicaux biodégradables à usage temporaire.

- **Échantillon 3 : (Bioplastique solide)**

- La perte de masse augmente progressivement avec l'alcalinité, de 17,10 % à pH 1 jusqu'à 46,10 % à pH 11.
- Reste relativement stable entre pH 1 et 5, puis diminue légèrement à pH 13.

Ce bioplastique est résistant en milieu acide à neutre, ce qui le rend approprié pour des applications internes ou structurelles temporaires, comme des implants biodégradables ou fils de suture dans le corps humain

Échantillon 4: (Pansements médicaux)

- Très faible perte à pH 1 (6,85 %), mais forte dégradation dès pH 3 (34,53 %), culminant à 53,60 % à pH 5.
- La perte reste élevée en milieu basique, atteignant 48,45 % à pH 13.

Ce matériau est instable dans les conditions physiologiques classiques, sauf dans un environnement très acide. Il conviendrait à des pansements spécifiques, par exemple pour des soins en milieu infectieux ou acide, et à usage très court.

III.2.6. Test de biodégradabilité

Tableau III.10 : Résultats du test de biodégradabilité pour les deux échantillons (4 et 5).

Échantillon	Masse initiale (W1, g)	Masse finale (W2, g)	Biodégradabilité (%)
Échantillon 5 (5 jours)	0,0549	0,0385	29,87 %
Échantillon 5 (10 jours)	0,1092	0,0587	46,25 %
Échantillon 4 (5 jours)	0,0923	0,087	5,66 %
Échantillon 5 (10 jours)	0,1155	0,0588	49,09 %

- Le taux de biodégradation augmente avec le temps, ce qui montre que les bioplastiques sont effectivement biodégradables dans un environnement naturel (terre humide).
- Les gants médicaux présentent une dégradation progressive avec environ **30 %** en **5 jours** et plus de **46 %** en **10 jours**.

- Les pansements médicaux sont moins dégradés à **5 jours (environ 6 %)**, mais montrent une dégradation importante après **10 jours (près de 50 %)**, ce qui suggère un comportement de dégradation plus lent mais efficace à long terme.

III.2.7. Test de perméabilité à l'eau du bioplastique

Un test de perméabilité à l'eau a été réalisé sur deux échantillons de bioplastique destinés à des applications médicales, à savoir les gants et les pansements (4 et 5), en simulant une exposition prolongée à un flux d'eau contrôlé (Figure III.12).



Figure III.12 : Montage expérimental du test de perméabilité à l'eau du bioplastique

Les résultats ont montré qu'aucune goutte d'eau n'a traversé les échantillons placés au fond de l'entonnoir Büchner. Cette imperméabilité totale indique que les bioplastiques testés possèdent d'excellentes propriétés de barrière à l'eau. Cela peut s'expliquer par une structure interne compacte, homogène et faiblement poreuse, qui empêche l'eau de pénétrer ou de se diffuser à travers le matériau.

Cette performance en termes d'étanchéité est particulièrement prometteuse pour les domaines où une bonne résistance à l'humidité est nécessaire. Dans le secteur médical, cela pourrait garantir la protection des dispositifs ou des zones sensibles contre les contaminations hydriques. Ces bioplastiques peuvent donc être utilisés efficacement dans la fabrication de produits tels que les gants médicaux, les pansements ou encore certains revêtements biodégradables. Leur imperméabilité partielle ou totale est en effet essentielle dans ces cas-là.

III.2.8. Spectroscopie Infra-Rouge (IR)

L'étude comparative a été réalisée entre les spectres IRTF de l'amidon extrait de déchets de maïs et celui de l'amidon de maïs commercial cité dans la littérature. De même, le spectre IRTF notre amidon extrait de pomme de terre local a été comparé avec celui de l'amidon de pomme de terre décrit dans la littérature [63].

Les spectres IR de trois échantillons : amidon de maïs, de manioc et de pomme de terre cités dans la littérature est présenté dans la figure III.13 suivante [64].

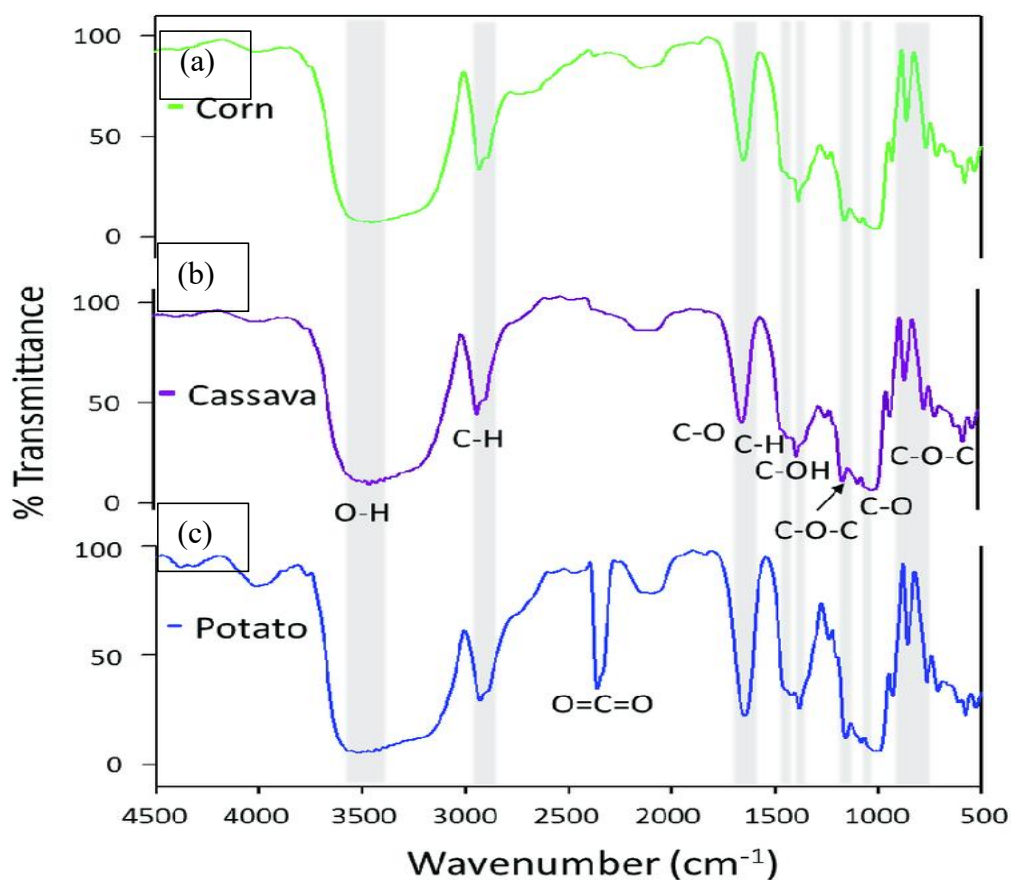


Figure III.13 : Spectre de trois échantillons d'amidon : a) de maïs, b) de manioc et c) de pomme de terre [64].

Les principales bandes caractéristiques des groupements fonctionnels ainsi que leurs valeurs de vibration sont présentées dans la section suivante pour l'amidon extrait de maïs dans la figure III.14 et le tableau III.11, et pour l'amidon extrait de la pomme de terre dans la figure III.15 et le tableau III.12, respectivement.

1) Spectre IR de l'amidon extrait de maïs

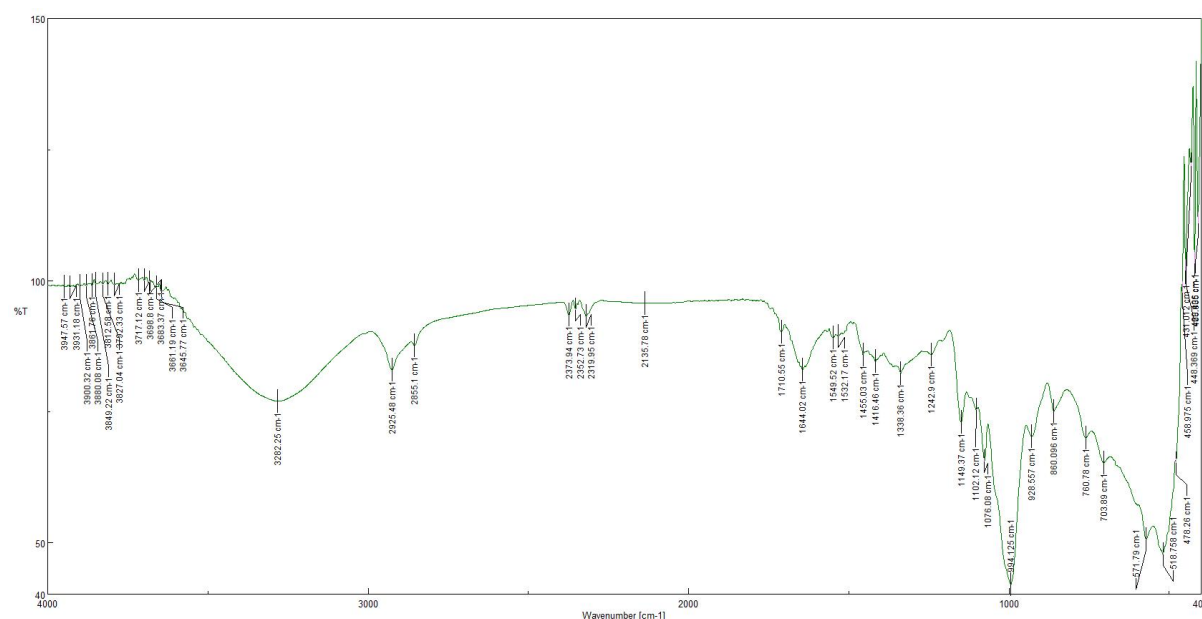


Figure III.14 : Spectre IR de l'amidon extrait de déchets de maïs.

Tableau III.11 : Etude comparative entre amidon extrait de maïs et celui de l'amidon de maïs commercial cité dans la littérature.

Vibration	Attribution	Nombre d'onde (cm ⁻¹)	Pic ou bande de spectre	Pic ou bande de spectre de l'amidon de maïs commercial [63]
Élongation O-H	Groupes hydroxyles (liaisons hydrogène)	3280 – 3300	Présente	Présente
Élongation C-H	Chaînes CH ₂ /CH ₃ aliphatiques	2925	Présente	Présente
Déformation O-H	Eau liée (humidité résiduelle)	1640 – 1650	Présente	Présente
Élongation C-O	Groupes glycosidiques / polysaccharides	1150 – 1020	Présente	Présente
Élongation C-O-C	Liaisons éther (ponts glycosidiques)	930 – 850	Présente	Présente
Déformation hors plan C-H	Oscillations secondaires du squelette carboné	760 – 600	Présente	Présente

Le spectre IR-TF obtenu pour l'amidon extrait de maïs issu de déchets présente des bandes caractéristiques qui correspondent bien à celles du spectre de l'amidon de maïs commercial [64]:

- La bande large autour de 3280 cm^{-1} , attribuée à la vibration d'élongation des liaisons O–H, indique la présence abondante de groupements hydroxyles, typiques des polysaccharides et responsables des interactions hydrogène dans la structure de l'amidon.
- La bande vers 2925 cm^{-1} , associée aux vibrations C–H des chaînes aliphatiques, confirme la structure carbonée de l'amidon.
- La bande à environ 1640 cm^{-1} est liée à la déformation O–H de l'eau absorbée, ce qui suggère une certaine hygroscopicité, typique des amidons naturels.
- Entre 1150 et 1020 cm^{-1} , les bandes correspondent aux vibrations d'élongation C–O, caractéristiques des liaisons glycosidiques (C–O–C) reliant les unités de glucose dans les chaînes d'amylose et d'amylopectine.
- Les bandes autour de 930 à 850 cm^{-1} indiquent des vibrations liées à la structure hélicoïdale de l'amidon (généralement attribuées aux modes d'élongation C–O–C dans les cycles glucosidiques).
- Enfin, les bandes de faible intensité entre 760 et 600 cm^{-1} sont typiques des déformations hors plan C–H, représentant des oscillations secondaires du squelette carboné.

L'ensemble des bandes observées dans le spectre IRFT de l'amidon extrait à partir de déchets de maïs coïncide parfaitement avec celui du spectre présenté dans la figure III.13.a. Cela confirme l'intégrité chimique de l'amidon dans l'échantillon étudié et valide l'étape d'extraction, justifiant ainsi son utilisation potentielle comme matière première pour la fabrication de bioplastiques.

2) Spectre de l'amidon extrait de déchet de la pomme de terre

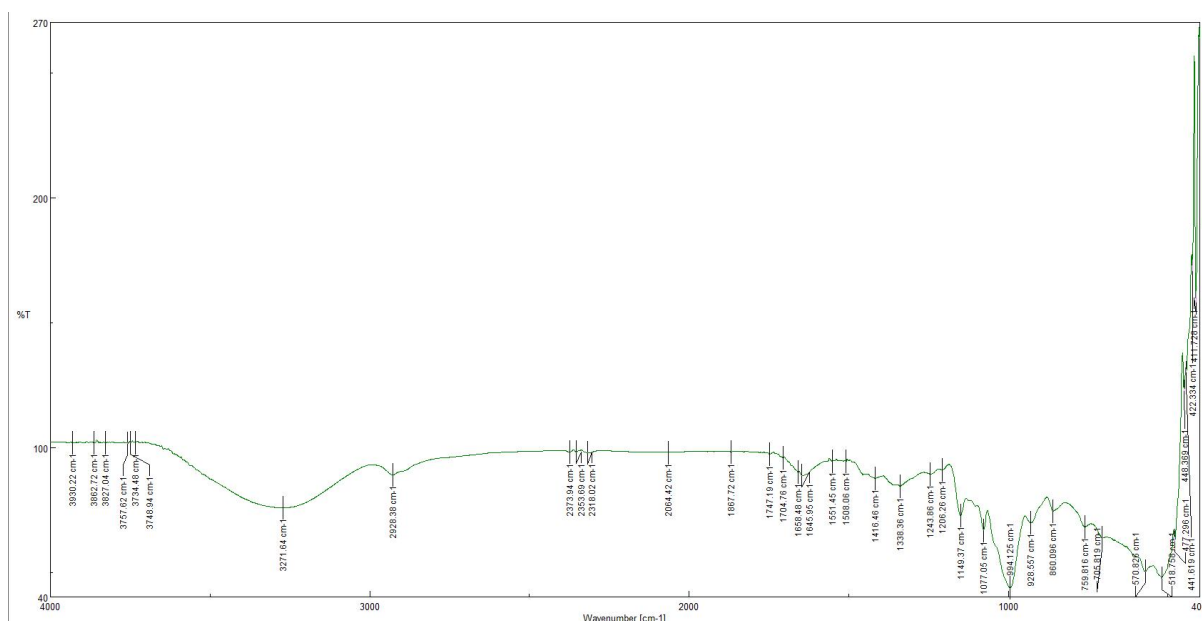


Figure III.15 : Spectre de l'amidon extrait de déchets de pomme de terre

Tableau III.12 : Etude comparative amidon extrait de déchet de pomme de terre et celui de l'amidon de pomme de terre cité dans la littérature.

Vibration	Attribution	Nombre d'onde (cm ⁻¹)	Pic ou bande de spectre	Pic ou bande de spectre de l'amidon de pomme de terre cité dans la littérature [63]
Élongation O–H	Groupes hydroxyles (liaisons H)	3270	Présente	Présente
Élongation C–H	Chaînes CH ₂ /CH ₃ aliphatiques	2928	Présente	Présente
Déformation O–H	Eau liée (humidité résiduelle)	1640	Présente	Présente
Élongation C–O	Groupes glycosidiques (polysaccharides)	1150 – 1020	Présente	Présente
Élongation C–O–C	Liaisons éther dans les cycles glycosidiques	930 – 850	Présente	Présente
Déformation hors plan C–H	Oscillations secondaires du squelette carboné	760 – 600	Présente	Présente

Le spectre IR-TF de l'amidon extrait de la pomme de terre montre des bandes caractéristiques correspondant étroitement à celles du spectre de référence de l'amidon extrait de pomme de terre (figure III.13.c).

Ces bandes confirment la structure typique d'un amidon natif à base de polysaccharides :

- La bande large autour de 3270 cm^{-1} correspond à l'élongation des liaisons O–H, indiquant la présence de groupes hydroxyles impliqués dans des liaisons hydrogène, caractéristiques des polysaccharides comme l'amylose et l'amylopectine.
- Le pic vers 2928 cm^{-1} est attribué aux vibrations d'élongation des liaisons C–H dans les groupes CH_2/CH_3 aliphatiques, confirmant ainsi la présence de chaînes carbonées typiques de l'amidon.
- La bande observée à environ 1640 cm^{-1} est liée à la déformation des liaisons O–H de l'eau absorbée, indiquant une hygroscopicité naturelle, comme observée dans les amidons natifs.
- Les bandes comprises entre 1150 et 1020 cm^{-1} reflètent l'élongation des liaisons C–O dans les groupes glycosidiques, qui relient les unités de glucose dans l'amylose et l'amylopectine.
- Entre 930 et 850 cm^{-1} , les bandes signalent les vibrations de liaisons C–O–C (liaisons éther) impliquées dans les cycles glucosidiques de l'amidon.
- Enfin, les bandes de faible intensité entre 760 et 600 cm^{-1} sont attribuées aux déformations hors plan des liaisons C–H, correspondant aux oscillations secondaires du squelette carboné.

Nous avons observé que l'ensemble des bandes du spectre IRFT de l'amidon extrait à partir de déchets de pomme de terre montre l'apparition des mêmes groupements du spectre présenté dans la figure III.13.c. L'étude de l'échantillon a permis de confirmer deux choses : l'intégrité chimique de l'amidon extrait de déchets de pomme de terre et l'efficacité de l'étape d'extraction et de purification. L'amidon obtenu est utilisé par la suite comme matière première dans la fabrication de bioplastiques.

3) Spectres infrarouge des bioplastiques élaborés

➤ Spectre IR échantillon 5 :

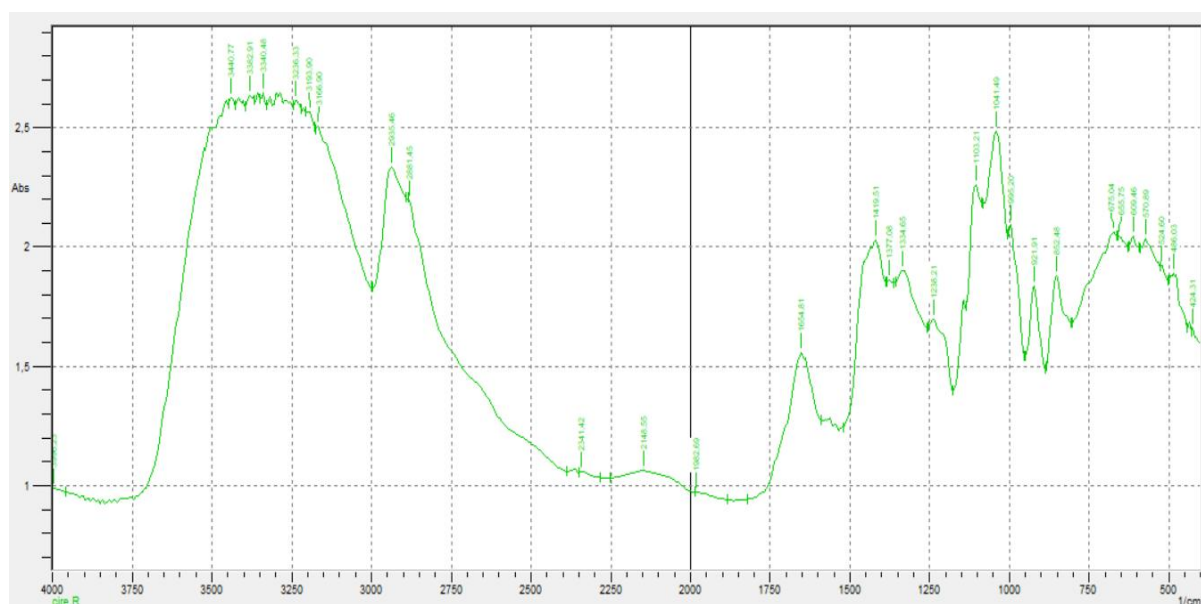


Figure III.16 : Spectre IR de l'échantillon 5 « gants médicaux »

- Le spectre présente une bande large vers 3315 cm^{-1} , associée aux groupes O–H. Elle est plus large que celle de l'amidon natif, ce qui traduit la formation de liaisons hydrogène supplémentaires, probablement dues à la présence de plastifiants comme le glycérol.
- Le pic à 2920 cm^{-1} (C–H) est présent, ce qui montre que les chaînes aliphatiques sont conservées.

Un pic à $1640\text{-}1650\text{ cm}^{-1}$ est également visible, indiquant la présence d'eau absorbée ou de groupements C=O.

- Les bandes entre 1145 et 1020 cm^{-1} sont typiques des liaisons glycosidiques (C–O, C–O–C), ce qui confirme la structure glucidique.

En comparaison avec le spectre de l'amidon natif, on remarque un élargissement des pics O–H et l'apparition de pics secondaires, témoignant de modifications structurales liées à la transformation en film polymérique.

➤ **Spectre IR échantillon 4:**

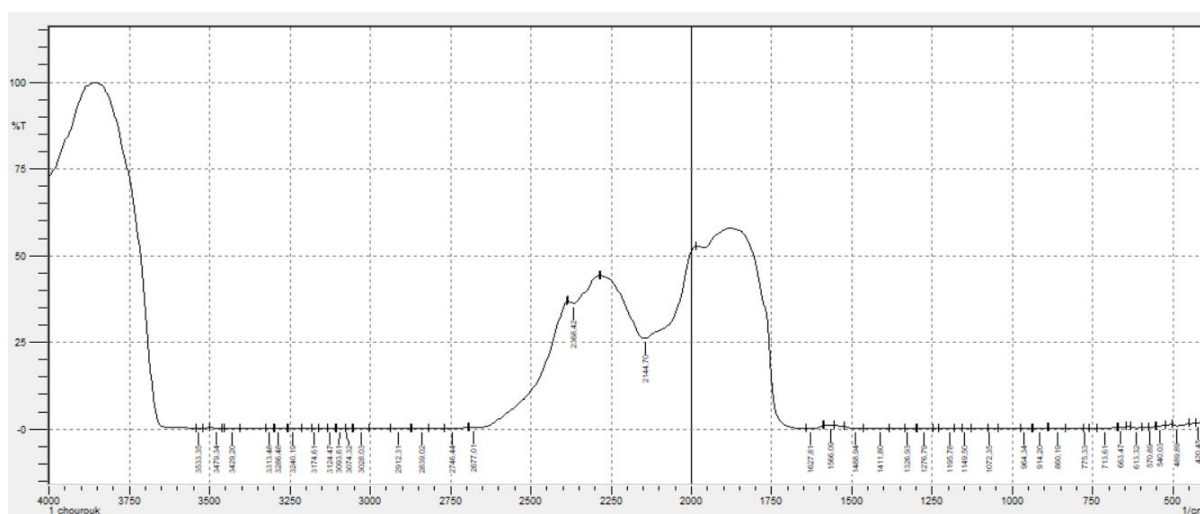


Figure III.17 : Spectre IR échantillon 4 « pensement médicaux ».

L'examen du spectre IR nous permet de tirer les points suivants :

- La bande O–H vers 3330 cm^{-1} est très large, suggérant une interaction plus forte avec l'eau ou une teneur plus élevée en plastifiant.
- Les pics C–H et C=O sont présents aux bonnes positions (2925 cm^{-1} et $\sim 1070\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$).
- Un pic notable à 2130 cm^{-1} est observé, absent dans l'amidon natif. Il peut être attribué à des groupes carbonyles formés pendant la gélatinisation ou à une réaction de réticulation.

En comparaison, ce spectre présente des modifications plus marquées que celui des gants médicaux, ce qui peut indiquer une structure plus amorphe ou une plastification plus importante dans l'échantillon étudié.

➤ Spectre IR échantillon 3:

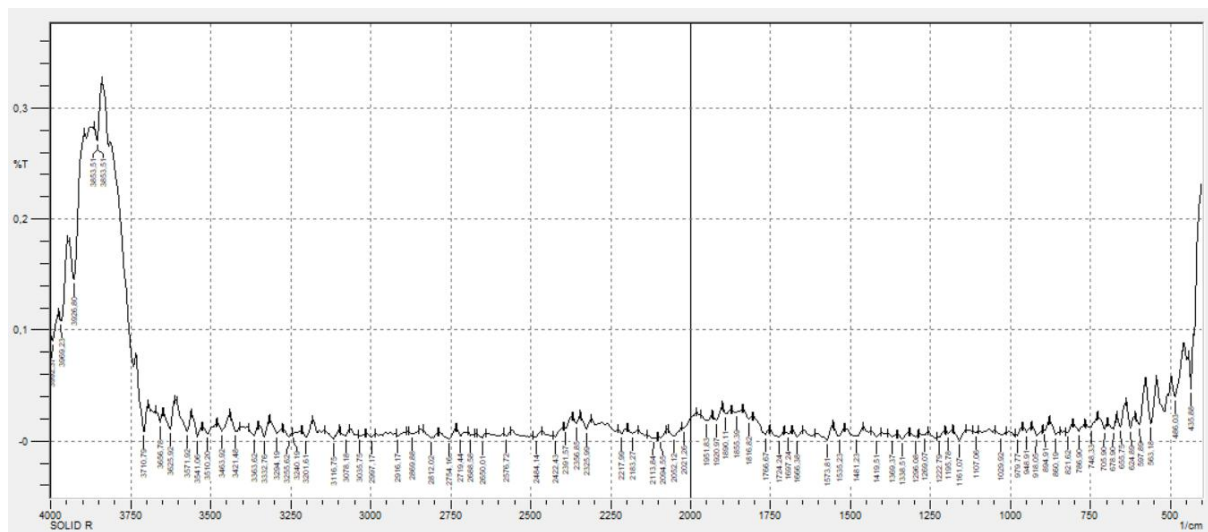


Figure III.18 : Spectre IR échantillon 3 « solide ».

L'analyse de spectre infrarouge nous permet de tirer les conclusions suivantes :

- Le spectre est plus proche de celui de l'amidon natif.
- La bande O–H située vers 3300 cm^{-1} est présente mais moins étalée.
- Les bandes C–O sont nettes entre 1020 et 1150 cm^{-1} , avec une organisation typique d'un amidon peu modifié.
- Des pics faibles à 873 cm^{-1} et 618 cm^{-1} apparaissent : ils sont liés à des déformations de squelette moléculaire, dues au séchage à l'air libre ?? ou à la compaction du matériau.

Conclusion Générale

Dans un contexte de crise environnementale croissante, la dépendance aux plastiques d'origine pétrochimique représente un enjeu majeur sur les plans écologique et sanitaire. Ce mémoire s'inscrit dans une démarche résolument durable. Il explore la possibilité de concevoir des bioplastiques à partir de déchets agroalimentaires, tels que les résidus de maïs, de pommes de terre et les coquilles de noix. Cette valorisation de matières premières naturelles et renouvelables (ou déchets) s'aligne ainsi sur les principes de la chimie verte et de l'économie circulaire.

Cette étude visait deux objectifs : d'une part, réduire l'impact environnemental des déchets organiques non toxiques en les transformant en matériaux utiles ; d'autre part, développer une alternative viable aux plastiques conventionnels pour des applications médicales. Les résultats expérimentaux ont démontré que les bioplastiques élaborés présentent des propriétés mécaniques (via le test d'élasticité) et physico-chimiques prometteuses, telles qu'une bonne flexibilité, une biodégradabilité efficace, une résistance à la perméabilité et une stabilité chimique dans les milieux acides et basiques. Ils peuvent donc être utilisés pour la fabrication de dispositifs médicaux à usage unique ou d'emballages stériles.

Au-delà des performances techniques, ce travail montre qu'il est possible de mettre en place un modèle de production durable dans lequel les déchets ne constituent plus une contrainte, mais une ressource. L'optimisation des formulations, notamment grâce au choix de plastifiants tels que la glycérine ou le PVA, et la maîtrise des procédés de transformation, permettent d'envisager une intégration industrielle de ces matériaux à faible impact négatif écologique, ce qui est un enjeu important pour la transition écologique.

Cette étude prouve que les bioplastiques fabriqués à partir de déchets agroalimentaires sont une solution viable et pérenne pour le secteur médical. Ils répondent non seulement à des impératifs écologiques, mais également à des besoins industriels concrets, et participent ainsi, à leur manière, à la construction d'un avenir plus propre et responsable.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Shrestha, B., Chapain, K., Shah, S., & Pandit, R. (2023). *Starch/Polyvinyl Alcohol (PVA) Blend Bioplastics: Synthesis and Physicochemical Properties*. Journal of Nepal Chemical Society, 43(2), 103–109.
- [2] Nanda, N., & Bharadvaja, N. (2022). Algal bioplastics: current market trends and technical aspects.
- [3] Finkenstadt, V. L. (2019). Historic Role of the United States Department of Agriculture in Food Production, Quality, and Security.
- [4] Preventpack 2012
- [5] Melchor-Martínez, E. M., Macías-Garbett, R., Alvarado-Ramírez, L., Araújo, R. G., Sosa-Hernández, J. E., Ramírez-Gamboa, D., Parra-Arroyo, L., Alvarez, A. G., Monteverde, R. P. B., Cazares, K. A. S., Reyes-Mayer, A., Yáñez Lino, M., Iqbal, H. M. N., & Parra-Saldivar, R. (2022).
- [6] Market update 2020: Bioplastics continue to become mainstream as the global bioplastics market is set to grow by 36 percent over the next 5 years.
- [7] Le rapport de référence concernant la capacité mondiale de production de bioplastiques en 2024 est le « Bioplastics Market Data Report 2024.
- [8] NaturePlast. (n.d.). Origine des plastiques biosourcés. Retrieved June 14, 2025, from NaturePlast website
- [9] Les bioplastiques : une solution pour les entreprises ? mardi 14 juin 2011, de 9h30 à 10h30/ agrion paris, 10 rue mercoeur, 75011 paris - france tel : (+33) 1.48.00.00.25 - fax : (+33) 1.48.01.66.05 - www.agrion.org 25/12/2018.
- [10] Kumar AA, Karthick K, Arumugam KP. Propriétés of biodégradable polymers and dégradation for sustainable development. International Journal of Chemical Engineering and Applications 2011.
- [11] European Committee for Standardization (CEN). (2000). EN 13432: Packaging – Requirements for packaging recoverable through composting and biodegradation. Brussels, Belgium: CEN.
- [12] ASTM International. (2019). ASTM D6400-19: Standard Specification for Compostable Plastics. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [13] Bioplastiques biodégradables, compostables et biosourcés pour les emballages

alimentaires, distinctions subtiles mais significatives ,Richard Lapointe , centre universitaire de formation en environnement ,université de sherbrooke, québec, canada.

[14] Ibrahim, N. I., Shahar, F. S., Sultan, M. T. H., Shah, A. U. M., Safri, S. N. A., & Mat Yazik, M. H. (2021). Overview of Bioplastic Introduction and Its Applications in Product Packaging. *Coatings*, 11(11), 1423.

[15] Sidek, I. S., Syed Draman, S. F., Sheikh Abdullah, S. R., & Anuar, N. (2019). *Current Development on Bioplastics and Its Future Prospects: An Introductory Review*. INWASCON Technology Magazine (i-TECH MAG), 1, 03–08

[16] Attanayake, N. A. B., Chandrasiri, M. T. M. S., Asela, A. U., Pitawala, H. M. J. C., & Senevirathna, M. A. S. R. (2022). *Biopolymers: Structure, properties, extraction methods and applications*. *Sri Lankan Journal of Applied Sciences*, 1(1), 18–30.

[17] ARIKAN, E. B., & OZSOY, H. D. (2015). A Review: Investigation of Bioplastics. *J. Civil Eng. Arch*, 9, 188-192.page191.

[18] ASHTER, S. A. (2016). Introduction to Bioplastics Engineering. William Andrew.

[19] Kumar S, Thakur K (2017) Bioplastics-classification, production and their potential food applications.

[20] GEA Goupe, Sustainable plastics from natural sources, [en ligne], <https://www.gea.com/fr/stories/sustainable-plastics-from-natural-sources/>, consulté le 23 mai 2025.

[21] Muhammadi S, Afzal M, Hameed S (2015) Bacterial polyhydroxyalkanoates-eco-friendly next generation plastic: production, biocompatibility, biodegradation, physical properties and applications.

[22] .Suszkiw, J. (2005). Electroactive bioplastics flex their industrial muscle. *Agricultural Research Magazine*, 53(5). Retrieved from <https://agresearchmag.ars.usda.gov/2005/may/bioplastics/>

[23] ChenG-Q,Patel MK(2012)Plastics derived from biological sources: present and future: a technical and environmental review.

[24] Kumar S, Thakur K (2017) Bioplastics-classification, production and their potential food applications.

[25] Polyesters DA, Albertson A (2001) *Advances in polymer science*, vol 157

- [26] Ross, G. M., Ross, S., & Tighe, B. J. (2017). Bioplastics: New routes, new products. In M. Gilbert (Ed.), *Brydson's Plastics Materials* (8th ed., pp. 631–652). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35824-8.00023-2>
- [27] M.N. Subramanian, *Plastics Additives and Testing*, Wiley Publishers, Salem, MA, 2013.
- [28] S. Thomas, P.M. Visakh, *Handbook of Engineering and Speciality Thermoplastics*, vol. 3, M. Niaounakis, *Biopolymers: Reuse, Recycling, and Disposal*, Elsevier, Oxford, UK, 2013, p. 47.
- [29] *Materials Additives and Blends Take PLA Upscale*, *Plast. Technol.*
- [30] E.S. Stevens, *Green Plastics: An Introduction to the New Science of Biodegradable Plastics*, Princeton University Press, Woodstock, UK, 2002.
- [31] L.-T. Lim, R. Auras, M. Rubino, Processing technologies for poly(lactic acid), *Prog. Polym. Sci.* 33 (8) (2008) 820 852. Elsevier.
- [32] N. Navratilova, A. Naplava, Study of biodegradable plastics produced by injection molding.
- [33] V.R.N. Telis, *Biopolymer Engineering in Food Processing*, Table 8.4, CRC Press, 2012, 311.
- [34] Elite Machinery Systems LLC, http://elitemachinerysystems.com/plastic_injection_molding.php.
- [35] J. Ren, *Biodegradable poly(lactic acid): Synthesis, modification, processing and applications*, Springer, 2010.
- [36] S.A. Ashter, *Thermoforming of Single and Multilayer Laminates: Plastics Films Technologies, Testing, and Applications*, Elsevier, 2014.
- [37] L.-T. Lim, R. Auras, M. Rubino, Processing technologies for poly(lactic acid), *Prog. Polym. Sci.* 33 (8) (2008) 820 852. Elsevier.
- [38] V.R.N. Telis, *Biopolymer Engineering in Food Processing*, Table 8.4, CRC Press, 2012, 311.
- [39] Lecture 5.6: Compression Molding, Indian Institute of Technology Patna.
- [40] Lecture 5.6: Compression Molding, Indian Institute of Technology Patna.

- [41] Comparison of Different Materials Used in The Preparation Of Household Bioplastics and Evaluation of a Mixture of Animal Gelatin and Cornstarch - Syrian Journal for Science and Innovation (BioPlastics vs Regular Plastics | BioPak Australia.
- [42] Water absorption and its effect on the tensile properties of tapioca starch/polyvinyl alcohol bioplastics – ResearchGate.
- [43] Environmental assessment of corn starch based biodegradable plastic with glycerol and fructose | Global NEST Journal.
- [44] Physical, Physicochemical, Mechanical, and Sensory Properties of Bioplastics from Phosphate Acetylated Arenga Starches.
- [45] Comparison of Different Materials Used in The Preparation Of Household Bioplastics and Evaluation of a Mixture of Animal Gelatin and Cornstarch - Syrian Journal for Science and Innovation
- [46] Recent Advances in Starch-Based Blends and Composites for Bioplastics.
- [47] Recent Advances in Starch-Based Blends and Composites for Bioplastics
- [48] Chen, G.-Q. (2009). A microbial polyhydroxyalkanoates (PHA) biosynthesis platform. *Biotechnology Advances*, 27(6), 651–666.
- [49] I.S. Arvanitoyannis, Totally and partially biodegradable polymer blends based on natural synthetic macromolecules: preparation, physical proper ties, and potential as food packaging materials, *J. Macromol. Sci. Rev. Macromol. Chem. Phys.* C39 (2) (1999) 205 271.
- [50] G. Scott, Green polymer, *Polym. Degrada. Stab.* 68 (2000) <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2009.05.012>
- [51] E. Erschfeld, Biodegradable Beach Toys: Safe for Kids and Oceans,
- [52] European Bioplastics e.V. (n.d.). Agriculture and horticulture. Retrieved June 14, 2025, from
- [53] A.N. Desai, Burial pods: Biodegradable coffins could one day replace depressing cemeteries with lush green forests.
- [54] S. Moore, PLA bioplastic debuts in touchscreen computer housing, *Plastics Today*.
- [55] Djetouiet, Z. (s.d.). Préparation d'un polymère thermoplastique [Mémoire non publié].
- [56] Université Hamma Lakhdar – El Oued. (2022). Étude structurale de bioplastique fabriqué à partir de pomme de terre (FTIR/DRX) [Mémoire de licence non publié].

- [57] Shrestha et al. (2023), Journal of Nepal Chemical Society
- [58] Abdel Hamid et al. (2025), Clean Technologies and Environmental Policy
- [59] Abdel Hamid et al. (2025), Clean Technologies and Environmental Policy
- [60] Ray & Bousmina (2004), Materials Science and Engineering: R: Reports
- [61] Mali, S., Sakanaka, L. S., Yamashita, F., & Grossmann, M. V. E. (2005). Water sorption and permeability of starch-based films. *Journal of Food Engineering*, 72(1), 85–91.
- [62] Di Bartolo, Alberto et al. “A Review of Bioplastics and Their Adoption in the Circular Economy.” *Polymers* vol. 13,8 1229. 10 Apr. 2021, doi:10.3390/polym13081229.
- [63] Science et surface – Centre scientifique Auguste Moirux – Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier FTIR
- [64] Abdullah, A.H., Chalimah, S., Primadona, I., & Hanantyo, M.H.G. (2018). Physical and chemical properties of corn, cassava, and potato starchs.