

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ de BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie des Procédés



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN GENIE DES PROCEDES

Spécialité : Génie Chimique

Intitulé du mémoire

Elaboration de nouvelle classe de bioplastique à partir de déchets alimentaires

Présenté par :
SAMI Rofaida
BOUGUESSA Nedjema

Encadré par :
Mme. CHABANE
Mr. BOURAS

Année universitaire 2024/2025

Remerciement

Au terme de ce travail, nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons tout d'abord à remercier chaleureusement Mr. Bouras et Mme Chabane, nos encadreurs, pour leur accompagnement, leurs conseils précieux, leur disponibilité, et la confiance qu'ils nous ont accordée tout au long de cette étude. Leur rigueur scientifique et leur bienveillance ont grandement enrichi notre travail.

Nos remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du Département de Génie des Procédés de l'Université de Blida 1, pour la qualité de l'enseignement dispensé et les connaissances acquises durant notre formation.

Enfin, nous remercions nos familles et nos amis pour leur soutien moral constant, leur patience et leur encouragement inestimable durant cette période de travail.

À toutes et à tous, merci.

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Mes chers parents,

pour leur amour inconditionnel, leur soutien moral et leurs sacrifices tout au long de mon parcours. Ce travail est l'aboutissement de leur patience et de leurs prières.

Mes frères et sœurs,

pour leur encouragement constant et leur présence rassurante, même dans les moments les plus difficiles.

Mes amis fidèles,

qui ont toujours cru en moi, m'ont soutenue et motivée tout au long de ce projet.

À toutes les personnes

qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Avec toute ma gratitude.

Rofaida Sami

Dédicace

À ceux qui ont été le socle de ma réussite...

Je dédie ce mémoire :

À ma chère mère, source infinie d'amour, de tendresse et de prières. Que Dieu te préserve.

À mon père, pour sa sagesse, son soutien discret mais essentiel, et son exemple de persévérance.

À mes frères et sœurs, pour leur présence réconfortante et leurs mots d'encouragement qui m'ont toujours porté vers le haut.

À mes enseignants, pour leur savoir transmis avec passion.

À mes camarades et amis, pour les moments partagés, les discussions, les rires et le soutien mutuel.

Enfin, à tous ceux qui croient en la valeur du savoir et de l'effort.

Nedjema Bouguessa

Résumé

Ce mémoire s'inscrit dans une démarche de valorisation des déchets agroalimentaires en tant que ressource renouvelable pour la production de matériaux biodégradables. L'objectif principal de cette étude est d'élaborer différentes formulations de bioplastiques à partir de déchets agroalimentaires riches en polymères naturels, tels que l'amidon issu des résidus de blé et la cellulose contenue dans les coques d'arachide. Ces derniers sont sélectionnés pour leur disponibilité locale et leur richesse en composants valorisables.

Les résultats de caractérisation montrent que les bioplastiques élaborés présentent une bonne cohésion, une biodégradabilité satisfaisante et une stabilité chimique.

Cette étude confirme le potentiel des déchets agroalimentaires dans la production de bioplastiques durables, permettant ainsi de réduire la pollution plastique et de promouvoir une économie circulaire.

Mots-clés : Bioplastique, Déchets agroalimentaires, Amidon, Cellulose, Biodégradable, Valorisation.

Abstract

This thesis is part of an approach to valorizing agri-food waste as a renewable resource for the production of biodegradable materials. The main objective of this study is to develop various bioplastic formulations from agri-food waste rich in natural polymers, such as starch from wheat residues and cellulose from peanut shells. These products were selected for their local availability and their richness in recoverable components.

Characterization results demonstrate that the developed bioplastics exhibit good cohesion, satisfactory biodegradability, and chemical stability.

This study confirms the potential of agri-food waste for producing of sustainable bioplastics, thereby reducing plastic pollution and promoting a circular economy.

Keywords: Bioplastic, Agri-food waste, Starch, Cellulose, Biodegradable, Recovery.

المخلص

هذه الأطروحة جزء من نهجٍ لتأمين نفايات الأغذية الزراعية كموردٍ متجددٍ لإنتاج مواد قابلةٍ للتحلل الحيوي. الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تطوير تركيباتٍ مختلفةٍ من البلاستيك الحيوي من نفايات الأغذية الزراعية الغنية بالبوليمرات الطبيعية، مثل النشا من بقايا القمح والسليلوز من قشور الفول السوداني. وقد تم اختيار هذه التركيبات بناءً على توفرها محليًا وراثتها بالمكونات القابلة للاسترداد.

تُظهر نتائج التوصيف أن البلاستيك الحيوي المُطوّر يتميز بتماسكٍ جيد، وقابليةٍ مُرضيةٍ للتحلل الحيوي، وثباتٍ كيميائي.

تؤكد هذه الدراسة إمكانات نفايات الأغذية الزراعية في إنتاج البلاستيك الحيوي المستدام، مما يُقلل من تلوث البلاستيك ويُعزز الاقتصاد الدائري.

الكلمات المفتاحية: البلاستيك الحيوي، نفايات الأغذية الزراعية، النشا، السليلوز، قابل للتحلل الحيوي، الاسترداد.

Table des matières

Résumé

Liste des tableaux

Liste des figures

CHAPITRE I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Valorisation des déchets alimentaires	3
I.1.1. Définition et classification des déchets alimentaires	3
I.1.2. Composition chimique des déchets exploitables pour produire les bioplastiques	4
I.1.3. Stratégies pour la valorisation des déchets alimentaires	11
I.2. Bioplastiques	13
I.2.1. Définition	13
I.2.2. Classification des bioplastiques	14
I.2.3. Avantages et inconvénients relatifs aux bioplastiques	16
I.2.4. Réglementations et normes associées aux bioplastiques	17
I.3. Techniques de fabrication des bioplastiques	20
I.3.1. Matières premières utilisées dans les bioplastiques	20
I.3.2. Procédés de transformation des bioplastiques	21
I.3.3. Facteurs Influant sur la Qualité des Bioplastiques	24
I.4. Les Tests sur les bioplastiques	28
I.4.1. Tests physico chimiques	28
I.4.2. Tests mécaniques	32
I.4.3. Tests de biodégradabilité	33

CHAPITRE II

MATERIEL ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Introduction	35
II.1. Matériel et méthodes utilisées	35
II.1.1. Matériel et, appareillages	35
II.1.2. Réactifs et produits chimiques	36
II.2. Origine et préparation des matières premières précurseuses	37
II.2.1. Origine des déchets alimentaires utilisés	37
II.2.2. Étapes de préparation des matières premières précurseuses	37
II.3. Méthodes d'extraction des matières premières précurseuses	37

II.3.1. Justification du choix des matières à extraire	37
II.3.2. Extraction de l'amidon à partir des déchets de blé	38
II.2.3. Extraction de la cellulose.....	39
II.4. Méthodes de caractérisation des bioplastiques	42
II.4.1. Analyses physico-chimiques.....	42
II.4.2. Analyse structurale par IRTF :.....	46
II.4.3. Test de biodégradabilité	46

CHAPITRE III

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Introduction	47
III.1. Résultats de rendement d'extraction des matières utilisées	47
III.1.1. Rendement d'extraction de l'amidon (à partir du blé)	47
III.2. Morphologie des bioplastiques formés.....	49
III.3. Résultats des caractéristiques physico-chimiques des bioplastiques	51
III.3.1. Résultats de taux d'absorption de l'eau.....	51
III. 3.2. Résultats de la résistance du bioplastique aux milieux acides et basiques.....	52
III.3.3. Résultats de taux d'humidité	56
III.3.4. Résultats de taux de solubilité	60
III.3.5. Taux de perméabilité	63
III.3.6. Caractérisation structurale par spectroscopie infrarouge (IRTF)	64
III.3.7 Test d'élasticité.....	74
III.3.7. Taux de biodégradation	75
Conclusion générale	77
references.....	Erreur ! Signet non défini.

Liste des tableaux

Tableau (I.1) : présente synthèse des principales normes et réglementations relatives aux bioplastiques	21
Tableau (I.2) : présente les principales propriétés des bioplastiques obtenues selon les matières premières utilisées pour leur élaboration.	22
Tableau II.1 : Présentation du matériel et appareillages	37
Tableau II.2 : présente Différents produits utilisés avec leurs propriétés	38
Tableau II. 3 : Comparaison des deux méthodes d'extraction de l'amidon	41
Le Tableau (III.1) présente les rendements d'extraction de l'amidon avec et sans agitation et de la cellulose	49
Tableau (III.2) : présente la Comparaison visuelle des deux types de bioplastiques	51
Tableau (III.3) : présente Les résultats relatifs aux taux d'absorption	53
Tableau II.4 : Résultats liés aux observations de l'immersion dans l'eau distillée (24 h) pour chaque type de bioplastique.	54
Tableau III.5 : Résultats du test de résistance chimique en milieu acide et basique (variations de masse du bioplastique solide)	55
Tableau III.6 : Observations et interprétations des résultats de bioplastique solide testé en milieu acide et basique	56
Tableau III.7 : Résultats du test de résistance chimique en milieu acide et basique (variations de masse du bioplastique sac d'emballage)	56
Tableau III.8 : Observations et interprétations des résultats de bioplastique sac d'emballage testé en milieu acide et basique	58
Tableau III.9 : Evolution de la masse de l'échantillon Type 1 pendant le séchage à 70 °C	58
Tableau III.10 : Evolution de la masse de l'échantillon Type 2 pendant le séchage à 70 °C.	59
Tableau III.11 : Evolution de la masse et le taux d'humidité	62
Tableau III.12: Evolution des masses au cours du temps pour chaque couple échantillon/solvant.	62
Tableau (III.13) : Présente le pourcentage de solubilité en fonction du temps pour chaque type d'échantillon et de solvant	63
Tableau (III.14) : présente l'interprétation des résultats de solubilité des bioplastiques dans différents solvants	65
Tableau (III.15) : Résultats du test de perméabilité à l'eau des échantillons	65
Tableau (III.16) : présente attribution des principales bandes observées sur le spectre IR pour l'amidon natif	66
Tableau (III.17) : représente analyse du spectre IR – Amidon sans agitation	67
Tableau (III.18) : présente la comparaison avec le spectre IR de l'amidon natif	68
Tableau (III.19) : Analyse du spectre IR – Amidon avec agitation	69
Tableau (III.20) : présente la comparaison avec le spectre IR de l'amidon natif et sans agitation	70
Tableau (III.21) : présente l'analyse des bandes FTIR de la cellulose standard	72
Tableau (III.22) : Attribution des principales bandes observées dans les spectres	73
Tableau (III.23) : présente analyse comparative des spectres FTIR	74

Tableau (III.24): présente l'analyse des bandes FTIR de la bioplastique sac	74
Tableau (III.25) : présente les bandes FTIR de bioplastique solide	75
Tableau (III.26) : présente Les résultats du test avec l'interprétation du test d'élasticité de bioplastique type sac d'emballage	76
Tableau (III.27) : présente l'évolution de la masse (g)	76
Tableau (III.28) : présente le pourcentage de dégradation	77

Liste des figures

Figure I.1 : Définitions des catégories de bioplastiques	18
FigI.2 : Classification des bioplastiques	19
FigI.3 : Schéma de la méthode de traitement par moulage par compression	26
FigI.4 : Schéma de la méthode de traitement par moulage par injection	28
Figure III.1 : Photographies montrant les bioplastiques préparés a) : bioplastique type 1 « sac d’emballage » ; b) : bioplastique type 1 « solide »	53
Figure III..2) : Photos montrant les différents types de bioplastique avant et après le test d’absorption	55
Figure III.3 : Photos montrant l’état visuel de bioplastique solide avant et après le traitement chimique dans le milieu acide et basique	57
Figure III.4 : Photos montrant l’état visuel de bioplastique type sac d’emballage avant et après le traitement chimique dans le milieu acide et basique	59
Figure III.5 : Graphe d’évolution de la masse de l’échantillon Type 1 pendant le séchage à 70 °C en fonction du temps	61
Figure III.6 : Graphe d’évolution de la masse du bioplastique Type 2 au cours du séchage à 70°C en fonction du temps.	62
Figure III.7 : Photos montrant l’état visuel de bioplastique type sac d’emballage et solide avant et après le test de séchage.	63
Figure (III.8) : graph présente la variation de la masse bioplastique sac en fonction de temp	66
Figure (III. 9) : graph présente la variation de la masse bioplastique solide en fonction de temp	67
La Figure (III.10) : représente les résultats de spectroscopie infrarouge d'amidon natif	68
La Figure (III.11) : représente les résultats de spectroscopie infrarouge d'amidon extrait sans agitation	69
La Figure (III.13) : représente les résultats de spectroscopie infrarouge d'amidon extrait avec agitation	71
Figure (III.14) : les bandes de la cellulose standard	73
Figure (III.15) : présente des bandes de la cellulose extraite de l’arachide	74
Figure (III.16) : présente les bandes de bioplastique sac	76
Figure (III.17) :présence les bandes de bioplastique solide	76
Figure (III.18) : photos montrant l’état visuel de bioplastique type sac d’emballage avant et après le test d’élasticité	77

INTRODUCTION GENERALE

L'environnement constitue une ressource vitale pour l'humanité, mais il est malheureusement mis en péril par de nombreuses activités humaines. Parmi les principales menaces environnementales, la gestion inadéquate des déchets représente un enjeu de taille, notamment les déchets plastiques non biodégradables qui s'accumulent dans la nature. Face à cette problématique, il est impératif de développer des solutions durables qui visent à réduire l'impact environnemental de nos modes de consommation.

Les déchets alimentaires, souvent perçus comme de simples rebuts, recèlent pourtant un fort potentiel de valorisation. Ils contiennent des composants organiques tels que l'amidon, la cellulose, la lignine ou encore les protéines, qui peuvent être exploités pour la fabrication de matériaux biodégradables, notamment les bioplastiques. Cette approche, à la croisée de l'innovation et du développement durable, permet non seulement de réduire la quantité de déchets envoyés en décharge, mais aussi de proposer des alternatives écologiques aux plastiques conventionnels issus de ressources fossiles.

Dans ce contexte, la valorisation des déchets alimentaires pour la production de bioplastiques représente une stratégie prometteuse. Elle s'inscrit pleinement dans une logique d'économie circulaire où les résidus deviennent des ressources. L'objectif de ce travail de recherche est donc de développer une nouvelle classe de bioplastiques à partir de résidus agroalimentaires disponibles localement, en mettant en œuvre des procédés simples, économiques et respectueux de l'environnement.

Notre étude s'est ainsi portée sur l'élaboration de matériaux bioplastiques à base d'amidon extrait de résidus de blé et de cellulose issue de coques d'arachide, deux déchets largement disponibles. Ces matières premières ont été préparées, caractérisées, puis transformées en bioplastiques par différentes méthodes de mise en forme. L'ensemble du travail a été réalisé au sein du laboratoire « Eau, Environnement et Développement Durable » de l'Université de Blida 1.

Le présent mémoire s'articule autour de trois chapitres. Le premier est consacré à une synthèse bibliographique portant sur la valorisation des déchets alimentaires et la fabrication de bioplastiques. Le second décrit les matériaux, les méthodes expérimentales et les techniques de caractérisation utilisées. Le troisième chapitre présente et discute les résultats obtenus.

Ce travail vise à démontrer la faisabilité d'une valorisation locale et durable des déchets alimentaires en bioplastiques fonctionnels, en contribuant ainsi à la réduction de l'empreinte écologique des déchets tout en apportant des alternatives innovantes et biodégradables aux matériaux plastiques classiques.

CHAPITRE I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Valorisation des déchets alimentaires

I.1.1. Définition et classification des déchets alimentaires

Les déchets alimentaires, aussi appelés biodéchets ou déchets de cuisine, sont des déchets organiques d'origine végétale ou animale issus principalement des ménages, des industries agroalimentaires, des établissements de restauration, des marchés, des cantines, etc. Ils comprennent les restes de repas crus ou cuits, les épluchures, les denrées périmées non emballées, les os, les arêtes de poisson, ainsi que les produits alimentaires avariés ou en excès.

Ces déchets font partie de la famille des biodéchets, qui inclut également les déchets verts (tonte, taille, branchages), mais les déchets alimentaires présentent des contraintes sanitaires plus importantes, notamment en raison de leur origine animale, et contiennent d'avantage d'eau.

On distingue plusieurs catégories de déchets alimentaires selon leur nature et leur évitabilité :

- **Déchets inévitables** : parties non comestibles des aliments, comme les os, les coquilles d'œufs, les épluchures de certains fruits (banane, ananas), etc.

- **Déchets potentiellement évitables** : parties que certaines personnes consomment et d'autres non, ou qui pourraient être consommées si préparées différemment (croûtes de pain ou de fromage, pelures de pommes de terre, fanes de légumes).

- **Déchets évitables** : aliments encore comestibles jetés, comme les restes de repas, les produits frais proches de leur date limite de consommation, pain rassis, etc [1]

En résumé, les déchets alimentaires sont les résidus organiques issus de la préparation, la consommation et la distribution des aliments, comprenant les restes comestibles ou non, qui peuvent être valorisés pour réduire leur impact environnemental.

I.1.2. Composition chimique des déchets exploitables pour produire les bioplastiques

a) Déchets agricoles

Les déchets agricoles représentent une source importante et facilement disponible de biomasse pour la production de bioplastiques, ce qui permet de limiter la concurrence avec les cultures alimentaires.

b) Déchets de maïs (tiges et enveloppes)

La large fourchette de composition chimique rapportée pour les tiges de maïs met en évidence la variabilité selon des facteurs tels que la variété de maïs, le stade de croissance et les conditions environnementales. Cette variabilité rend nécessaire une caractérisation approfondie du flux spécifique de déchets de maïs utilisé afin d'optimiser les processus d'extraction et de conversion pour la production de bioplastiques. La normalisation de la source et des méthodes de prétraitement pourrait conduire à des résultats plus cohérents. De plus, la teneur relativement élevée en hémicellulose des déchets de maïs, par rapport aux sources de cellulose pure, présente à la fois des opportunités et des défis. L'hémicellulose peut être une source précieuse de sucres pour la fermentation, mais sa structure complexe peut nécessiter des méthodes de prétraitement spécifiques pour une utilisation efficace. L'hémicellulose est un polysaccharide hétérogène, et sa décomposition efficace en sucres fermentescibles nécessite souvent une hydrolyse enzymatique ou chimique. Le développement de méthodes rentables et respectueuses de l'environnement pour cette étape est crucial pour assurer la viabilité économique des bioplastiques à base de déchets de maïs [2].

Les tiges de maïs sont composées principalement de cellulose (32-50%), d'hémicellulose (20,42-42 %) et de lignine (5-38,12 %), avec des quantités variables de cendres (2,43-24,9 %) et d'humidité (3,32-10,82 %) [3] Ces composants, en particulier la cellulose et l'hémicellulose, peuvent être extraits et chimiquement modifiés ou utilisés comme matière première pour la fermentation microbienne afin de produire des bioplastiques.[4]

La lignine issue des déchets de maïs peut également être explorée pour des applications de bioplastiques, améliorant potentiellement des propriétés telles que la résistance aux UV.[5]

c) Bagasse de canne à sucre

La bagasse de canne à sucre se distingue comme une matière première polyvalente grâce à sa teneur significative en trois principaux composants lignocellulosiques : la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Cela permet la production d'une large gamme de bioplastiques par diverses méthodes de transformation. La présence de cellulose permet la production de bioplastiques à base de cellulose, tandis que l'hémicellulose peut être une source de sucres pour la fermentation en biopolymères tels que les PHA. De plus, le composant lignine offre des opportunités pour créer des bioplastiques aux propriétés uniques ou pour une utilisation comme charge ou agent de renforcement dans d'autres matrices bioplastiques. Cette polyvalence fait de la bagasse de canne à sucre une option très intéressante pour une approche de bioraffinerie. Les méthodes de prétraitement sont cruciales pour rendre la cellulose plus accessible au sein de la structure de la bagasse de canne à sucre en éliminant la lignine et l'hémicellulose. L'efficacité de ces prétraitements a un impact significatif sur le rendement et la qualité de la cellulose extraite. La lignine agit comme une barrière physique, entravant l'extraction de la cellulose. Un prétraitement efficace, comme un traitement alcalin ou un blanchiment, peut perturber la structure lignocellulosique, entraînant un rendement plus élevé de cellulose plus purifiée. Le choix de la méthode de prétraitement doit tenir compte de facteurs tels que la rentabilité, l'impact environnemental et les propriétés souhaitées du bioplastique final.[6] La bagasse de canne à sucre est principalement composée de cellulose (26-50 %), d'hémicellulose (19-35 %) et de lignine (14-33 %), ainsi que de plus petites quantités de cendres (1-5 %) et d'extractifs (5,63 %).

La forte teneur en cellulose fait de la bagasse une matière première précieuse pour la production de bioplastiques à base de cellulose, y compris l'acétate de cellulose.[6]

La bagasse de canne à sucre peut également être utilisée comme matière première pour la production microbienne de biopolymères tels que les polyhydroxyalcanoates (PHA).

La lignine issue de la bagasse de canne à sucre peut être utilisée pour améliorer les propriétés d'autres bioplastiques ou comme matériau bioplastique autonome[6]

c) Déchets de éplucheurs de pommes de terre

Les déchets d'éplucheurs de pommes de terre constituent une matière première particulièrement intéressante en raison de leur forte teneur en amidon, qui peut être facilement extrait et transformé en amidon thermoplastique (TPS), un type de bioplastique largement utilisé. Cette conversion directe des déchets en un biopolymère précieux simplifie le processus de production. L'amidon est un polymère naturel composé d'unités de glucose, ce qui le rend intrinsèquement biodégradable et un matériau de départ approprié pour les bioplastiques. L'abondance d'amidon dans les peaux de pommes de terre, un sous-produit important de l'industrie de transformation alimentaire, offre une alternative durable et rentable à l'utilisation de sources d'amidon natif telles que le maïs ou la canne à sucre. La présence d'autres composés précieux dans les éplucheurs de pommes de terre, tels que les acides phénoliques et les fibres alimentaires, suggère le potentiel d'une approche de bioraffinerie où plusieurs produits à haute valeur ajoutée, y compris les bioplastiques et les nutraceutiques, peuvent être extraits du même flux de déchets. Cette approche intégrée peut améliorer la viabilité économique globale et la durabilité de l'utilisation des déchets de peaux de pommes de terre. L'extraction de composés bioactifs avant ou en même temps que la production de bioplastiques peut maximiser la valeur ajoutée à cette ressource et réduire l'impact environnemental de son élimination. [6]

Les éplucheurs de pommes de terre sont riches en glucides (8,7-68,71 %), principalement en amidon (7,8-52 %), ainsi qu'en protéines (1,2-18 %), en lignine (10-20 %), en lipides (0,1-1 %), en cendres (0,9-9,64 %) et en divers composés bioactifs tels que les acides phénoliques et les glycoalcaloïdes. [7]

La forte teneur en amidon fait des peaux de pommes de terre une excellente source pour la production de bioplastiques à base d'amidon, qui peuvent être modifiés pour diverses applications. [7]

La cellulose extraite des peaux de pommes de terre peut également être utilisée dans la production de bioplastiques, améliorant potentiellement les propriétés mécaniques. [7]

d) Déchets alimentaires

Les déchets alimentaires, un contributeur important aux décharges, peuvent être valorisés en matériaux bioplastiques précieux.

- déchets alimentaires riches en amidon

La polyvalence de l'amidon en tant que précurseur de bioplastique est évidente dans sa capacité à être extrait d'une grande variété de déchets alimentaires. Cela met en évidence le potentiel d'une production locale de bioplastiques utilisant des ressources de déchets locales disponibles régionalement. L'amidon est un composant courant de nombreux produits alimentaires et de leurs déchets. Le fait qu'il puisse provenir de pommes de terre, de maïs, de manioc, de riz, de blé et d'autres sources signifie que différentes régions peuvent potentiellement utiliser leurs déchets alimentaires les plus abondants pour la production de bioplastiques, réduisant ainsi les coûts de transport et favorisant les économies locales. La transformation de l'amidon en bioplastiques nécessite souvent une modification, telle que la gélatinisation et l'ajout de plastifiants comme le glycérol, afin de surmonter sa fragilité inhérente et d'améliorer sa flexibilité. Les granules d'amidon natif sont semi-cristallins et difficiles à transformer en films flexibles ou autres formes. La gélatinisation, qui consiste à chauffer l'amidon dans l'eau afin de perturber sa structure cristalline, et l'ajout de plastifiants, qui réduisent les forces intermoléculaires, sont des étapes cruciales dans la transformation de l'amidon en un matériau thermoplastique plus malléable.[4]

L'amidon est un polymère de glucose, existant sous forme d'amylose linéaire et d'amylopectine ramifiée, dont le rapport influence les propriétés du bioplastique. [7]

Les déchets de blé, qu'il s'agisse de sous-produits de la transformation du grain ou de blé non alimentaire, représentent une source d'amidon prometteuse pour la production de bioplastiques. L'amidon de blé est un polymère de glucose, tout comme l'amidon d'autres sources, et peut être transformé en bioplastiques biodégradables. L'amidon est le glucide principal présent dans le grain de blé. La paille de blé, bien que lignocellulosique, contient également des sucres qui peuvent être valorisés. L'amidon de blé, comme d'autres amidons, est composé d'amylose linéaire et d'amylopectine ramifiée, dont le ratio influence les propriétés du bioplastique final. L'amidon de blé peut être utilisé pour produire des bioplastiques à base d'amidon, tels que l'amidon thermoplastique (TPS) ou pour la production d'acide polylactique (PLA) via fermentation. L'amidon de blé peut être plastifié avec des agents comme le glycérol pour améliorer sa flexibilité et sa transformabilité, permettant sa mise en forme par extrusion ou moulage par injection. Les sucres dérivés de l'amidon de blé peuvent être fermentés pour

produire de l'acide lactique, qui est ensuite polymérisé en PLA. L'utilisation des déchets de blé comme source d'amidon contribue à réduire la concurrence avec les cultures alimentaires et à valoriser des sous-produits agricoles abondants. Cependant, la variabilité de la composition des déchets et la nécessité de processus d'extraction et de purification efficaces constituent des défis à surmonter pour une production à grande échelle. [8]

Les méthodes d'extraction comprennent le broyage, le lavage, la filtration et le séchage pour obtenir de la poudre d'amidon. [7]

- Déchets d'huile végétale

L'utilisation d'huiles de cuisson usagées pour la production de bioplastiques offre un double avantage environnemental en réduisant à la fois les déchets plastiques et la pollution causée par l'élimination inappropriée des huiles usagées.

En effet, si elles ne sont pas correctement gérées, les huiles de cuisson usagées peuvent contaminer les sources d'eau et le sol.

Leur conversion en bioplastiques fournit non seulement une matière première durable, mais contribue également à réduire ce risque environnemental et à préserver la propreté de l'environnement.

La nature lipidique des huiles végétales permet la production de bioplastiques aux propriétés différentes de celles à base d'amidon ou de cellulose, conduisant potentiellement à des matériaux avec une flexibilité et une durabilité améliorée.

La structure chimique des lipides est différente de celle des glucides, et les bioplastiques qui en sont dérivés, tels que les PHA et les polyuréthanes biosourcés, peuvent présenter des caractéristiques uniques. Les PHA, par exemple, sont connus pour leur biodégradabilité et leur biocompatibilité, ce qui les rend adaptés aux applications médicales. [7]

Les huiles de cuisson usagées, composées de triglycérides (esters de glycérol et d'acides gras), peuvent être utilisées pour produire des bioplastiques.

Les micro-organismes peuvent consommer ces huiles pour produire des polyhydroxyalcanoates (PHA), un type de bioplastique biodégradable.

Huiles végétales usagées peuvent également être chimiquement modifiées pour créer des polyuréthanes biosourcés et des précurseurs de polyester [7]

- Cellulose issue des déchets agricoles

La cellulose, qui est un polysaccharide linéaire composé d'unités de glucose, est un composant majeur de nombreux déchets agricoles et alimentaires. Son extraction nécessite généralement des prétraitements (par exemple, alcalins, acides) pour éliminer la lignine et l'hémicellulose, suivis d'un blanchiment pour obtenir de la cellulose purifiée. La composition chimique de la cellulose extraite est principalement constituée de longues chaînes d'unités D-glucose liées par des liaisons β (1 $\rightarrow$ 4) avec de nombreux groupes hydroxyle. [9]

L'extraction de cellulose de haute pureté à partir de déchets nécessite une optimisation minutieuse des processus de prétraitement et de purification afin d'éliminer efficacement les composants non cellulosiques sans dégrader la cellulose elle-même. La présence de lignine et d'hémicellulose peut entraver la transformabilité et affecter les propriétés des bioplastiques à base de cellulose. L'élimination efficace de ces composants est essentielle pour obtenir de la cellulose avec la pureté et le poids moléculaire souhaités pour des applications spécifiques. L'abondance de groupes hydroxyle dans la cellulose la rend apte à la modification chimique, telle que l'acétylation, pour produire des dérivés de cellulose aux propriétés améliorées comme la thermoplasticité et la solubilité dans les solvants organiques. La cellulose native possède de fortes liaisons hydrogène intermoléculaires, la rendant insoluble dans la plupart des solvants courants et difficile à transformer à l'état fondu. La dérivation par remplacement de certains groupes hydroxyle par d'autres groupes fonctionnels peut perturber ces liaisons hydrogène, conduisant à des matériaux comme l'acétate de cellulose qui sont plus facilement transformés en bioplastiques. [9]

Coquilles d'arachides : Les coquilles d'arachides (ou coques d'arachides) constituent une source durable et abordable de cellulose, avec une composition typique de 37,0 % de cellulose, 28,8 % de lignine et 2,5 % d'autres glucides. Elles contiennent également de l'hémicellulose et peuvent être utilisées comme liant dans les bio composites. La cellulose et la lignine sont concentrées dans différentes parties de la coque, ce qui peut influencer l'épaisseur et les performances mécaniques du matériau final. [10]

- **Pelures d'orange :** Les pelures d'orange, un sous-produit abondant de l'industrie du jus, contiennent environ 14,2 % de cellulose, 0,2 % d'hémicellulose et 1,0 % de lignine. La

cellulose extraite des pelures d'orange peut être convertie en nanocristaux de cellulose (CNC) avec une cristallinité élevée (environ 61,93 %). Ces CNC peuvent être utilisés comme agents de renforcement dans les films nano composites, ce qui permet d'améliorer leur résistance à la traction, leur résistance à la barrière à la lumière et à la vapeur d'eau, tout en réduisant leur solubilité dans l'eau. Des bioplastiques avec une excellente résistance, flexibilité et capacité de désintégration ont été produits à partir de pelures d'orange en utilisant du glycérol comme plastifiant. [11]

- **Pseudotrunc de bananier** : Le pseudotrunc de bananier est un résidu majeur de la production de bananes, riche en composés lignocellulosiques, ce qui en fait une matière première intéressante pour l'extraction de la cellulose. La teneur moyenne en cellulose dans le pseudotrunc de bananier est d'environ 49,33 %. Les fibres cellulosiques de haute qualité extraites du pseudotrunc de bananier peuvent présenter une excellente stabilité thermique, avec une température de dégradation initiale d'environ 300,53 °C [12]

b) Les Déchets de Lignine

La lignine est un biopolymère amorphe complexe, tridimensionnel, composé d'unités phénylpropane, conférant de la rigidité aux parois cellulaires des plantes. C'est le deuxième polymère naturel le plus abondant après la cellulose et un sous-produit important des industries des pâtes et du papiers et des biocarburants. La lignine peut être incorporée dans diverses matrices polymères pour améliorer les propriétés mécaniques, la résistance aux UV et la biodégradabilité. Les méthodes d'extraction de la lignine comprennent le procédé Kraft, le procédé au sulfite, le procédé à la soude, le procédé organosolv et l'explosion à la vapeur. [13]

La structure complexe et variable de la lignine, dépendant de la source végétale et de la méthode d'extraction, représente un défi pour son utilisation cohérente dans les bioplastiques, mais offre également la possibilité d'adapter ses propriétés par modification. L'hétérogénéité de la lignine, avec ses différents types de liaisons et de groupes fonctionnels, rend difficile sa dépolymérisation et sa transformation uniforme. Cependant, cette diversité structurale permet également des modifications chimiques pour améliorer sa réactivité, sa solubilité et sa compatibilité avec d'autres polymères, conduisant à des bioplastiques aux caractéristiques

spécifiques souhaitées. Malgré son abondance, une partie importante des déchets de lignine est actuellement brûlée pour la récupération d'énergie ou traitée comme un sous-produit de faible valeur. Le développement de méthodes efficaces et rentables pour convertir la lignine en bioplastiques représente une opportunité majeure de valoriser cette ressource sous-utilisée. La transformation des déchets de lignine en bioplastiques possédant des aux propriétés comparables ou supérieures à celles des plastiques conventionnels peut améliorer considérablement l'économie et la durabilité des bioraffineries et contribuer au développement d'une bioéconomie circulaire[13]

I.1.3. Stratégies pour la valorisation des déchets alimentaires

a) Fermentation aérobie pour la production de bioplastiques

Les déchets agroalimentaires peuvent être transformés en une solution d'acides gras volatils (AGV) qui peut ensuite être utilisée pour produire des polyhydroxyalcanoates (PHA), des biopolymères aux propriétés similaires à celles des plastiques conventionnels. L'acide lactique, un précurseur du PLA (acide poly lactique) biodégradable, peut également être produit par fermentation à partir de lactosérum. Le PBS (poly butylène succinate), un autre biopolymère biodégradable, peut également être dérivé de déchets agricoles. [14]

• Production directe de bioplastiques

Certains déchets alimentaires, comme les tiges de persil et d'épinards, les coques de cacao et les balles de riz, peuvent être directement transformés en bioplastiques cellulosiques amorphes par digestion dans de l'acide trifluoroacétique (TFA), moulage et évaporation. [15]

• Utilisation des huiles de cuisson usagées

Les huiles de cuisson usagées peuvent être transformées par biocatalyse en bioplastiques durables. Elles peuvent également être utilisées par des bactéries pour produire des polyhydroxyalcanoates (PHA). La transestérification des huiles de cuisson usagées peut produire du biodiesel et du glycérol, ce dernier pouvant être utilisé dans la formulation de bioplastiques.[16]

- **Extraction de composants de valeur**

Les déchets alimentaires contiennent des nutriments de haute valeur qui peuvent être extraits pour la production de bioplastiques par fermentation microbienne et traitements chimiques. Par exemple, la chitine présente dans les coquilles de crustacés peut être transformée en chitosane, un biopolymère. [17]

- **Production de bio-PE :**

Les déchets agricoles comme la canne à sucre peuvent être utilisés pour produire du bio-PE, un bioplastique aux propriétés similaires au PE d'origine pétrochimique. [17]

- **Production de polyhydroxyalcanoates (PHA) :**

Les PHA, des bioplastiques biodégradables, peuvent être produits par fermentation microbienne de divers déchets alimentaires, y compris les déchets riches en amidon et les huiles végétales usagées. [18]

I.2. Bioplastiques

I.2.1. Définition

Selon la revue Sciences et Avenir, le terme « bioplastique » est "un néologisme formé de toutes pièces par les industriels et qui recouvre des plastiques à la composition et à l'intérêt écologique très variables". Les bioplastiques sont des plastiques issus exclusivement de la polymérisation de biopolymères.

La chambre régionale du commerce et de l'industrie de Champagne-Ardenne indique le néologisme « bioplastique » ne correspond pas à une définition précise. Le même constat a été fait par la revue Sciences et Avenir, l'emploi du terme dans des ouvrages scientifiques réfère aux biopolymères qui sont souvent biodégradables ou du moins aptes à subir un processus de décomposition et qu'ils sont issus soit de la pétrochimie (polymères de synthèse ou associés à des composés naturels comme extrait de végétaux traités),[19]soit totalement dérivés de ressources renouvelables qui sont naturellement présentes dans les organismes vivants [7]

L'ambiguïté du terme « bioplastique » vient donc du fait qu'il ne garantit ni qu'il soit biosourcé (encore moins issu d'une agriculture biologique), ni qu'il soit biodégradable. Par ailleurs, un plastique biosourcé peut être appelé « bioplastique » s'il est composé à 30% en masse de biomasse. Autrement dit, un plastique composé à 70% de pétrole est considéré comme un « bioplastique ».

En effet, aucun seuil européen n'existe pour définir une quantité minimale de matières biosourcées dans le produit.

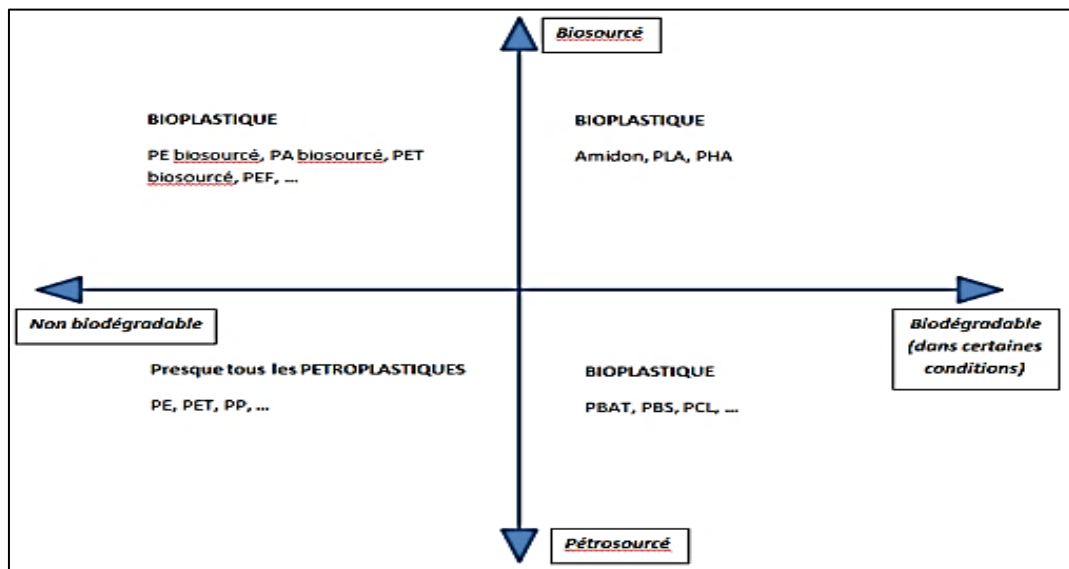


Figure I.1 : Définitions des catégories de bioplastiques

I.2.2. Classification des bioplastiques

Les bioplastiques peuvent être classés selon leur composition chimique, leurs méthodes de synthèse, leur procédé de fabrication, leur importance économique ou leurs applications

a) Bioplastiques naturels issus directement de la biomasse

Les bioplastiques naturels issus directement de la biomasse constituent les parois cellulaires des végétaux comme la cellulose et la lignine. On peut citer le cas de l'amidon.

Ces polymères sont extraits directement à partir des plantes. Des monomères simples peuvent être également obtenus à partir des plantes après transformations chimiques et /ou enzymatiques par polymérisation de ces monomères [20]

b) Bioplastiques issus des microorganismes par fermentation microbienne

Ce groupe de bioplastiques est constitué de la famille des polyhydroxyalcanoates {PHA} dont le poly hydroxybutyrate {PHB} et le poly hydroxybutyrate-valérate {PHBV} qui sont les plus courants. Ces polyester proviennent du mécanisme de survie de certains microorganismes qui les conservent et les accumulent comme source d'énergie et de carbone [21]

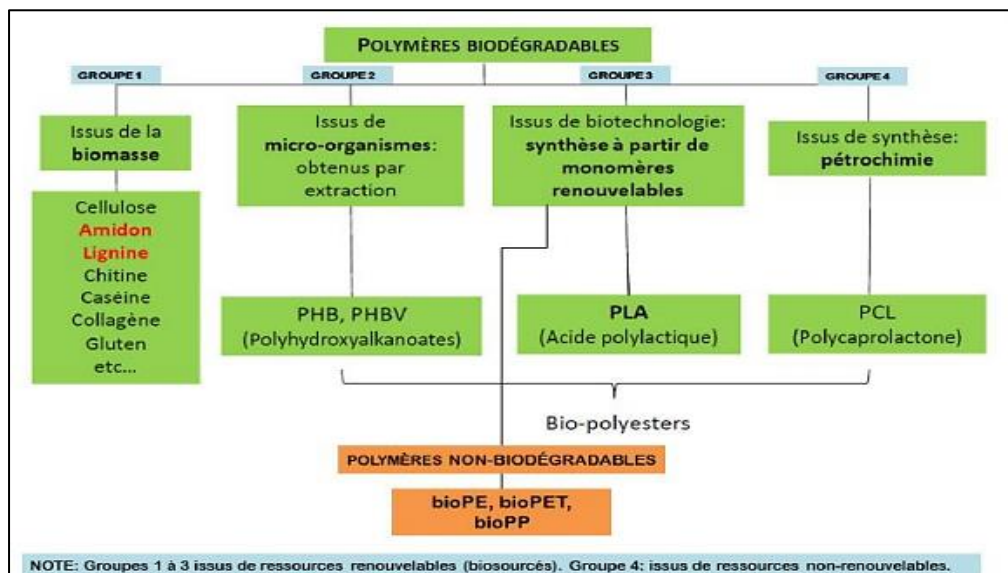
c) Bioplastiques obtenus par synthèse à partir de monomères renouvelables

Ces biopolymères sont transformés par synthèse chimique à partir des monomères issus de matières premières agricoles. On les appelle également bio polyesters car ils ont de nombreuses caractéristiques communes avec les polyesters courants. [22]

Le principal groupe de bio polyesters inclut les polyacides {PLA}. Ils sont produits par synthèse chimique à partir de l'acide lactique qui est extrait de produits agricoles ou bien de déchets de l'industrie alimentaire. [23]

d) Bioplastiques pétrochimiques biodégradables

De nombreux bioplastiques biodégradables peuvent être obtenus à partir de ressources fossiles. Les premiers développements de ces matériaux datent du début des années 70. Il s'agissait de développer des polymères combinant les bonnes propriétés d'usages des polymères conventionnels et la propriété d'être dégradés par les microorganismes [40].



FigI.2 : Classification des bioplastiques

I.2.3. Avantages et inconvénients relatifs aux bioplastiques

a) Avantages

Les bioplastiques présentent plusieurs avantages, parmi eux on les suivants : [24]

- Ils sont renouvelables, compostables et contribuent à réduire la pollution de l'environnement.
- Réduction de l'empreinte carbone.
- Ils génèrent moins d'émissions de gaz à effet de serre et ne contiennent pas de toxines.
- Les bioplastiques tels que le polyéthylène téréphtalate biosourcé (bio-PET) sont similaires aux plastiques à base de fossiles et peuvent être recyclés de la même manière que les plastiques classiques.
- Les bioplastiques biosourcés une fois arrivés en fin de vie et en l'absence de recyclage, peuvent être brûlés pour produire de l'énergie renouvelable et/ou être utilisés pour fabriquer des biocarburants.

b) Inconvénients

• Problèmes de recyclage

Par exemple, en travaillant avec les rayons infrarouges en système de séparation des déchets, les bioplastiques ne peuvent être séparés, d'où ils seront contaminés en présence des matières plastiques conventionnelles.

• Réduction des matières premières

Les bioplastiques produit à partir de sources renouvelables pourraient réduire les réserves de matières premières. En outre afin de réduire la consommation d'énergie lors de la production de bioplastiques et de limiter la concurrence potentielle avec les ressources agricoles pour les aliments et de fournir des sources supplémentaires de matières premières, l'exploitation des sous-produits alimentaires est également la tendance actuelle. [24]

I.2.4. Réglementations et normes associées aux bioplastiques

• NF EN 13432 (compostage industriel)

Cette norme européenne établit les exigences pour les emballages pouvant être valorisés par compostage industriel. Elle impose plusieurs critères :

- Composition : limites sur les solides volatils, les métaux lourds et le fluor.
- Désintégration : au moins 90 % du matériau doit passer à travers un tamis de 2 mm en moins de 12 semaines.
- Biodégradabilité : au moins 90 % de conversion en CO₂, eau et minéraux en moins de 6 mois.
- Écotoxicité : le compost final ne doit présenter aucun effet toxique pour l'environnement. [25]

Cette norme est principalement utilisée comme référence pour les emballages compostables en plateforme industrielle

• NF T 51-800 (compostage domestique)

Spécifique au compostage domestique, cette norme s'adresse aux plastiques pouvant se biodégrader à domicile. Les critères sont les suivants :

- Conditions de compostage : température comprise entre 20 et 30°C, cycle de compostage plus long.
- Biodégradabilité : au moins 90 % de transformation en CO₂, eau et minéraux en moins de 12 mois.
- Désintégration : 90 % du matériau doivent passer à travers un tamis de 2 mm en moins de 6 mois.

• CEN/TR 15932

Il s'agit d'un rapport technique qui propose une terminologie harmonisée autour des bioplastiques. [22]

- Objectif : clarifier les concepts comme « bioplastique », « biodégradable » et « compostable ».

- **ISO 17088**

Cette norme internationale définit les exigences pour les plastiques récupérables par compostage aérobie.

- Critères : biodégradabilité, désintégration, innocuité du compost final, et préservation de la qualité du compost. [22]

- **Loi AGEC (France)**

Cette loi vise à réduire les déchets et à lutter contre le gaspillage.

- Mesures : depuis juillet 2021, restriction ou interdiction de certains bioplastiques à usage unique (sacs, pailles, vaisselle jetable), sauf exceptions pour certains produits alimentaires solides. [26]

- Marquage : obligation d'un logo spécifique pour certains produits comme les gobelets à revêtement PLA.

- **Directives européennes**

Elles encadrent l'usage des plastiques à usage unique et favorisent des alternatives réutilisables. [27]

- Application : limitation des bioplastiques non compostables ou non réutilisables.

- **ASTM D6400**

Norme américaine précisant les conditions pour les plastiques compostables.

- Désintégration : moins de 10 % du matériau doit rester sur un tamis de 2 mm après 12 semaines.

- Biodégradabilité : 90 % de conversion en CO₂, eau et biomasse en moins de 180 jours.

- Sécurité : absence d'impact sur la croissance des plantes et limites sur les métaux lourds.²⁸

- **ASTM D6866**

Cette norme permet de déterminer la part de carbone biosourcé dans un matériau. [29]

- Utilisation : elle aide à différencier les matériaux d'origine fossile de ceux issus de la biomasse.

Tableau (I.1) : présente synthèse des principales normes et réglementations relatives aux bioplastiques

Norme/Réglementation	Champ d'application	Critères principaux
NF EN 13432	Compostage industriel	90 % biodégradation en 6 mois, désintégration, écotoxicité
NF T 51-800	Compostage domestique	90 % biodégradation en 12 mois, désintégration, écotoxicité
CEN/TR 15932	Terminologie bioplastiques	Définition, caractérisation
ISO 17088	Compostage aérobie	Identification, étiquetage, qualité du compost
ASTM D6400	Compostage (international)	Désintégration, biodégradabilité, sécurité
ASTM D6866	Biosourcé	Mesure du carbone biosourcé

I.3. Techniques de fabrication des bioplastiques

I.3.1. Matières premières utilisées dans les bioplastiques

Les bioplastiques sont généralement composés d'un biopolymère (qui forme la matrice plastique), d'un plastifiant, et parfois d'additifs.

Des additifs, comme les fibres (cellulosiques, les plus fiables), les nanoclays et nanoparticules ou les agents de réticulation (comme l'acide citrique), sont ajoutés pour améliorer les propriétés mécaniques. Il est crucial que ces additifs soient aussi biodégradables que la matrice.[30]

Les plastifiants (comme l'eau, bien que limitant les propriétés mécaniques, ou des polyols et oligosaccharides) sont essentiels pour améliorer la transformation des bioplastiques en augmentant leur flexibilité et en réduisant leur viscosité.

Tableau (I.2) : présente les principales propriétés des bioplastiques obtenues selon les matières premières utilisées pour leur élaboration. [31]

Type de Matière Première	Caractéristiques Intrinsèques Clés	Polymère Résultant Typique	Défis Qualitatifs Courants	Opportunités Clés d'Amélioration de la Qualité
Amidon	Rapport amylose/amylopectine, taille/morphologie des granules, pureté	TPS	Sensibilité à l'humidité, propriétés mécaniques faibles, rétrogradation	Sélection de la source, modification (oxydation, HMT), plastification, renforcement, mélange
Cellulose	Teneur en lignine/hémicellulose, pureté, structure cristalline	Esters de cellulose, NCC/CNF composites	Hydrophilie, dispersion des nanocelluloses, compatibilité avec matrices hydrophobes	Prétraitement, délignification contrôlée, extraction/fonctionnalisation de nanocellulose, mélange

Acide Lactique (source)	Pureté des stéréoisomères (L, D, méso-lactide)	PLA	Fragilité, faible résistance thermique (si amorphe), cinétique de cristallisation lente	Contrôle stéréochimique, catalyseurs de polymérisation, nucléation, plastification, renforcement, mélange
Matière première PHA	Type de substrat (sucres, lipides, déchets), pureté du substrat	PHA (PHB, PHBV, MCL-PHA)	Fragilité (PHB), coût de production, variabilité des propriétés	Ingénierie génétique des souches, optimisation de la fermentation, copolymérisation, plastification, mélange, renforcement
Lignine	Source, méthode d'extraction, groupes fonctionnels, MW	Composites à base de lignine	Hétérogénéité, faible compatibilité avec d'autres polymères, faible transformabilité à l'état fondu	Extraction sélective, modification chimique (estérification, acétylation), fonctionnalisation, utilisation comme additif fonctionnel (UV, antioxydant)
Huiles Végétales	Composition en acides gras, pureté	Monomères/polymères fonctionnalisés, plastifiants	Stabilité thermique, propriétés mécaniques parfois limitées des polymères purs	Fonctionnalisation chimique (époxydation, acrylation), copolymérisation, utilisation comme plastifiants réactifs ou bio-sourcés
Sucres	Pureté, source (1ère, 2ème génération)	Précurseurs pour PLA, PHA	Concurrence avec l'alimentation (1ère génération.), coût de conversion de la biomasse (2ème génération.)	Fermentation optimisée, utilisation de déchets sucrés, ingénierie métabolique pour une conversion efficace en monomères

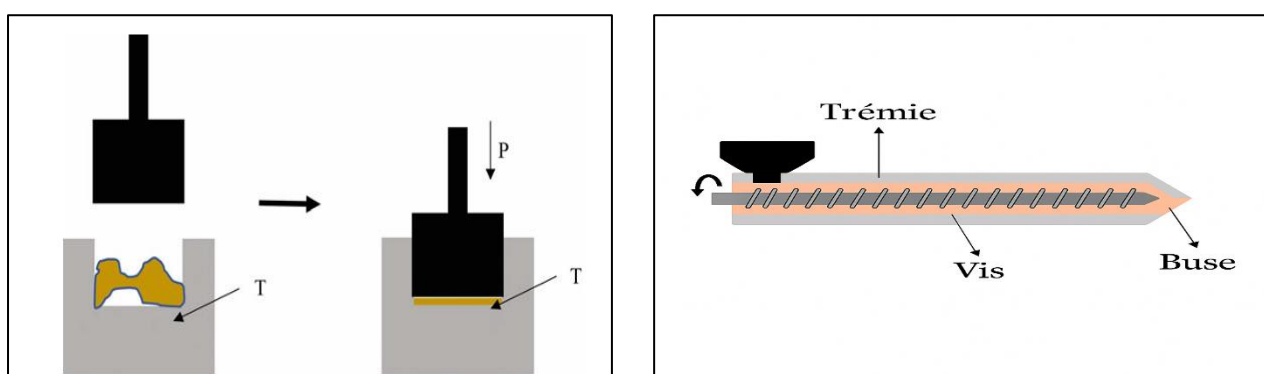
I.3.2. Procédés de transformation des bioplastiques

La production de bioplastiques est facilitée par l'adaptabilité des méthodes de transformation existantes pour les plastiques classiques, ce qui réduit les coûts d'investissement et encourage les producteurs à utiliser des subventions pour adapter leurs installations. Les techniques courantes, telles que le moulage par compression, l'extrusion et le moulage par

injection, impliquent la rupture des liaisons intermoléculaires des biopolymères, le réarrangement des chaînes polymères et la formation de nouvelles liaisons pour stabiliser la matrice. Bien que d'autres méthodes existent, leur rentabilité est moindre pour les applications agricoles et horticoles. Les méthodes classiques sont utilisées pour les matrices bioplastiques, mais nécessitent souvent des étapes additionnelles. [32]

1. Moulage par Compression :

Ce procédé utilise une combinaison de chaleur et de pression pour façonner les biopolymères. Le matériau, chauffé au-dessus de sa température de transition vitreuse pour le rendre facilement malléable, est placé dans un moule. La chaleur et la pression sont appliquées jusqu'à ce que le matériau épouse la forme du moule et durcisse. Bien que la polymérisation puisse survenir en fonction des conditions et du plastifiant, cette technique se distingue par ses faibles coûts d'exploitation, de maintenance et de fabrication des moules, ainsi que par une bonne finition de surface et peu de déchets. Cependant, les temps de durcissement peuvent être longs, et l'utilisation de la compression isostatique, bien qu'améliorant l'homogénéité des propriétés, peut augmenter significativement les coûts. [33]



FigL.3 : Schéma de la méthode de traitement par moulage par compression

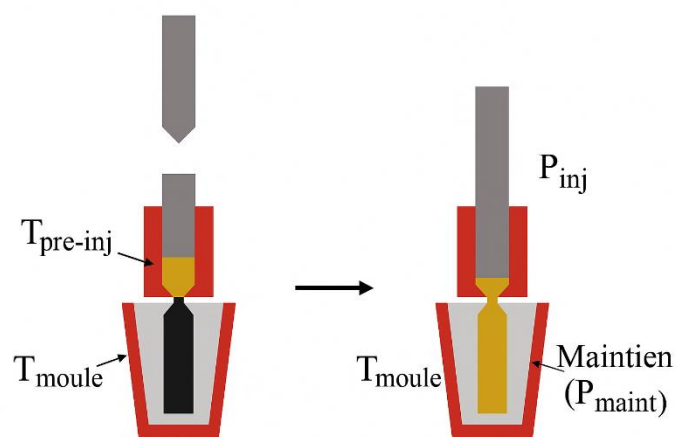
2. Extrusion :

Cette méthode repose sur le mélange d'une protéine et d'un plastifiant pour obtenir un mélange homogène. Le matériau thermoplastique est ensuite forcé, à une température adéquate, à travers une filière ou une buse de forme spécifique par application de pression. L'équipement comprend une trémie d'alimentation, un moteur, une vis d'extrusion et un cylindre chauffé. Les

principaux avantages sont une productivité élevée due à un fonctionnement continu, une simplicité d'opération (pas de pré-homogénéisation requise) et des coûts modérés. Néanmoins, elle est limitée aux produits de section constante et nécessite souvent des post-traitements. La température doit atteindre la transition vitreuse pour un écoulement correct, et un profil thermique précis est crucial, tout comme le contrôle du degré de réticulation pour optimiser les propriétés mécaniques sans entraver l'écoulement.

3. Moulage par Injection :

Similaire au moulage par compression, cette technique discontinue utilise la pression et la température pour former la matrice bioplastique. Le matériau est plastifié dans un cylindre, injecté sous pression dans un moule, puis refroidi et démoulé. Le contrôle de la température de fusion est critique car il affecte la viscosité du biopolymère fondu et donc la vitesse d'injection et de refroidissement. Les équipements peuvent être de type piston ou, plus couramment à l'échelle industrielle, à vis horizontale (la vis plastifie et injecte). L'avantage majeur est la capacité à produire en une seule étape des pièces de tailles et de géométries variées, même complexes, ce qui en fait la méthode la plus rentable à grande échelle. Cependant, le processus est complexe, peut nécessiter un prétraitement pour l'homogénéisation et induit des changements structuraux irréversibles aux biopolymères. Les paramètres clés incluent les températures de la chambre de pré-injection (proche de la transition vitreuse) et du moule (souvent plus élevée pour la réticulation), ainsi que les pressions et temps d'injection et de maintien. [34]



FigI.4 : Schéma de la méthode de traitement par moulage par injection

4. Traitements de Transformation Supplémentaires :

Ces traitements visent à optimiser les propriétés finales des matrices bioplastiques. L'homogénéisation préalable des matières premières (biopolymère, plastifiant, additifs) est essentielle pour le moulage par compression et par injection, le ratio des composants étant crucial pour éviter des mélanges trop fluides ou trop sableux. L'ajout d'additifs peut améliorer les propriétés jusqu'à un certain seuil. Des traitements de fonctionnalisation, comme l'acylation ou l'ajustement du pH, peuvent améliorer la capacité d'absorption d'eau. Pour renforcer les propriétés mécaniques, des traitements physiques comme le traitement déshydrothermique (DHT) à environ 50°C sont courants, bien que des techniques plus rapides comme les ultrasons et les micro-ondes émergent malgré un investissement initial plus élevé. Enfin, pour les applications à libération contrôlée (nutriments, pesticides), l'élimination du plastifiant (souvent par immersion dans l'eau) est nécessaire, bien que cela puisse entraîner une perte d'additifs hydrophiles ; des alternatives comme l'utilisation d'éthanol comme solvant sont à l'étude. Un séchage est ensuite requis. [35]

I.3.3. Facteurs Influant sur la Qualité des Bioplastiques

La qualité des bioplastiques est un enjeu majeur pour leur adoption à grande échelle. Elle est déterminée par une série de facteurs interdépendants qui affectent leurs propriétés physiques,

chimiques, mécaniques, ainsi que leur comportement environnemental. Voici une explication détaillée de chacun de ces facteurs :

a) Nature et Origine de la Matière Première

La matière première est le fondement même du bioplastique et son choix a un impact direct et profond sur la qualité finale. Les bioplastiques peuvent être issus de diverses sources renouvelables (biosourcés) comme l'amidon (de maïs, pomme de terre, blé), la cellulose (extraite du bois ou de déchets végétaux), les sucres (de canne à sucre, betterave), les huiles végétales (de ricin, soja), ou encore de protéines. La composition chimique intrinsèque de ces matières premières varie : par exemple, différents types d'amidon auront des tailles de granules et des rapports amylose/amylopectine distincts, influençant la transformabilité et les propriétés mécaniques du plastique obtenu. La pureté de la matière première est également cruciale ; des impuretés peuvent agir comme des défauts, affaiblissant le matériau ou causant des incohérences dans la production. De plus, la durabilité de l'approvisionnement et les pratiques agricoles (utilisation de pesticides, OGM ou non) peuvent aussi être considérées comme des aspects qualitatifs indirects, notamment en termes d'impact environnemental global et d'acceptation par le consommateur. Certains bioplastiques, bien que biodégradables, peuvent aussi être synthétisés à partir de monomères dérivés de ressources fossiles, et la qualité de ces monomères de départ est tout aussi importante. [36]

b) Structure Chimique du Polymère

Une fois la matière première choisie et transformée en monomères ou directement en polymères, la structure chimique spécifique du bioplastique est déterminante. Cela inclut le type de liaisons chimiques, le poids moléculaire moyen et sa distribution (polydispersité), le degré de cristallinité, la présence de ramifications ou de réticulations, et la tacticité (arrangement spatial des groupes latéraux). Par exemple, un poids moléculaire plus élevé est généralement associé à une meilleure résistance mécanique (traction, impact) et à une plus grande ténacité. La cristallinité influence la rigidité, la résistance à la chaleur, la transparence et les propriétés de barrière aux gaz et à l'humidité. Des polymères comme l'acide poly lactique (PLA) peuvent exister sous différentes formes stéréochimiques (PLLA, PDLA, PDLLA) qui affectent leur vitesse de cristallisation et leurs propriétés finales. Les polyhydroxyalcanoates (PHA), produits par fermentation bactérienne, offrent une large gamme de structures (en variant les monomères incorporés) permettant d'obtenir des propriétés allant de rigides et cassantes à élastomériques.

Cette structure chimique dicte non seulement les performances physiques mais aussi la vitesse et les mécanismes de biodégradation. [36]

c) Procédés de Fabrication et de Transformation

La manière dont les matières premières sont converties en résine bioplastique, puis cette résine transformée en produit fini, est capitale. Durant la polymérisation, les conditions de réaction (température, pression, catalyseur, temps de réaction) doivent être optimisées pour obtenir la structure moléculaire désirée et minimiser les sous-produits. Ensuite, lors de la mise en forme par des techniques telles que l'extrusion, le moulage par injection, le thermoformage, ou le soufflage de film, les paramètres de traitement (profil de température, vitesse de cisaillement, refroidissement) doivent être adaptés aux caractéristiques rhéologiques spécifiques du bioplastique. De nombreux bioplastiques ont une fenêtre de transformation plus étroite et une sensibilité thermique plus élevée que les plastiques conventionnels. Un traitement inadéquat peut entraîner une dégradation thermique ou hydrolytique du polymère, réduisant son poids moléculaire et, par conséquent, ses propriétés mécaniques. L'homogénéité du mélange, notamment si des additifs ou d'autres polymères sont incorporés (mélanges de polymères), est également essentielle pour obtenir des propriétés uniformes dans le produit final.

d) Additifs et Charges

Rarement un polymère est utilisé à l'état pur. Des additifs sont presque toujours incorporés pour améliorer certaines propriétés, faciliter la transformation ou réduire les coûts. Dans le cas des bioplastiques, le choix des additifs est particulièrement critique car ils ne doivent pas compromettre la biodégradabilité, la composition stabilité ou la biocompatibilité du matériau final, ni introduire de substances toxiques. Les plastifiants (par exemple, glycérol, citrates) sont souvent nécessaires pour augmenter la flexibilité de bioplastiques intrinsèquement rigides comme le PLA ou les dérivés d'amidon. Des stabilisants (thermiques, UV) peuvent être ajoutés pour améliorer la durabilité pendant l'utilisation. Des charges (minérales comme le talc ou la craie, ou naturelles comme les fibres de bois ou de lin) peuvent être utilisées pour augmenter la rigidité, réduire les coûts ou modifier la texture. Des agents de nucléation peuvent contrôler la cristallisation. La nature, la concentration, la taille des particules et la dispersion de ces additifs et charges ont un impact majeur sur les propriétés mécaniques, thermiques, optiques et la biodégradabilité du bioplastique. Une mauvaise dispersion peut créer des points de faiblesse.[37]

d) Conditions Environnementales

La qualité d'un bioplastique ne se limite pas à ses propriétés initiales, mais aussi à sa capacité à maintenir ses performances durant sa vie utile et à se comporter comme prévu en fin de vie. Durant son utilisation, l'exposition à la chaleur, à l'humidité, à la lumière (en particulier les UV), et aux contraintes mécaniques peut entraîner un vieillissement prématuré, une perte de propriétés ou une décoloration. La stabilité hydrolytique et thermique est donc un aspect qualitatif important. Concernant la fin de vie, si le bioplastique est conçu pour être biodégradable ou compostable, sa capacité à se décomposer efficacement dans l'environnement approprié (compost industriel, compost domestique, sol, milieu marin) est un critère de qualité essentiel. Cette décomposition dépend de la structure du polymère mais aussi des conditions environnementales spécifiques : température, humidité, pH, présence et type de micro-organismes. Un bioplastique qui ne se dégrade pas comme attendu ou qui libère des résidus nocifs ne répond pas aux critères de qualité environnementale.

e) Conception du Produit Final

Enfin, la manière dont le bioplastique est utilisé dans la conception d'un produit spécifique influence également la perception de sa qualité. Un bioplastique peut avoir d'excellentes propriétés intrinsèques, mais si le produit est mal conçu (par exemple, parois trop minces pour une application nécessitant de la robustesse, ou une forme qui concentre les contraintes), il peut échouer prématurément. La conception doit tenir compte des forces et des faiblesses du bioplastique choisi, de son comportement au vieillissement et de sa fin de vie prévue. L'adéquation entre les propriétés du matériau et les exigences de l'application est donc un facteur clé pour que la qualité du bioplastique se traduise par la qualité et la durabilité du produit fini.[38]

I.4. Les Tests sur les bioplastiques

I.4.1. Tests physico chimiques

a) Analyse morphologique et structurale

• Microscopie Électronique à Balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage (MEB) utilise un faisceau focalisé d'électrons pour générer des images de la topographie de surface et de la composition d'un échantillon. Elle permet de mesurer la morphologie de surface, la taille et la distribution des particules (pour les composites), d'analyser les surfaces de fracture et de visualiser la dégradation. Des études ont utilisé la MEB pour observer la finesse de surface de revêtements bioplastiques et examiner des surfaces cryo-fracturées pour étudier la structure interne. La MEB est également employée pour examiner les étapes de compostage de sacs en bioplastique, en visualisant les fragments intacts et dégradés ainsi que les microplastiques. L'équipement requis est un microscope électronique à balayage.[39]

• Diffraction des Rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X (DRX) est basée sur l'interférence constructive des rayons X monochromatiques avec un échantillon cristallin. Elle permet de déterminer la structure cristalline, le degré de cristallinité et d'identifier les phases cristallines. Une analyse par DRX a montré que certains revêtements sur des bioplastiques à base de déchets végétaux/PVA augmentent la cristallinité. L'équipement utilisé est un diffractomètre de rayons X.

Le degré de cristallinité, déterminé par DRX, influence profondément les propriétés mécaniques (par exemple, la résistance à la traction, la rigidité, la fragilité) et les propriétés barrières (par exemple, aux gaz, à la vapeur d'eau) des bioplastiques. La MEB complète cette analyse en visualisant la microstructure, telle que la taille des sphérulites ou la dispersion des charges, qui est directement liée à ces propriétés macroscopiques et aux conditions de mise en œuvre. De nombreux bioplastiques comme le PLA peuvent exister à l'état amorphe ou semi-cristallin en fonction de leur mise en œuvre et de leur historique thermique. Une cristallinité plus élevée augmente généralement le module et la résistance, mais peut réduire la ténacité et la perméabilité. La MEB peut révéler, par exemple, si une mauvaise dispersion d'une charge de renforcement (visualisée par MEB) est responsable d'une résistance mécanique inférieure aux

attentes, ou comment les processus de dégradation visualisés par MEB modifient la structure du matériau, ce qui est en corrélation avec les changements de cristallinité observés par DRX.[40]

b) Analyse de la Composition Chimique et des Groupes Fonctionnels

• Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (IRTF)

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) mesure l'absorption du rayonnement infrarouge par les molécules de l'échantillon, excitant ainsi les vibrations moléculaires. Elle permet d'identifier les groupes fonctionnels, de confirmer le type de polymère, de détecter les additifs et de suivre les modifications chimiques lors de la dégradation ou des réactions. Les résultats IRTF ont montré la présence d'alcane C-H, d'acides carboxyliques C=O, d'alcools OH et d'alcènes C-H dans des bioplastiques à base de déchets végétaux. L'équipement utilisé est un spectromètre IRTF. [41]

• Spectroscopie d'Absorption Atomique (SAA)

La spectroscopie d'absorption atomique (SAA) mesure l'absorption du rayonnement optique par les atomes libres à l'état gazeux pour déterminer les concentrations élémentaires. Elle permet la détermination quantitative d'éléments spécifiques, en particulier les métaux. L'analyse par SAA a montré que des bioplastiques contenaient des micro et macronutriments (Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni). L'équipement utilisé est un spectromètre d'absorption atomique.

La IRTF sert d'outil critique pour vérifier l'identité chimique des bioplastiques et suivre leurs voies de dégradation (par exemple, l'hydrolyse des liaisons ester dans le PLA/PHA). La SAA est indispensable pour quantifier les métaux traces, ce qui est une exigence clé pour les certifications de compostabilité (limites en métaux lourds) et pour évaluer la teneur en nutriments si le bioplastique est dérivé de biomasse les contenant. La IRTF fournit une "empreinte digitale" de la structure chimique du polymère. Pour les bioplastiques, cela est vital pour confirmer le polymère de base (par exemple, distinguer le PLA du PHA) et identifier les plastifiants ou compatibilisants utilisés dans les mélanges. Lors des études de biodégradation, les modifications des spectres IRTF, telles que l'apparition de nouveaux pics carbonyle ou hydroxyle ou la disparition des pics ester, peuvent indiquer des transformations chimiques

spécifiques. La SAA est directement pertinente pour les critères d'écotoxicité des normes telles que ASTM D6400 et EN 13432, qui fixent des limites strictes pour les métaux lourds. [42]

c) Analyse des Propriétés Thermiques

•Analyse Thermogravimétrique (ATG)

L'analyse thermogravimétrique (ATG) mesure la variation de masse d'un échantillon en fonction de la température ou du temps dans une atmosphère contrôlée. Elle permet de déterminer la stabilité thermique, les températures de décomposition, la teneur en humidité et en matières volatiles, la teneur en cendres et la composition de systèmes multi-composants. L'ATG a été utilisée pour l'analyse des caractéristiques thermiques, montrant une bonne résistance à la chaleur jusqu'à 200 °C pour un bioplastique. L'ATG est également utile pour la détermination exacte de la composition (volatiles, charges) et de la température de décomposition, cruciale pour les plastiques biodégradables. Il est important d'utiliser l'ATG pour déterminer la température T_{95} (température pour <5% de décomposition) afin de fixer les limites supérieures pour les balayages DSC, évitant ainsi l'analyse d'un échantillon en dégradation. L'ATG permet aussi de caractériser la dégradation et la stabilité thermique. L'équipement est un analyseur thermogravimétrique. [43]

•Analyse Calorimétrique Différentielle (DSC)

L'analyse calorimétrique différentielle (DSC) mesure la différence de flux thermique entrant dans un échantillon et une référence en fonction de la température ou du temps. Elle permet de mesurer la température de transition vitreuse, la température de fusion, la température de cristallisation, la chaleur de fusion/cristallisation, la capacité thermique spécifique, la pureté et le degré de polymérisation. La DSC est mentionnée pour l'analyse des caractéristiques thermiques et mesure la stabilité thermique et les transitions de phase. Des directives détaillées de préparation d'échantillons pour la DSC sont disponibles. [44]

•Analyse Thermique Différentielle (ATD)

L'analyse thermique différentielle (ATD) mesure la différence de température entre un échantillon et une référence inerte en fonction de la température. Elle fournit des informations similaires à la DSC, telles que les températures de transition et la décomposition. L'ATD est

mentionnée pour l'analyse des caractéristiques thermiques et comme une technique d'analyse thermique. L'ATD est également utilisée pour l'étude des propriétés thermiques. L'équipement est un analyseur thermique différentiel. [43]

d) Interaction avec l'Eau

• Test d'Absorption d'Eau (ASTM D570)

Le test d'absorption d'eau mesure le taux relatif d'absorption d'eau par les plastiques lorsqu'ils sont immergés dans l'eau dans des conditions spécifiées. La propriété mesurée est le pourcentage de gain de poids après immersion. La norme ASTM D570 décrit le séchage, la pesée, l'immersion (23 °C, 24h ou équilibre) et la nouvelle pesée de l'échantillon. Les facteurs influençant ce test incluent le type de plastique, les additifs, la température et la durée d'exposition. Des valeurs d'absorption d'eau de 2.9% à 4.3% ont été rapportées pour des bioplastiques à base d'amidon avec du ZnO et du glycérol. L'équipement requis comprend un four, un dessiccateur, une balance et un bain-marie. [43]

• Test de Solubilité dans l'Eau

Ce test détermine le pourcentage de matériau qui se dissout dans l'eau dans des conditions spécifiques. La propriété mesurée est le pourcentage de perte de poids après immersion et séchage du résidu. Une méthode a été décrite et la solubilité dans l'eau pour des échantillons de bioplastiques a été rapportée à une moyenne de 46.878%. L'équipement nécessaire comprend une balance, des béchers, un appareil d'agitation, un four et du papier filtre. [45]

• Test de Teneur en Humidité

Ce test mesure la perte de poids d'un échantillon après séchage dans un four à une température spécifique jusqu'à poids constant. La propriété mesurée est le pourcentage de teneur en humidité. La méthode (séchage à 110 °C) a été décrite et la teneur en humidité pour des échantillons de bioplastiques a été rapportée à une moyenne de 21.99%. L'analyse de la teneur en humidité pour les bioplastiques à base d'albumine, incluant la cryo-fragmentation et le chauffage à 80 °C, a montré comment le type de plastifiant affecte significativement l'absorption d'humidité au fil du temps. La teneur en humidité à l'équilibre (EMC) et sa forte dépendance à l'humidité relative pour les polymères hydrophiles comme Mater-Bi et le Chitosan ont également été discutées. L'équipement utilisé est un four et une balance. [45]

I.4.2. Tests mécaniques

a) Propriétés en Traction

Ce test mesure la réponse du matériau à une contrainte de traction uniaxiale (force de traction). Les propriétés mesurées sont la résistance à la traction (au seuil d'écoulement et à la rupture), le module de Young (rigidité), l'allongement à la rupture (ductilité) et la courbe contrainte-déformation. Les tests de traction peuvent être effectués entre -40°C et $+230^{\circ}\text{C}$. souligne que la résistance à la traction et le pourcentage d'allongement sont des caractéristiques mécaniques essentielles. Il montre comment le ZnO et le glycérol affectent ces propriétés dans les bioplastiques à base d'amidon. Certaines données sur les propriétés de traction du PLA et des mélanges PLA/PHB sont également disponibles.

Les propriétés en traction sont fondamentales pour presque toutes les applications des bioplastiques, mais de nombreux bioplastiques courants (comme le PLA ou l'amidon non modifié) présentent une résistance et un module élevés au détriment d'un faible allongement (fragilité). Les tests sont donc critiques non seulement pour la caractérisation de base, mais aussi pour évaluer l'efficacité des plastifiants, des charges ou des stratégies de mélange visant à améliorer la ténacité. Pour que les bioplastiques remplacent les polymères ductiles conventionnels comme le PE ou le PP dans des applications telles que les films ou les emballages flexibles, l'amélioration de leur allongement à la rupture et de leur ténacité globale est essentielle. Les essais de traction fournissent les données quantitatives pour évaluer ces améliorations. Par exemple montre comment l'ajout de glycérol augmente l'allongement des films d'amidon. [46]

b) Propriétés en Flexion

Ce test mesure la résistance du matériau et ses propriétés de déformation sous une charge en trois points. Les propriétés mesurées sont la résistance en flexion, le module de flexion, la contrainte/déformation en flexion au seuil d'écoulement/à la rupture. Les tests de flexion peuvent être effectués entre -40°C et $+230^{\circ}\text{C}$.

Les essais de flexion sont particulièrement pertinents pour les bioplastiques destinés à des applications semi-rigides ou rigides où les composants pourraient subir des charges de flexion en service (par exemple, boîtiers, couverts, supports structurels). Alors que les essais de traction évaluent le comportement sous une traction pure, les essais de flexion simulent un état de

contrainte plus complexe impliquant la traction, la compression et le cisaillement. Ceci est souvent plus représentatif des conditions de charge réelles pour de nombreuses pièces en plastique. Pour les bioplastiques visant à remplacer des matériaux comme le PS ou le PP dans de telles applications, de bonnes propriétés en flexion sont essentielles. [46]

c) Résistance aux Chocs

Ce test mesure la capacité du matériau à résister à une charge ou un choc appliqué soudainement. Les propriétés mesurées sont l'énergie de choc absorbée (par exemple, kJ/m²) et le type de rupture.

La résistance aux chocs est une faiblesse critique pour plusieurs bioplastiques importants (par exemple, le PLA, ceux à base d'amidon). Par conséquent, les essais de choc sont essentiels non seulement pour la spécification des matériaux, mais aussi comme mesure clé pour les efforts de R&D axés sur le renforcement de la ténacité de ces matériaux par mélange, copolymérisation ou additifs. De nombreux bioplastiques comme le PLA sont connus pour leur fragilité et leurs mauvaises performances sous charges d'impact. Cela limite leur utilisation dans des applications sujettes aux chutes ou aux forces soudaines. Les tests quantifient directement cette ténacité (ou son absence). Les améliorations de la résistance aux chocs par modification (par exemple, en mélangeant le PLA avec des polymères plus ductiles ou des modificateurs de choc) seraient validées à l'aide de ces tests, élargissant ainsi la gamme d'applications des bioplastiques. [47]

I.4.3. Tests de biodégradabilité

Ce test évalue la capacité du matériau à être décomposé par des micro-organismes en CO₂, eau et biomasse dans des conditions environnementales spécifiques. La compostabilité est une forme spécifique de biodégradabilité dans des conditions de compostage gérées. Les propriétés mesurées incluent le pourcentage de désintégration, le pourcentage de biodégradation (évolution du CO₂ ou consommation d'O₂, les changements de masse, la réduction du poids moléculaire et l'écotoxicité du résidu. [48]

Le test d'enfouissement dans le sol est un test qualitatif plus simple évaluant la perte de poids lorsque le matériau est enfoui dans le sol. Décrit l'enfouissement d'échantillons à 3 cm de

profondeur pendant 15 jours. Il est important de distinguer les environnements : compostage industriel (haute température, contrôlé), compostage domestique (température plus basse, variable), sol, milieu marin. Un matériau certifié pour le compostage industriel peut ne pas se dégrader dans d'autres environnements. **[49]**

CHAPITRE II

MATERIEL ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Introduction

La partie expérimentale de cette étude se concentre sur la formulation, la fabrication et à la caractérisation physicochimique et structurale () des bioplastiques, en mettant l'accent sur les techniques utilisées pour l'extraction de l'amidon à partir des déchets de blé et la cellulose issue de déchets alimentaires.

Ce chapitre est structuré en plusieurs sections. Tout d'abord, les protocoles d'extraction et de purification des matières premières procureuses et les réactifs utilisés seront décrits en détail. Ensuite, les techniques de préparation des bioplastiques seront présentées, suivies des méthodes de caractérisation employées pour évaluer les propriétés structurelles et fonctionnelles des bioplastiques élaborées.

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.1. Matériel et méthodes utilisées

II.1.1. Matériel et, appareillages

Le Tableau II.1 suivant présente le matériel et l'appareillage utilisé lors de la réalisation de la présente étude.

Tableau II.1 : Présentation du matériel et appareillages

Matériel	Appareillages
• Pipettes (5mL, 10mL, 25mL). • Entonnoirs, Cristalliseur. • Boîte pétrie • Barreau magnétique, Verre de montre. • Papier filtre. • Eprouvette, Pissette. • Beurette, Thermomètre. • Béchers (50 ml, , 250 mL,500 mL,1L, 2L)	• Agitateur mécanique HEIDOLPH. • Balance électronique : IIAXIS, précision 0,001g. • Etuve MEMMERT. • PH mètre type HANNA instruments. • 8900 SHIMADZU • Plaque chauffante • Spectromètre • Agitateur magnétique

• Erlenmeyers • Tamis de laboratoire • Moules (silicone) • Spatules • Pincés • Gants	• Thermomètre
---	---

II.1.2. Réactifs et produits chimiques

Les produits chimiques utilisés afin d'élaborer les différentes étapes d'extraction des matières premières procureuses et d'élaboration des bioplastiques sont présentés sur le tableau II.2 comme suit :

Tableau II.2 : présente les différents produits utilisés avec leurs propriétés

Réactif	Formule chimique	Rôle	Masse molaire (g/mol)	Pureté (%)	Densité	Propriétés physiques
Gélatine	Protéines animales	Agent filmogène	Variable (~90,000 Da)	95–99	1.3–1.4	Soluble à chaud, gélifie à froid
Glycérol	C ₃ H ₈ O ₃	Plastifiant	92.09	98–99	1.26	Liquide visqueux, incolore
Hydroxyde de sodium	NaOH	Base forte (extraction)	40.00	98	2.13 (solide)	Très corrosif, soluble dans l'eau
Chlorure d'hydrogène	HCl	Acide fort (test chimique)	36.46	33–37	1.19	Liquide très corrosif
Eau de Javel	NaClO	Désinfectant / nettoyage	74.44	2–5	~1.1	Liquide jaune/vert, odeur piquante

II.2. Origine et préparation des matières premières précurseuses

II.2.1. Origine des déchets alimentaires utilisés

Dans le cadre de ce projet, quatre types de déchets alimentaires ont été retenus en raison de leur richesse en polymères naturels utilisables pour la fabrication de bioplastiques biodégradables :

- **Coques d'arachide** : constituées majoritairement de cellulose et lignine, ces coques offrent une bonne rigidité et sont adaptées pour renforcer la matrice polymérique.
- **Résidus de blé** (issues ou sons) : contiennent de l'amidon, des fibres et des protéines végétales (gluten), ce qui favorise la formation d'un matériau souple et cohésif.

II.2.2. Étapes de préparation des matières premières précurseuses

Les déchets récoltés ont été préparés selon les étapes suivantes :

a) Triage et lavage

Chaque type de déchet a été trié manuellement pour retirer les impuretés (poussière, matières plastiques, corps étrangers). Ensuite, ils ont été lavés abondamment à l'eau claire afin d'éliminer les résidus organiques et les micro-organismes éventuels.

b) Séchage

- Les coques d'arachide ont été séchées dans une étuve à 50 °C pendant 24 à 48 heures, jusqu'à évaporation quasi complète de l'humidité.
- Pour les résidus de blé, un séchage plus doux (à 40 °C) a été appliqué afin de préserver les propriétés de l'amidon et des protéines.

c) Broyage

Une fois secs, tous les échantillons ont été broyés à l'aide d'un moulin mécanique afin d'obtenir une poudre fine et homogène, ce qui a facilité les étapes ultérieures d'extraction ou de mélange.

II.3. Méthodes d'extraction des matières premières précurseuses

II.3.1. Justification du choix des matières à extraire

Pour cette étude, l'amidon et la cellulose ont été ciblés comme composants clés en raison de leur grande disponibilité dans les déchets alimentaires étudiés, ainsi que de leurs propriétés intéressantes pour la fabrication de bioplastiques :

- L'amidon : polymère naturel, thermoplastique, biodégradable, et compatible avec divers additifs plastifiants.

- La cellulose : polymère rigide, abondant, renforçant la structure des films plastiques, et conférant une meilleure résistance mécanique.

II.3.2. Extraction de l'amidon à partir des déchets de blé

L'extraction de l'amidon des déchets de blé (ex : son de blé, grains cassés, etc.) repose sur sa solubilité dans l'eau froide et sa capacité à être séparé des fibres et des protéines par sédimentation.

Deux méthodes ont été comparées pour évaluer leur efficacité sur le rendement et la qualité des composants extraits.

Méthode 1 : Extraction sans agitation

Cette méthode repose sur la décantation naturelle de l'amidon en milieu aqueux. Les étapes d'extraction, telles que décrites dans la littérature [50] avec quelques modifications, sont les suivantes :

- Mélange 100 g de poudre de résidu de blé avec 1 L d'eau distillée.
- Homogénéisation à l'aide d'un mixeur pendant 20 minutes.
- Filtrage le mélange à travers d'un tissu filtrant pour séparer les fibres insolubles.
- Repos de filtrat pendant 12 heures à température ambiante pour la sédimentation de l'amidon.
- Décantation le surnageant et récupérer le dépôt blanc contenant l'amidon.
- Rinçage quelques fois avec de l'eau distillée.
- Laisser l'amidon à l'air libre jusqu'à obtention d'une poudre sèche.

Méthode 2 : Extraction avec agitation

Les différentes étapes du processus d'extraction sont :

- 100 g de résidu de blé sont ajoutés à 500 ml d'eau distillée.
- Le mélange est agité fortement en utilisant un agitateur mécanique pendant 30 minutes
- Le mélange est filtré pour séparer les fibres du liquide contenant l'amidon.
- Le filtrat est laissé au repos à 12 heures pour que l'amidon se décante au fond du récipient.

- Même procédure que la méthode 1.

Tableau II.3: présente Comparaison des deux méthodes d'extraction de l'amidon.

Critère	Méthode sans agitation	Méthode avec agitation
Temps total	Long (24 h)	Plus court (12–16 h)
Rendement en amidon	Moyen	Elevé
Pureté de l'extrait	Moyenne	Bonne
Facilité de mise en œuvre	Très simple	Nécessite un agitateur

II.2.3. Extraction de la cellulose

La cellulose est extraite en éliminant les composants non cellulosiques (lignine, hémicellulose, protéines, lipides) par des traitements alcalins et/ou acides. Les étapes d'extraction sont : [51]

Étape 1 : Lavage à l'eau chaude (élimination des composés solubles)

- 100 g de poudre de déchets alimentaires sont bouillis dans 1 L d'eau distillée pendant 20 minutes.
- Ce lavage élimine les composés solubles dans l'eau tels que les sucres, les acides organiques et d'autres petites molécules.
- Le mélange est filtré à l'aide d'un papier filtre pour séparer les deux phases solide et liquide.

Étape 3 : Traitement basique (élimination de l'hémicellulose)

Les solides récupérés sont traités avec 1 M d'hydroxyde de sodium (NaOH) à 85°C pendant 30 minutes sous agitation.

L'hydroxyde de sodium attaque les liaisons de l'hémicellulose, un autre composant des parois cellulaires des plantes.

⁵¹ Bettaieb F. EP. KH ; Valorisation des déchets cellulosiques tunisiens ; Thèse en Mécanique des fluides, Procédés, Energétique ; Université Grenoble Alpes, France ; 2015 ;190.)

Étape 2 : Traitement acide (élimination de la pectine)

Les solides filtrés sont immergés dans une solution d'acide chlorhydrique (1 M) à 85°C pendant 30 minutes sous agitation moyenne

L'acide hydrolyse la pectine, un polysaccharide complexe présent dans les parois cellulaires végétales.

Étape 4 : Lavage et Neutralisation

Les solides sont rincés à plusieurs reprises avec de l'eau distillée jusqu'à atteindre un pH neutre (≈ 7).

Cette neutralisation est essentielle avant l'étape suivante, car un pH acide ou basique pourrait interférer avec l'étape de blanchiment.

Etape 5 : Blanchiment (élimination de la lignine)

Le blanchiment de la cellulose a été effectué à l'aide d'une solution d'hypochlorite de sodium NaClO à 20 % (v/v) à 60 °C pendant 1 heure sous agitation moyenne afin d'éliminer les résidus de lignine et de colorants végétaux.

Etape 6 : Lavage et rinçage

- Après blanchiment, les fibres ont été filtrées et rincées plusieurs fois avec de l'eau distillée, puis lavées avec une solution faiblement acidifiée (acide acétique à 1 %) pour neutraliser les traces de chlore actif.

- Les fibres blanchies ont été séchées à 60 °C pendant 24 heures, puis conservées dans un flacon hermétiquement fermé à l'abri de l'humidité.

II.3.4. Rendement des extraits utilisés

L'efficacité des méthodes d'extraction est évaluée par le rendement d'extraction, qui correspond au pourcentage de matière sèche récupérée par rapport à la masse initiale de matière première. Les extractions ont été réalisées :

- Pour l'amidon : à partir des résidus de blé, avec et sans agitation.
- Pour la cellulose : à partir des coques d'arachide, selon un protocole unique.

Le rendement est calculé par l'équation suivante :

$$\text{Rendement (\%)} = \frac{\text{masse d'extrait sec (g)}}{\text{masse de matière première sèche (g)}} \times 100 \quad (\text{II.1})$$

II.3. Formulation et fabrication des bioplastiques

II.3.1. Procédure de fabrication du bioplastique – Type 1 (sac d’emballage)

Le premier type de bioplastique a été formulé dans le but d’obtenir un matériau souple et léger, adapté à la fabrication de sacs d’emballage biodégradables. Les étapes à suivre pour l’élaboration des bioplastiques de type 1 [52] avec de mineurs corrections sont les suivantes :

- Préparation une solution de gélatine à 15% et la verser dans un bécher contenant d’eau distillée. Laisser reposer pendant 15 minutes à température ambiante (24°C) pour permettre une bonne hydratation des chaînes protéiques.
- Chauffage doucement le mélange sur plaque chauffante à 70 °C), tout en remuant lentement pour favoriser la dissolution complète de la gélatine.
- Ajout 5% d’amidon de blé et 2% de glycérol (agent plastifiant) directement dans le mélange et agiter pendant 5 minutes pour assurer la bonne dispersion du glycérol dans la matrice biopolymère.
- Versement le mélange encore chaud sur un moule en silicone.
- Étalement uniformément pour obtenir une fine couche.
- séchage à température ambiante pendant 48 heures.

Une fois le bioplastique est totalement sec et rigide, procéder délicatement au démoulage du film souple.

II.3.2. Formulation et fabrication du bioplastique – Type 2 (échantillon solide)

Ce deuxième type de bioplastique a été conçu pour obtenir un matériau plus rigide et dense, adapté à des usages comme des objets jetables semi-rigides (ex. : ustensiles, emballages solides). Les étapes à suivre pour son élaboration sont les suivantes :

- Mélange les deux poudres d’amidon 7% et de la cellulose 5% en masse-dans un bécher puis ajouter 2% de glycérol et 1% d’acide acétique en ajoutant de l’eau distillé.
- Agitation à l’aide d’un agitateur magnétique à 80 °C pendant 20 minutes, pour obtenir une pâte homogène. Cette étape favorise la gélatinisation de l’amidon, la dispersion de la cellulose et le début de réticulation sous l’effet de l’acidité.
- Versement le mélange épais dans un moule (en silicone).
- séchage à température ambiante (pendant 72 h.

II.4. Méthodes de caractérisation des bioplastiques

II.4.1. Analyses physico-chimiques

a) Test d'absorption d'eau

L'absorption d'eau est un test crucial pour évaluer la stabilité du bioplastique en milieu humide. Il permet de quantifier la capacité du matériau à retenir l'humidité, ce qui influence directement son usage dans l'emballage, le stockage ou les applications médicales.

Les échantillons sont pesés (M_i) avant immersion dans un récipient contenant 50 mL d'eau distillée, à température ambiante ($\approx 25\text{ }^{\circ}\text{C}$), pendant 24 heures, sans agitation.

Après 24 h, les échantillons sont retirés, séché légèrement à la surface avec un papier absorbant pour retirer l'excès d'eau puis pesés pour déterminer la masse finale (M_f).

Le taux d'absorption est calculé par la formule suivante :

$$\Delta m = \frac{m_0 - m_f}{m_0} \times 100 \quad (\text{II.2})$$

Avec :

M_i : Masse initiale des échantillons en g.

M_f : Masse après séchage en g

b) Test de résistance à l'acide et à la base

Ce test a pour objectif d'évaluer la stabilité chimique du bioplastique solide lorsqu'il est exposé à un milieu acide ou basique, conditions pouvant être rencontrées dans certaines applications industrielles ou domestiques.

Afin d'évaluer la stabilité chimique du bioplastique solide en milieu acide et basique, un test d'immersion a été réalisé. Deux solutions ont été préparées :

- Une solution acide composée de deux gouttes d'acide chlorhydrique concentré (HCl) diluées dans 20 mL d'eau distillée, et une solution basique obtenue en dissolvant 0,08 g d'hydroxyde de sodium (NaOH) dans 20 ml d'eau distillée

- Deux échantillons de bioplastique sec ont été pesés avant l'immersion, avec des masses initiales de 1,20 g pour l'échantillon destiné au test acide et de 1,54 g pour celui soumis à la solution basique.

- Les échantillons ont ensuite été immergés dans leurs solutions respectives pendant 24 heures à température ambiante (environ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$).

– Après ce temps de contact, ils ont été retirés, essuyés délicatement à l'aide de papier absorbant, en vue d'analyser les éventuelles variations de masse ou d'aspect, témoignant de leur comportement face à ces environnements chimiques.

Et on a trouvé après pesée final (m_2/m_4) dans acide $m_2=0.92g$ et dans basique $m_4=1.49g$

La variation de la masse de ce test est calculé avec cette formulation

$$\text{Variation (\%)} = \frac{m_f - m_i}{m_i} \times 100 \quad (\text{II.3})$$

Mi= masse initiale d'échantillons en (g)

Mf=masse après séchage

c) Test de séchage à 70 °C – Détermination du taux d'humidité

Ce test a pour objectif de déterminer le taux d'humidité résiduel dans les échantillons de bioplastique fabriqués. Ce paramètre est essentiel pour évaluer la stabilité et la conservation du matériau. Ce test permet ainsi de vérifier si les échantillons ont atteint une masse constante après séchage, garantissant leur qualité et leur aptitude à une utilisation durable.

Afin de déterminer le taux d'humidité des échantillons de bioplastique, une procédure de séchage contrôlé a été mise en place avec les étapes suivantes :

Dans un premier temps, chaque échantillon a été pesé afin d'enregistrer sa masse initiale à l'état humide (m_1).

Les échantillons ont ensuite été placés dans un étuve à air ventilé, maintenu à une température constante de 70 °C.

Des pesées successives ont été réalisées toutes les heures pendant les quatre premières heures de séchage (H+1, H+2, H+3, H+4), afin de suivre l'évolution de la perte de masse. Une dernière pesée a été effectuée après 24 heures de séchage, afin de s'assurer de la stabilisation de la masse.

Le taux d'humidité a été ensuite calculé par différence de masse, en comparant la masse initiale (m_1) et la masse finale après séchage complet (m_2). Ce taux reflète la quantité d'eau retenue dans le matériau à l'état initial. Ce calcul est fait par l'équation suivante :

$$\text{Taux d'humidité} = \frac{m_1 - m_f}{m_1} \times 100 \quad (\text{II.4})$$

Mi=masse initiale d'échantillons avant séchage

Mf=masse finale après séchage

d) Test de perméabilité

Ce test a pour but d'évaluer la perméabilité à l'eau des deux types de bioplastiques élaborés. La perméabilité est un critère essentiel pour les matériaux destinés à des usages d'emballage, notamment en contact avec des produits humides ou liquides.

Afin d'évaluer la perméabilité aux échantillons des bioplastiques (sac d'emballage et le solide), un test de transmission d'eau a été réalisé avec les étapes suivantes :

1. Préparation de l'échantillon : découper un disque ou carré régulier du bioplastique à tester (environ 5 cm²).
2. Fixation le film bioplastique à l'extrémité ouverte d'une éprouvette de manière hermétique (à l'aide d'un élastique ou ruban adhésif).
3. Versement un volume fixe d'eau distillée (20 ml) dans le tube.
4. Démarrage le chronomètre et placer un récipient sous le tube.
5. Observation et mesurer, pendant 1 à 2 heures, la quantité d'eau qui a traversé le film à travers le temps (en ml).
6. Répétition pour l'autre échantillon.

Le taux de perméabilité (P) peut est estimé par la formule :

$$P = \frac{V_{traversé}}{S \times t} \quad (II.5)$$

- Traversé = volume d'eau passé à travers le film (en ml),
- S = surface de l'échantillon (cm²),
- t= temps de test (heures ou secondes).

e) Test de solubilité – Solvants organiques

Évaluer la résistance des bioplastiques à la dissolution ou à la dégradation dans des solvants organiques courants : éthanol et acétone. Ce test permet d'estimer leur stabilité chimique et leur usage potentiel dans des environnements exposés à des solvants.

Deux types de bioplastique ont été étudiés : le type 1 (sac d'emballage souple) et le type 2 (échantillon rigide et solide). Les échantillons, préalablement découpés à taille constante, ont été soigneusement pesés à l'état sec afin de déterminer leur masse initiale (m₀).

Chaque échantillon a ensuite été immergé séparément dans un bécher contenant 50 mL de solvant (éthanol ou acétone). À des intervalles réguliers de 10 minutes, et pendant une durée totale d'une heure, les échantillons ont été retirés, tamponnés délicatement et éliminer l'excès de solvant en surface, puis immédiatement pesés ($m_1, m_2, \dots, m_6$).

Le test a été conduit à température ambiante, avec douce agitation, dans des conditions contrôlées.

$$\text{Taux de solubilité (\%)} = \frac{m_i - m_t}{m_i} \times 100 \quad (\text{II.6})$$

M_i= masse initiale d'échantillon avant l'immersion dans un solvant organique

M_t= représente la masse de l'échantillon après 10 minutes de traitement

f) Test d'élasticité et de déformation (souplesse à froid et à chaud)

Évaluer la flexibilité, l'élasticité et la déformation du bioplastique, d'abord à température ambiante (froid), puis après chauffage. Ce test permet de voir si notre bioplastique réagit en se ramollissant ou en devenant plus rigide sous l'effet de la chaleur, et s'il retrouve sa forme après déformation ou reste déformé.

Le protocole commence par un test à température ambiante (environ 25 °C). On découpe un morceau de bioplastique de forme régulière, mesurant approximativement 2 cm sur 4 cm, avec une épaisseur suffisante pour être manipulé sans risque de déchirure. Ce morceau est ensuite observé dans son état initial, puis soumis à des tests de flexion en réalisant d'abord un pli simple, puis un pli plus accentué.

Dans un second temps, un test est réalisé après chauffage. On commence par verser 300 ml d'eau dans une casserole, que l'on place ensuite sur une plaque chauffante ou une cuisinière. Une nouvelle bande de bioplastique, de dimensions similaires (2 cm × 4 cm), est découpée et placée dans un petit récipient en verre. Celui-ci est ensuite introduit dans la casserole une fois que l'eau a atteint une température comprise entre 70°C. L'eau doit recouvrir au moins la moitié de la hauteur du récipient. Le bioplastique est laissé à chauffer pendant 5 à 10 minutes, puis le récipient est retiré à l'aide d'une pince ou d'une cuillère en bois. Le morceau de bioplastique est alors déposé sur un support sec et immédiatement soumis à un test de flexibilité ou d'élasticité tant qu'il est encore chaud.

II.4.2. Analyse structurale par IRTF :

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (**IRTf**) est utilisée pour analyser les groupes fonctionnels caractéristiques présents dans les matériaux. Elle permet d'évaluer les modifications structurales après extraction (amidon, cellulose) et après la formulation finale des bioplastiques.

Les échantillons (amidon extrait à partir du blé (avec et sans agitation) et de cellulose extraite à partir des coques d'arachide) ont été broyés finement pour garantir une mesure précise et homogène au niveau du spectre.

Les bioplastiques (Type 1 (sac d'emballage) ; Type 2 (échantillon solide)) ont été analysés tels quels, sous forme de films, sans broyage préalable.

Les spectres ont été enregistrés dans la gamme de 4000 à 500 cm^{-1} , permettant de détecter les vibrations caractéristiques des principales liaisons chimiques.

II.4.3. Test de biodégradabilité

L'objectif de ce test est évalué la capacité des deux types de bioplastiques élaborés à se décomposer naturellement dans un environnement humide, en présence des micro-organismes naturellement présents dans le sol. La biodégradabilité constitue un critère essentiel dans la conception de matériaux alternatifs aux plastiques d'origine pétrochimique, car elle reflète leur impact environnemental en fin de vie.

Le protocole expérimental a débuté par la pesée initiale (m_i) des deux échantillons : un bioplastique solide (0,1602 g) et un film d'emballage souple (0,0755 g). Les échantillons ont ensuite été partiellement enterrés dans un sol maintenu humide à température ambiante. L'humidité du sol a été conservée en l'aspergeant légèrement avec de l'eau distillée tous les deux jours. Aux jours 5 et 10 (J+5 et J+10), les échantillons ont été retirés du sol, nettoyés délicatement à l'eau distillée, séchés à température ambiante, puis pesés afin de mesurer les pertes de masse, indicatives du degré de biodégradation.

CHAPITRE III

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Introduction

Ce chapitre présente l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus et leur interprétation relative à l'extraction des composants amidon et cellulose issus de déchets agroalimentaires, ainsi que à la formulation des bioplastiques et aux tests physico-chimiques et structuraux (par analyse IRTF) réalisés.

Les résultats obtenus s'accompagnent d'une analyse critique qui les compare aux données bibliographiques existantes.

III.1. Résultats de rendement d'extraction des matières utilisées

III.1.1. Rendement d'extraction de l'amidon (à partir du blé)

Afin d'évaluer l'efficacité des méthodes d'extraction employées, le Tableau (III.1) ci-dessous résume les rendements obtenus pour l'amidon extrait du blé (avec et sans agitation) ainsi que pour la cellulose extraite des coques d'arachide.

Le Tableau III.1 : Rendements d'extraction de l'amidon par deux méthodes (avec et sans agitation) et de la cellulose

Echantillon	Méthode d'extraction	Masse de blé utilisée (g)	Masse D'amidon extrait (g)
Amidon	Méthode 1 « Sans Agitation »	100 g	18.70 g
	Méthode 2 « Avec Agitation »	100 g	23.50 g
Cellulose	Simple	100g	13.00 g

L'analyse des résultats met en évidence l'importance de l'agitation dans le processus d'extraction de l'amidon. En effet, l'absence d'agitation permet d'extraire 18,70 grammes, soit 18,7 % du total, tandis que l'agitation permet d'obtenir 23,5 grammes, soit 23,5 % du total. Ceci suggère une désagrégation plus complète des particules de blé, ce qui favoriserait une meilleure libération de l'amidon.

L'agitation a un impact significatif sur l'extraction de l'amidon de blé, notamment sur le rendement. Une agitation appropriée permet une meilleure séparation des grains d'amidon des autres composantes du grain, augmentant ainsi le rendement d'extraction. En effet, L'agitation favorise la dispersion des grains d'amidon dans l'eau et permet leur séparation des autres composants du grain, tels que le gluten et les autres protéines.

Pour la cellulose, le rendement d'extraction de la cellulose est 13%. Ce rendement reflète une extraction efficace dans des conditions simples, mais l'utilisation de méthodes plus intensives pourrait permettre une meilleure séparation des fibres cellulosiques des composants non cellulosiques.

Le rendement d'extraction de la cellulose à partir des coques d'arachide varie en fonction des méthodes et des conditions de traitement. Cependant, il est généralement estimé qu'environ 0,39 g de cellulose peuvent être extraits pour chaque gramme de poids sec de coque d'arachide selon Ganguly et al. [53]

III.2. Morphologie des bioplastiques formés

Deux types distincts de bioplastiques ont été obtenus à l'issue des formulations expérimentales. Chacun d'entre eux présente des propriétés physiques visibles correspondant à son objectif d'usage. Ils sont présentés sous forme de Figure (III.1) :

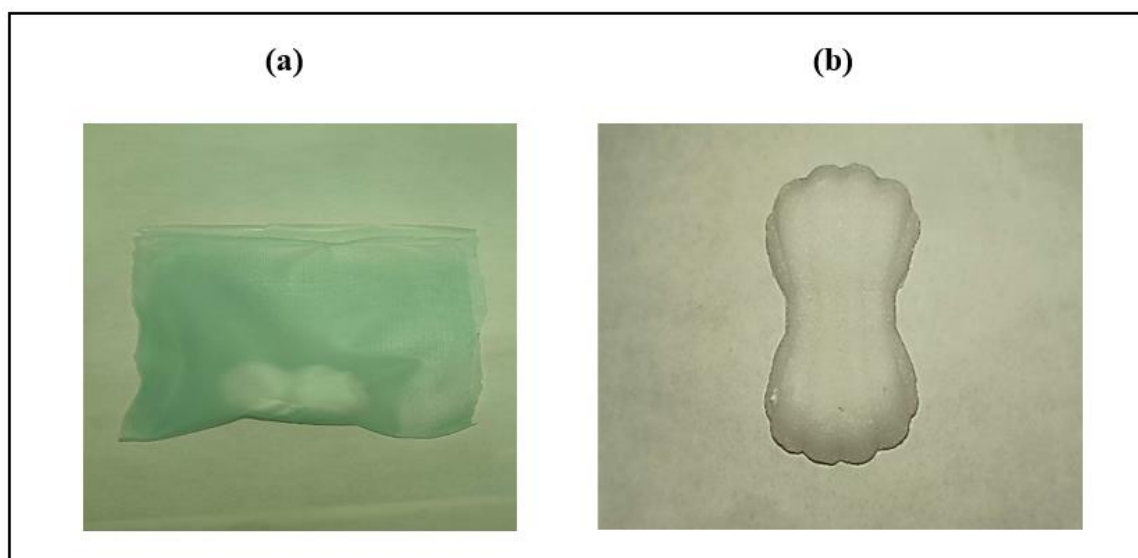


Figure III.1 : Photographies montrant les bioplastiques préparés a) : bioplastique type 1 « sac d'emballage » ; b) : bioplastique type 1 « solide ».

Afin d'évaluer les caractéristiques physiques observables des bioplastiques obtenus, une comparaison visuelle a été réalisée entre les deux types d'échantillons fabriqués (type 1 : sac d'emballage, type 2 : bioplastique solide) dans le Tableau (III.2) ci-dessous :

Tableau III.2 : Comparaison visuelle des deux types de bioplastiques.

Critère	Bioplastique Type 1 (Souple – Sac)	Bioplastique Type 2 (Solide – Objet moulé)
Apparence	Translucide, lisse, homogène	Opaque, granuleux, forme définie
Texture	Souple, élastique, flexible	Rigide, dense, dur
Couleur	Légèrement verdâtre (selon formulation)	Blanc mat ou blanc cassé
Comportement mécanique	Peut-être plié sans se casser	Ne se plie pas, cassant sous forte contrainte

Utilisation potentielle	Sacs d’emballage souples et biodégradables	Ustensiles jetables, Contenants, objets rigides
État final après séchage	Mince, flexible	Compact, épais, moulé

III.3. Résultats des caractéristiques physico-chimiques des bioplastiques

III.3.1. Résultats de taux d'absorption de l'eau

Les résultats relatifs aux taux d'absorption de l'eau obtenue sont présentés dans le Tableau (III.3) et la Figure (III.2) ci-dessous.

Tableau III.3 : Résultats relatifs aux taux d'absorption.

Échantillon	Masse initiale (Mi)	Masse finale (Mf)	Taux d'absorption (%)
Bioplastique solide	0.1538 g	0.2490 g	+61.92 %
Sac d'emballage	0.9200 g	0.8192 g	-10.96 %

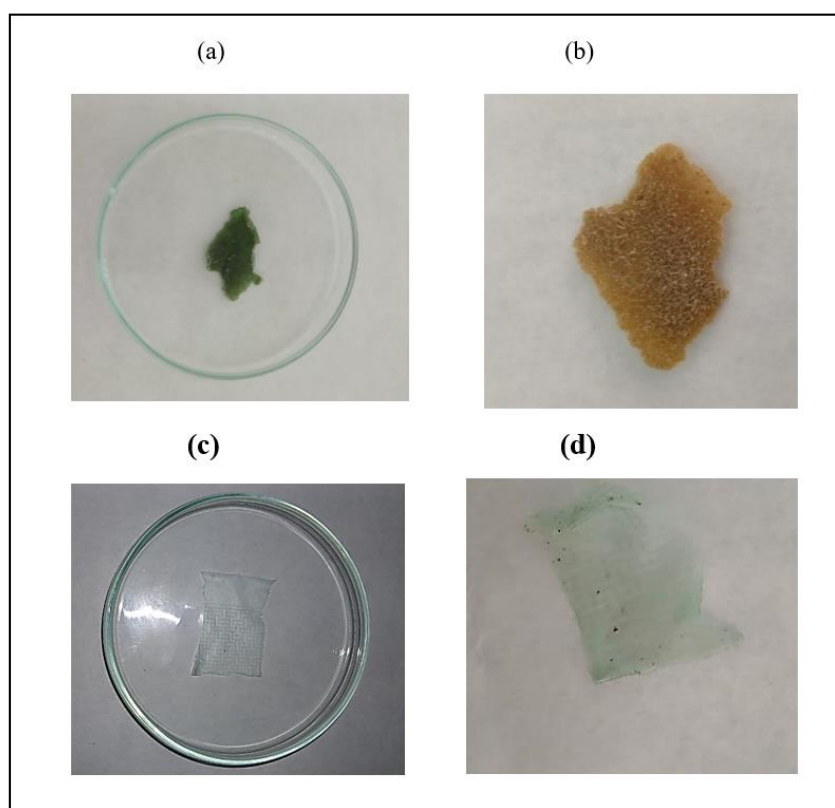


Figure III.2 : Photos montrant les différents types de bioplastique avant et après le test d'absorption ; a) : Bioplastique type 2 (solide) – Avant le test ; b) : type 2 après le test ; c) : Bioplastique type 1 (sac d'emballage) – Avant le test ; d) : type 1 après le test
Les changements physiques observés ont été résumés dans le tableau (III.4) ci-dessous.

Tableau II.4 : Résultats liés aux observations de l'immersion dans l'eau distillée (24 h)
pour chaque type de bioplastique.

Échantillon	Changements après 24h d'immersion
Échantillon 1 (bioplastique solide)	Gonflement notable, légère déformation, perte de rigidité, mais forme globale conservée
Échantillon 2 (sac d'emballage)	Forte déformation, ramollissement extrême, passage à un état gélatineux voire partiellement dissous

L'examen de ces résultats montre les phénomènes suivants :

- le bioplastique solide présente un gain de masse de 61.92 %, ce qui indique une absorption modérée de l'eau. Cette propriété hydrophile est attendue pour un matériau à base d'amidon, mais reste acceptable pour des usages à court terme ou dans des conditions sèches.

- le sac d'emballage montre une perte de masse de -10.96 % après immersion. Cela peut s'expliquer par une dégradation partielle ou dissolution superficielle de certains composants dans l'eau (ex. : migration de plastifiant), ou par une structure plus dense qui empêche l'absorption d'eau, accompagnée d'une perte de matière.

- Absorption d'eau modérée ; structure encore cohérente ; bonne tenue relative malgré une certaine fragilisation.

- Très grande sensibilité à l'eau ; dégradation rapide ; structure peu résistante à l'humidité.

III. 3.2. Résultats de la résistance du bioplastique aux milieux acides et basiques

a) Pour l'échantillon bioplastique solide

La dégradation subie par le matériau peut être quantifiée par les variations de sa masse après immersion dans des solutions de caractère acide ou basique. Le tableau (III.5) ci-dessous résume ces résultats, tandis que la figure (III.3) qui illustre l'état visuel de cet échantillon avant et après les traitements chimiques.

Tableau III.5 : Résultats du test de résistance chimique en milieu acide et basique
(variations de masse du bioplastique solide)

Milieu de test	Masse initiale (g)	Masse finale (g)	Variation de masse (%)
Solution acide	1.20	0.92	-23.33 %
Solution basique	1.54	1.49	-3.25 %

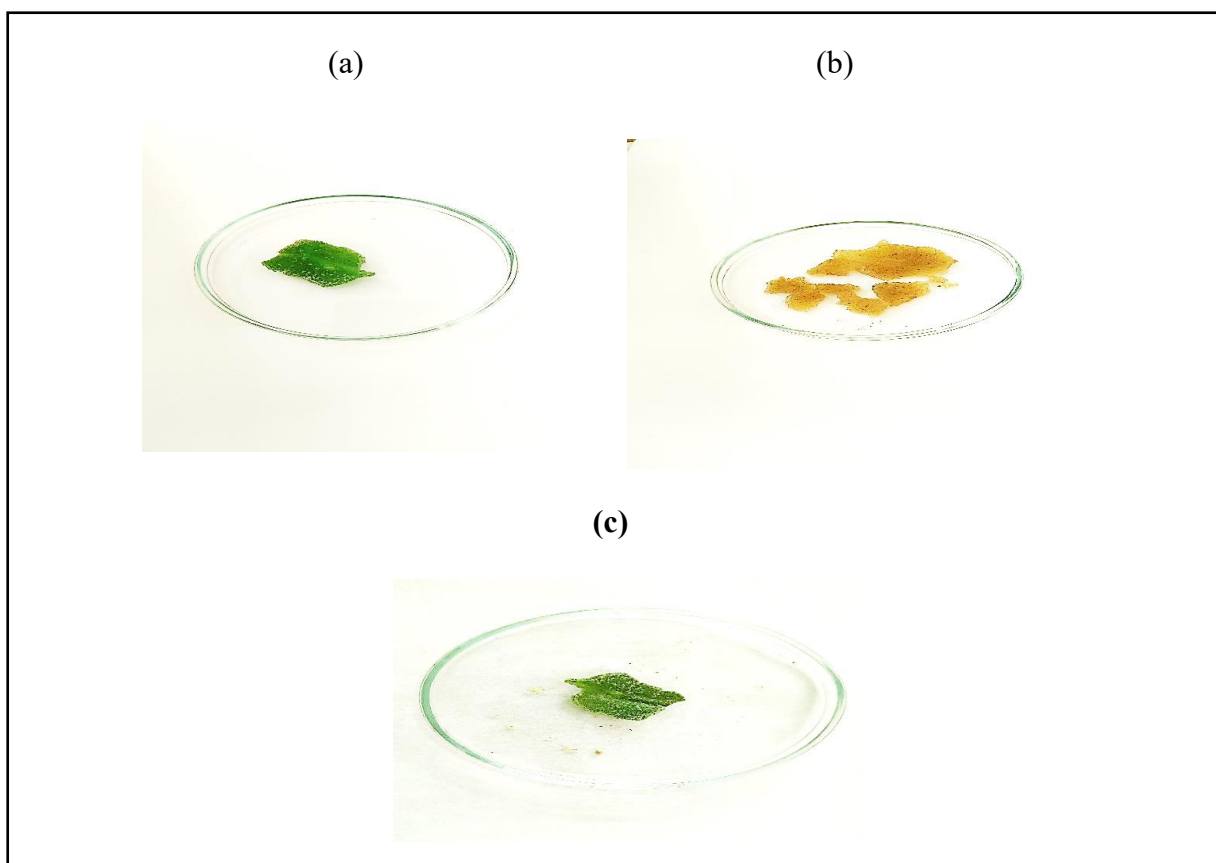


Figure III.3 : Photos montrant l'état visuel de bioplastique solide avant et après le traitement chimique dans le milieu acide et basique

- a) : Bioplastique solide– Avant le test ;
- b) : Bioplastique solide après le traitement chimique dans le milieu basique ;
- c) : Bioplastique solide après le traitement chimique dans le milieu acide

Afin de mieux comprendre les effets des environnements acides et basiques sur le comportement de bioplastique solide, une interprétation des résultats est présentée dans le tableau (III.6) ci-dessous.

Tableau III.6 : Observations et interprétations des résultats de bioplastique solide testé en milieu acide et basique.

Milieu	Perte de masse (%)	Observations	Interprétations
Acide (HCl dilué)	-23.33 %	Perte de masse notable, aspect visuel modérément altéré	- Hydrolyse probable des liaisons glycosidiques de l'amidon en milieu acide - Fragilité chimique du matériau face aux ions H^+ même dilués
Base (NaOH diluée)	-3.25 %	Dégradation physique visible importante (fissures, gonflement, fragilisation)	- Bonne stabilité des liaisons amidon-cellulose face aux ions OH^- doux- Malgré une perte de masse faible, l'intégrité visuelle est plus affectée

b) Pour l'échantillon sac d'emballage

Les variations de masse après immersion permettent de quantifier la dégradation subie par le matériau. Le tableau (III.7) ci-dessous résume ces résultats, tandis que la figure (III.4) qui illustre l'état visuel de cet échantillon avant et après les traitements chimiques.

Tableau III.7 : Résultats du test de résistance chimique en milieu acide et basique (variations de masse du bioplastique sac d'emballage)

Milieu	Masse initiale (m_i)	État final après 24 h
Acide (2 gouttes HCl / 20 mL H_2O)	0.54 g	Échantillon dissous (gel)
Basique (0.08 g NaOH / 20 mL H_2O)	0.67 g	Échantillon dissous (gel)

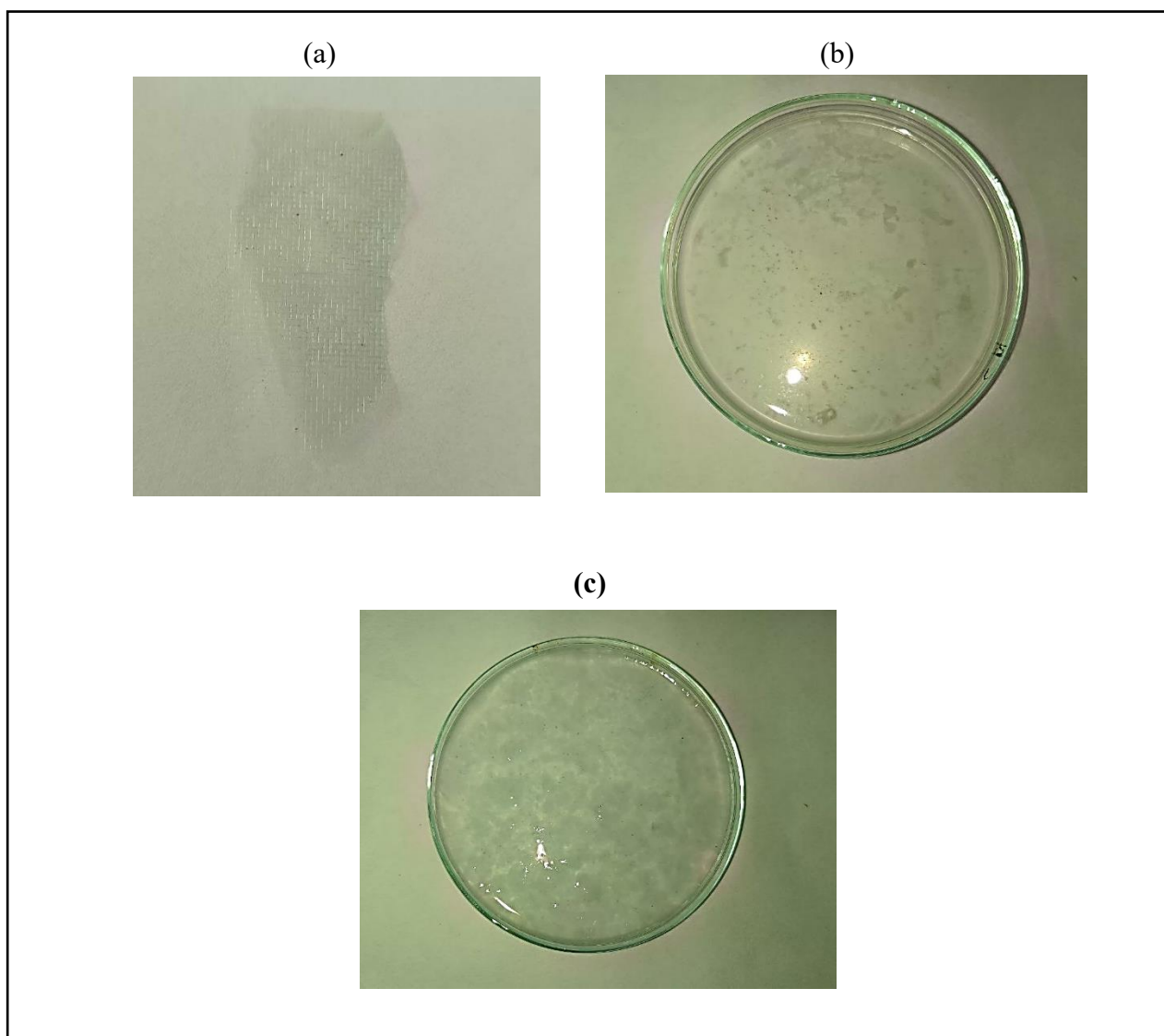


Figure III.4 : Photos montrant l'état visuel de bioplastique type sac d'emballage avant et après le traitement chimique dans le milieu acide et basique

- a) : Bioplastique s type sac d'emballage – Avant le test ;
- b) : Bioplastique type sac d'emballage après le traitement chimique dans le milieu basique
- c) : Bioplastique type sac d'emballage après le traitement chimique dans le milieu acide

Afin de mieux comprendre les effets des environnements acides et basiques sur le comportement de bioplastique type sac d'emballage, une interprétation des résultats a été réalisée dans le tableau (III.8) ci-dessous.

Tableau III.8 : Observations et interprétations des résultats de bioplastique sac d'emballage testé en milieu acide et basique

Milieu	Observations sur le bioplastique sac	Interprétations
Acide	Transformation en gel visqueux, dissociation visible des polymères, dissolution partielle	Faible stabilité des liaisons intermoléculaires, probablement due à une forte teneur en amidon ou à l'absence d'agents réticulant ou plastifiants.
Basique	Gélification rapide, perte complète de la cohésion, état presque dissous	Sensibilité aux ions OH^- , pouvant entraîner une saponification de certains composants ou indiquer une faible cristallinité ou polymérisation.

III.3.3. Résultats de taux d'humidité

a) Échantillon Type 1 : Bioplastique du sac d'emballage

Pour évaluer la teneur en eau et le comportement de séchage du bioplastique utilisé pour le sac d'emballage (échantillon 1), un test de séchage à 70 °C a été réalisé. Les résultats des variations de masse au cours du temps sont présentés dans le tableau (III.9), et sous forme de courbe dans la figure (III.5).

Tableau III.9 : Evolution de la masse de l'échantillon Type 1 pendant le séchage à 70 °C.

Temps (h)	Masse (g)
0	0.52
1	0.43
2	0.42
3	0.42
4	0.42
24	0.42

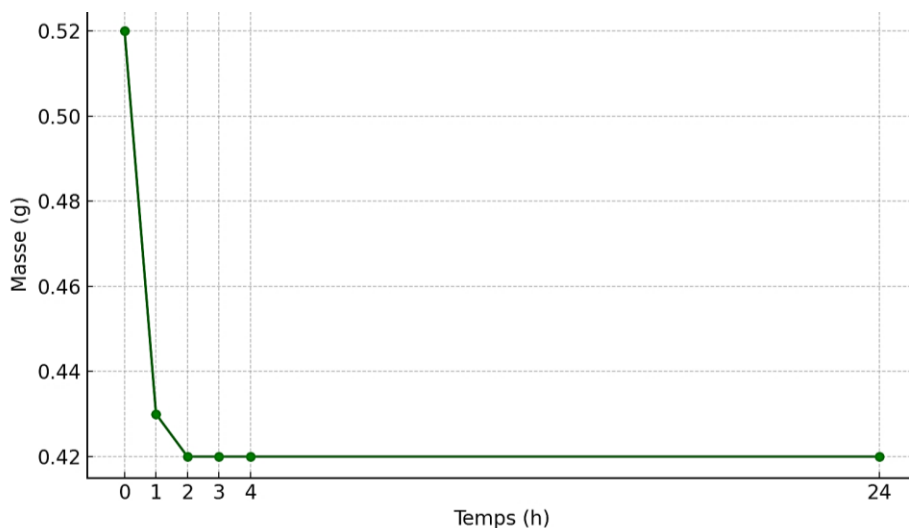


Figure III.5 : Graphe d'évolution de la masse de l'échantillon Type 1 pendant le séchage à 70 °C en fonction du temps.

Le graphique représente l'évolution de la masse du sac d'emballage en fonction du temps de séchage à 70 °C. On observe une chute rapide de la masse dès la première heure, suivie d'une stabilisation à partir de la deuxième heure, ce qui indique que l'humidité a été majoritairement évacuée dès les premières heures de séchage.

b) Échantillon Type 2 : Bioplastique solide final

Les résultats des variations de masse de bioplastique solide au cours du temps sont présentés sous forme d'un tableau (III.10), d'une figure (III.6) de graphe illustrant cette évolution.

Tableau III.10 : Evolution de la masse de l'échantillon Type 2 pendant le séchage à 70 °C.

Temps (h)	Masse (g)
0	0.56
1	0.45
2	0.4463
3	0.4417
4	0.4315
24	0.42

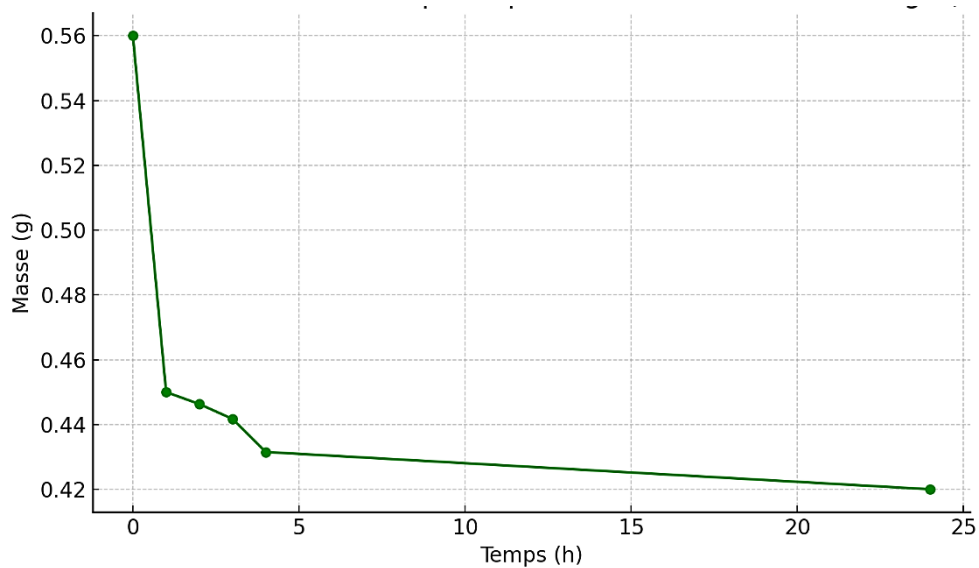


Figure III.6 : Graphe d'évolution de la masse du bioplastique Type 2 au cours du séchage à 70°C en fonction du temps.

Le graphique illustre l'évolution de la masse du bioplastique solide durant le séchage à 70 °C. On observe une diminution rapide de la masse durant les premières heures, suivie d'une stabilisation autour de 0,42 g après 4 heures, indiquant une élimination quasi complète de l'humidité.

Cette évolution est illustrée par des images comparatives de l'échantillon avant et après séchage présentées dans la figure (III.7).

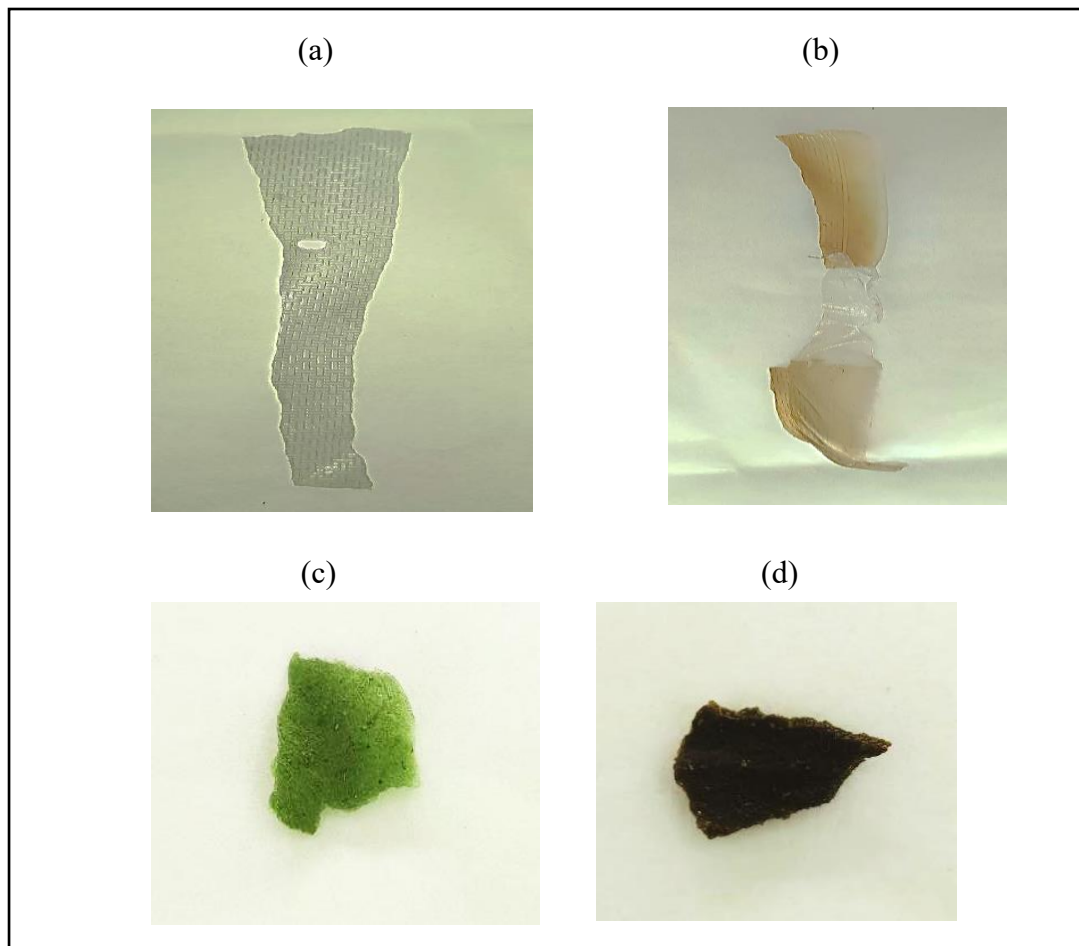


Figure III.7 : Photos montrant l'état visuel de bioplastique type 1 et 2 avant et après le test de séchage.

- a) : bioplastique type 1 avant séchage
- b) : bioplastique type 1 après séchage
- c) : Bioplastique type 2 avant séchage
- d) : Bioplastique type 2 après séchage

Une série d'observations visuelles et de mesures de masse ont été réalisées avant et après le processus de séchage, afin de mieux comprendre le comportement des deux échantillons de bioplastique. Le tableau III.11 montre, d'une part, les évolutions physiques constatées et, d'autre part, l'évolution de la masse ainsi que le taux d'humidité résiduelle.

Tableau III.11 : Evolution de la masse et le taux d'humidité.

Échantillon	Avant séchage	Après séchage	Évolution de la masse (g)	Taux d'humidité (%)	Interprétation
Bioplastique Type 1	Texture uniforme, brillante, souple ; coloration homogène.	Brunissement partiel, rigidité accrue, cassant et déformé.	0.52 → 0.42 (stabilisé dès la 2 ^e heure)	19.23 %	Évacuation rapide de l'eau libre ; la structure est plus ouverte, facilitant la libération d'humidité.
Bioplastique Type 2	Texture verte vive, légèrement souple, forme homogène.	Couleur plus foncée (marron), taille réduite, durcissement marqué.	0.56 → 0.42 (perte progressive sur 4h)	25.00 %	Humidité plus liée à la matrice ; présence de cellulose hydrophile et structure plus dense ralentissant l'évaporation de l'eau.

III.3.4. Résultats de taux de solubilité

- Les résultats des variations de masse de bioplastique solide au cours du temps sont présentés sous forme d'un tableau (III.12) Dans le but d'évaluer la solubilité des deux types de bioplastiques (Type 1 et Type 2) dans des solvants organiques.

Tableau III.12 : Evolution des masses au cours du temps pour chaque couple échantillon/solvant.

Temps (min)	Bioplastique Type 1 dans Éthanol	Bioplastique Type 1 dans Acétone	Bioplastique Type 2 dans Éthanol	Bioplastique Type 2 dans Acétone
0	0.4000	0.1600	0.7778	0.3372
10	0.4000	0.1595	0.7635	0.3167
20	0.3900	0.1588	0.7611	0.3190
30	0.3600	0.1560	0.7609	0.3111
40	0.3500	0.1545	0.7440	0.3110
50	0.3400	0.1334	-	-

Afin de mieux visualiser l'évolution de la solubilité des échantillons dans les solvants, les pertes de masse ont été converties en pourcentage par rapport à la masse initiale. Le tableau suivant (III. 13) regroupe les résultats trouvés.

Tableau III.13 : Pourcentage de solubilité en fonction du temps pour chaque type d'échantillon et de solvant

Temps (min)	Bioplastique Type 1 dans Éthanol	Bioplastique Type 1 dans Acétone	Bioplastique Type 2 dans Éthanol	Bioplastique Type 2 dans Acétone
0	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.31	1.84	6.08
20	2.50	0.75	2.15	5.40
30	10.00	2.50	2.17	7.74
40	12.50	3.44	4.35	7.77
50	15.00	16.63	-	-

Les Figures (III.8) et (III.9) ci-dessous illustrent l'évolution de la masse des deux échantillons de bioplastique (sac d'emballage et solide) au cours du temps, lors du test de séchage à 70 °C. Ces courbes permettent de visualiser la cinétique de perte d'humidité et de comparer la vitesse de séchage selon la nature du matériau.

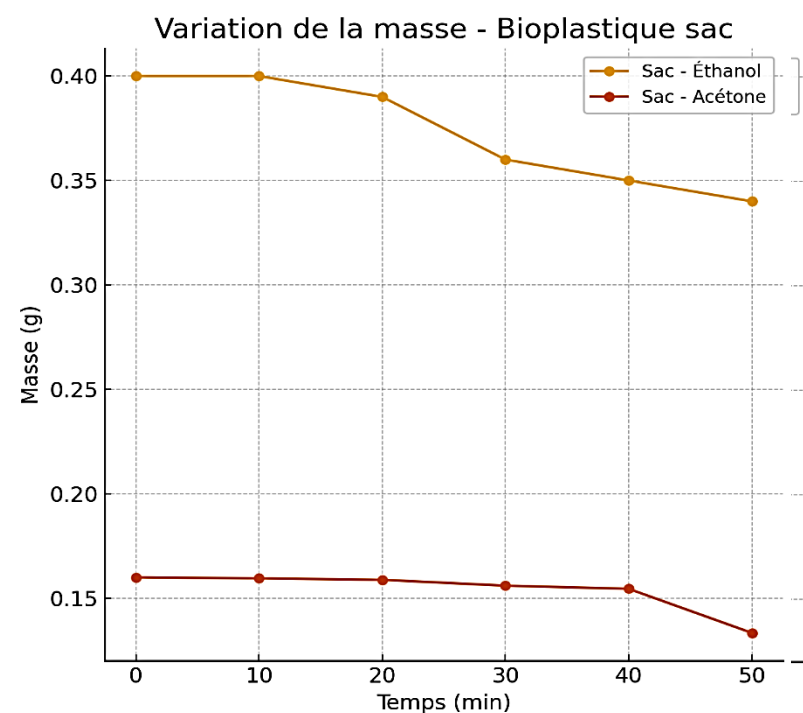


Figure III.8 : Variation de la masse du bioplastique Type 1 en fonction de temps.

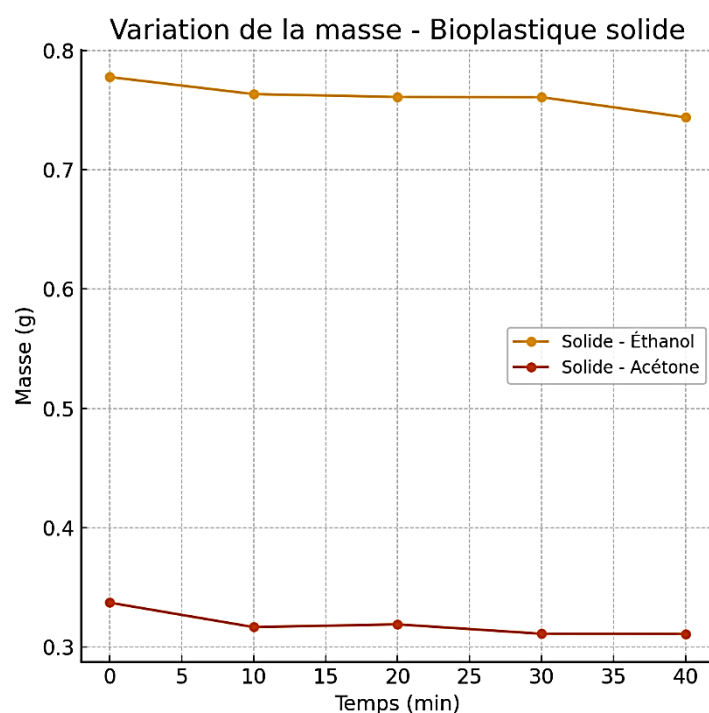


Figure III. 9 : Variation de la masse du bioplastique Type 2 en fonction de temps

Les graphiques montrent l'évolution de la masse de deux types de bioplastiques (solide et sac) en contact avec l'éthanol et l'acétone. Le bioplastique en sac perd progressivement de la masse dans l'éthanol, indiquant une dégradation continue, tandis qu'il résiste mieux à l'acétone jusqu'à une chute soudaine après 40 minutes. Le bioplastique solide, quant à lui, se montre plus stable dans les deux solvants, avec une légère perte dans l'éthanol et une diminution plus marquée mais limitée dans l'acétone.

Le tableau III.14 ci-dessous résume les interprétations des résultats obtenus lors des tests de solubilité dans l'éthanol et l'acétone pour les deux types de bioplastiques.

Tableau III.14 : Interprétations des résultats de solubilité des bioplastiques dans différents solvants.

Echantillons	Interprétations
Bioplastique Type 1 dans l'éthanol	L'échantillon montre une faible perte de masse progressive (environ –15 % environ), indiquant une solubilité modérée . Cela pourrait être lié à la présence de glycérol et de polymères peu réticulés, solubles dans des alcools.
Bioplastique Type 1 dans l'acétone	La perte de masse est plus rapide (–17 % à 50 min), ce qui suggère une meilleure affinité de l'acétone pour certains composants du bioplastique.
Bioplastique Type 2 dans l'éthanol	Très faible variation de masse (moins de –5 %), ce qui indique une bonne stabilité chimique . La présence de cellulose renforcée rend l'échantillon plus résistant à la solubilisation.
Bioplastique Type 2 dans l'acétone	Stabilité légèrement moindre que dans l'éthanol, mais toujours dans des limites acceptables. Cela montre que la formulation solide offre une meilleure résistance aux solvants organiques .

III.3.5. Résultats de taux de perméabilité

Les résultats obtenus pour les deux types de bioplastique sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.15 : Résultats du test de perméabilité à l'eau des échantillons.

Échantillon	Surface (cm ²)	Volume initial (mL)	Volume traversé (mL)	Temps (h)	Perméabilité (mL/cm ² ·h)
Bioplastique Type 1	5	20	3.2	1	0.64
Bioplastique Type 2	5	20	0	1	0.00

L'examen de ces résultats montre les phénomènes suivants :

- Le bioplastique de Type 1 présente une perméabilité notable à l'eau (0,64 mL/cm²·h), ce qui suggère une structure plus ouverte ou moins dense, probablement due à une formulation plus souple et hydrophile (présence de glycérol, faible réticulation).

- Le bioplastique Type 2 n'a laissé passer aucune quantité mesurable d'eau pendant l'expérience, indiquant une très bonne résistance à la perméation. Cette propriété peut être

attribuée à une densité plus élevée, à une meilleure organisation interne et à la présence de cellulose plus cristalline.

III.4. Caractérisation structurale par spectroscopie infrarouge (IRTF)

a) Amidon

Une analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) a été réalisée afin d'identifier les fonctions chimiques présentes dans l'amidon extrait.

La Figure (III.10) présente le spectre IR obtenu pour l'amidon natif, tandis que le Tableau (III.17) récapitule les principales bandes d'absorption observées, ainsi que leur attribution aux différentes vibrations moléculaires caractéristiques de l'amidon natif.

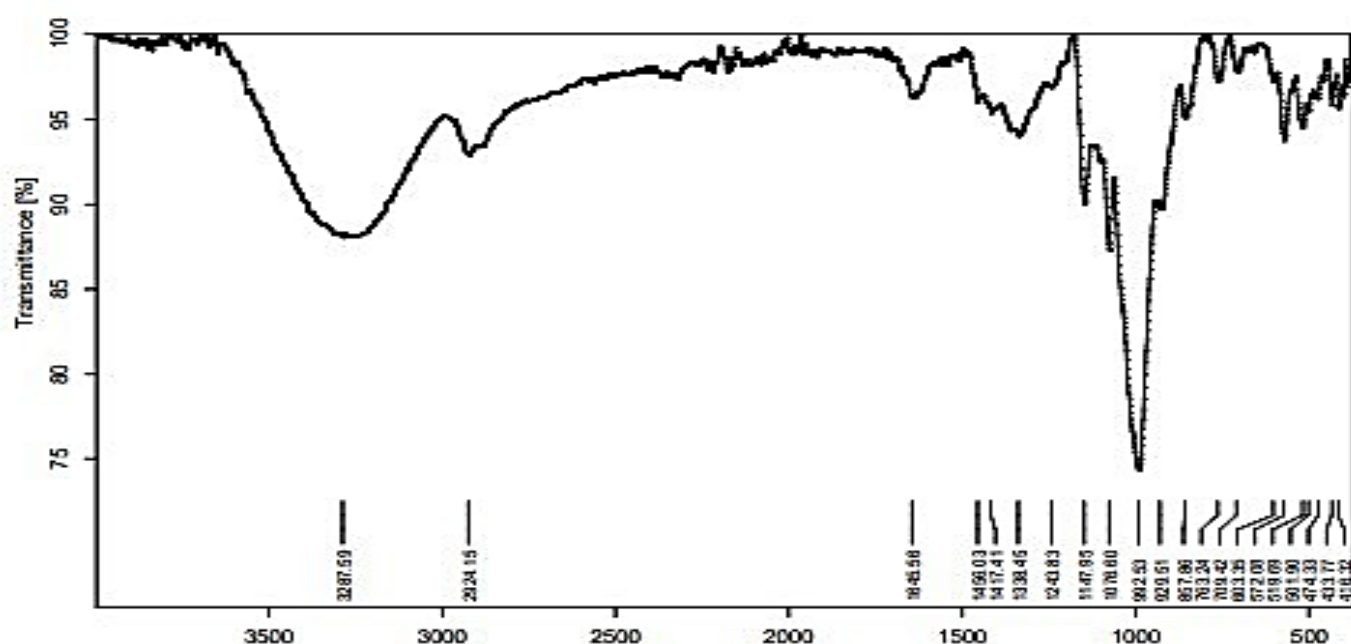


Figure III.10 : Résultats de spectroscopie infrarouge d'amidon natif cités dans la littérature

Tableau III.16 : Attribution des principales bandes observées sur le spectre IR de l'amidon natif

Type de vibration	Attribution	Nombre d'onde (cm ⁻¹)
Élongation	O–H liée (liaison hydrogène)	3287.59
Élongation	C–H (groupement CH ₂)	2924.15
Déformation	O–H (eau ou alcool)	1645.56
Déformation	C–H (groupement CH ₂)	1445.56
Élongation ou déformation	C–O (alcool, ester, polysaccharide)	1147.95
Vibration complexe	C–O–H ou hors plan	992.53 – 519.69

Les résultats de l'analyse IRTF de l'amidon extrait selon la méthode 1 (sans agitation) sont présentés sous forme de spectre infrarouge (Figure III.12), accompagné d'un tableau (III.18) d'attribution des bandes caractéristiques.

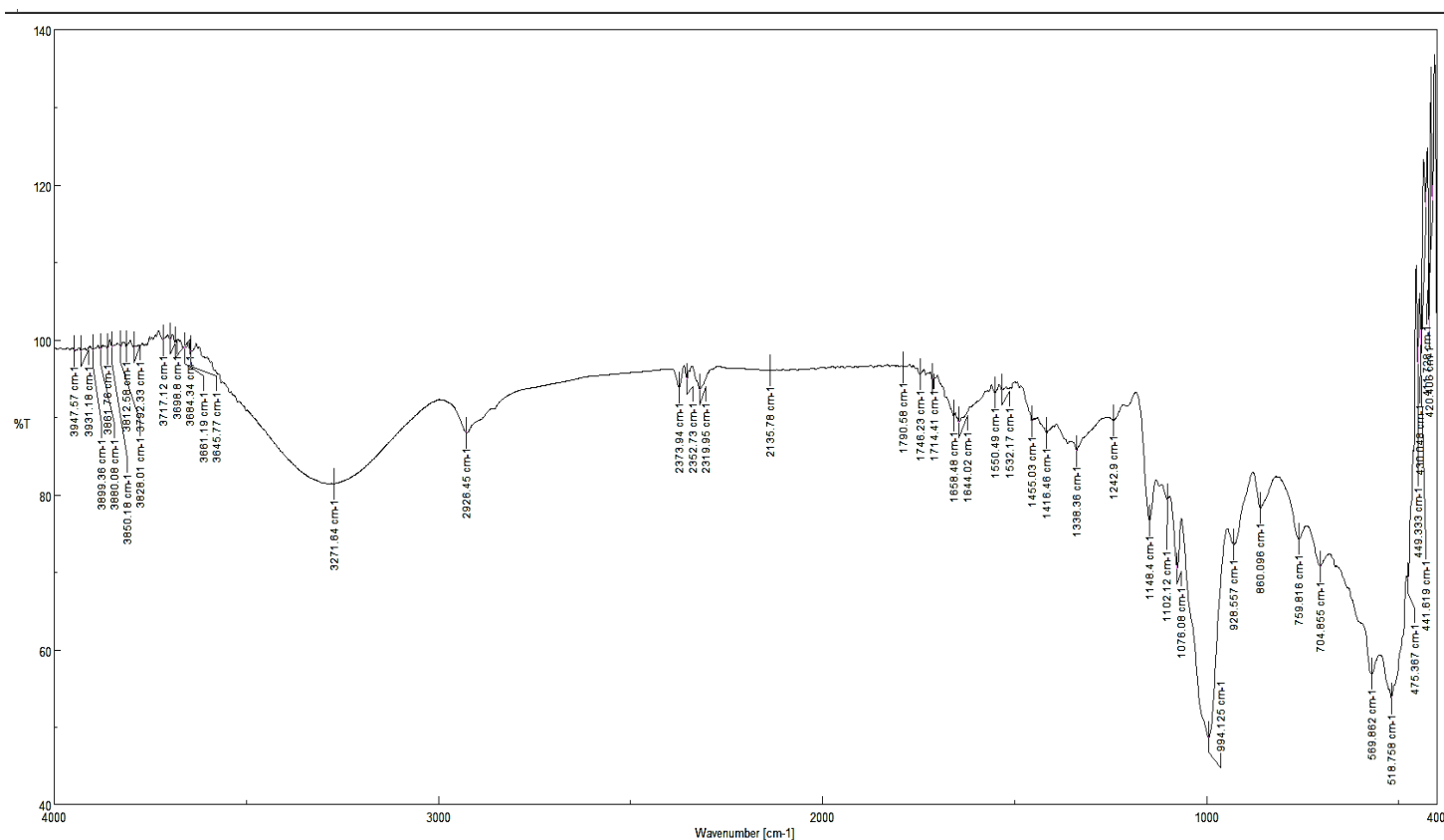


Figure III.12 : Résultats de spectroscopie infrarouge d'amidon extrait selon la méthode 1 (sans agitation).

Tableau III.17 : Attribution des principales bandes observées sur le spectre IR d'amidon extrait selon la méthode 1.

N°	Bande observée (cm ⁻¹)	Attribution	Interprétation
1	~3271–3645	O–H (élongation)	Groupe hydroxyles de l'amidon
2	~2926	C–H (élongation)	Groupe méthyles des unités de glucose
3	~1741–1684	H–O–H (eau liée) / C=O	Présence d'eau résiduelle ou d'impuretés
4	~1455–1242	C–H, C–O (déformations)	Liens C–H et C–O–H du squelette glucosidique
5	~1144, 1070, 1010, 994	C–O–C et C–O–H	Liaisons typiques de polysaccharides (amidon)
6	~860, 800, 760, 704	Déformations secondaires	Structure amorphe, traces de cristallinité
7	~590–445	Vibrations squelette (C–C, C–O)	Mouvement de base du squelette amidonique

Une comparaison entre le spectre IR d'amidon extrait selon la méthode 1 avec le spectre de l'amidon natif (Tableau III.16) est également intégrée afin de mettre en évidence d'éventuelles différences structurelles ou la présence d'impuretés dans le Tableau (III.19) ci-dessous.

Tableau (III.18) : Comparaison des spectres IR (Amidon natif et amidon extrait selon la méthode 1)

Région (cm ⁻¹)	Amidon natif	Amidon extrait selon la méthode 1	Observation
~3300 (O–H)	✓ Présente	✓ Présente	Bande large, correcte
~2925 (C–H)	✓ Présente	✓ Présente	Stable
~1740–1650 (H–O–H)	✓ Présente	✓ Plus marquée	Forte apparition du pic relatif à la présence de l'eau résiduelle ou impuretés
~1450–1000 (C–O–C)	✓ Présente	✓ Mais moins définie	Une légère apparition du pic moins net, signe de pureté moindre
<800 (structure)	✓ Présente	✓ Présente	Bande légèrement moins structurée
Bruit de fond / ligne	Propre	Léger bruit	Présence probable d'impuretés

L'examen de ces résultats montre les phénomènes suivants :

- L'amidon extrait selon la méthode 1 (sans agitation) présente un spectre globalement reconnaissable comme de l'amidon, avec les bandes caractéristiques bien présentes.

- La bande d'eau ($\sim 1650\text{ cm}^{-1}$) est plus intense, indiquant une plus grande quantité d'humidité.

- La bande C–O–C est moins nette, ce qui peut indiquer la présence de résidus ou d'une structure moins bien isolée.

- Plus de bruit dans les zones basses, ce qui suggère la présence de matières non éliminées.

Les résultats de l'analyse IRTF de l'amidon extrait selon la méthode 2 (avec agitation) sont présentés sous forme de spectre infrarouge (Figure III.13), accompagné d'un tableau (III.20) d'attribution des bandes caractéristiques.

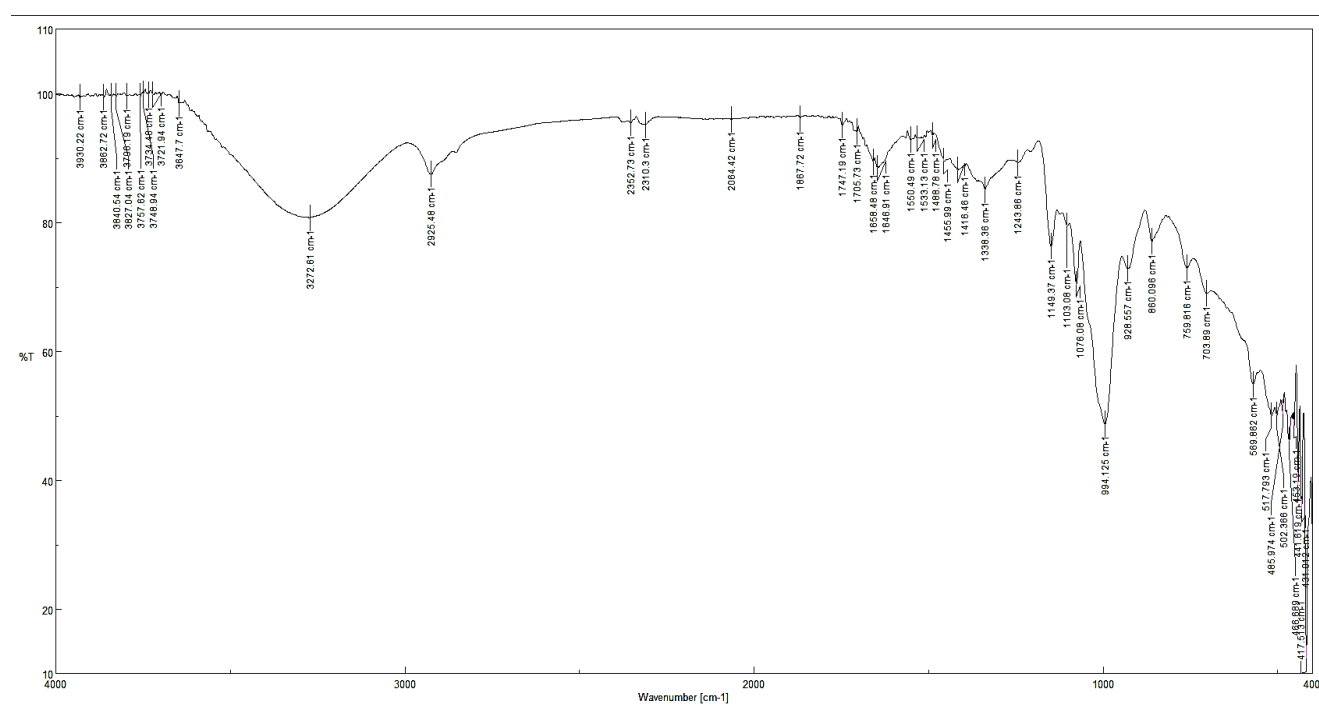


Figure III.13 : Résultats de spectroscopie infrarouge d'amidon extrait selon la méthode 2 (avec agitation).

Tableau III.19 : Attribution des principales bandes observées sur le spectre IR d'amidon extrait selon la méthode 2.

N°	Bande observée (cm ⁻¹)	Attribution	Interprétation
1	~3722–3300	O–H (élongation)	Groupe hydroxyles de l'amidon
2	~2925	C–H (élongation)	Chaînes aliphatique (glucose)
3	~1658–1747	H–O–H (eau adsorbée) / C=O	Eau résiduelle ou impuretés faibles
4	~1455–1242	C–H, C–O, déformation	Groupe méthyles / liaisons C–O–H
5	~1076, 1010, 994	C–O–C, C–O–H	Liaisons glucosidiques du polysaccharide
6	~860, 760, 703	Modes de déformation secondaires	Structure amorphe de l'amidon
7	~580–450	Vibrations de squelette (C–C, C–O)	Mouvements internes du polymère

Le spectre de l'amidon natif cité dans la littérature et celui de l'amidon extrait selon les deux méthodes sont comparés. Cette comparaison permet de mettre en évidence d'éventuelles différences structurales. Ces éléments sont représentés dans le Tableau (III.21) ci-dessous.

Tableau III.20 : Comparaison des spectres IR de différents types d'amidon.

Région	Amidon natif	Amidon extrait selon la méthode 2	Amidon extrait selon la méthode 2
~3300 O–H	✓ Forte	✓ Présente	✓ Présente
~2925 C–H	✓ Absente ?	✓	✓
~1650 eau	✓	✓ Fort	✓ Plus faible
~1000–1150 C–O–C	✓	✓	✓ Plus nette
<800 (déformations)	✓	✓	✓ Plus définies
Bruit de fond bas	✓	Moyen	✓ Très propre

L'examen de ces résultats montre les phénomènes suivants :

L'amidon ayant subi une agitation lors de son extraction montre un spectre plus net et mieux défini, avec des pics plus marqués et moins de bruit, surtout dans la zone 1000–400 cm⁻¹.

L'intensité plus faible du pic à $\sim 1640\text{ cm}^{-1}$ suggère que l'agitation a permis de réduire l'humidité ou d'extraire un amidon de meilleure qualité.

Les pics dans la zone $1000\text{-}500\text{ cm}^{-1}$ sont plus prononcés, ce qui indique une meilleure organisation structurale ou un retrait plus efficace des impuretés résiduelles.

L'agitation améliore significativement la pureté et la structure de l'amidon extrait. Le spectre IR de l'échantillon avec agitation est plus proche de celui de l'amidon natif, ce qui confirme l'efficacité de cette méthode d'extraction.

L'amidon extrait sans agitation contient bien les fonctions caractéristiques de l'amidon, mais présente des signes d'humidité résiduelle, une structure moins pure et une légère contamination. Ces résultats montrent que l'agitation améliore la qualité d'extraction en favorisant une séparation plus efficace et une structure plus proche de l'amidon natif.

b) Cellulose

Les résultats de la spectroscopie infrarouge sont présentés sous forme de spectres comparatifs entre la cellulose citée dans la littérature (Figure III.14) et la cellulose extraite des coques d'arachide dans notre étude (Figure III.15).

Pour faciliter l'interprétation, nous avons répertorié les bandes principales observées dans chaque spectre dans un tableau d'attribution (Tableau III.20) et dans un autre tableau (III.21). Nous avons ensuite établi un tableau comparatif entre les deux échantillons (Tableau III.22).

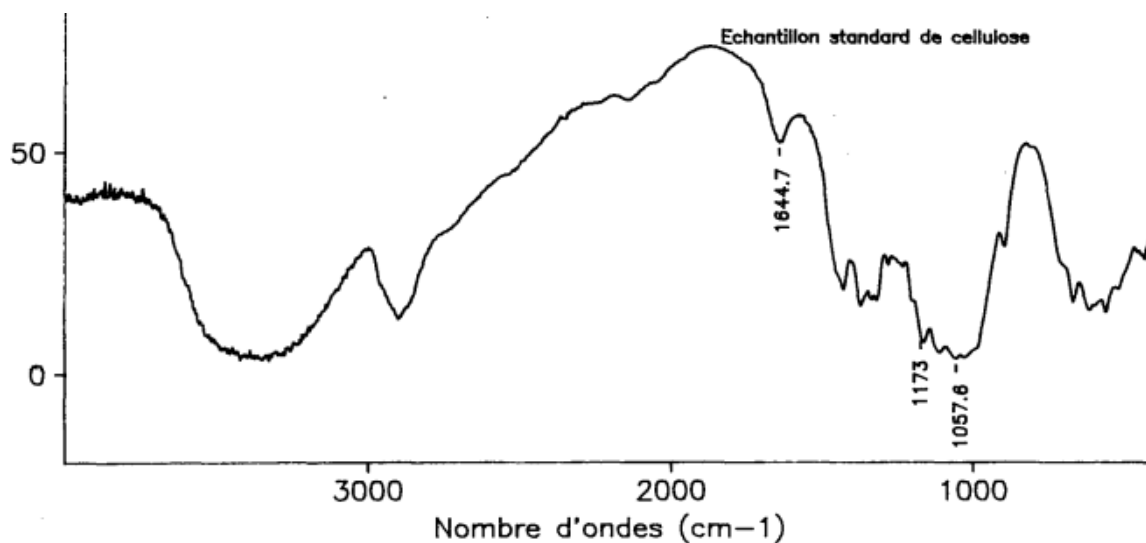


Figure III.14 : Résultats de spectroscopie infrarouge de la cellulose citée dans la littérature

Tableau III.20 : Résultats de l'analyse des bandes IRFT de la cellulose citée dans la littérature

N°	Bande observée (cm ⁻¹)	Attribution vibrationnelle	Interprétation
1	~3340 (non visible sur graphe mais habituel)	O–H (élongation)	Vibration de la fonction hydroxyle – typique de la cellulose
2	~2900	C–H (élongation)	Présence des chaînes méthylènes CH ₂
3	1644.7	H–O–H (eau liée)	Traces d’humidité – bande fréquente dans les polysaccharides
4	1173	C–O–C (élongation)	Ponts éther – squelette de la cellulose
5	1057.6	C–O–H (élongation)	Groupes alcools secondaires – structure glucosidique

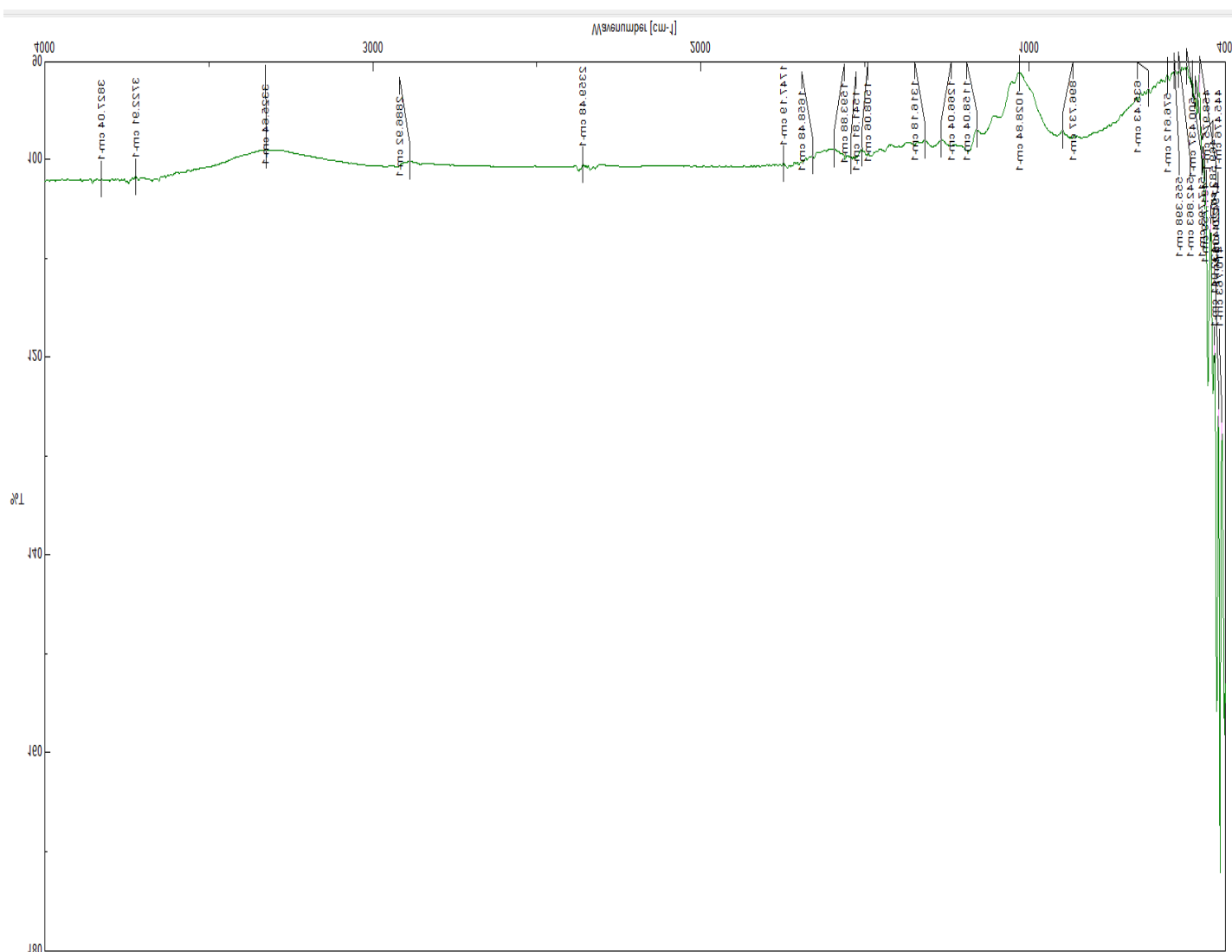


Figure III.15 : Spectre IRTF de la cellulose extraite des coques d’arachide.

Tableau III.21 : Attribution des principales bandes observées dans les spectres IR de différents types de la cellulose.

Tableau III.22 : Interprétation des spectres IR de la cellulose extraite de coques d'arachide.

Région spectrale (cm ⁻¹)	Cellulose citée dans la littérature	Cellulose extraite (arachide)	Observation
~3300 (O–H)	✓ Bande large et intense	✓ Présente également, un peu décalée	↔ confirmation de la présence des groupements hydroxyle
~2900 (C–H)	✓ Présente	✓ Présente	↔ Bon maintien des chaînes aliphatiques
~1740–1650 (C=O ou H–O–H)	✓ Faible	✓ Plus marquée	↗ Traces d'eau ou impuretés carbonylées
~1450–1200 (C–O / C–H)	✓ Net	✓ Légèrement moins intense	↘ Pureté légèrement réduite
~1100–1000 (C–O–C)	✓ Bien défini	✓ Présent mais moins net	↘ Liaisons conservées mais structure légèrement moins ordonnée
<800 (C–C / vibrations)	✓ Présent	✓ Présent	↔ Profil similaire (structure conservée)

N°	Bande observée (cm ⁻¹)	Attribution vibrationnelle	Interprétation chimique
1	~3270–3340	O–H (élongation)	Groupe hydroxyles des chaînes celluloses
2	~2900–2925	C–H (élongation)	Chaînes aliphatiques (CH ₂ / CH ₃)
3	~1740–1650	C=O ou H–O–H (eau liée)	Présence d'humidité ou de groupements carbonyles (impuretés éventuelles)
4	~1450–1200	C–H / C–O (déformations)	Squelette glucosidique, déformations angulaires
5	~1150–1000	C–O–C et C–O–H	Liaisons éther et alcools secondaires typiques de polysaccharides
6	~800–500	Vibrations du squelette C–C	Structure amorphe / semi-cristalline de la cellulose

Le spectre FTIR de la cellulose extraite de coques d'arachide présente les principales bandes caractéristiques de la cellulose native. Cela confirme la présence des groupements hydroxyles (O–H), des chaînes glucosidiques (C–O–C) et autres vibrations du squelette. La présence accrue de bandes autour de 1740–1650 cm⁻¹ pourrait indiquer de l'humidité résiduelle ou quelques impuretés, mais dans l'ensemble, la structure est bien conservée. L'extraction a donc été globalement efficace. La cellulose est de bonne qualité. Elle est cependant légèrement moins pure que l'échantillon de la cellulose citée dans la littérature.

c) Bioplastiques

Dans le but de caractériser la structure chimique des bioplastiques élaborés, nous avons réalisé une analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRFT). Les spectres IRFT de deux échantillons (bioplastique Type 1 et bioplastique Type 2) présentent les bandes d'absorption caractéristiques suivantes, comme le montrent les tableaux et les figures ci-dessous.

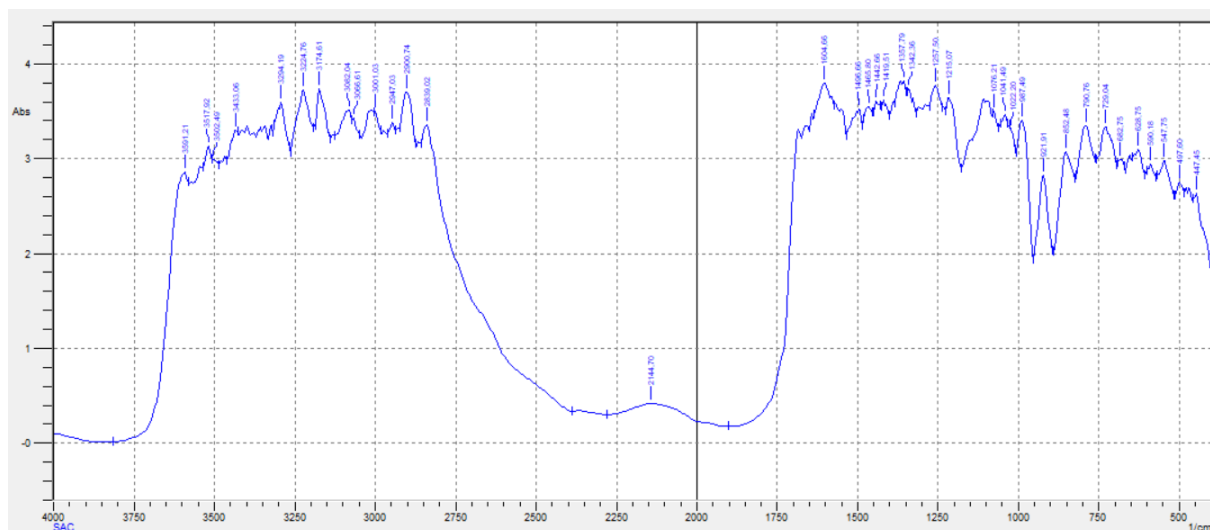


Figure III.16 : Bandes caractéristiques du bioplastique Type 1.

Tableau III.23 : Attribution des groupements de bioplastique Type 1.

Plage (cm^{-1})	Attribution	Intensité / Observation
3600–3200	$\nu(\text{O-H})$: groupements hydroxyles	Présente (modérée)
2920–2850	$\nu(\text{C-H})$: liaisons aliphatiques (CH_3 , CH_2)	Présente
1740–1720	$\nu(\text{C=O})$: esters, acides carboxyliques	Modérée
1650–1550	$\delta(\text{N-H})$ ou $\nu(\text{C=C})$ aromatique ou peptidique	Faible à moyenne
1200–900	$\nu(\text{C-O})$, C-O-C : polysaccharides, cellulose	Présente
600–450	Vibrations hors plan	Présente

Figure III.17 : Bandes caractéristiques du bioplastique Type 2.

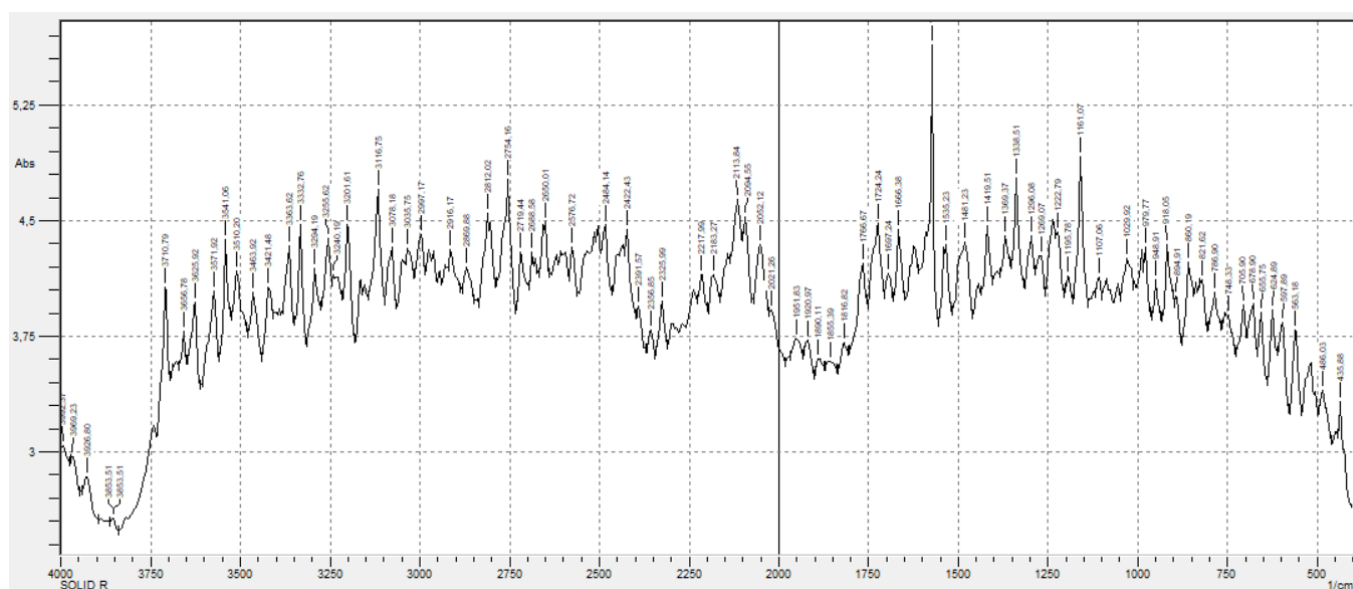


Tableau III.24 : Attribution des groupements de bioplastique Type 2.

Plage (cm^{-1})	Attribution	Intensité / Observation
3600–3200	$\nu(\text{O-H})$: groupements hydroxyles	Très marquée (forte teneur en –OH)
2920–2850	$\nu(\text{C-H})$: liaisons aliphatiques (CH_3 , CH_2)	Plus nette et intense
1740–1720	$\nu(\text{C=O})$: esters, acides carboxyliques	Marquée
1650–1550	$\delta(\text{N-H})$ ou $\nu(\text{C=C})$ aromatique ou peptidique	Forte (protéines probables)
1200–900	$\nu(\text{C-O})$, C-O-C : polysaccharides, cellulose	Très présente, structurée
600–450	Vibrations hors plan	Présente

III.5. Résultats de test d'élasticité des bioplastiques

La Figure (III.18) illustre l'aspect visuel du bioplastique de type 1 (sac d'emballage) avant et après le test d'élasticité réalisé à la température ambiante et à la température de 70°C.

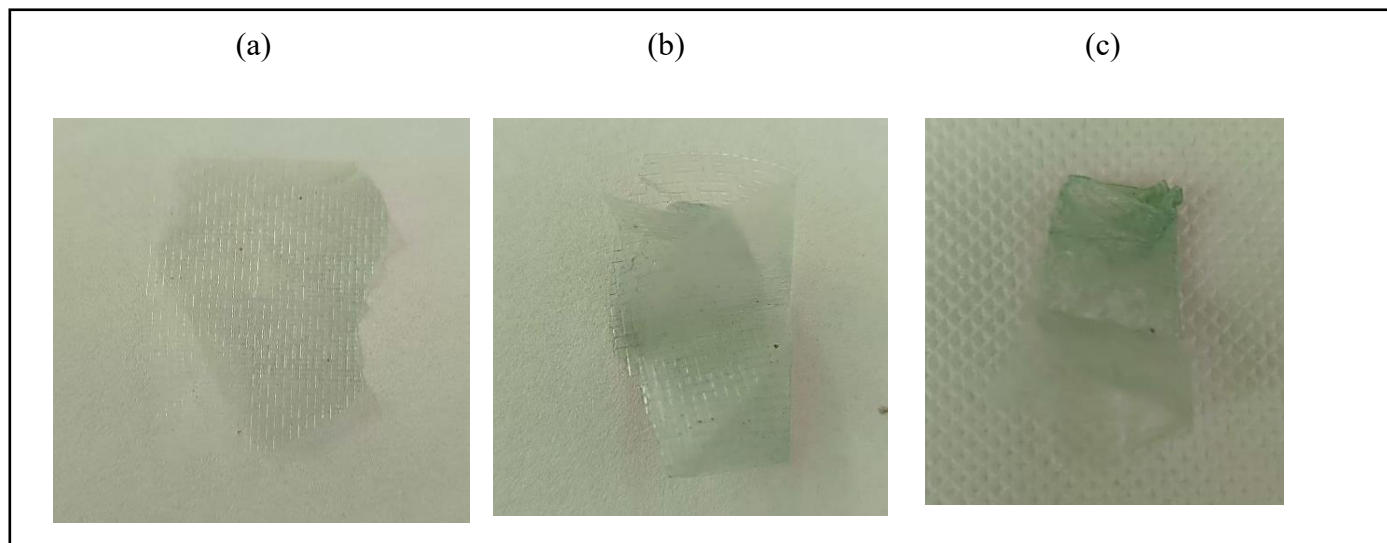


Figure III.18 : Photos montrant l'état visuel de bioplastique Type 1 avant et après le test d'élasticité

- a) : échantillon de bioplastique Type 1 à l'état initial
- b) : bioplastique Type 1 après le test d'élasticité à température ambiante
- c) : bioplastique Type 1 après le test d'élasticité à 70°C

Le tableau (III.25) ci-dessous présente les résultats du test d'élasticité ainsi que leur interprétation.

Tableau III.25 : Résultats du test d'élasticité et Interprétation du bioplastique Type 1.

Température	Observation mécanique détaillée	Revient à la forme initiale	Casse	Interprétation technique
25°C (température ambiante)	Le plastique se plie sans casser . Il reste légèrement déformé , ne reprend pas complètement sa forme initiale. Résistance correcte à la flexion.	Non totalement (partiel)	Non	Le bioplastique est flexible, plastique , mais peu élastique . Il résiste au pliage mais garde une mémoire de déformation → structure semi-rigide.
70°C (chauffé 5–10 min)	Le plastique devient plus rigide , se plie moins facilement , reste déformé après pliage, et peut casser s'il est trop plié.	Non	Oui	Le matériau a perdu sa souplesse . Il devient cassant sous l'effet de la chaleur. Il ne se ramollit pas : comportement thermodurcissable ou réticulé .

III.6. Résultats de test de taux de biodégradation

Les résultats de l'évolution de la masse des deux types d'échantillons (bioplastique Type 1 et 2) à différents intervalles de temps (en jours), ainsi que leur pourcentage de dégradation sont présentés dans les (Tableau (III.26) et Tableau (III.27), respectivement.

Tableau III.26 : Evolution de la masse (g) en fonction de jours.

Durée (jours)	Bioplastique Type 2 (g)	Bioplastique Type 1 (g)
Jour 0	0.1602	0.0755
Jour 5	0.1457	0.0621
Jour 10	0.1202	0.0000 (<i>disparu</i>)

Tableau III.27 : Pourcentage de dégradation de deux types de bioplastique.

Échantillon	J+5 (% perte)	J+10 (% perte)
Bioplastique Type 2	9.06	25.01
Bioplastique Type 1	17.78	100.00

L'examen de ces résultats met en évidence les phénomènes suivants :

- Le bioplastique Type 1 « sac d'emballage » présente une biodégradabilité remarquable : il se décompose complètement après seulement 10 jours, ce qui le rend idéal pour des applications à usage unique ou à courte durée de vie, notamment pour l'emballage alimentaire biodégradable.

- Le bioplastique Type 1 « solide » montre une dégradation progressive, avec une perte de masse de 9,06 % à J+5 et 25,01 % à J+10, ce qui confirme sa plus grande résistance à la biodégradation. Cela est cohérent avec sa densité supérieure et la présence de cellulose, qui se dégrade moins rapidement que la gélatine ou l'amidon.

Conclusion générale

L'objectif de cette étude, qui visait à élaborer une nouvelle classe de bioplastiques à base de polymères naturels contenus dans les déchets alimentaires, tels que l'amidon et la cellulose, est jugé atteint et très satisfaisant.

Les bioplastiques obtenus à partir de mélanges formulés à base d'amidon de blé et de cellulose issue des coques d'arachide ont montré des propriétés intéressantes sur les plans mécanique et structurel, ce qui confirme leur potentiel pour des applications biodégradables et durables.

Les analyses physico-chimiques, notamment par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF), ont permis d'évaluer les caractéristiques structurales et fonctionnelles des bioplastiques élaborés. Les résultats obtenus mettent en évidence une bonne cohésion de la matrice, une stabilité chimique et une biodégradabilité satisfaisante.

À partir des résultats de caractérisation obtenus, nous pouvons avancer les conclusions suivantes :

- Les analyses IR ont confirmé la présence de fonctions caractéristiques des polymères naturels (cellulose et amidon), qui se sont conservées après les étapes de transformation menant à la fabrication de bioplastiques.
- Les bioplastiques formulés présentent une homogénéité structurelle qui leur permet d'être utilisés pour les transformations par moulage.
- Le taux d'absorption d'eau et la biodégradabilité en conditions naturelles sont compatibles avec une utilisation comme matériaux compostables.

La valorisation des déchets alimentaires dans la production de bioplastiques écologiques est une perspective qui s'ouvre grâce à ce travail. Cela permet de réduire la charge environnementale des déchets organiques, mais aussi la dépendance aux plastiques issus du pétrole.

Références Bibliographiques

1. Damien A, 2013. Guide de traitement des déchets : Réglementation et choix des procédés 6 ème édition. Edition Dunod, Paris France, pp 461.)
2. Characterization and optimization studies of cellulose-based bioplastics extracted from *Musa paradisiaca* L. - Global NEST Journal
3. Synthesis of Bioplastic-Based Renewable Cellulose Acetate from Teak Wood (*Tectona grandis*) Biowaste Using Glycerol-Chitosan Plasticizer - Oriental Journal of Chemistry
4. Synthesis of Bioplastic-Based Renewable Cellulose Acetate from Teak Wood (*Tectona grandis*) Biowaste Using Glycerol-Chitosan Plasticizer - Oriental Journal of Chemistry
5. kamzari, Sana & Lakkimsetty, Nageswara Rao & Lakavat, Motilal & Suman, Gandhi & Parne, Saidi & Sri, G.. (2021). Extraction and characterization of cellulose from agricultural waste materials.
6. R. Smith, R. Biodegradable Polymers for Industrial Applications. Cambridge: Woodhead Publishing, 2005.
7. Synthesis of Bioplastic-Based Renewable Cellulose Acetate from Teak Wood (*Tectona grandis*) Biowaste Using Glycerol-Chitosan Plasticizer - Oriental Journal of Chemistry
8. Longo, A., Fanelli, F., Villano, M., Montemurro, M., & Rizzello, C. G. (2024). Bioplastic Production from Agri-Food Waste through the Use of *Haloferax mediterranei*: A Comprehensive Initial Overview.
9. Bioplastics Market Forecast 2014 2024, Prospects for Bio-based/NonBiodegradable Packaging, Consumer Electronics Products, Catering, Agriculture & Pharmaceuticals, 2014.
10. Bigi, F., Maurizzi, E., Haghighi, H., Siesler, H. W., Licciardello, F., & Pulvirenti, A. (2023). Waste Orange Peels as a Source of Cellulose Nanocrystals and Their Use for the Development of Nanocomposite Films.
11. Yurchenko, Angelina & Golub, Nataliia & Zhu, Ying. (2019). Lignin as the Basis for Obtaining Bioplastics. Innovative Biosystems and Bioengineering. 3. 185-197. 10.20535/ibb.2019.3.3.173421.
12. Nascimento, Rosa & Carnevalheira, Mónica & Crespo, Joao & Neves, Luisa. (2023). Extraction and Characterization of Cellulose Obtained from Banana Plant Pseudostem. Clean Technologies. 5. 1028-1043. 10.3390/cleantechnol5030052.
13. Kavlock, R. J., Daston, G. P., DeRosa, C., Fenner-Crisp, P., Gray, L. E., Kaattari, S., ... & Tilson, H. A. (1996). Research needs for the risk assessment of health and

- environmental effects of endocrine disruptors: a report of the US EPA-sponsored workshop. *Environmental health perspectives*, 104(suppl 4), 715-740.
14. Musioł M, Sikorska W, Adamus G et al (2016) Forensic engineering of advanced polymeric materials Part III- Biodegradation of thermoformed rigid PLA packaging under industrial composting conditions. *Waste Manag* 52:69–76.
 15. Khosravani MR, Nasiri S (2020) Injection molding manufacturing process: review of case based reasoning applications.
 16. Jiménez-Rosado M, Perez-Puyana V, Cordobés F et al (2019b) Development of superabsorbent soy protein-based bioplastic matrices with incorporated zinc for horticulture. *J Sci Food Agric* 99:4825.
 17. Rahmani M, Faridi-Majidi R, Khani M-M et al (2020) Cross-linked PMS/PLA nanofibers with
 18. tunable mechanical properties and degradation rate for biomedical applications. *Eur Polym J*
 19. 130:109633.
 20. Yu, L. « Biodegradable Polymers Blends and Composites from Renewable Ressources ». New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 487p, 2009.
 21. Rabetafika, H. N., Paquot, M ; Dubois, P. Les polymères issus du végétal : matériaux à propriétés spécifiques pour des applications ciblées en industrie plastique. *Biotechnologie, agronomie, société et environnement*, 10 (3),(2006).page 186.
 22. Lapointe, R. Bioplastiques biodégradables, compostables et biosourcés pour les emballages alimentaires, distinctions subtiles mais significatives (Doctoral dissertation Université Sherbrooke.). (2012). PP: 13-27
 23. Véronique. Van Hoof ; Theo Geerken .Bioplastiques : définitions, normes, possibilités d'application, impact sur l'environnement,(2012).page 21.
 24. Maamri Salima , Haga Aicha ,Etude structural de bioplastique fabriqué à partir de pomme de terre {FTIR -RDX }, Thèse , Université Echahid Hamma Lakhdar EL - OUED , 16 15 -PP: , 2022
 25. Lever les ambiguïtés qui entourent les bioplastiques, Fiche méthodologique du Collège d'Entreprises BeMed - Janvier 2022
 26. <https://objectif-green.fr/article/pla-cpla-quelle-est-la-reglementation>

27. Magnus Jern, Normes européennes pour les produits biodégradables et compostables, 30 avril 2020 : <https://tappwater.co/fr/blogs/bloguer/normes-europeennes-pour-les-produits-biodegradables-et-compostables>
28. Réglementation Les bioplastiques sont réglementés par diverses certifications et par le respect de normes mondiales. Natur-Tec : <https://fr.naturtec.com/reglementation/>
29. <https://fr.naturtec.com/reglementation/>
30. Brzyski P, Barnat-Hunek D, Fic S, Szeląg M (2017) Hydrophobization of lime composites with lignocellulosic raw materials from flax. *J Nat Fibers* 14(5):609–620.
31. Sabbagh F, Muhamad II (2017) Production of poly-hydroxyalkanoate as secondary metabolite with main focus on sustainable energy. *Renew Sust Energ Rev* 72:95–104
32. Serafim LS, Lemos PC, Albuquerque MGE, Reis MAM (2008) Strategies for PHA production by mixed cultures and renewable waste materials. *Appl Microbiol Biotechnol* 81:615–628
33. BMEL(Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2016) Processing of bioplastics-a guideline. HANNOPRINT GmbH, Hannover.
34. Kumar M, Rathour R, Singh R, Sun Y, Pandey A, Gnansounou E, Lin KYA, Tsang DCW, Thakur IS (2020) Bacterial polyhydroxyalkanoates: opportunities, challenges, and prospects. *J Clean Prod* 263:121500
35. Cinelli P, Seggiani M, Mallegni N et al (2019) Processability and degradability of PHA-based composites in terrestrial environments.
36. Seo J-H, Han J, Lee KS et al (2012) Combined effects of chemical and microcellular foaming on foaming characteristics of PLA (poly lactic acid) in injection molding process.
37. Saberi B, Golding JB, Marques JR et al (2018) Application of biocomposite edible coatings based on pea starch and guar gum on quality, storability and shelf life of “Valencia” oranges.
38. Dakiri, Walid & Mechoukhi, Abdelmounim. (2024). Microscopie Electronique à Balayage (MEB) Scanning Electronic Microscopy (SEM) Technique d'élaboration et de Caractérisation.
39. Mechoukhi, Abdelmounim & Dakiri, Walid. (2025). Caractérisation par Diffraction des Rayons X – Characterization by X-ray Diffraction (XRD).
40. L. Sun, H. W. Wang, M. C. Chang, M. S. Lin, S. Y. Chen, *Materials Chemistry and Physics* (2003)

41. Li, X., Shen, A. et Xu, Z. (2008). Report on some shrimps from Dongtou Island, Zhejiang, China (Decapoda, Natantia). Crustaceana
42. 1 Zaidi, Nariman & Boudjema, Bezzazi & Hamma, ZEDIRA & Mohammed Amin, Benbouras. (2017). Analyse Thermogravimétriques et Thermo-Différentielles (ATG/ATD) d'un Béton Ordinaire à Base d'un Ciment Résistant Aux Sulfates dans un Milieu Agressif.
43. 1 Ghanbari, Elmira & Picken, Stephen J. & van Esch, Jan. (2023). Analysis of differential scanning calorimetry (DSC): determining the transition temperatures, and enthalpy and heat capacity changes in multicomponent systems by analytical model fitting. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 148. 10.1007/s10973-023-12356-1.
44. Zaidi, Nariman & Boudjema, Bezzazi & Hamma, ZEDIRA & Mohammed Amin, Benbouras. (2017). Analyse Thermogravimétriques et Thermo-Différentielles (ATG/ATD) d'un Béton Ordinaire à Base d'un Ciment Résistant Aux Sulfates dans un Milieu Agressif.
45. Hossain, A.B.M. Sharif & Ibrahim, Nasir & Aleissa, Mohammed. (2016). Nano-Cellulose Derived Bioplastic Biomaterial Data for Vehicle Bio-Bumper from Banana Peel Waste Biomass. Data in Brief. 8. 10.1016/j.dib.2016.05.029.
46. Hossain, A.B.M. Sharif & Ibrahim, Nasir & Aleissa, Mohammed. (2016). Nano-Cellulose Derived Bioplastic Biomaterial Data for Vehicle Bio-Bumper from Banana Peel Waste Biomass. Data in Brief. 8. 10.1016/j.dib.2016.05.029.
47. Addiego, Frédéric. (2006). Caractérisation de la variation volumique du polyéthylène au cours de la deformation plastique en traction et en fluage :.
48. B. Redjel, F. de Charentenay. RÉSISTANCE AU CHOC DES MATÉRIAUX COMPOSITES SMC À BASE DE RÉSINE PHÉNOLIQUE. Journal de Physique IV Proceedings, 1991, 01 (C3), pp.C3 297-C3-304. 10.1051/jp4:1991342. jpa-00250485
49. Ng, J. S., Kiew, P. L., Lam, M. K., Yeoh, W. M., & Ho, M. Y. (2022). Preliminary evaluation of the properties and biodegradability of glycerol-and sorbitol-plasticized potato-based bioplastics. International journal of environmental science and technology
50. Ng, J. S., Kiew, P. L., Lam, M. K., Yeoh, W. M., & Ho, M. Y. (2022). Preliminary evaluation of the properties and biodegradability of glycerol-and sorbitol-plasticized potato-based bioplastics. International journal of environmental science and technology