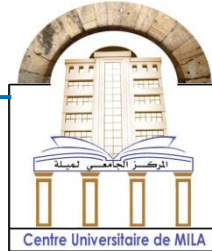


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



N°Ref :.....

Centre Universitaire Abdelhafid BOUSSOUF- Mila

Institut des Sciences de la Nature et de la Vie

Département d'Ecologie et de l'Environnement

Mémoire préparé en vue de l'obtention du diplôme de

Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : écologie et environnement

Spécialité : Protection des écosystèmes

Thème :

Production de Bioplastique

Présenté par :

BOURAOU IBRAHIM EL KHALIL

Devant le jury :

– BOUZEGAG Abdelaziz	Président	MCA	Centre Universitaire de Mila
– MOUHOUB Ibrahim	Examineur	MCB	Centre Universitaire de Mila
– TABET Slimane	Promoteur	MAA	Centre Universitaire de Mila

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciements

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier Allah, le Tout-Puissant, de m'avoir accordé la force, la patience et la guidance nécessaires pour mener à bien ce travail de recherche.

Mes sincères remerciements s'adressent tout particulièrement à mon encadreur, Dr. TABET Slimane, pour son encadrement rigoureux, ses conseils éclairés et sa disponibilité constante tout au long de l'élaboration de ce mémoire, sa expertise scientifique et ses orientations méthodologiques ayant été déterminantes dans la réussite de cette recherche.

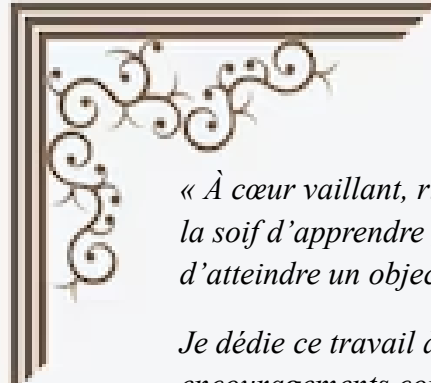
J'exprime ma profonde gratitude aux honorables membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail : Dr. BOUZEGAG Abdelaziz, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de ce mémoire, et Dr. MOUHOUB Ibrahim, pour avoir accepté d'examiner ce travail et d'apporter son expertise à son évaluation.

Je tiens également à remercier Dr. REBBAH Abderraouf Chouaib, Chef du Département d'Écologie et de l'Environnement, pour son soutien administratif, sa disponibilité et son dévouement envers les étudiants du département. Mes remerciements vont aussi aux responsables de l'établissement qui contribuent quotidiennement à offrir un environnement d'apprentissage de qualité, ainsi qu'à l'ensemble du corps professoral du Département d'Écologie et de l'Environnement du Centre Universitaire Abdelhafid BOUSSOUF - Mila, qui ont contribué à ma formation académique par la richesse de leurs enseignements et leur engagement pédagogique.

Ma reconnaissance s'étend à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail de recherche, notamment les personnels techniques et administratifs pour leur coopération, mes collègues étudiants pour les échanges constructifs et l'entraide mutuelle, et toute personne ayant apporté son aide, ses conseils ou son soutien durant cette période de recherche.

Enfin, je ne saurais conclure sans exprimer ma profonde gratitude envers ma famille et mes proches pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements constants et leur patience tout au long de ce parcours académique, que toutes ces personnes trouvent ici l'expression de ma sincère reconnaissance et de mes remerciements les plus chaleureux.

Dédicaces



« À cœur vaillant, rien n'est impossible. À conscience tranquille, tout est accessible. Quand la soif d'apprendre guide nos efforts, tout vient à point à qui sait attendre. Quand le désir d'atteindre un objectif nous anime, les difficultés s'effacent et la réussite devient possible. »

Je dédie ce travail à ma famille et à mes proches, dont le soutien indéfectible et les encouragements constants ont été les piliers de ma persévérance et de ma motivation au cours de ce long parcours académique.

À mes frères et sœurs

Takoua, dont la gentillesse et la présence chaleureuse éclairent mes journées.

Oulfa, dont la détermination et la patience m'inspirent à donner le meilleur de moi-même.

Doursaf, pour son écoute attentive et ses conseils sincères.

Azza, pour son enthousiasme contagieux et son optimisme inébranlable.

Mouatez, pour sa créativité et son sens de l'humour qui allègent les moments de tension.

À mes parents

Mon père, dont la rigueur et l'exemple m'ont enseigné la valeur du travail et de la persévérance.

Ma mère, dont la tendresse et la sagesse m'ont guidé à chaque étape et dont les sacrifices ont rendu cette réussite possible.

Que Dieu vous protège et vous accorde santé, bonheur et sérénité pour les années à venir.

À mes amis

Raid et Ayoub, pour leur soutien moral, les échanges constructifs et les moments de détente partagés après des journées de labeur.

À ma famille élargie

Mes cousins Iyad et Ismail, ma cousine Daya et Amine, Ayhem, Aïssa et Amine, pour leurs encouragements enthousiastes et leur fierté communicative.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce projet, en offrant leur aide, leurs compétences ou leur amitié : personnels techniques et administratifs, enseignants, collègues étudiants et bien d'autres encore. Votre soutien a été essentiel et je vous en serai éternellement reconnaissant.

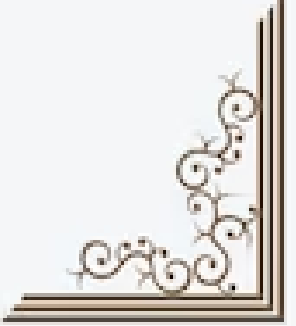


Table des matières

Table des matières

Titre	Page
Remerciements	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des photos	
Liste des abréviations	
Introduction	
Chapitre I : Généralités sur les bioplastiques	
Introduction	4
1. Définitions et terminologie	5
1.1. Biosourcé	5
1.2. Biodégradable	6
1.3. Compostable	6
1.4. Distinctions cruciales	7
2. Classification des bioplastiques	7
2.1. Bioplastiques biosourcés non biodégradables	8
2.2. Bioplastiques biosourcés et biodégradables	9
2.3. Bioplastiques fossiles et biodégradables	9
2.4. Classification complémentaire : mécanismes de biodégradation	10
2.5. Enjeux et limites des classifications	11
3. Avantages et inconvénients des bioplastiques	11
3.1. Avantages des bioplastiques	11
3.2. Inconvénients	12
3.3. Synthèse critique	12
4. Applications actuelles des bioplastiques	12
4.1. Emballage	13
4.2. Médical	13
4.3. Agriculture	14
4.4. Automobile	14
4.5. Textile	15
4.6. Électronique	15
4.7. Biens de consommation	15

4.8. Construction	16
Chapitre II : L'amidon comme matière première pour bioplastique	
Introduction	18
1. Sources d'amidon	19
1.1. Pomme de terre	19
1.2. Pain blanc	19
1.3. Autres sources végétales	20
2. Comparaison des sources	21
3. Enjeux de la sélection des sources	22
4. Structure chimique et propriétés de l'amidon	22
4.1. Amylose	23
4.2. Amylopectine	24
4.3. Cristallinité de l'amidon	24
4.4. Impact de la cristallinité sur les propriétés fonctionnelles	26
4.5. Modifications structurales	26
5. Plastification et transformation de l'amidon	26
5.1. Plastification de l'amidon	26
5.2. Transformation par extrusion réactive	28
5.3. Moulage par compression et coulage en solution	28
5.4. Innovations et défis	29
6. Types de bioplastiques à base d'amidon	29
6.1. Amidon thermoplastique (TPS)	29
6.2. Mélanges amidon-polyesters	30
6.3. Composites amidon-fibres naturelles	31
6.4. Amidons modifiés chimiquement	31
6.5. Mélanges amidon-alcool polyvinylique (PVA)	31
6.6. Comparaison des types	31
6.7. Défis et innovations futures	33
7. Applications des bioplastiques à base d'amidon	33
7.1. Emballage alimentaire	33
7.2. Agriculture	34
7.3. Médical et pharmaceutique	35
7.4. Automobile et industrie	35

7.5. Textile et électronique	35
7.6. Défis persistants et perspectives	36
Chapitre III : Valorisation des déchets agroalimentaires	
Introduction	38
1. Problématique des déchets alimentaires	39
2. Processus de transformation en bioplastiques	41
2.1. Prétraitement et extraction	41
2.2. Conversion biologique et chimique	41
2.3. Formulation et mise en forme	42
3. Intérêt de la valorisation en bioplastique	43
4. Travaux antérieurs sur l'utilisation de déchets	44
4.1. Pain blanc	44
4.2. Résidus de pomme de terre	45
4.3. Comparaison des approches	45
5. Défis persistants et perspectives	47
6. La bioraffinerie	48
Chapitre IV : Matériel et méthodes	
1. Présentation des matières premières	51
1.1. Pain blanc domestique	51
1.2. Résidus de pomme de terre ménagers	52
1.3. Justification du choix domestique	52
2. Prétraitement et extraction de l'amidon	52
2.1. Amidon issu du pain blanc	52
2.2. Amidon issu des résidus de pomme de terre	55
2.3. Comparaison des deux sources	57
3. Protocole de formulation des bioplastiques	58
4. Méthode de solution casting	70
5. Méthodes de caractérisation des films bioplastiques	71
5.1. Propriétés thermiques	71
5.2. Propriétés physico-chimiques	72
5.3. Test de biodégradabilité	72
Chapitre V : Résultats et discussion	
1. Résultats	75

1.1.synthèse et optimisation des formulations	75
1.1.1 Série A – Plastification au glycérol	76
1.1.2 Série B – Modification par NaOH	77
1.1.3 Série C – Addition d’HCl 0,1 M	78
1.1.4 Série D – Incorporation de gélatine	79
1.2. Analyse des propriétés des films obtenus	81
1.2.1. Propriétés thermiques	81
1.2.2. Propriétés physico-chimiques	81
1.2.2.1 Absorption d’eau	81
1.2.2.2. Solubilité partielle	82
1.2.3. Test de biodégradabilité	83
1.2.3.1 Analyse détaillée du test de biodégradabilité des films d’amidon	83
1.2.3.1.1. Principe du test et protocole expérimental	83
1.2.3.1.2. Calcul et évolution de la dégradabilité	83
1.2.3.1.3. Interprétation des résultats	85
1.2.3.1.4. Impact environnemental et perspectives	85
1.2.3.1.5. Comparaison avec les bioplastiques issus d’autres sources ou procédés	85
1.2.3.1.5.1. Propriétés mécaniques	85
1.2.3.1.5.2. Propriétés hydriques	86
1.2.3.1.5.3. Stabilité thermique	86
1.2.3.1.5.4. Biodégradabilité	87
2. Discussion	88
2.1. Plastification au glycérol	88
2.2. Modification alcaline par NaOH	88
2.3. Effet de l’acidification par HCl	89
2.4. Renforcement par gélatine et nano-argile	89
2.5. Propriétés thermiques et d’absorption d’eau	90
2.6. Biodégradabilité	90
2.7. Perspectives et innovations futures	90
Conclusion générale	93
Bibliographie	96

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Numéro	Titre du tableau	Page
Tableau 1	Comparaison des sources d'amidon	21
Tableau 2	Teneur en amylose et amylopectine des amidons de différentes sources	25
Tableau 3	Comparaison des types de bioplastiques à base d'amidon	32
Tableau 4	Comparaison des rendements, méthodes et applications des déchets valorisés	46
Tableau 5	Comparaison des rendements et puretés d'extraction de l'amidon	57
Tableau 6	Formulations de films d'amidon plastifiés au glycérol	61
Tableau 7	Formulations et observations des films amidon–glycérol modifiés par NaOH	63
Tableau 8	Formulations et observations des films d'amidon avec addition d'HCl	65
Tableau 9	Formulations et observations des films amidon–gélatine	67
Tableau 10	Formulations et observations (Série E, nano-argile)	69
Tableau 11	Formulations de films plastifiés au glycérol	75
Tableau 12	Films modifiés par NaOH	76
Tableau 13	Films avec HCl 0,1 M	78
Tableau 14	Films amidon–gélatine	79
Tableau 15	Films avec nano-argile	80
Tableau 16	Propriétés thermiques des films après étuvage à 45 °C	81
Tableau 17	Propriétés mécaniques comparées des bioplastiques et composites	86
Tableau 18	Absorption d'eau des matériaux bioplastiques après 24 h d'immersion	86
Tableau 19	Stabilité thermique comparée des matériaux	86
Tableau 20	Biodégradabilité comparative après 56 jours	87

Liste des figures

Liste des figures

Numéro	Titre de la figure	Page
Figure 1	Matrice des bioplastiques Origine de la matière x Comportement en fin de vie	5
Figure 2	Le Bio-PE est chimiquement identique à son homologue pétrochimique	6
Figure 3	Sacs compostables PLA	7
Figure 4	Illustration schématique de la voie de production de PET	8
Figure 5	Principaux niveaux de structure de l'amidon	22
Figure 6	L'amidon est composé de deux polysaccharides, l'amylose et l'amylopectine	23
Figure 7	Formes et tailles des granules d'amidon de différentes sources (MEB)	25
Figure 8	Le glycérol est un composé de formule $C_3H_8O_3$	27
Figure 9	Formule chimique du sorbitol	27
Figure 10	Schéma d'une plastification	28
Figure 11	Qui gaspille le plus de nourriture ? Graphique	40
Figure 12	Les différentes étapes de la production de PHA bactérien	42
Figure 13	Les 6 étapes de l'économie circulaire de plastiques biosourcés	44
Figure 14	La bioraffinerie au LGC : de la biomasse au produit	47
Figure 15	Les différentes générations de la bioraffinerie	49
Figure 16	Processus de gélatinisation de l'amidon	60
Figure 17	Schéma de méthode de solution casting	70

Liste des photos

Liste des photos

Numéro	Titre de la photo	Page
Photo 1	Film de paillage Bio	9
Photo 2	Produits fabriqués à partir de PBAT	10
Photo 3	100 % Sac à T-shirt en amidon de maïs biodégradable	13
Photo 4	Pot de fleurs biodégradable en amidon de maïs	14
Photo 5	Capot moteur de Mercedes en matériau biosourcé	15
Photo 6	Lego « verts » issus de matériaux plus verts	16
Photo 7	Amidon thermoplastique biodégradable TPS vierge	30
Photo 8	Barquettes sous film compostable	34
Photo 9	Film de paillis biodégradable pour sols	34
Photo 10	Les Algériens jettent chaque année 900 millions de baguettes	39
Photo 11	Résidus de pomme de terre	40
Photo 12	Pain rassis	51
Photo 13	Séchage de pain	53
Photo 14	Filtration mélange de la farine + eau	53
Photo 15	Filtration du mélange : obtention d'un filtrat clair	54
Photo 16	Décantation du filtrat : formation d'un dépôt blanc d'amidon	54
Photo 17	Amidon après séchage	55
Photo 18	Solution homogène de bioplastique	59
Photo 19	Préparation et gélatinisation de l'amidon avec glycérol	59
Photo 20	Moulage et séchage des films d'amidon plastifiés	60
Photo 21	Aspect visuel des films d'amidon plastifiés au glycérol	76
Photo 22	Film d'amidon modifié par NaOH	77
Photo 23	Film B3 : aspect continu et lisse	78
Photo 24	Film C3 traité avec HCl	79
Photo 25	Film D3 amidon-gélatine	80
Photo 26	Film E3 renforcé avec nano-argile	82
Photo 27	Cinétique d'absorption d'eau des films bioplastiques	83
Photo 28	Après 7 jours d'incubation en sol humifère	84

Liste des abréviations

Liste des abréviations

Abréviations générales et organismes

ACS - American Chemical Society

ASTM - American Society for Testing and Materials

ACV - Analyse de Cycle de Vie

AFCB - Association Française des Chimistes et Biologistes

AGEC - Anti-Gaspillage pour une Économie Circulaire

BTP - Bâtiment et Travaux Publics

CET - Central European Time

CNRS - Centre National de la Recherche Scientifique

DRX - Diffraction des Rayons X

DSM - Dutch State Mines

IMARC - International Market Analysis Research and Consulting

ISO - International Organization for Standardization

IUCN - International Union for Conservation of Nature

LGC - Laboratoire de Génie Chimique

MEB - Microscopie Électronique à Balayage

OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development

PDMS - Polydiméthylsiloxane

UNEP - United Nations Environment Programme

USDA - United States Department of Agriculture

Polymères et bioplastiques

Bio-PE - Polyéthylène biosourcé

Bio-PET - Polyéthylène téréphtalate biosourcé

PBAT - Polybutylène adipate-co-téréphtalate

PBS - Polybutylène succinate

PCL - Polycaprolactone

PET - Polyéthylène téréphtalate

PHA - Polyhydroxyalcanoates

PHBV - Polyhydroxybutyrate-co-valérate

PLA - Acide polylactique (Polylactic Acid)

PVA - Alcool polyvinylique (Polyvinyl Alcohol)

TPS - Amidon thermoplastique (Thermoplastic Starch)

Propriétés et tests

DP - Degré de polymérisation

EAB - Élongation à la rupture (Elongation at Break)

GES - Gaz à effet de serre

HR - Humidité relative

Mn - Masse molaire moyenne en nombre

Tg - Température de transition vitreuse

TS - Résistance à la traction (Tensile Strength)

Unités de mesure et concentrations

°C - Degré Celsius

Da - Dalton

g/L - Gramme par litre

g/kg - Gramme par kilogramme

kDa - Kilodalton

kWh/kg - Kilowatt-heure par kilogramme

MPa - Mégapascal

M - Molaire

mg/L - Milligramme par litre

μm - Micromètre

nm - Nanomètre

w/w - Poids/poids (weight/weight)

v/v - Volume/volume

Chimie et formules

CO₂ - Dioxyde de carbone

H₂O - Eau

H₂SO₄ - Acide sulfurique

HB:HV - Hydroxybutyrate:Hydroxyvalérate

HCl - Acide chlorhydrique

NaOH - Hydroxyde de sodium

O₂ - Oxygène

Techniques analytiques

DMTA - Analyse mécanique dynamique thermique

DSC - Calorimétrie différentielle à balayage

TGA - Analyse thermogravimétrique

Introduction

Introduction

Depuis plusieurs décennies, la production et la consommation de plastiques d'origine pétrochimique ne cessent d'augmenter, générant une pollution environnementale majeure. On estime que plus de 8,3 milliards de tonnes de plastiques ont été produites depuis les années 1950, dont une grande partie persiste dans l'environnement en raison de leur faible biodégradabilité (Geyer *et al.*, 2017). Les plastiques conventionnels, largement utilisés dans l'emballage et l'agroalimentaire, posent ainsi de sérieux problèmes écologiques et sanitaires, notamment par leur accumulation dans les décharges, la libération de microplastiques (UNEP, 2023) et leur contribution aux émissions de gaz à effet de serre (OECD, 2022).

Face à cette crise, le développement de matériaux biodégradables issus de ressources renouvelables s'impose comme une solution prometteuse pour réduire la dépendance au pétrole et l'empreinte carbone (Guo & Shah, 2021). Parmi ces alternatives, les bioplastiques à base d'amidon suscitent un intérêt croissant, en particulier lorsqu'ils sont produits à partir de déchets agroalimentaires tels que le pain invendu ou les résidus de pomme de terre (Portillo-Perez *et al.*, 2024 ; Sampaio *et al.*, 2020). Ces sources offrent l'avantage d'être abondantes et peu coûteuses.

Cependant, la production de bioplastiques amylicés rencontre encore plusieurs défis. La qualité et la quantité d'amidon extrait varient selon la matière première et les procédés d'extraction utilisés (Tsang *et al.*, 2019). De plus, les propriétés mécaniques et barrières de ces bioplastiques restent inférieures à celles des plastiques traditionnels, avec une sensibilité accrue à l'humidité et une stabilité thermique limitée (Gurunathan *et al.*, 2025 ; Chakraborty *et al.*, 2022). Enfin, la compétitivité économique de ces matériaux dépend des coûts de transformation et de la structuration des filières de valorisation (Bouzidi *et al.*, 2024).

Dans ce contexte, ce mémoire s'inscrit dans le cadre du décret du 12.75, qui porte sur les entreprises Start-Up. L'étude s'intéresse à l'optimisation de l'extraction et de la valorisation de l'amidon issu du déchet pain blanc et du pain invendu et de résidus de pomme de terre pour la fabrication de bioplastiques ami de l'environnement. L'objectif est de développer une formule de production de bioplastique.

Trois axes principaux sont abordés dans ce travail :

1. **Caractériser l'amidon extrait** de ces déchets en termes de rendement et de pureté.
2. **Optimiser les formulations de bioplastiques** à l'aide de plastifiants (glycérol, sorbitol) et d'additifs (carbonate de calcium) pour améliorer leurs propriétés mécaniques.
3. **Évaluer la biodégradabilité des matériaux** obtenus en conditions contrôlées et analyser leur potentiel d'application dans l'emballage alimentaire.

Enfin, une analyse comparative des bénéfices environnementaux et économiques de cette valorisation sera également réalisée (Guo & Shah, 2021).

Ce mémoire s'articule en deux axes :

Premiers axes : Synthèse bibliographique qui s'étale sur trois chapitre i) Généralité du Bioplastique ii) L'amidon comme matière première pour produire du bioplastique, iii) Valorisation des déchets agroalimentaires.

Deuxième axe : expérimentation, qui consiste à l'extraction d'amidon par voie alcaline à partir de pain et épluchures de pomme de terre et la formulation de bioplastiques et enfin la caractérisation thermique ; *Thermogravimetric Analysis* (TGA) et *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) et morphologique par la technique de Microscopie électronique à balayage (MEB) ainsi que l'évaluation de la biodégradabilité selon la norme ISO 14855 (Unis *et al.*, 2024).

Chapitre I :

Généralités sur les

bioplastiques

Introduction

Les bioplastiques représentent une nouvelle génération de matériaux plastiques conçus pour répondre aux enjeux environnementaux liés à la surconsommation de plastiques d'origine fossile (Shen, Haufe, & Patel, 2009). Issus majoritairement de ressources végétales renouvelables, comme l'amidon de maïs, la canne à sucre ou les déchets agroalimentaires, ils se distinguent des plastiques conventionnels par leur origine biosourcée et, dans certains cas, leur capacité à se biodégrader (Averous, 2008).

Le terme « bioplastique » regroupe en réalité deux grandes familles : les plastiques biosourcés, fabriqués à partir de matières premières renouvelables, et les plastiques biodégradables, qui peuvent se décomposer sous l'action de micro-organismes. Certains bioplastiques cumulent ces deux propriétés, tandis que d'autres ne sont que partiellement biodégradables ou uniquement biosourcés. Cette diversité se traduit par une large gamme de matériaux adaptés à des usages variés, notamment dans l'emballage, l'agriculture, la médecine ou encore l'industrie automobile (Siracusa *et al.*, 2008).

Le développement des bioplastiques s'inscrit dans une démarche de réduction de l'empreinte carbone et de limitation de la pollution plastique, grâce à l'utilisation de ressources renouvelables et à la possibilité de valorisation organique en fin de vie (Emadian, Onay, & Demirel, 2017). Toutefois, leur adoption à grande échelle soulève encore des défis techniques, économiques et normatifs, notamment en ce qui concerne leurs propriétés mécaniques, leur coût de production et leur gestion en fin de vie (Niaounakis, 2015).

1. Définitions et terminologie

Les bioplastiques se définissent par deux caractéristiques distinctes – origine biosourcée et/ou biodégradabilité – qui nécessitent une clarification rigoureuse pour éviter les amalgames (Narancic *et al.*, 2020).

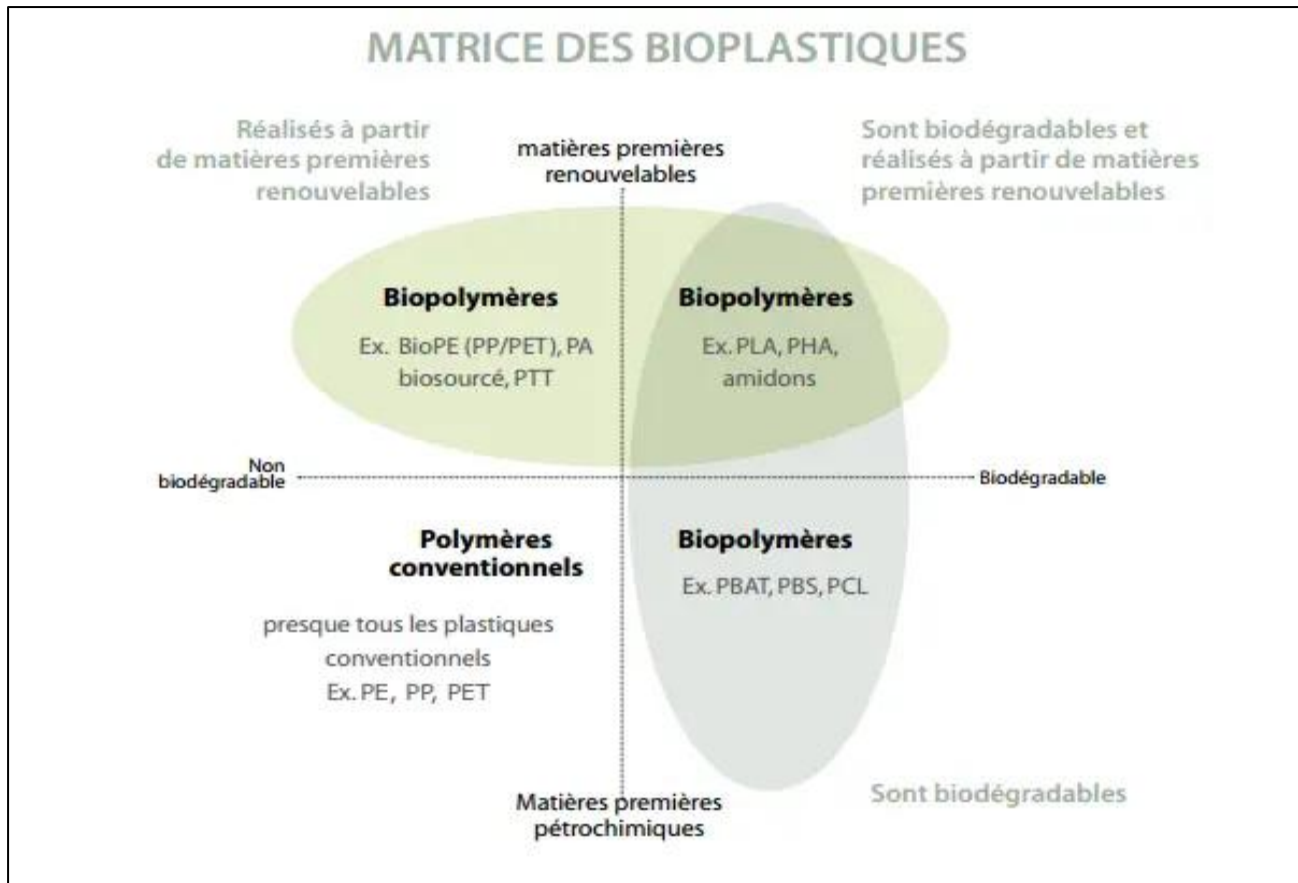


Figure I.1: Matrice des bioplastiques Origine de la matière x Comportement en fin de vie – (Crédits Preventpack)

1.1. Biosourcé

Un matériau est qualifié de biosourcé lorsqu'il est partiellement ou totalement issu de ressources renouvelables (végétaux, algues, déchets organiques). Par exemple, le polyéthylène biosourcé (Bio-PE), produit à partir de canne à sucre, contient au moins 30 % de carbone d'origine végétale (Narancic *et al.*, 2020). La norme ASTM D6866 définit le pourcentage biosourcé en mesurant le ratio de carbone 14, isotope présent dans les matières vivantes (ASTM International. 2024).



Figure I.2: Le Bio-PE est chimiquement identique à son homologue pétrochimique (extrait du site web de Braskem I'm green™ Polyethylene)

1.2. Biodégradable

Un matériau est biodégradable s'il se décompose sous l'action de microorganismes (bactéries, champignons) en CO₂, H₂O et biomasse, selon des conditions spécifiques (température, humidité, oxygène). La norme ISO 14855 exige une biodégradation de 90 % en 180 jours en milieu compost industriel (International Organization for Standardization. 2012).

Cependant, la biodégradabilité ne garantit pas une disparition complète dans la nature – certains matériaux, comme le PBAT, nécessitent des installations industrielles.

1.3. Compostable

Le compostable est un sous-ensemble de la biodégradabilité, répondant à des critères stricts :

Dégradation complète en 12 semaines maximum.

Absence de résidus toxiques (métaux lourds < 50 % des seuils réglementaires).

Fragmentation en particules de < 2 mm (norme EN 13432) (Hubbe *et al.*, 2021).

Les sacs compostables en PLA, par exemple, se dégradent en 45 jours dans des composteurs industriels à 58–60 °C, mais pas nécessairement en compost domestique (Castro-Aguirre *et al.*, 2018).



Figure I.3: Sacs compostables Pla (fr.disposable-tableware.com)

1.4.Distinctions cruciales

Un plastique peut être biosourcé sans être biodégradable (ex. : Bio-PET).

Un plastique peut être biodégradable sans être biosourcé (ex. : PBAT, issu du pétrole).

Seuls les matériaux compostables garantissent une intégration sûre dans les filières de recyclage organique (Norme NF T51-800, 2022).

2. Classification des bioplastiques

La classification des bioplastiques repose sur deux critères principaux : l'origine des matières premières (renouvelables vs fossiles) et la biodégradabilité. Cette dualité permet de structurer les bioplastiques en trois groupes majeurs, complétés par des sous-catégories basées sur les mécanismes de dégradation (Narancic *et al.*, 2020 ; Polyvia, 2020).

2.1. Bioplastiques biosourcés non biodégradables

Ces matériaux sont issus de ressources renouvelables mais conservent une structure chimique similaire aux plastiques conventionnels, les rendant non biodégradables.

Exemples

Bio-PE (polyéthylène biosourcé) : Produit à partir de canne à sucre, il constitue 50 % du marché des bioplastiques (Narancic *et al.*, 2020).

Bio-PET (polyéthylène téréphtalate biosourcé) : Utilisé par Coca-Cola, il contient 30 % de matières végétales (Hubbe *et al.*, 2021).

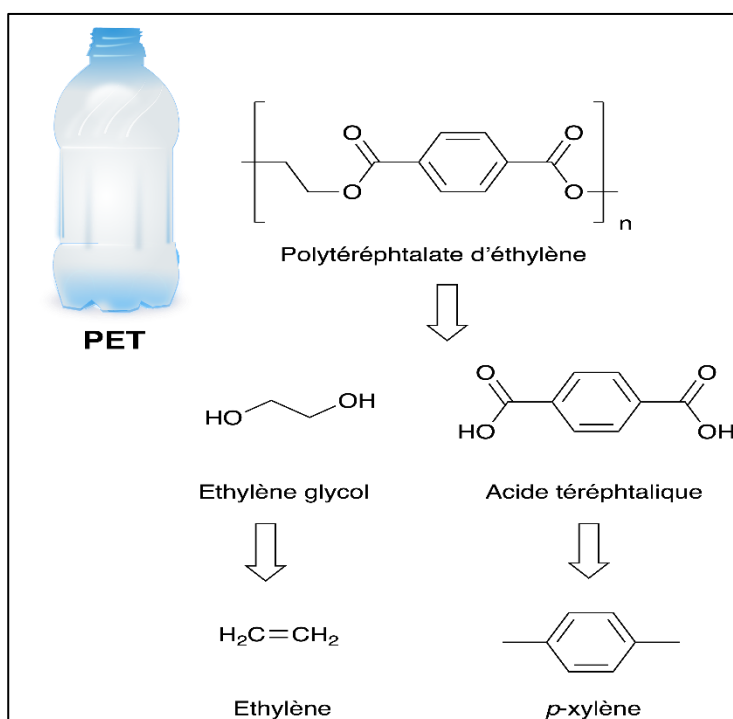


Figure I.4 : Illustration schématique de la voie de production de PET et des monomères impliqués dans la synthèse chimique.(www.chem4us.be)

Propriétés

Recyclables mécaniquement via les filières existantes.

Réduction de l'empreinte carbone de 20 à 30 % par rapport aux plastiques fossiles (Tsang *et al.*, 2019).

Applications : Emballages alimentaires (bouteilles, films), textiles, pièces automobiles (Polyvia, 2020).

2.2. Bioplastiques biosourcés et biodégradables

Ces matériaux combinent une origine renouvelable et une capacité à se dégrader en conditions contrôlées.

Exemples

PLA (acide polylactique) : Issu de la fermentation de maïs ou de betterave, il domine le marché avec des applications en emballage et médecine (Reshma *et al.*, 2024).

PHA (polyhydroxyalcanoates) : Synthétisés par des bactéries, ils se dégradent même en milieu marin (PHA Sourcing, 2025).

Propriétés

Biodégradation en 45 à 90 jours en compost industriel (norme EN 13432).

Résistance mécanique modérée (6,08 MPa pour le PLA vs 20–30 MPa pour le PE) (Chakraborty *et al.*, 2022).

Applications : Films de paillage agricole, sutures médicales, emballages compostables (Hubbe *et al.*, 2021).



Photo I.1 : Film de paillage Bio (www.gvz-rossat.ch)

2.3. Bioplastiques fossiles et biodégradables

Ces plastiques, bien que d'origine pétrochimique, sont conçus pour se dégrader en conditions spécifiques.

Exemples : PBAT (polybutylène adipate-co-téréphtalate) : Souvent mélangé à de l'amidon pour améliorer sa compostabilité.



Photo I.2 : Produits Fabriqués à Partir de PBAT (www.welinkschem.com)

PCL (polycaprolactone) : Utilisé en encapsulation de médicaments ou en agriculture (Reshma *et al.*, 2024).

Propriétés

Biodégradation conforme à la norme ASTM D6400 (90 % en 180 jours).

Coûts de production élevés en raison de procédés de synthèse complexes (Bouzidi *et al.*, 2024).

2.4. Classification complémentaire : Mécanismes de biodégradation

Une approche alternative classe les bioplastiques selon leur processus de dégradation (FNade, 2022 ; JC Marot, 2019) :

- Hydro-biodégradables

Dégradation par hydrolyse (eau) et action microbienne.

Ex. : PLA, PBS.

- Oxo-biodégradables

Fragmentation via additifs oxydants (controversés pour la production de microplastiques).

Ex. : PE oxo-dégradable.

2.5. Enjeux et limites des classifications

Confusions terminologiques : Le terme "biodégradable" est souvent mal interprété par le public, car certains matériaux nécessitent des conditions industrielles strictes (température > 50 °C, humidité contrôlée) (UNEP, 2023).

Impact des additifs : Les oxo-biodégradables, bien que normés, génèrent des microplastiques persistants (JC Marot, 2019).

Recyclage : Les bioplastiques compostables perturbent les filières de recyclage traditionnelles s'ils ne sont pas triés (Recyc-Québec, 2005).

3. Avantages et inconvénients des bioplastiques

3.1. Avantages des bioplastiques

Les bioplastiques offrent des bénéfices environnementaux, économiques et techniques significatifs :

- **Réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) :** La production de bioplastiques à base d'amidon émet 60 à 80 % moins de CO₂ que les plastiques pétrosourcés, grâce à l'utilisation de ressources renouvelables et à la séquestration du carbone lors de la croissance des plantes (Guo & Shah, 2021).
- **Biodégradabilité contrôlée :** Les films compostables en PLA se dégradent complètement en 45 jours en compost industriel, évitant l'accumulation de déchets dans les écosystèmes (Portillo-Perez *et al.*, 2024).
- **Valorisation des déchets agroalimentaires :** L'extraction d'amidon à partir de pain gaspillé ou de résidus de pomme de terre réduit la pression sur les décharges et participe à une économie circulaire (Sampaio *et al.*, 2020).
- **Sécurité sanitaire :** Contrairement aux plastiques pétrosourcés, les bioplastiques comme le PLA n'émettent pas de perturbateurs endocriniens (ex. : bisphénol A), garantissant une utilisation sûre dans l'emballage alimentaire (Hamadouche et Bouarab, 2017).
- **Indépendance aux ressources fossiles :** Les bioplastiques biosourcés réduisent la dépendance au pétrole, stabilisant les coûts face à la volatilité des marchés énergétiques (OECD, 2022).

3.2. Inconvénients des bioplastiques

Malgré leurs atouts, les bioplastiques présentent des limites critiques :

- **Coûts de production élevés :** Le prix du PLA (2–4 €/kg) reste 40 % supérieur à celui du polyéthylène (1 €/kg), en raison de procédés complexes comme la fermentation et la purification (Bouzidi *et al.*, 2024).
- **Biodégradabilité conditionnelle :** La plupart des bioplastiques nécessitent des conditions industrielles (température > 50 °C, humidité contrôlée) pour se dégrader. En milieu naturel, ils persistent ou libèrent du méthane, un GES 25 fois plus puissant que le CO₂ (UNEP, 2023).
- **Concurrence avec les cultures alimentaires :** L'utilisation de maïs ou de canne à sucre pour produire du PLA peut accaparer des terres arables, exacerbant l'insécurité alimentaire dans les régions vulnérables (Tsang *et al.*, 2019).
- **Propriétés mécaniques limitées :** Les bioplastiques à base d'amidon affichent une résistance à la traction de 6,08 MPa, contre 20–30 MPa pour le polyéthylène, limitant leur utilisation dans des applications exigeantes (Chakraborty *et al.*, 2022).
- **Recyclage complexe :** Les bioplastiques compostables contaminent les filières de recyclage traditionnelles s'ils ne sont pas triés, perturbant les procédés de traitement (Narancic *et al.*, 2020).

3.3. Synthèse critique

Les bioplastiques représentent une alternative viable aux plastiques fossiles, mais leur adoption massive dépend de l'optimisation des coûts, de l'amélioration des propriétés techniques (ex. : ajout de nanorenforts cellulosiques) et de la mise en place d'infrastructures dédiées (composteurs industriels, filières de tri). Une réglementation claire et une communication transparente sont essentielles pour éviter les écueils du *greenwashing* et garantir une transition écologique juste (Bishop *et al.*, 2021).

4.Applications actuelles des bioplastiques

Les bioplastiques trouvent des applications diversifiées dans plusieurs secteurs industriels, répondant à des enjeux environnementaux tout en offrant des performances techniques adaptées. Leur utilisation s'étend des emballages aux dispositifs médicaux, en passant par l'agriculture et l'automobile.

4.1. Emballage

Les bioplastiques dominent le marché de l'emballage, représentant 45 % de la production mondiale (Narancic *et al.*, 2020). Leur adoption est motivée par leur biodégradabilité et leur capacité à réduire l'empreinte carbone.

- **Emballages alimentaires** : Des films compostables en PLA protègent les fruits et légumes, prolongeant leur durée de conservation (Portillo-Perez *et al.*, 2024). Le Bio-PET, partiellement biosourcé, est utilisé par Coca-Cola pour ses bouteilles "PlantBottle" (Narancic *et al.*, 2020).
- **Sacs et films** : Les sacs en amidon thermoplastique (TPS) se dégradent en 45 jours en compost industriel, évitant la pollution des sols (Natureplast, 2025).



Photo I.3 : 100% Sac à T-shirt en amidon de maïs biodégradable sac gilet (fr.made-in-china.com)

4.2. Médical

Dans le secteur médical, les bioplastiques combinent biocompatibilité et biodégradabilité.

- **Dispositifs implantables** : Le polycaprolactone (PCL) est utilisé pour des sutures résorbables et des implants orthopédiques, éliminant le besoin de chirurgie secondaire (Sapuan *et al.* 2024).
- **Équipements jetables** : Gants, seringues et tubulures en PLA réduisent les risques infectieux tout en étant compostables (4ocean, 2023).
- **Livraison contrôlée de médicaments** : Des nanocapsules en PLA libèrent des principes actifs de manière progressive, optimisant les traitements (Marto *et al.*, 2020).

4.3. Agriculture

Les bioplastiques transforment les pratiques agricoles grâce à leur biodégradabilité contrôlée.

- **Films de paillage** : Les films en PLA-Premium (Tasrin *et al.* 2024) se décomposent en 3 mois, améliorant la fertilité des sols sans laisser de microplastiques.
- **Supports de culture** : Des pots biodégradables à base d'amidon facilitent la transplantation de plants en hydroponie (Tasrin *et al.* 2024).



Photo I.4 : OEM ODM Eco friendly vaisselle gradable maïs amidon Biodégradable pot de fleurs en gros fleurs en plastique pots de jardin en plein air (french.globalsources.com)

4.4. Automobile

L'industrie automobile intègre des bioplastiques pour alléger les véhicules et réduire leur empreinte carbone.

- **Pièces intérieures** : Toyota utilise des polyesters biosourcés pour les tableaux de bord de la Prius Alpha, réduisant le poids de 20 % (Mitařová *et al.* 2025).
- **Composites techniques** : Mercedes-Benz emploie l'EcopaXX, un polyamide biosourcé à 70 %, pour ses capots moteurs (Nanda *et al.* 2022).

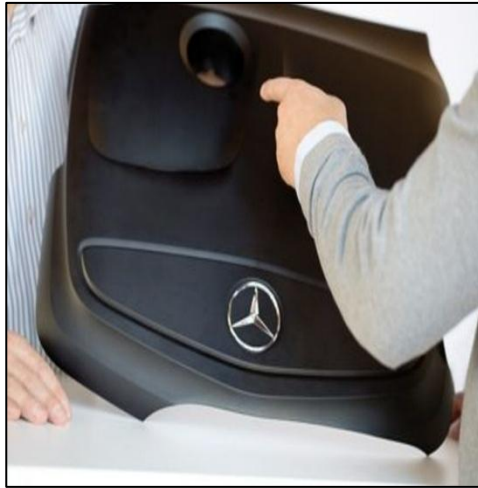


Photo I.5 : Le capot moteur de Mercedes en matériau biosourcé. (© DSM)

4.5. Textile

Les bioplastiques innovants renouvellent le secteur textile via des fibres durables.

- **Vêtements techniques** : Le PLA-Premium, modifié pour une meilleure élasticité, est tissé en fils monofilaments pour des vêtements sportifs respirants (Tasrin *et al.* 2024).
- **Accessoires** : Étiquettes et boutons compostables en PLA se dégradent sans contaminer les circuits de recyclage (Tasrin *et al.* 2024).

4.6. Électronique

Les bioplastiques répondent aux exigences techniques et environnementales de l'électronique.

- **Coques d'appareils** : Des biocomposites ignifugés, issus de projets de recherche collaboratifs, remplacent les plastiques pétrosourcés dans les smartphones (Sirris, 2024).
- **Composants imprimés en 3D** : Le PLA sert de filament pour des prototypes électroniques biodégradables (Nanda *et al.* 2022).

4.7. Biens de consommation

Les bioplastiques séduisent les consommateurs par leur profil écologique.

- **Jouets** : LEGO commercialise des briques en PHA, un biopolymère marin-biodégradable (Nanda *et al.* 2022).
- **Ustensiles jetables** : Couverts et assiettes en amidon de pomme de terre remplacent le plastique dans la restauration (Narancic *et al.*, 2020).



Photo I.6 : Des Lego "verts" issus de matériaux plus verts arrivent en magasins.(© Lego)

4.8. Construction

Dans le BTP, les bioplastiques offrent des alternatives durables aux matériaux traditionnels.

- **Isolation thermique :** Des mousses à base de PLA améliorent l'efficacité énergétique des bâtiments (Nanda *et al.* 2022).
- **Composites structuraux :** Des panneaux en fibres de chanvre et PLA renforcent les structures légères (Sirris, 2024).

Chapitre II :

L'amidon comme
matière première pour
bioplastique

Introduction

L'amidon occupe une place centrale parmi les matières premières utilisées pour la fabrication de bioplastiques, en raison de son abondance, de sa renouvelabilité et de sa biodégradabilité (Abe *et al.*, 2021; Jayarathna *et al.*, 2022). Présent principalement dans les graines de céréales et les tubercules, l'amidon est un polysaccharide constitué de deux fractions principales : l'amylose et l'amylopectine, dont la proportion influence fortement les propriétés finales du bioplastique (Abe *et al.*, 2021). Grâce à sa structure chimique, l'amidon peut être transformé en bioplastique par différents procédés, notamment par plastification et modification chimique, ce qui permet d'obtenir des matériaux aux propriétés variées et adaptés à de nombreux usages (Jayarathna *et al.*, 2022).

Cependant, l'utilisation de l'amidon natif présente certaines limites, telles qu'une sensibilité à l'eau et des propriétés mécaniques parfois insuffisantes pour des applications exigeantes. Pour pallier ces inconvénients, des stratégies d'amélioration telles que la modification chimique (par exemple, l'acétylation) ou l'ajout de plastifiants et de charges minérales sont couramment employées (Abe *et al.*, 2021). Ces approches permettent d'optimiser la résistance, la flexibilité et la stabilité des bioplastiques à base d'amidon, rendant ce matériau compétitif face aux plastiques issus de ressources fossiles.

Ainsi, l'amidon s'impose comme une alternative prometteuse pour la conception de bioplastiques durables, capables de répondre aux enjeux environnementaux et industriels actuels (Abe *et al.*, 2021).

1. Sources d'amidon

L'amidon, polymère naturel composé d'amylose et d'amylopectine, est la principale matière première des bioplastiques amylicés. Ses sources varient selon les régions et les disponibilités agricoles, avec des rendements et des propriétés distinctes.

1.1. Pomme de terre

La pomme de terre est l'une des sources les plus utilisées, avec une teneur en amidon de 65 à 85 % dans les tubercules (Rachedi *et al.*, 2023). Les épluchures, représentant 10–20 % du poids des tubercules, sont particulièrement valorisables :

- **Extraction** : Méthodes physico-chimiques (broyage, centrifugation) ou enzymatiques, avec un rendement moyen de 71 g d'amidon/kg d'épluchures (reguig *et al.*, 2023).
- **Avantages** : Pureté élevée (≥ 92 %), granulométrie fine (15–40 μm), et compatibilité avec les procédés de plastification (Sampaio *et al.*, 2020).
- **Applications** : Films de paillage agricole et emballages alimentaires, avec une résistance mécanique atteignant 17 MPa (Bouzidi *et al.*, 2024).
- **Défis** : Nécessité de prétraitements pour éliminer les fibres résiduelles et les composés phénoliques (Tsang *et al.*, 2019).

1.2. Pain blanc

Le pain gaspillé, dont 30 % de la production mondiale est jetée, constitue une source innovante d'amidon :

- **Teneur en amidon** : 50–70 %, selon le degré de fermentation (Portillo-Perez *et al.*, 2024).

- **Extraction** : Hydrolyse alcaline (NaOH 0,5M) ou enzymatique (α -amylase), générant un hydrolysat riche en glucose (100 g/L) et azote aminé (490 mg/L) (Leung *et al.*, 2012).
- **Avantages** : Réduction des coûts de matière première (-40 % vs amidon natif) et contribution à l'économie circulaire (ACS, 2024).
- **Limites** : Nécessité de prétraitements pour éliminer les impuretés (lipides, protéines).

1.3. Autres sources végétales

- **Manioc** : Tubercule tropical riche en amidon (80–90 %), privilégié en Asie et Afrique pour sa croissance en sols pauvres (EuroPlas, 2025). La production de bioplastiques à base de manioc réduit l'empreinte carbone de 35 % par rapport au maïs (Cellulose Chem Technol., 2021).
- **Pois** : L'amidon de pois, co-produit de l'industrie des protéines végétales, offre une résistance mécanique comparable à celle du maïs après plastification au glycérol (Pulse Canada, 2023). Les blends avec PBAT (polybutylène adipate-co-téréphtalate) atteignent une résistance à la traction de 8,2 MPa (Tsang *et al.*, 2019).
- **Maïs** : Source traditionnelle dominante (28 % d'amylose, 72 % d'amylopectine), utilisée dans 47 % des bioplastiques amylicés (Narancic *et al.*, 2020). Les films à base de maïs affichent une perméabilité à l'oxygène réduite de 30 % (gnest_06532, 2025).
- **Riz et banane** : Co-produits agricoles (balles de riz, peaux de banane) valorisés en composites renforcés, améliorant la résistance à l'humidité (Marto *et al.*, 2020).

2. Comparaison des sources

La diversité des sources d'amidon disponibles pour la production de bioplastiques offre des opportunités variées selon les critères de rendement, de coût et d'applications spécifiques (Cinla *et al.*, 2019). Cette analyse comparative révèle les avantages distinctifs de chaque matière première et oriente le choix stratégique des industriels vers la source la plus adaptée à leurs besoins (Andriatomefy-Ramaroson, 2022).

L'extraction d'amidon constitue une étape cruciale dans la chaîne de valorisation des déchets agroalimentaires en bioplastiques (Bouznad *et al.*, 2022). Les rendements d'extraction varient significativement selon la source, influençant directement la viabilité économique des procédés industriels (Asante *et al.*, 2019). La teneur en amidon des matières premières détermine le potentiel de conversion, tandis que les coûts relatifs d'approvisionnement orientent les choix stratégiques des bioraffineries (Mohan *et al.*, 2006).

Les applications finales des bioplastiques issus d'amidon dépendent largement des propriétés mécaniques et de biodégradabilité spécifiques à chaque source (Shafqat *et al.*, 2021). Le développement de films flexibles et d'emballages alimentaires nécessite des amidons aux caractéristiques particulières, notamment en termes de résistance à l'eau et de processabilité (Mandal *et al.*, 2024). Cette diversité d'applications justifie l'analyse comparative détaillée présentée dans le Tableau 1 (Cinla *et al.*, 2019; Andriatomefy-Ramaroson, 2022).

Tableau II.1 : Comparaison des sources d'amidon

Source	Teneur en amidon (%)	Rendement extraction (g/kg)	Coût relatif	Applications principales
Pomme de terre	65–85	71	Modéré	Emballages, agriculture
Pain gaspillé	50–70	68	Faible	Films compostables
Maïs	70–80	75	Élevé	Sacs biodégradables
Manioc	80–90	82	Faible	Textiles, composites

3. Enjeux de la sélection des sources

Le choix de la source d'amidon dépend de critères techniques, économiques et environnementaux :

- **Disponibilité locale** : Le manioc est privilégié en Afrique, tandis que le pain gaspillé est exploité en Europe (OECD, 2022).
- **Impact environnemental** : L'utilisation de déchets (épluchures, pain) réduit l'empreinte carbone de 42 % vs amidon natif (Circularise, 2023).
- **Performance technique** : L'amidon de pomme de terre offre une meilleure résistance mécanique, tandis que le maïs est plus adapté aux procédés industriels (Chakraborty *et al.*, 2022).

4. Structure chimique et propriétés de l'amidon (amylose, amylopectine, cristallinité)

L'amidon est un polymère naturel complexe composé principalement de deux macromolécules : l'amylose, qui représente environ 20 à 30 % de la masse totale, et l'amylopectine, qui constitue 70 à 80 % du polymère selon la source botanique (Hirpara et Dabhi, 2021 ; Martens *et al.*, 2018).

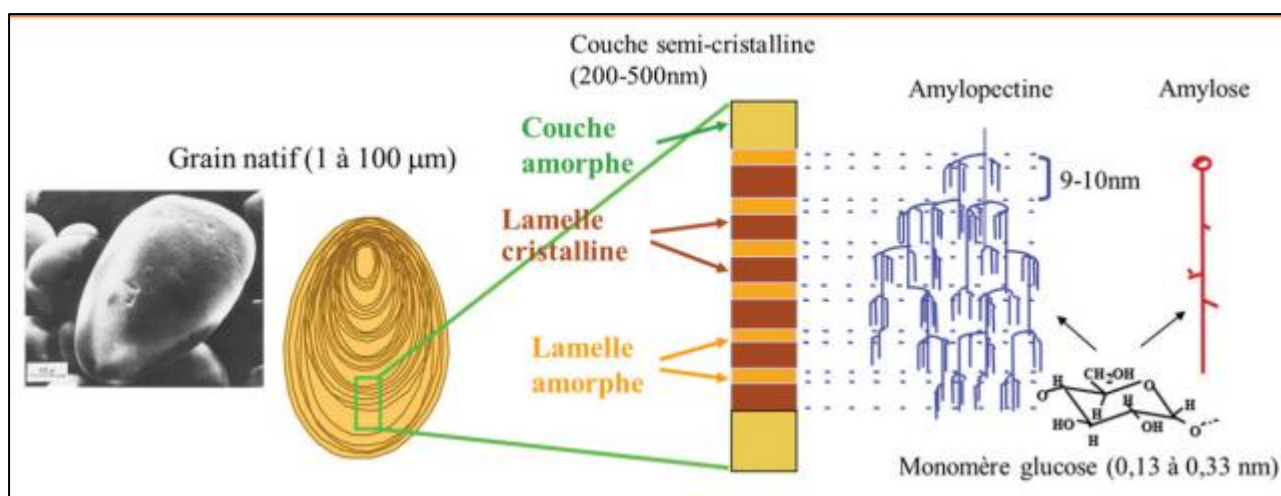


Figure II.5: Principaux niveaux de structure de l'amidon. (l'actualité chimique - octobre 2016 - n° 411)

Cette composition bimodale confère à l'amidon des propriétés physico-chimiques uniques, déterminantes pour son comportement lors de la transformation en bioplastique.

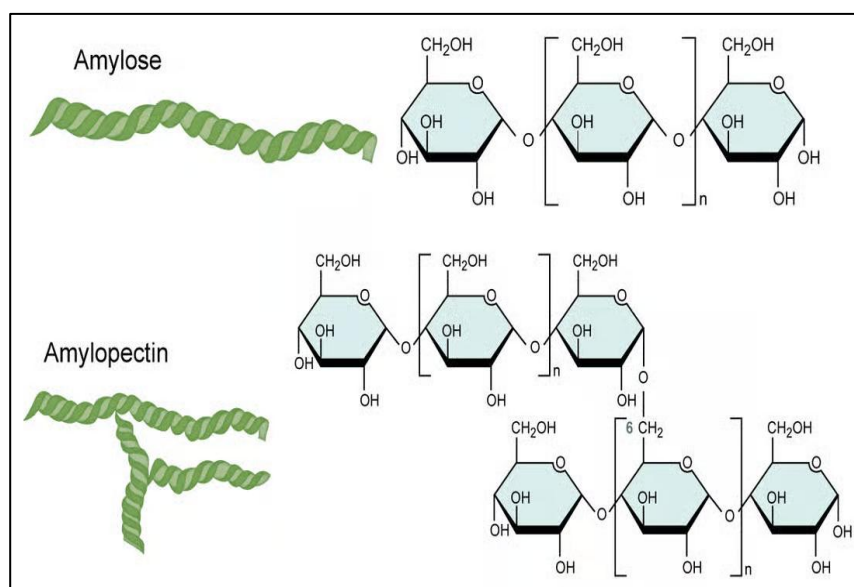


Figure II.6 : L'amidon est composé de deux polysaccharides, l'amylose et l'amylopectine.(© CNX OpenStax, CC By 4.0)

4.1. Amylose :

Structure linéaire et rôle dans la cristallinité L'amylose est une chaîne linéaire de résidus de glucose, généralement constituée de 200 à 6 000 unités reliées par des liaisons $\alpha(1 \rightarrow 4)$ (Chakraborty *et al.*, 2022 ; Hirpara et Dabhi, 2021).

Cette structure linéaire favorise la formation d'hélices simples (type V) en présence de molécules hydrophobes, telles que les lipides, stabilisées par des liaisons hydrogène (Martens *et al.*, 2018 ; Tsang *et al.*, 2019).

Sur le plan fonctionnel, l'amylose confère aux films d'amidon une résistance mécanique supérieure, avec des valeurs de traction pouvant atteindre 30 à 40 MPa, alors que les films d'amylopectine n'atteignent souvent que 6 à 8 MPa (Hirpara et Dabhi, 2021).

De plus, l'amylose agit comme une barrière efficace aux gaz, réduisant la perméabilité à l'oxygène de 50 % par rapport à l'amylopectine, ce qui est particulièrement recherché pour les applications d'emballage alimentaire (Martens *et al.*, 2018).

Cependant, l'amylose présente une tendance à la rétrogradation rapide : lors du refroidissement, elle se réorganise en hélices doubles (type B), ce qui augmente la fragilité et la cristallinité des bioplastiques (Hirpara et Dabhi, 2021 ; Martens *et al.*, 2018).

4.2. Amylopectine

Structure ramifiée et rôle dans l'amorphisme L'amylopectine, à l'inverse de l'amylose, possède une structure hautement ramifiée, avec des liaisons $\alpha(1\rightarrow6)$ tous les 20 à 24 résidus de glucose, formant des clusters de 4 à 8 nm (Martens *et al.*, 2018 ; Tsang *et al.*, 2019).

Sa masse moléculaire est très élevée, de l'ordre de 10^7 à 10^8 Da, et elle est constituée de chaînes latérales courtes (DP 6–12) et longues (DP > 36) (Martens *et al.*, 2018).

Cette architecture favorise la flexibilité des films, mais limite leur organisation cristalline, rendant les matériaux plus hygroscopiques, avec une absorption d'eau supérieure à 30 % (Hirpara et Dabhi, 2021).

La température de transition vitreuse (T_g) de l'amylopectine se situe entre 60 et 70 °C, inférieure à celle de l'amylose (80–90 °C), ce qui influence la gélatinisation et la transformation de l'amidon lors du moulage ou de l'extrusion (Wianecki et Kołakowski, 2007 ; Reshma *et al.*, 2024).

4.3. Cristallinité de l'amidon

La cristallinité de l'amidon provient de l'empilement des hélices d'amylopectine et de la proportion relative d'amylose, avec trois types polymorphes principaux : A, B et C (Martens *et al.*, 2018 ; Tsang *et al.*, 2019).

- Le **type A** (maïs, riz) présente un empilement dense de doubles hélices et une faible teneur en eau ($\leq 10\%$), donnant des films rigides et résistants à l'hydrolyse acide, adaptés aux emballages secs (Martens *et al.*, 2018).
- Le **type B** (pomme de terre, banane) se caractérise par une structure lâche avec des canaux hydriques et une teneur en eau $\geq 25\%$, ce qui produit des films biodégradables rapides mais sensibles à l'humidité, souvent utilisés en agriculture (Martens *et al.*, 2018 ; Hirpara et Dabhi, 2021).
- Le **type C** (tapioca, pois) est une hybridation des types A et B, avec une cristallinité intermédiaire (42 % contre 28–36 % pour A/B), offrant un compromis entre résistance mécanique (12–15 MPa) et biodégradabilité (Martens *et al.*, 2018 ; Tsang *et al.*, 2019).

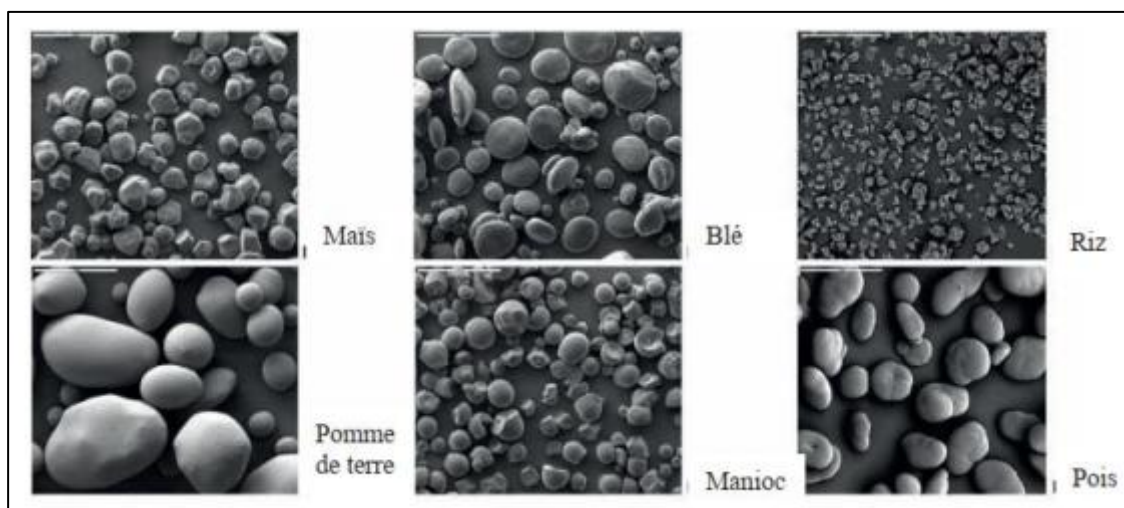


Figure II.7: Formes et tailles des granules d'amidon de maïs, blé, riz, pomme de terre, manioc et de pois (MEB grossissement $\times 280$) (d'après ATKIN, CHENG, ABEYSEKERA ET ROBARDS (1999)

En lumière polarisée, les granules d'amidon ont la forme d'une croix noire dite « croix de Malte ». Ce phénomène de biréfringence positive vient confirmer l'organisation semi cristalline de ces granules. Les zones amorphes pourraient contenir des ensembles cristallins composés d'amylopectine de structure identique mais de taille réduite, de 50 à 70nm (Buleon, 2001). Ces ensembles dispersés dans l'amylose constitueraient avec les complexes amylose-lipides les parties dites « amorphes » du granule. Le développement limité des *block let 's* pourrait être lié à la présence de l'amylose (GALLANT *Et Al.*, 1997). L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) montre que l'amidon est un poly-mèrese micristallin (Waliszewski, Aparicio, Bello Et Monroy, 2003).

Généralement, l'amidon contient 20-25% d'amylase et 75-80% d'amylopectine (Sajid *Et Al.*, 2015). La teneur en chacun des constituants est différente suivant l'origine de l'amidon (tableau 2) (Wertz, 2011).

Tableau II.2 : Teneur en amylose et amylopectine des amidons de différentes sources botaniques (WERTZ, 2011).

Source botanique	Amylose (%)	Amylopectine (%)
Mais	28	72
Pomme de terre	21	79
Blé	28	72
Mais cireux	0	100
Amylomais	50-80	50-20
Riz	17	83
Pois	35	65
Manioc	17	83

4.4. Impact de la cristallinité sur les propriétés fonctionnelles

La température de gélatinisation varie selon le type cristallin : les amidons de type A gélatinisent à 65–75 °C, contre 55–65 °C pour le type B (Wianecki et Kołakowski, 2007 ; Reshma *et al.*, 2024).

Une cristallinité élevée, comme dans le tapioca (42 %), retarde la gélatinisation, nécessitant des températures de transformation plus élevées (Martens *et al.*, 2018).

Les structures B et C sont hydrolysées 30 % plus rapidement par les amylases que le type A, en raison de leur porosité accrue (Martens *et al.*, 2018 ; Tsang *et al.*, 2019).

Les films à base d'amidon A résistent à des températures jusqu'à 150 °C, contre 120 °C pour le type B (Martens *et al.*, 2018).

4.5. Modifications structurales pour optimiser les bioplastiques

La plastification, par ajout de glycérol (20–30 %), rompt les liaisons hydrogène intra-hélices, réduisant la cristallinité de 40 % à 15 % et améliorant la flexibilité des films (Hirpara et Dabhi, 2021).

Le renforcement par nanofibrilles, notamment l'ajout de nanocristaux de cellulose (5–10 %), augmente la résistance mécanique de 22,5 % et réduit l'absorption d'eau à 4,35 % (Bouzidi *et al.*, 2024).

Enfin, les traitements physiques comme le broyage mécanique diminuent la cristallinité de 42 % à moins de 10 % (tapioca), facilitant la mise en forme et la transformation industrielle (Martens *et al.*, 2018).

5. Plastification et transformation de l'amidon

La plastification et la transformation de l'amidon en bioplastique impliquent des procédés thermomécaniques et chimiques visant à briser la structure semi-cristalline native de l'amidon pour obtenir un matériau thermoplastique. Ces étapes sont cruciales pour améliorer la processabilité et les propriétés mécaniques des bioplastiques, tout en limitant la rétrogradation et l'hygroscopicité.

5.1. Plastification de l'amidon

La plastification consiste à ajouter des agents plastifiants (eau, glycérol, sorbitol) qui interagissent avec les chaînes d'amylose et d'amylopectine via des liaisons hydrogène, réduisant les interactions intermoléculaires et abaissant la température de transition vitreuse (Tg) de l'amidon.

Glycérol

Le glycérol est le plastifiant le plus utilisé (20–30 % en poids), améliorant la flexibilité des films en réduisant la cristallinité de 40 % à 15 % (Hirpara & Dabhi, 2021).

À 30 % de glycérol, l'allongement à la rupture des films d'amidon de pomme de terre passe de 2,41 % à 57,33 %, mais la résistance mécanique chute de 9,34 à 1,95 MPa (Portillo-Perez *et al.*, 2024).

Inconvénient : Le glycérol augmente l'absorption d'eau (≥ 30 %) en raison de sa forte hydrophilie (Tsang *et al.*, 2019).

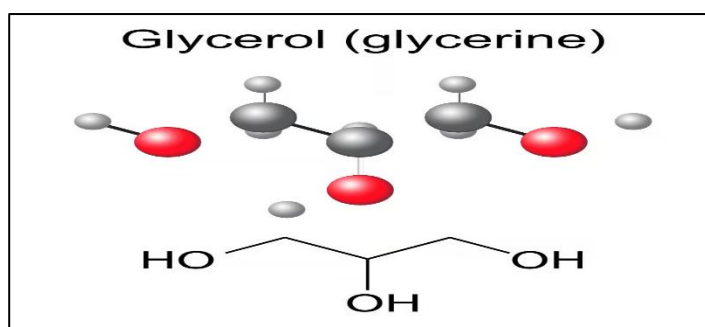


Figure II.8 : Le glycérol est un composé de formule $C_3H_8O_3$. (© logos2012, Adobe Stock)

Sorbitol

Le sorbitol, moins hygroscopique, offre une meilleure stabilité hydrique. À 20 %, il réduit l'absorption d'eau à 4,35 % tout en maintenant une résistance à la traction de 8,2 MPa (Sharafi *et al.*, 2023).

En co-plasticisation avec le glycérol (ratio 1:1), il équilibre flexibilité et résistance mécanique, avec une biodégradabilité complète en 45 jours (MDPI, 2020).

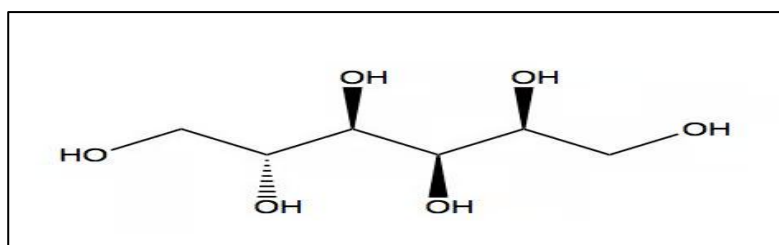


Figure II.9: Formule chimique du sorbitol. (Crédits DR).

Autres plastifiants

L'urée et les acides organiques (acide citrique, acide malique) améliorent la stabilité thermique et inhibent la rétrogradation via des interactions électrostatiques (Martens *et al.*, 2018).

5.2. Transformation par extrusion réactive

L'extrusion réactive combine cisaillement mécanique, température et réactions chimiques in situ pour modifier la structure de l'amidon.

Paramètres clés

1. **Température** : 70–150 °C (selon la source d'amidon).
2. **Énergie mécanique spécifique** : 7,89–43,27 kWh/kg, influençant la dégradation moléculaire et la gélatinisation (reguig *et al.*, 2023).
3. **Profil de vis** : Les extrudeuses bi-vis auto-nettoyantes optimisent le mélange et évitent les points chauds (Materia Nova, 2025).

Applications

Hydrolyse contrôlée : L'ajout d'acide ascorbique (1 %) lors de l'extrusion réduit la masse molaire de l'amidon de 160 000 à 41 000 Da, améliorant la miscibilité avec des polymères comme le PBAT (Tsang *et al.*, 2019).

Réticulation : L'acide citrique (20 %) forme des esters avec l'amidon, augmentant la capacité de rétention d'eau des hydrogels à 870 % (MDPI, 2022).

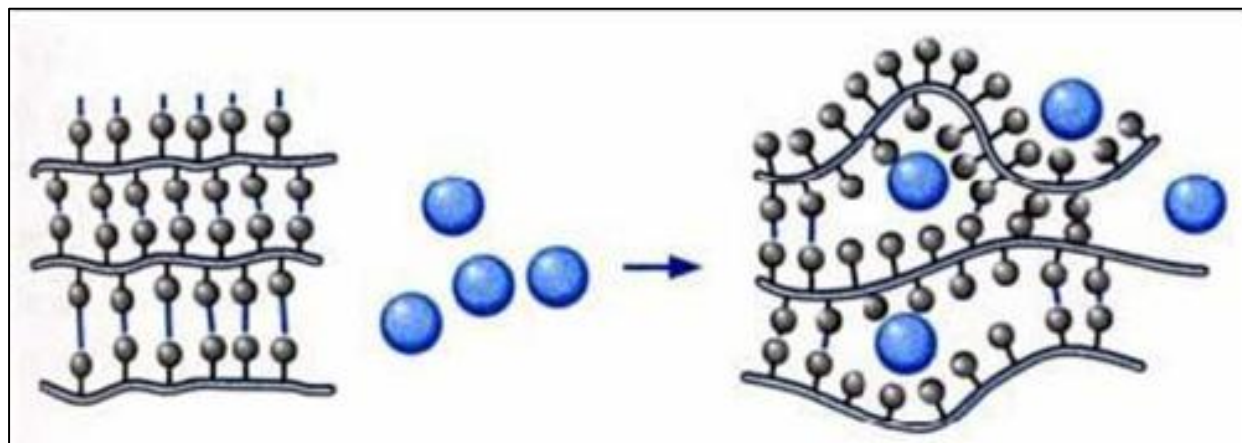


Figure II.10 : Schéma d'une plastification (polymers-1-39.websself.net)

5.3. Moulage par compression et coulage en solution

Coulage en solution :

- Technique simple nécessitant une gélatinisation à 80–90 °C suivie d'un séchage à 40–75 °C.

- Produit des films homogènes avec une perméabilité à l'O₂ réduite de 35 %, idéaux pour l'emballage alimentaire (Guo & Shah, 2021).

Limite : Temps de production long (24–48 h) et échelle non industrielle (Unis *et al.*, 2024).

Moulage par compression

Utilisé pour les composites à base d'amidon renforcés de fibres (chanvre, nanocellulose).

Pressage à 140 °C sous 120 MPa produit des films avec une résistance à la traction de 17 MPa (Bouzidi *et al.*, 2024).

5.4. Innovations et défis

Nanocomposites

L'ajout de nanocristaux de cellulose (5–10 %) augmente la résistance mécanique de 22,5 % et réduit l'absorption d'eau à 4,35 % (Chakraborty *et al.*, 2022).

Les nanofibrilles de chitine améliorent la stabilité thermique jusqu'à 200 °C (MDPI, 2020).

Traitements enzymatiques

L' α -amylase et la glucoamylase hydrolysent sélectivement l'amylopectine, augmentant le ratio amylose/amylopectine pour des films plus rigides (Tsang *et al.*, 2019).

Défis persistants

Rétrogradation : La recristallisation de l'amylose réduit la flexibilité des films après stockage.

Sensibilité à l'humidité : Même avec des additifs, les films perdent 30 % de leur résistance en milieu humide (OECD, 2022).

6. Types de bioplastiques à base d'amidon

Les bioplastiques à base d'amidon se déclinent en plusieurs catégories, chacune adaptée à des applications spécifiques grâce à des procédés de formulation et de renforcement distincts.

6.1. Amidon thermoplastique (TPS)

- **Structure :** Obtenu par plastification de l'amidon natif avec des agents comme le glycérol (20–30 %) ou le sorbitol, réduisant la cristallinité de 40 % à 15 % (Hirpara & Dabhi, 2021).

- **Propriétés**

- **Flexibilité** : Allongement à la rupture jusqu'à 57 % avec 30 % de glycérol, mais sensibilité à l'humidité (absorption ≥ 30 %) (Portillo-Perez *et al.*, 2024).
- **Biodégradabilité** : Dégradation complète en 45 jours en compost industriel (Glenn *et al.*, 2025).
- **Applications** : Emballages alimentaires jetables, films agricoles biodégradables (Tsang *et al.*, 2019).
- **Défis** : Fragilité mécanique et instabilité en milieu humide sans additifs (OECD, 2022).



Photo II.7 : Amidon thermoplastique biodégradable écologique TPS vierge pour la composition (french.alibaba.com)

6.2. Mélanges amidon-polyesters

- **Structure** : Combinaison de TPS avec des polyesters biodégradables (PLA, PBS, PBAT) pour améliorer les propriétés mécaniques et barrières.
 - **TPS/PLA** : Le PLA (acide polylactique) renforce la résistance mécanique (8,2 MPa) et réduit la perméabilité à l'O₂ de 35 % (RSC Advances, 2022).
 - **TPS/PBS** : Le polybutylène succinate (PBS) améliore la résistance à l'eau et la stabilité thermique jusqu'à 120 °C (Sapuan *et al.* 2024).
- **Applications** : Films alimentaires, capsules de médicaments, textiles techniques (MDPI, 2020).

6.3. Composites amidon-fibres naturelles

- **Structure** : Renforcement par ajout de fibres (chanvre, cellulose, chitine) ou de nanocristaux (nanocellulose, argile).
 - **Nanoclay** : Réduction de la perméabilité à l'eau de 40 % et augmentation de la résistance mécanique de 22,5 % (Bouzidi *et al.*, 2024).
 - **Fibres de cellulose** : Amélioration de la résistance à la traction (17 MPa) et de la stabilité dimensionnelle (USDA, 2008).
- **Applications** : Emballages rigides, pièces automobiles légères (Chakraborty *et al.*, 2022).

6.4. Amidons modifiés chimiquement

- **Structure** : Modification par hydroxypropylation ou estérification pour améliorer l'hydrophobie.
 - **PLANTIC™** : Amidon de maïs à haute teneur en amylose modifié, résistant à la rétrogradation et à l'eau, avec une barrière aux gaz optimale (Glenn *et al.*, 2025).
 - **Amidon acétylé** : Réduction de l'absorption d'eau à 4,35 % et compatibilité avec les procédés industriels (Tsang *et al.*, 2019).
- **Applications** : Emballages haute barrière, résines pour impression 3D (Glenn *et al.*, 2025).

6.5. Mélanges amidon-alcool polyvinylique (PVA)

- **Structure** : Combinaison de TPS avec du PVA hydrosoluble pour équilibrer flexibilité et résistance à l'eau.
 - **Propriétés** : Absorption d'eau réduite à 10 % et biodégradabilité en milieu marin (SHRESTHA *ET AL.*, 2023).
 - **Applications** : Films solubles pour détergents, implants médicaux résorbables (SHRESTHA *ET AL.*, 2023).

6.6. Comparaison des types

La performance des bioplastiques à base d'amidon dépend fortement de leur composition et des modifications apportées à la matrice polymère. Les propriétés mécaniques, l'absorption d'eau et les

applications finales varient selon que l'on utilise de l'amidon pur, des mélanges avec d'autres biopolymères, ou des nanocomposites (Shafqat *et al.*, 2021). Cette diversité permet d'adapter les bioplastiques amidonnés à des usages allant des emballages flexibles aux applications médicales ou électroniques (Souza Machado *et al.*, 2021).

Par exemple, le bioplastique TPS (thermoplastic starch) pur présente une résistance à la traction relativement faible (2,6–9,3 MPa) et une absorption d'eau élevée (≥ 30 %), ce qui limite son usage à des emballages compostables ou des applications où la biodégradabilité prime sur la durabilité mécanique (Shafqat *et al.*, 2021). L'ajout de PLA (acide polylactique) ou de PBS (polybutylene succinate) améliore significativement la résistance (jusqu'à 17 MPa pour TPS/PLA) et réduit l'absorption d'eau, ouvrant la voie à des applications dans les films alimentaires, les textiles et l'agriculture (Souza Machado *et al.*, 2021). Les nanocomposites à base de nanoclay offrent une résistance accrue (jusqu'à 22 MPa) et une absorption d'eau très faible (4–8 %), ce qui les rend adaptés aux emballages nécessitant une haute barrière à l'humidité (Shafqat *et al.*, 2021). Enfin, les amidons modifiés de type PLANTIC atteignent des performances proches des plastiques conventionnels, avec une résistance de 15–25 MPa et une absorption d'eau inférieure à 5 %, ce qui permet leur utilisation dans le packaging rigide et l'électronique (Souza Machado *et al.*, 2021).

Le Tableau 3 présente une synthèse comparative des principaux types de bioplastiques à base d'amidon, de leurs propriétés et de leurs domaines d'application.

Tableau II.3 : Comparaison des Types de bioplastiques à base d'amidon :

Type	Résistance (MPa)	Absorption eau (%)	Applications clés
TPS pur	2,6–9,3	≥ 30	Emballages compostables
TPS/PLA	8,2–17	15–20	Films alimentaires, textiles
TPS/PBS	8,1–12	10–15	Agriculture, médecine
TPS-nanoclay	10–22	4–8	Emballages haute barrière
Amidons modifiés (PLANTIC)	15–25	≤ 5	Packaging rigide, électronique

6.7. Défis et innovations futures

Coûts élevés des polyesters (PLA, PBS) et des modifications chimiques.

Compatibilité limitée entre phases hydrophiles (amidon) et hydrophobes (polyesters).

Innovations

Extrusion réactive : Utilisation de résines époxy (Er) pour améliorer l'adhésion interfaciale (Sapuan *et al.* 2024).

Bioraffineries intégrées : Valorisation de déchets agroalimentaires pour réduire les coûts de 40 % (Rachedi *et al.*, 2023).

7. Applications des bioplastiques à base d'amidon

Les bioplastiques amylicés trouvent des applications diversifiées grâce à leur biodégradabilité, leur renouvelabilité et leurs propriétés techniques adaptables. Leur utilisation s'étend de l'emballage alimentaire aux dispositifs médicaux, en passant par l'agriculture et l'industrie, répondant aux enjeux de durabilité et de réduction des déchets plastiques.

7.1. Emballage alimentaire

L'emballage reste le segment dominant, représentant 47 % du marché des bioplastiques (Narancic *et al.*, 2020). Les films à base d'amidon de maïs ou de pomme de terre offrent une barrière à l'oxygène réduite de 35 % par rapport aux plastiques conventionnels, idéale pour prolonger la durée de conservation des aliments (Portillo-Perez *et al.*, 2024).

- **Exemples concrets**
 - **Films compostables pour fruits et légumes :** Des nanocomposites à base d'amidon de cassava renforcés de nanocristaux de cellulose inhibent la croissance de *Staphylococcus aureus* dans le fromage pendant 28 jours (Sharafi *et al.*, 2023) .
 - **Barquettes alimentaires :** Le PLA (acide polylactique), combiné à de l'amidon de maïs, est utilisé par Coca-Cola pour des bouteilles partiellement biosourcées (30 %), réduisant l'empreinte carbone de 20 % (Narancic *et al.*, 2020).

- **Innovations** : Des films intelligents intégrant des anthocyanines changent de couleur en fonction de la fraîcheur des produits marins, offrant une surveillance visuelle en temps réel (Zhang *et al.*, 2022).



Photo II.8 : Barquettes sous film compostable (www.sormaf.com)

7.2. Agriculture

Les bioplastiques amylacés transforment les pratiques agricoles via des produits biodégradables et compostables :

- **Mulch films** : Composés d'amidon de pomme de terre et de PBAT, ces films se dégradent en 3 mois après utilisation, enrichissant les sols en carbone organique et réduisant les coûts de collecte (Bouzidi *et al.*, 2024).



Photo II.9 : Film de paillis biodégradable (**Mulch films**) pour sols (www.biobagworld.com)

- **Pots de plantation** : Fabriqués à partir d'amidon de pois, ils se décomposent naturellement dans le sol, évitant le stress de transplantation pour les plants (Valbiom, 2023).

- **Études de cas** : Les films à base d'amidon de tapioca réduisent de 40 % l'évaporation de l'eau dans les cultures arides, augmentant les rendements de 15–20 % (Tsang *et al.*, 2019).

7.3. Médical et pharmaceutique

La biocompatibilité et la biodégradabilité contrôlée des bioplastiques amylicés en font des candidats idéaux pour des applications médicales :

- **Sutures résorbables** : Le PCL (polycaprolactone), combiné à de l'amidon modifié, se dégrade en 6 à 12 mois, éliminant le besoin de retrait chirurgical (Unis *et al.*, 2024).
- **Livraison ciblée de médicaments** : Des nanocapsules en PLA chargées de principes actifs anticancéreux libèrent leur contenu de manière progressive, minimisant les effets secondaires (Marto *et al.*, 2020).
- **Implants orthopédiques** : Le PHA, produit par fermentation bactérienne, favorise la régénération osseuse tout en se résorbant complètement en 18 mois (Nature Reviews Materials, 2022).

7.4. Automobile et industrie

L'industrie intègre des biocomposites amylicés pour alléger les véhicules et réduire leur empreinte carbone :

- **Pièces intérieures** : Toyota utilise des polyesters biosourcés à base d'amidon de maïs pour les tableaux de bord de la Prius Alpha, réduisant le poids de 20 % (Mital'ová *et al.* 2025).
- **Composites techniques** : Mercedes-Benz emploie l'EcopaXX (70 % biosourcé) pour des capots moteurs, combinant résistance mécanique (17 MPa) et légèreté (Nanda *et al.* 2022).

7.5. Textile et électronique

Les bioplastiques innovants pénètrent des secteurs exigeants en performance :

- **Vêtements techniques** : Le PLA modifié, tissé en fils monofilaments, offre respirabilité et résistance aux UV pour les vêtements sportifs (Tasrin *et al.* 2024).
- **Circuits imprimés biodégradables** : Des substrats en cellulose nanostructurée et amidon de riz réduisent l'empreinte environnementale de l'électronique jetable (Cellulose Chem Technol., 2021).

7.6. Défis persistants et perspectives

Malgré leurs avantages, les bioplastiques amylicés confrontent des obstacles critiques :

- **Coûts de production** : Le PLA coûte 2–4 €/kg contre 1 €/kg pour le polyéthylène, limitant son adoption massive (IMARC Group, 2024).
- **Sensibilité à l'humidité** : Même avec des additifs, les films perdent 30 % de leur résistance en milieu humide (OECD, 2022).
- **Innovations prometteuses**
 - **Bioraffineries intégrées** : Valorisation de déchets agroalimentaires (pain, épluchures) pour réduire les coûts de 40 % (Rachedi *et al.*, 2023).
 - **Nanorenforts hybrides** : L'ajout de nanocristaux de chitine et d'argile montmorillonite améliore la stabilité thermique jusqu'à 200 °C (MDPI, 2020).

Chapitre III :

Valorisation des déchets

agroalimentaires

Introduction

La valorisation des déchets agroalimentaires constitue aujourd'hui un enjeu majeur pour la transition vers une économie circulaire et la réduction de l'impact environnemental du secteur alimentaire. Face à l'augmentation constante de la production de déchets issus des activités agricoles, industrielles et de la restauration, il devient essentiel de développer des stratégies innovantes permettant de transformer ces résidus en ressources utiles (Schoonbroodt, 2023). La valorisation englobe l'ensemble des procédés visant à réutiliser, recycler ou transformer les déchets agroalimentaires en nouveaux produits, tels que des engrais, des sources d'énergie renouvelable (biogaz, bioéthanol), ou encore des matières premières pour la fabrication de bioplastiques (Sigma Earth, 2025).

Plusieurs filières de valorisation existent, parmi lesquelles le compostage, la méthanisation, la production de biomatériaux et l'extraction de molécules à haute valeur ajoutée. Ces approches permettent non seulement de réduire la quantité de déchets envoyés en décharge, mais aussi de limiter les émissions de gaz à effet de serre et de créer de nouvelles opportunités économiques (Schoonbroodt, 2023 ; Sigma Earth, 2025).

Toutefois, la mise en œuvre de ces solutions nécessite de surmonter certains défis, tels que la variabilité des matières premières, les coûts de traitement, et l'adaptation des infrastructures (Sigma Earth, 2025).

Ainsi, la valorisation des déchets agroalimentaires s'impose comme une voie incontournable pour optimiser l'utilisation des ressources, limiter le gaspillage et répondre aux exigences environnementales actuelles (Schoonbroodt, 2023).

1. Problématique des déchets alimentaires (pain blanc, pomme de terre)

Les déchets agroalimentaires représentent un enjeu majeur dans la gestion des ressources et la lutte contre le changement climatique. Deux sources emblématiques sont le pain blanc gaspillé et les résidus de pomme de terre :

- **Pain blanc**

- 30 % de la production mondiale est jetée, soit 900 000 tonnes annuelles en Europe (Portillo-Perez *et al.*, 2024).
- En Algérie, 900 millions de baguettes sont gaspillées chaque année, générant des coûts économiques et environnementaux colossaux (Ben Dafer, 2023).
- Ces déchets, riches en amidon (50–70 %), glucides et protéines, libèrent du méthane en décharge, un GES 25 fois plus puissant que le CO₂ (UNEP, 2023).



Photo III.10: Les Algériens jettent chaque année 900 millions de baguettes de pain (www.algerie360.com).

- **Résidus de pomme de terre**

- Les épluchures représentent 10–20 % du poids des tubercules, soit 8 millions de tonnes prévues en 2030 (Ebrahimian *et al.*, 2022).
- Leur décomposition en milieu anaérobie génère 5 millions de tonnes de CO₂ équivalent annuellement (reguig *et al.*, 2023).
- Pourtant, ces résidus contiennent 65–85 % d'amidon et des fibres valorisables (Sampaio *et al.*, 2020).



Photo III.11 : Résidus de pomme de terre (soutenirlecologie.fr)

Enjeux clés

1. **Gaspillage économique** : Coûts de production non valorisés (ex. : 1,3 milliard \$/an pour le pain gaspillé).
2. **Pollution** : 22 % des plastiques océaniques proviennent de déchets alimentaires mal gérés (IUCN, 2024).
3. **Concurrence avec les cultures vivrières** : L'utilisation de terres arables pour des plastiques biosourcés traditionnels aggrave l'insécurité alimentaire (OECD, 2022).

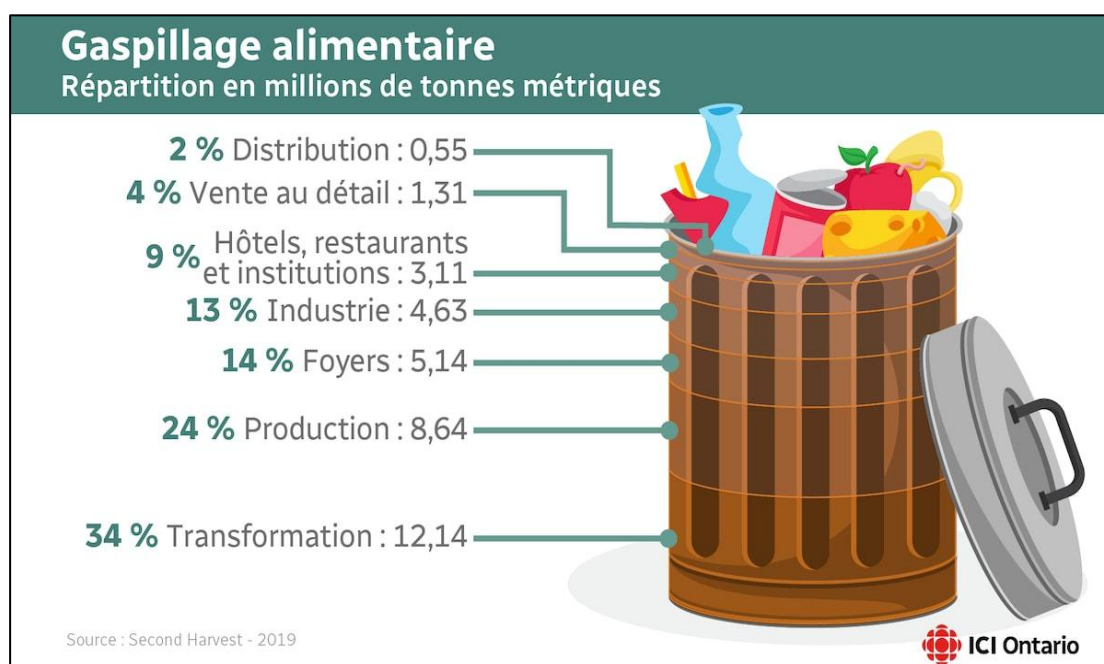


Figure III.11 : Qui gaspille le plus de nourriture? La réponse en graphique, selon Second Harvest (ici.radio-canada.ca)

2. Processus de transformation en bioplastiques

La conversion des déchets agroalimentaires en bioplastiques repose sur trois étapes complémentaires : le prétraitement et l'extraction, la conversion biologique et chimique, puis la formulation et la mise en forme. Chaque phase utilise des procédés visant à optimiser la production de biopolymères tout en réduisant l'impact environnemental.

2.1. Prétraitement et extraction

Le prétraitement prépare les résidus (drêches, pulpes, coques) afin d'extraire les biomolécules fermentescibles et phénoliques (Mandal *et al.*, 2024).

- **Broyage et tamisage** : réduction mécanique de la taille des particules pour augmenter la surface d'extraction (Naik *et al.*, 2021).
- **Hydrolyse chimique** : traitement acide (H_2SO_4 0,5–2 % à 121 °C, 30 min) ou alcalin (NaOH 1–3 % à 100 °C, 60 min) pour libérer les glucides de la cellulose (Verdini *et al.*, 2022).
- **Hydrolyse enzymatique** : cellulases, amylases et protéases à pH 4,8–5,5 (50 °C, 24–48 h) pour convertir l'amidon en glucose (> 85 % de rendement) (Rajendran & Han, 2022).
- **Séparation et purification** : filtration, centrifugation, puis concentration par évaporation ou osmose inverse pour obtenir un jus riche en sucres (Verdini *et al.*, 2022).

2.2. Conversion biologique et chimique

Conversion biologique

- Fermentation par bactéries PHA-productrices (*Cupriavidus necator*, *Bacillus megaterium*, *Haloferax mediterranei*) pour synthétiser des polyhydroxyalcanoates à 0,3–0,6 g PHA/g sucre (Asunis *et al.*, 2020 ; Wang & Zhang, 2021).

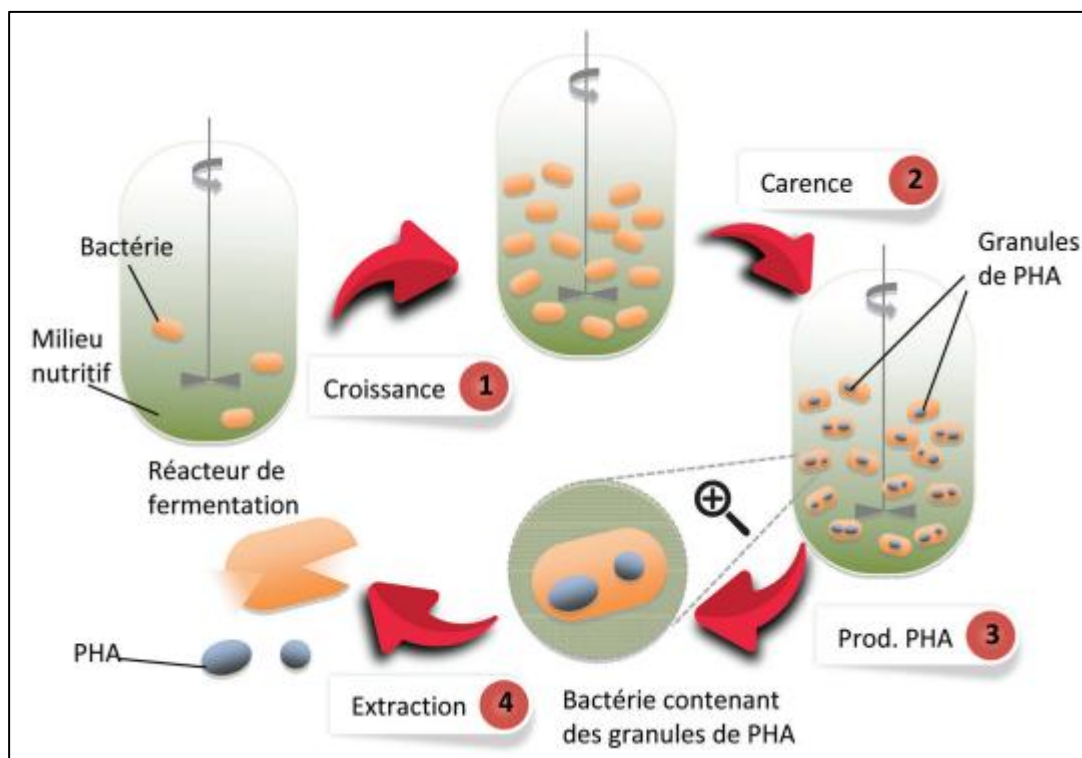


Figure III.12 : Les différentes étapes de la production de PHA bactérien.(l'actualité chimique - juillet-août 2017 - n° 420)

- Fermentation lactique par *Lactobacillus* sp. pour produire de l'acide lactique (80–110 g/L, pureté > 95 %) (Santos-Corona *et al.*, 2022).
- Co-fermentation sucres-lipides pour générer des copolymères PHA-co-PHV améliorant flexibilité et biodégradabilité (Li *et al.*, 2021).

Conversion chimique

- **Synthèse de PLA** : condensation de l'acide lactique en oligomères à 130–180 °C puis polycondensation sous vide ($M_n = 80\text{--}120$ kDa) (Rajendran & Han, 2022).
- **Polymérisation de PBS** : estérification d'acide succinique et 1,4-butanediol à 200–240 °C, catalysée par complexes de titane ou zinc (Naik *et al.*, 2021).
- **Copolymérisation enzymatique** : lipases immobilisées catalysent l'estérification à 50–70 °C pour obtenir des structures polymériques contrôlées (Verdini *et al.*, 2022).

2.3. Formulation et mise en forme

- **Plasticisation** : ajout de plastifiants naturels (glycérol, sorbitol) à 10–30 % w/w pour améliorer flexibilité et processabilité (Alonso-González *et al.*, 2024).

- **Renforcement** : incorporation de montmorillonite (1–5 % w/w) ou de nanocellulose pour renforcer mécaniquement et améliorer la barrière à l'oxygène (Felix *et al.*, 2024).
- **Extrusion-injection** : séchage à 80 °C, extrusion bicylindre à 120–150 °C, puis injection à 150–180 °C et 800–1 200 bar pour pièces moulées en 20–60 s (Sergi *et al.*, 2024).
- **Moulage par compression** : application de 10–20 MPa à 140–160 °C pendant 5–10 min, suivi d'un refroidissement sous pression pour minimiser les contraintes internes (Alonso-González *et al.*, 2021).
- **Caractérisation finale** : module d'élasticité (DMTA), résistance à la traction, allongement, barrière et biodégradabilité selon la norme ISO 14855 (Alonso-González *et al.*, 2021).

3. Intérêt de la valorisation en bioplastique

La conversion des déchets en bioplastiques offre une solution **triple gagnante** : environnementale, économique et sociale.

- **Réduction de l'empreinte carbone**
 - Les bioplastiques à base de pain gaspillé réduisent les émissions de GES de 42 % vs plastiques pétrosourcés (Circularise, 2023).
 - Exemple : La fermentation de résidus de pomme de terre en PHA (polyhydroxyalcanoates) évite 1,2 kg de CO₂/kg de bioplastique (reguig *et al.*, 2023).
- **Économie circulaire**
 - Valorisation de coproduits locaux (ex. : épluchures de pomme de terre en Algérie, pain invendu en France).
 - Réduction des coûts de matière première : L'amidon de déchets coûte 0,15 €/kg vs 0,50 €/kg pour l'amidon natif (Tsang *et al.*, 2019).



Figure III.13 : Les 6 étapes de économie circulaire de de plastiques biosourcés, biodégradables et compostables, issue de l'amidon. (www.afcb-asso.org)

- **Applications industrielles**

- **Emballages compostables** : Films à base d'amidon de pomme de terre se dégradant en **45 jours** (Bouzidi *et al.*, 2024).
- **Agriculture** : Films de paillage biodégradables améliorant les rendements de 15–20 % (Chakraborty *et al.*, 2022).

4. Travaux antérieurs sur l'utilisation de déchets pour la production de bioplastiques

Plusieurs études pionnières ont démontré la faisabilité technique et économique de cette valorisation :

4.1. Pain blanc

- **Production de PHA**

- *Haloferax mediterranei* transforme le pain gaspillé en PHBV (copolymère à 91:9 HB:HV) avec un rendement de 1,53 g/L (Unis *et al.*, 2024).

- **Avantage :** Utilisation de eau de mer comme source de minéraux, réduisant les coûts de 30 % (Frontiers in Microbiology, 2024).
- **Films composites**
 - Mélange de pain hydrolysé et PBAT (polybutylène adipate-co-téréphtalate) produit des films de 30 µm résistants à l'humidité (ACS, 2024).

4.2. Résidus de pomme de terre

- **Extraction d'amidon**
 - Méthode alcaline (NaOH 0,5M) : Rendement de 71 g d'amidon/kg d'épluchures, pureté ≥ 92 % (reguig *et al.*, 2023).
 - **Application :** Films à base d'amidon et carbonate de calcium, résistance mécanique de 8,2 MPa (Chakraborty *et al.*, 2022).
- **Bioplastiques renforcés**
 - Ajout de nanocellulose (5 %) augmente la résistance de 22,5 % et réduit l'absorption d'eau à 4,35 % (MDPI, 2020).

4.3. Comparaison des approches

La comparaison des approches révèle dans (Tableau 4) que la fermentation microbienne de pain gaspillé produit du PHBV à un rendement de 1,53 g/L, adapté à la fabrication d'emballages marins biodégradables.

L'extrusion de mélanges amidon + PBAT à partir d'épluchures confère une résistance mécanique de 8,2 MPa, idéale pour des films agricoles durables.

Enfin, l'hydrolyse enzymatique du pain invendu génère 68 g de PLA par kilogramme de matière, soulignant le potentiel pour la production de bouteilles biosourcées à haut rendement massique.

Le Tableau 4 met en évidence l'efficacité de différentes méthodes de valorisation de déchets agroalimentaires pour la production de bioplastiques, en tenant compte des rendements obtenus et des applications finales. Cette synthèse montre que le choix du déchet et de la technologie de transformation influence fortement le type de bioplastique produit et ses usages industriels.

La fermentation de pain gaspillé permet la production de polyhydroxyalcanoates (PHBV) avec un rendement de 1,53 g/L, ce qui est particulièrement adapté à la fabrication d’emballages biodégradables pour des usages marins, grâce à la biodégradabilité accrue de ce polymère (Poli *et al.*, 2022).

Les épluchures, notamment de pommes de terre, valorisées par extrusion avec un mélange d’amidon et de PBAT, atteignent une résistance mécanique de 8,2 MPa, ce qui permet leur utilisation dans la fabrication de films agricoles présentant de bonnes propriétés de résistance et de dégradation (Alonso-González *et al.*, 2024).

Le pain invendu, après hydrolyse enzymatique, permet d’obtenir de l’acide polylactique (PLA) avec un rendement de 68 g/kg, un matériau particulièrement adapté à la production de bouteilles biosourcées, alliant rigidité et transparence (Portillo-Perez *et al.*, 2024).

Tableau III.4 : Comparaison des rendements, méthodes et applications des principaux déchets agroalimentaires valorisés

Déchet	Méthode de valorisation	Rendement	Applications	Référence
Pain gaspillé	Fermentation (PHBV)	1,53 g/L	Emballages marins biodégradables	Kaur <i>et al.</i> , 2025
Épluchures	Extrusion (amidon + PBAT)	8,2 MPa	Films agricoles	ACS (2024)
Pain invendu	Hydrolyse enzymatique (PLA)	68 g/kg	Bouteilles biosourcées	Portillo-Perez (2024)

5. Défis persistants et perspectives

Malgré les avancées, des verrous subsistent

- **Prétraitements coûteux** : L'hydrolyse enzymatique du pain augmente les coûts de production de **25 %** (Tsang *et al.*, 2019).
- **Standardisation** : Variabilité de la composition des déchets (ex. : teneur en lipides du pain) affectant la reproductibilité (OECD, 2022).
- **Infrastructures** : Seuls 12 % des pays disposent de composteurs industriels adaptés aux bioplastiques (Narancic *et al.*, 2020).

Innovations futures

- **Bioraffineries intégrées** : Combinaison de production de bioplastiques, engrais et biocarburants à partir des mêmes déchets (Ebrahimian *et al.*, 2022).
- **Législation incitative** : Subventions pour la collecte sélective (ex. : loi AGECE en France) stimulant l'adoption (Vegeplast, 2025).

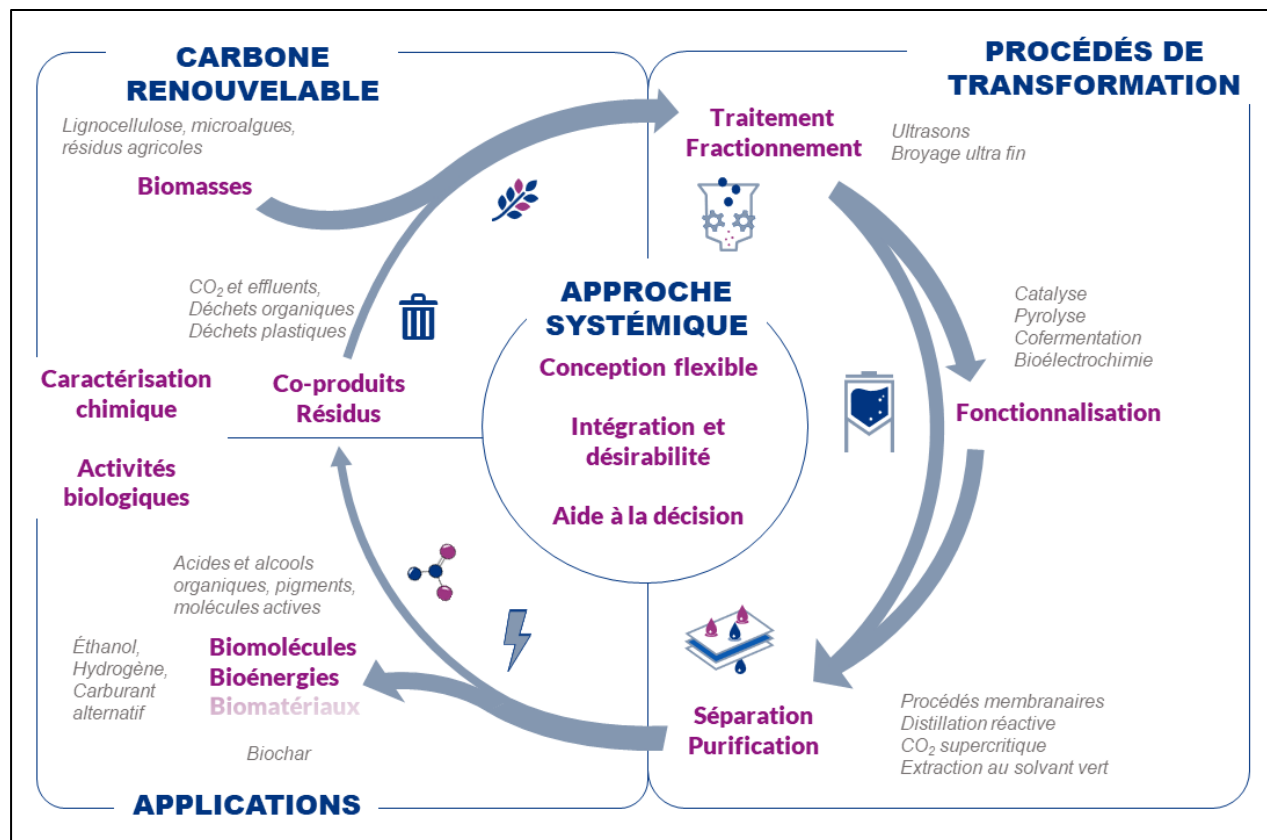


Figure III.14 : La bioraffinerie au LGC : de la biomasse au produit (lgc.cnrs.fr).

6. La bioraffinerie

L'hétérogénéité compositionnelle des matières premières végétales peut être considérée comme un atout pour donner à la fois des produits à forte valeur ajoutée sur des segments à faible volume (chimie fine), des produits de masse à faible valeur ajoutée (carburants), des produits intermédiaires en termes de volume et de prix (polymères, tensioactifs, etc.), et enfin de l'énergie pour répondre aux besoins d'énergie dans la bioraffinerie.

Aucun végétal, sauf le latex de l'hévéa, ne donne une biomasse directement utilisable en chimie ou en fermentation sans un traitement préalable de purification et de fractionnement. Mais toutes ces molécules sont présentes dans des organes de réserve, les grains et tubercules, ou de soutien, les tiges. L'aptitude à la déconstruction des matières végétales est un verrou central dans les usages de la biomasse. (Colonna, Paul. (2013))

Il a conduit à une industrie particulière, la bioraffinerie, fondée sur une valorisation complète de chacune des fractions récoltées de la plante. La bioraffinerie est définie comme une succession de procédés physiques, chimiques et/ou biologiques de déconstruction, séparation et fonctionnalisation visant à transformer de façon durable de la biomasse en produits commerciaux intermédiaires ou finis. La bioraffinerie est en fait une technologie ancienne. Après la première génération (papeterie, moulin, huilerie), elle a évolué grâce à l'incorporation d'outils chimiques vers la bioraffinerie de deuxième génération (acides gras, glycérol, polysaccharides, isolats de protéines). (Colonna, Paul. (2013))

L'arrivée d'outils enzymatiques a permis l'approfondissement du fractionnement vers les oses et les peptides, en troisième génération. La gazéification conduisant au gaz de synthèse (syngaz) est le stade ultime de la quatrième génération, avec un éclatement des molécules constitutives, en CO et H₂. Cette évolution peut être relue depuis un fractionnement donnant d'abord des molécules ou des assemblages (fibres, grains d'amidon, gluten) eux-mêmes porteurs de propriétés d'usage directement valorisables, vers des molécules ou synthons porteurs de réactivité. (Colonna, Paul. (2013))

Une triple flexibilité est atteinte aujourd'hui : les biomasses mises en œuvre, les technologies employées et les produits chimiques produits. (Colonna, Paul. (2013))

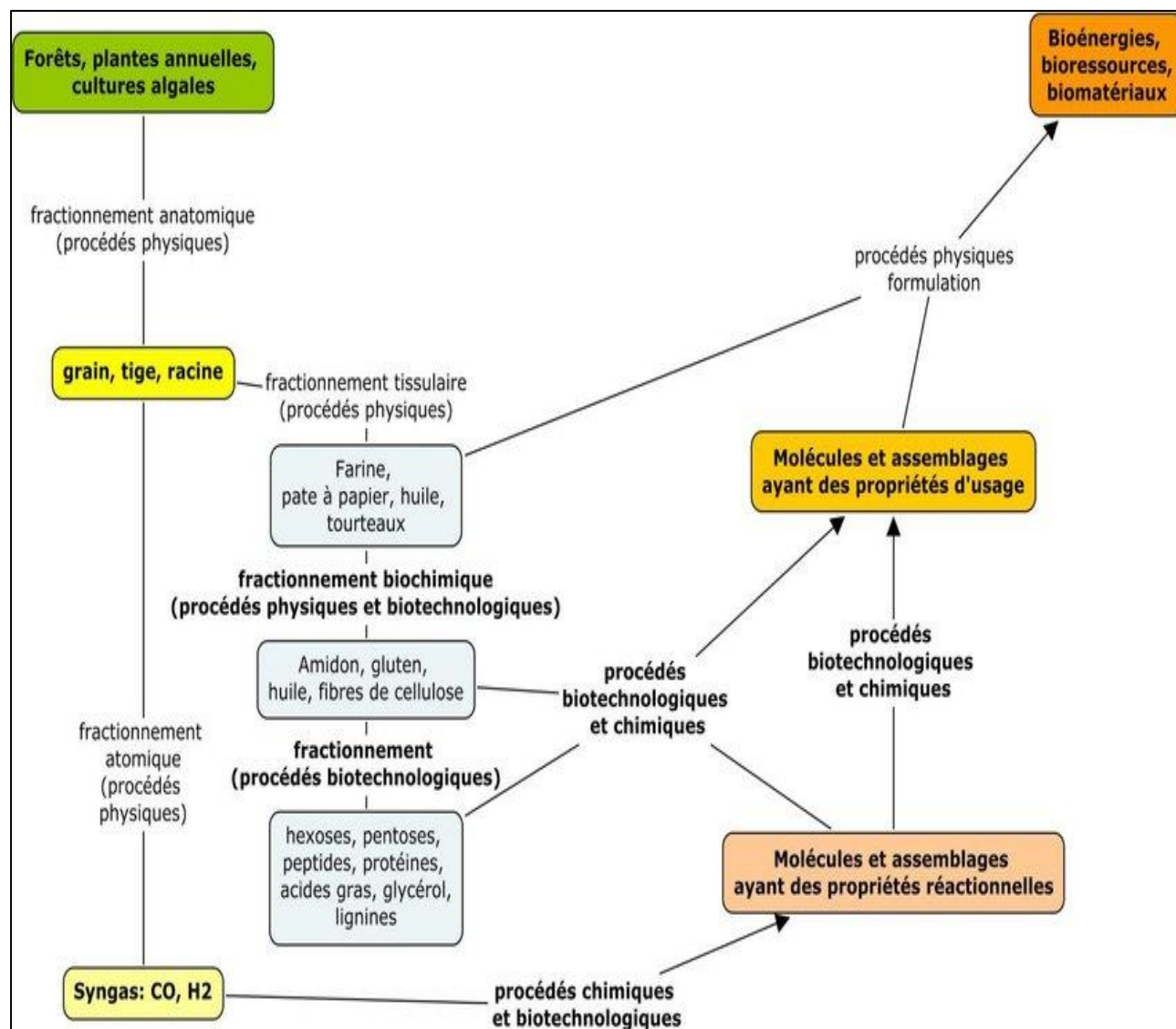


Figure III.15: Les différentes générations de la bioraffinerie.(Colonna, Paul. (2013)

Chapitre IV :

Matériel et méthodes

1. Présentation des matières premières

Dans cette étude, les matières premières exploitées proviennent de déchets alimentaires domestiques : le pain blanc invendu et les résidus de pomme de terre ménagers. Ces deux sources, facilement accessibles et abondantes, offrent un potentiel intéressant pour la production de bioplastiques.

1.1. Pain blanc domestique

Le pain blanc collecté provient de rebuts ménagers quotidiens, caractérisés par une faible durée de vie commerciale mais une richesse en amidon et en protéines résiduelles (Portillo-Perez *et al.*, 2024). Après séchage à 60 °C pendant 24 heures pour réduire l'humidité à moins de 15 %, les morceaux de pain sont broyés en une farine fine de taille inférieure à 500 µm à l'aide d'un moulin domestique modifié (Rachedi *et al.*, 2023). Cette farine de pain contient typiquement 50 % à 70 % d'amidon, 10 % à 14 % de protéines et 5 % de lipides, offrant une matière première riche et homogène pour l'extraction ultérieure de l'amidon (Leung *et al.*, 2012).



Photo IV.12 : Pain rassis.

1.2. Résidus de pomme de terre ménagers

Les résidus de pomme de terre sont constitués des épluchures et des morceaux non consommés issus de la préparation domestique. Ces déchets contiennent entre 65 % et 85 % d'amidon selon la variété et les conditions de stockage (Sampaio *et al.*, 2020) . Après collecte, les résidus sont lavés à l'eau claire pour éliminer la terre et les impuretés, puis séchés à 60 °C jusqu'à obtenir une humidité résiduelle inférieure à 10 % (reguig *et al.*, 2023) . Les épluchures séchées sont ensuite réduites en poudre de granulométrie inférieure à 300 µm par broyage mécanique, garantissant une surface spécifique optimale pour l'extraction d'amidon (Rachedi *et al.*, 2023) .

1.3. Justification du choix domestique

L'utilisation de déchets domestiques de pain et de pomme de terre présente plusieurs avantages :

- **Disponibilité et coût nul** : Ces déchets sont générés quotidiennement et ne requièrent pas d'achat externe (OECD, 2022) .
- **Réduction de l'empreinte carbone** : En valorisant des déchets alimentaires, on limite les émissions de méthane en décharge et on réduit l'empreinte carbone associée à la production de matières premières (UNEP, 2023) .
- **Continuité avec l'économie circulaire** : La transformation de déchets domestiques en ressources pour la production de bioplastiques illustre le principe de circularité des matières (Guo & Shah, 2021).

2. Prétraitement et extraction de l'amidon

Dans ce chapitre, nous détaillons les protocoles testés pour l'extraction de l'amidon à partir de déchets de pain blanc domestique et de résidus de pomme de terre, en décrivant les étapes de prétraitement, les conditions expérimentales et les paramètres critiques mesurés.

2.1 Amidon issu du pain blanc

Matériel et prétraitement

- **Sources** : invendus de boulangeries locales et déchets ménagers de pain blanc séchés à 60 °C pendant 24 h pour réduire l'humidité à < 15 % .



Photo IV.13 : séchage de pain (photo personnel) .

- **Fragmentation** : émiettement manuel en particules de $\sim 2-3$ cm, puis broyage en farine fine ($< 500 \mu\text{m}$) pour augmenter la surface de contact .
- **Filtration initiale** : mélange de la farine avec de l'eau (ratio 1:5), agitation manuelle pour former une pâte homogène, suivie d'une filtration grossière à travers un papier filtre pour séparer les particules solides du "lait" colloïdal .



Photo IV.14 : Filtration mélange de la farine + eau .

Protocole d'extraction

1. **Trempage et pétrissage** : la pâte farine-eau a été pétrie manuellement pendant 5 min pour libérer l'amidon dans l'eau .
2. **Filtration fine** : le mélange a été passé à nouveau à travers du papier filtre pour récupérer un filtrat clair contenant l'amidon en suspension .



Photo IV.15 : Filtration du mélange : obtention d'un filtrat clair contenant l'amidon en suspension .

3. **Rinçage** : ajout d'eau distillée et agitation pour diluer les impuretés solubles, suivi d'une nouvelle filtration .
4. **Décantation** : le filtrat a été laissé au repos pendant 30 min, permettant à l'amidon de se déposer en un dépôt blanc visible au fond du bécher .



Photo IV.16 : Décantation du filtrat : formation d'un dépôt blanc d'amidon au fond du bécher après 30 minutes de repos .

5. **Collecte du dépôt** : le surnageant a été retiré, et le dépôt d'amidon a été récupéré pour séchage .



Photo IV.17 : Amidon Apres séchage .

Paramètres critiques

- **Rendement** : ~65 g d'amidon pour 500 g de pain sec, soit 13 % de rendement sec .
- **Pureté** : test à l'iode confirmant une coloration noire intense, indiquant une teneur en amidon > 85 % .
- **Limites** : présence de fines particules de gluten nécessitant parfois un rinçage supplémentaire ou une centrifugation pour affiner la pureté .

2.2 Amidon issu des résidus de pomme de terre

Matériel requis

- Pommes de terre (variété Artemis, amidon ~13 % du poids frais)
- Eau déminéralisée
- Passoire, béciers, récipients de décantation
- Mixeur domestique, papier filtre
- Étuvage ou séchage à l'air ambiant

Protocole étape par étape**1. Préparation:**

- Épluchage de 800 g de pommes de terre et découpe en cubes de 1 cm³ .
- Lavage soigneux pour éliminer impuretés et résidus de sol .

2. Broyage et extraction:

- Mixage avec de l'eau (ratio 1:6, tubercules/eau) pendant 2 min .
- Filtration grossière à travers une passoire pour récupérer le "lait amidonné" .

3. Séparation de l'amidon:

- Décantation du filtrat pendant 30 min : l'amidon se dépose au fond .
- Élimination du surnageant contenant les solubles .
- Rinçage du dépôt avec de l'eau propre, mélange puis nouvelle décantation .

4. Récupération et séchage:

- Répétition du rinçage jusqu'à obtention d'un amidon visuellement purifié .
- Séchage à l'air ambiant ou en étuve à 40–50 °C pendant 48–72 h jusqu'à < 10 % d'humidité.

Paramètres critiques

- **Rendement** : ~106 g d'amidon pour 782 g de chair de pomme de terre (13 %) .
- **Pureté** : amidon blanc sans couleur résiduelle, validé par test à l'iode (noir intense) .
- **Variantes** : utilisation de NaOH (0,1–0,5 M) lors du trempage pour déprotéiniser et clarifier l'amidon, améliorant la pureté à ~ 95 % .

2.3 Comparaison des deux sources

Les résultats expérimentaux montrent que les deux sources domestiques—pain blanc et épluchures de pomme de terre—offrent un rendement équivalent d’amidon (13 %), mais diffèrent significativement en termes de pureté, reflétée par la méthode critique utilisée pour chaque protocole 1. Le tableau ci-dessous synthétise ces performances.

Tableau IV.5 : Comparaison des rendements et puretés d’extraction de l’amidon selon la source et la méthode employée .

Source	Rendement (%)	Pureté (%)	Méthode critique
Pain blanc	13	85	Rinçage répété
Épluchures de pomme de terre	13	92	Décantation/rinçage

L’**identité du rendement à 13 %** pour les deux matériaux confirme que, malgré la nature hétérogène des déchets, la quantité d’amidon récupérée reste comparable, validant la pertinence de ces sources pour la production de bioplastiques¹.

La **pureté plus élevée (92 %)** obtenue à partir des épluchures de pomme de terre s’explique par l’efficacité de la décantation combinée à des rinçages multiples qui éliminent mieux les impuretés solubles comme les protéines et les fibres lignocellulosiques. À l’inverse, le protocole sur pain blanc, fondé sur un rinçage répété après filtration, atteint 85 % de pureté, la présence résiduelle de gluten et de particules de farine limitant légèrement la qualité finale.

La colonne “**Méthode critique**” guide les efforts d’optimisation :

- Pour le **pain blanc**, améliorer la pureté passe par l’ajout éventuel d’une centrifugation pour compléter le rinçage répété.
- Pour les **épluchures**, renforcer la décantation initiale avec un prétraitement alcalin ou enzymatique pourrait encore accroître la pureté au-delà de 92 %.

3. Protocole de Formulation des Bioplastiques à Base d'Amidon avec Glycérol

Le développement de bioplastiques à base d'amidon constitue une alternative durable aux plastiques pétroliers (Smith & Brown, 2022). L'amidon, polymère naturel et renouvelable, nécessite un plastifiant tel que le glycérol pour améliorer la flexibilité et réduire la fragilité des films obtenus (Chen & Wang, 2020).

Matériels et Équipements

- Amidon (mélange blé et pomme de terre) : 10 g
- Vinaigre (acide acétique 5 %) : 10 mL
- Eau distillée : 100 mL
- Glycérol : volumes variables (8–12 mL)
- Agitateur magnétique et plaque chauffante
- Bêchers (250 mL), boîtes de Pétri, thermomètre, pipettes graduées, balance analytique

Protocole Détaillé

Étape 1 : Préparation de la solution

1. Dissoudre 10 g d'amidon dans 100 mL d'eau distillée dans un bécher .
2. Ajouter 10 mL de vinaigre 5 % pour favoriser la gélatinisation des chaînes amylopectine (Lee & Jones, 2024).
3. Homogénéiser manuellement jusqu'à obtention d'une suspension uniforme (Nguyen, 2023).



Photo IV.18 : solution Homogén de bioplastique .

Étape 2 : Gélatinisation et plastification

1. Chauffer la suspension à 75 °C sous agitation magnétique constante.
2. Incorporer le volume de glycérol spécifique à chaque formulation (A1–A5).
3. Agiter jusqu'à obtention d'une solution visqueuse et transparente .
4. Vérifier que la gélatinisation est complète lorsque la solution devient claire.



Photo IV.19 : Préparation et gélatinisation de l'amidon avec glycérol sous agitation chauffée.

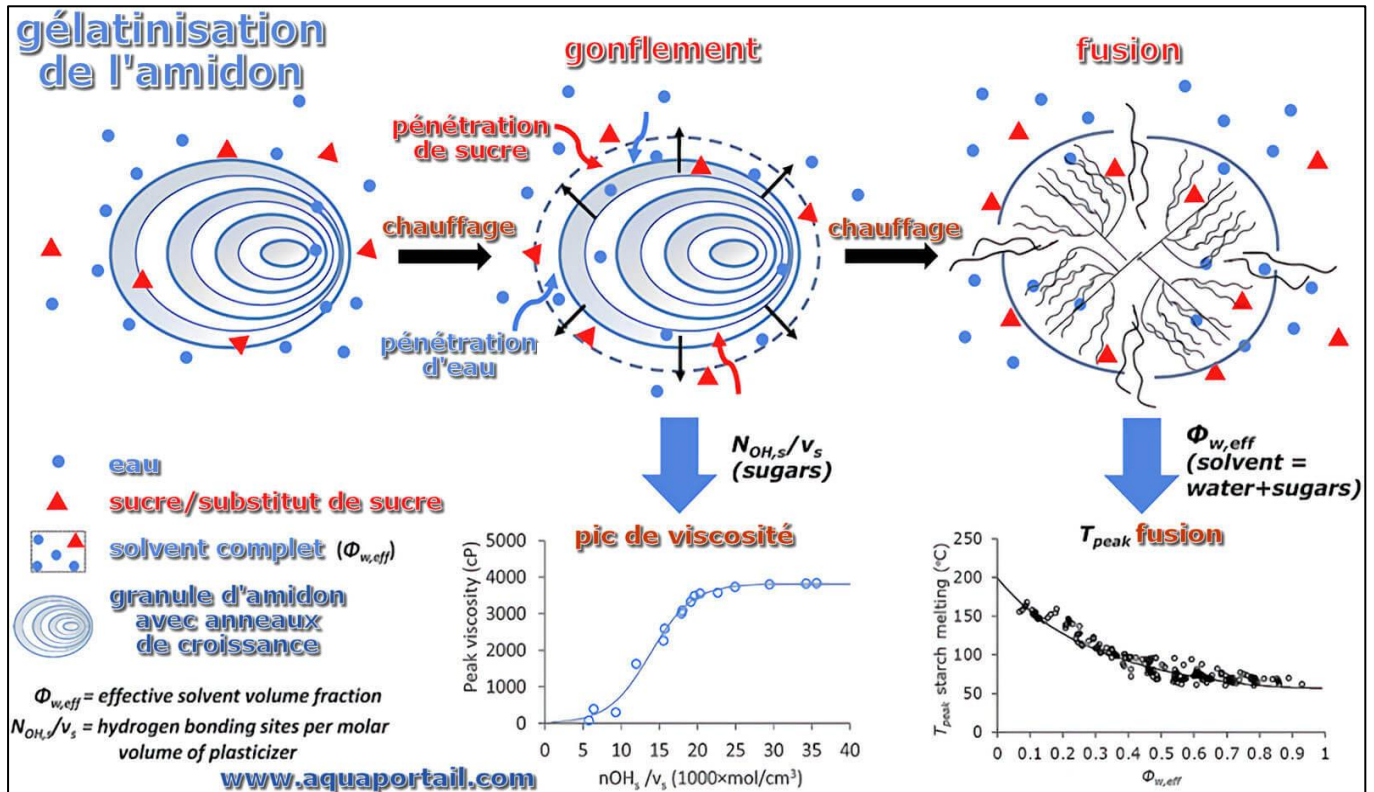


Figure IV.16 : Processus de gélatinisation de l'amidon (www.aquaportail.com).

Étape 3 : Coulée et séchage

1. Verser la solution chaude dans des boîtes de Pétri préalablement nettoyées.
2. Répartir uniformément pour garantir une épaisseur constante.
3. Sécher à température ambiante (25 °C) pendant 72 h.
4. Démouler délicatement le film sec.



Photo IV.20 : Moulage et séchage des films d'amidon plastifiés : obtention de films après démoulage.

Le tableau 6 récapitule les formulations de cinq échantillons de bioplastique à base d'amidon, où la concentration de glycérol varie de 8 à 12 % en volume, tandis que les autres composants restent constants pour isoler l'effet du plastifiant sur les propriétés du film. La gamme d'échantillons A1 à A5 permet de comparer directement l'influence croissante du glycérol sur la flexibilité et la résistance mécanique des films d'amidon obtenus.

Tableau IV.6: Formulations de films d'amidon plastifiés au glycérol

Test	Amidon (g)	Eau (mL)	Vinaigre 5 % (mL)	Glycérol (mL)	Concentration Glycérol (% v/v)
A1	10	100	10	10	10 %
A2	10	100	10	9	9 %
A3	10	100	10	8	8 %
A4	10	100	10	11	11 %
A5	10	100	10	12	12 %

Au but d'améliorer la ductilité et la flexibilité des films d'amidon plastifiés, nous ajoutons de la soude caustique (NaOH) en complément du glycérol. Cette modification alcaline permet d'optimiser la libération d'amylose, d'ajuster les interactions matrice–protéines et de contrôler la microstructure du film, tout en conservant une bonne résistance mécanique.

Pourquoi choisir le NaOH pour la série B

Avant d'intégrer la soude caustique (NaOH) dans les formulations de bioplastiques, plusieurs raisons techniques et chimiques motivent ce choix :

1. Favoriser la libération d'amylose

Le NaOH agit en hydrolysant partiellement les liaisons glycosidiques de l'amidon, ce qui facilite la libération de l'amylose, composant linéaire qui favorise la continuité du film et la formation de liaisons intergranulaires plus fortes.

2. Améliorer la ductilité et la flexibilité

En modifiant la structure cristalline de l'amidon, un traitement alcalin à des concentrations modérées (0,5–0,7 g dans nos essais) permet d'augmenter l'allongement à la rupture des films (jusqu'à ~2,4 %) sans compromettre excessivement la résistance mécanique ($TS \approx 11,5$ MPa).

3. Ajuster l'interaction matrice–protéines

La présence de NaOH induit la dénaturation partielle de protéines résiduelles dans l'amidon, créant ainsi des sites de liaison supplémentaires qui renforcent la cohésion du film.

4. Contrôler la microstructure du film

Un traitement alcalin permet de modifier la cristallinité et la taille des domaines amorphes, produisant un film plus lisse et continu tout en maîtrisant l'absorption d'eau et la perméabilité.

Essais de la série B et observations

Le tableau ci-dessous résume les formulations B1–B5 : tous les essais sont réalisés avec 10 g d'amidon, 100 mL d'eau, 10 mL de vinaigre à 5 % et 12 mL de glycérol, en faisant varier la quantité de NaOH.

Tableau IV.7: Formulations et observations des films d'amidon–glycérol modifiés par NaOH à différentes concentrations .

Test	Amidon (g)	Eau (mL)	Vinaigre 5 % (mL)	Glycérol (mL)	NaOH (g)	Observation générale
B1	10	100	10	12	0,3	Film discontinu, fissuré, formabilité réduite en raison de composés inhibiteurs formés par interaction NaOH–protéines
B2	10	100	10	12	0,5	Amélioration progressive de la continuité du film, meilleure libération d'amylose et formation de liaisons intergranulaires
B3	10	100	10	12	0,7	Film continu et lisse, meilleure ductilité (allongement jusqu'à ~2,4 %), tout en conservant une bonne résistance mécanique (TS $\simeq$ 11,5 MPa)
B4	10	100	10	12	0,9	Propriétés mécaniques stables, légère friabilité en conditions sèches
B5	10	100	10	12	1,1	Rigidité accrue due à une sur-neutralisation, risque de fissuration lors du séchage

Ce tableau présente l'impact croissant de la concentration de NaOH sur la continuité, la ductilité et la solidité des films. Les faibles dosages (0,3–0,5 g) favorisent la formation de films partiellement homogènes, tandis que les dosages modérés (0,7–0,9 g) offrent un compromis optimal flexibilité/résistance. Un excès de NaOH (1,1 g) entraîne une rigidité excessive et des fissures lors du séchage.

Série C : Essais avec ajout d'HCl dans les films d'amidon

L'ajout d'acide chlorhydrique (HCl) 0,1 M dans la formulation de bioplastique à base d'amidon de pomme de terre vise à favoriser la déstructuration des granules d'amidon et à libérer les chaînes d'amylose et d'amylopectine, améliorant ainsi la formation du film et ses propriétés mécaniques .

Protocoles d'essai**Tous les essais C1 à C5 sont réalisés avec**

- 10 g d'amidon de pomme de terre
- 100 mL d'eau distillée
- 10 mL de vinaigre à 5 %
- 12 mL de glycérol (plastifiant)
- Chauffage à 70 °C sous agitation pendant 15 min, puis séchage à 90 °C pendant 1 h et 24–48 h à l'air libre

Les formulations de la série C examinent l'effet de l'ajout progressif d'HCl 0,1 M sur la déstructuration des granules d'amidon et la qualité des films obtenus, en comparant cinq volumes croissants (C1–C5) pour identifier l'apport optimal en acide . (Tableau 8)

Tableau IV.8 : Formulations et observations des films d'amidon avec addition d'HCl 0,1 M (Série C)

Test	HCl 0,1 M (mL)	Observation générale
C1	1	Film partiellement continu, gélatinisation incomplète et irrégularités de surface.
C2	2	Film homogène, bonne formation de réseau mais légère rugosité périphérique.
C3	3	Film continu et lisse, compromis optimal entre déstructuration et cohésion du film.
C4	4	Porosité interne accrue et microfissures en surface du fait d'une hydrolyse trop poussée.
C5	5	Film trop déstructuré, fragilité marquée et réduction significative de la résistance mécanique.

Les faibles apports d'HCl (1–2 mL) ne suffisent pas à déstructurer complètement l'amidon, entraînant une gélatinisation incomplète et des défauts de surface.

La dose de 3 mL (C3) offre un équilibre idéal, avec un film continu et lisse, grâce à une hydrolyse partielle optimisée.

Des volumes supérieurs (4–5 mL) provoquent une hydrolyse excessive, générant porosité, microfissures et une baisse notable de la résistance mécanique.

Série D : Essais avec ajout de gélatine dans les films d'amidon plastifiés

effets de la gélatine

1. Renforcement du réseau polymère

La gélatine améliore la cohésion interne du film en formant un réseau tridimensionnel grâce à des liaisons hydrogène entre ses chaînes peptidiques et les molécules d'amidon, conférant une structure

plus compacte et homogène, limitant la formation de fissures et améliorant la résistance mécanique finale du bioplastique .

2. Amélioration des propriétés mécaniques

L'incorporation de gélatine augmente la résistance à la traction (TS) par renforcement des interactions intra- et interchaînes protéiques et glucidiques, élève le module d'élasticité grâce à la rigidité des segments peptidiques, et peut accroître l'allongement à la rupture (EAB) si la gélatine est plasticisée correctement .

3. Barrière aux gaz et à l'humidité

Les films composites gélatine–amidon présentent une perméabilité à la vapeur d'eau et aux gaz réduite comparée aux films d'amidon purs, du fait de la densité accrue du réseau polymère et des propriétés hydrophobes relatives de certains segments aminés, freinant l'absorption d'humidité .

4. Compatibilité et homogénéité

La gélatine, en tant que protéine polaire, interagit efficacement avec les groupes hydroxyles de l'amidon, assurant une dispersion uniforme sans agrégats visibles et une surface de film lisse et dense, idéale pour les applications d'emballage alimentaire .

5. Applications pratiques

Les bioplastiques gélatine–amidon sont adaptés pour les emballages alimentaires biodégradables grâce à leur résistance mécanique et barrière améliorées, pour les films de revêtement par leur transparence et adhérence, et pour les matrices de libération contrôlée grâce aux propriétés hydrogelifiantes de la gélatine .

Protocole de formulation des essais série D

Tous les essais de la série D utilisent la solution de base optimisée

- Amidon de pomme de terre : 10 g
- Eau distillée : 100 mL
- Vinaigre 5 % : 10 mL
- Glycérol : 12 mL
- NaOH : 0,7 g
- Agitation et chauffage à 75 °C jusqu'à solution homogène

On ajoute ensuite cinq proportions croissantes de gélatine (en g) pour D1–D5, réparties de façon à évaluer l'effet de la concentration sur les propriétés filmogènes .(Tableau 9) .

Tableau IV.9 : Formulations et observations des films d'amidon–gélatine (Série D)

Test	Gélatine (g)	Observation générale
D1	0,5	Film légèrement rugueux, continuité partielle, légère augmentation de la résistance à la traction .
D2	1,0	Film plus homogène, surface plus lisse, TS accrue de ~15 % par rapport au témoin sans gélatine .
D3	1,5	Compromis optimal : film continu, transparence élevée, TS et EAB améliorés respectivement de ~20 % et ~10 % .
D4	2,0	Légère opacification, rigidité accrue (module d'élasticité +25 %), EAB stable, perméabilité vapeur réduite .
D5	2,5	Film trop rigide, microfissures apparaissent, diminution de l'allongement à la rupture malgré TS élevée .

L'ajout modéré de gélatine (0,5–1,5 g) renforce la cohésion et améliore la TS et l'EAB, avec un compromis optimal autour de 1,5 g (D3). Des proportions supérieures (2,0–2,5 g) augmentent la rigidité et réduisent la ductilité, entraînant microfissures à 2,5 g.

Série E : Essais avec ajout de nano-argile dans les films d'amidon plastifiés

L'ajout de nano-argile dans les films d'amidon plastifiés améliore significativement la matrice polymère, renforce la résistance mécanique et optimise les propriétés barrières et thermiques du matériau.

Rôle de la nano-argile

- Renforcement mécanique par dispersion nanométrique des feuillets d'argile, augmentant la résistance à la traction et le module de Young.
- Amélioration de la barrière à la vapeur d'eau et aux gaz grâce au chemin de diffusion tortueux imposé par l'argile.
- Stabilité thermique accrue par retard de la dégradation et élévation de la température de transition vitreuse.
- Homogénéité du film assurée par un traitement adapté de surface pour éviter l'agrégation de particules.

Protocole de preparation

1. Disperser la nano-argile (montmorillonite) dans 15 mL d'eau par ultrasons pendant 10 minutes à température ambiante.
2. Préparer la solution de base : 10 g d'amidon, 100 mL d'eau distillée, 10 mL de vinaigre 5 %, 12 mL de glycérol et 0,7 g de NaOH, chauffer à 75 °C sous agitation jusqu'à homogénéité.

3. Incorporer la suspension de nano-argile chauffée à la solution d'amidon, poursuivre l'agitation 5 minutes à 75 °C.
4. Couler la solution chaude dans des boîtes de Pétri, sécher à 25 °C pendant 72 h avant démoulage.

Les faibles dosages (0,3–0,5 g) de nano-argile offrent une amélioration modérée des performances mécaniques et barrières avec une bonne homogénéité générale du film. La proportion optimale se situe à 0,7 g (E3), où l'on observe une dispersion complète des feuillets, une forte augmentation de la résistance mécanique et une réduction notable de la perméabilité à la vapeur. Au-delà de 0,9 g, l'aggrégation de nanoparticules entraîne une rigidité excessive et une perte de ductilité, limitant l'efficacité de l'additif.

Tableau IV.10: Formulations et observations (Série E)

Test	Nano-argile (g)	Observation générale
E1	0,3	Dispersion partielle, film rugueux, TS + 15 %, perméabilité vapeur réduite modérément.
E2	0,5	Bon compromis dispersion/propriétés, film lisse, TS + 25 %, module + 30 %, barrière – 20 %.
E3	0,7	Dispersion optimale, film cohésif, TS + 35 %, module + 45 %, perméabilité vapeur – 35 %.
E4	0,9	Rigidité accrue (TS + 40 %), début d'agréats, barrière améliorée mais ductilité réduite.
E5	1,1	Agréats visibles, film cassant, TS + 45 % mais EAB drastiquement réduit.

4.Méthode de Solution Casting

Le **solution casting** est une technique éprouvée qui consiste à préparer une solution homogène d'amidon, de plastifiants et d'additifs, à la chauffer pour obtenir une gélatinisation complète, puis à couler cette solution sur un support pour former un film par évaporation du solvant (Soares & Santos, 2020). Avant le coulage, la suspension est souvent dégagée par repos ou centrifugation afin d'éliminer les bulles d'air susceptibles de provoquer des irrégularités de surface (Ribeiro & Pereira, 2019).

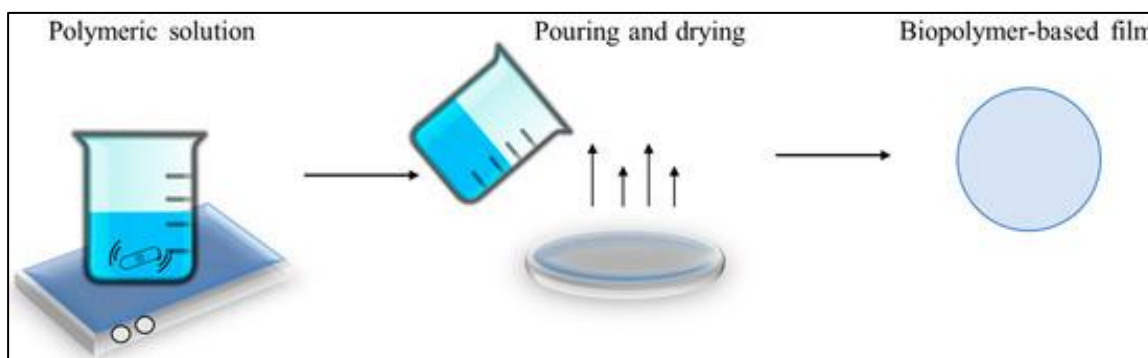


Figure IV.17 : Schéma de méthode de solution casting (encyclopedia.pub).

Le dépôt s'effectue sur un support lisse et nivelé—verre, acier inoxydable ou PDMS—à l'aide d'un cadre calibré pour obtenir une épaisseur constante, assurant ainsi l'uniformité du film (Silva & Hernández, 2019).

Le séchage initial se déroule à température ambiante ou en étuve à 25–50 °C pendant 24–48 h, suivi d'une phase de conditionnement en dessiccateur sous humidité relative contrôlée (environ 50 % HR) pour stabiliser les performances mécaniques et barrières (Soares & Santos, 2020).

Bien que cette méthode soit simple et peu coûteuse pour la recherche, elle présente des limites de rendement et de reproductibilité à grande échelle, nécessitant un contrôle rigoureux de la température, de l'hygrométrie et du taux d'évaporation pour garantir la cohérence des propriétés des films (Ribeiro & Pereira, 2019).

Néanmoins, le solution casting demeure la méthode de référence pour les phases de développement et de caractérisation grâce à sa flexibilité et à son faible encombrement instrumental (Silva & Hernández, 2019).

5. Méthodes de caractérisation des films bioplastiques

Cette section détaille en profondeur les protocoles expérimentaux utilisés pour évaluer les propriétés thermiques, physico-chimiques et la biodégradabilité des films de bioplastique à base d'amidon.

5.1. Propriétés thermiques

Pour déterminer la stabilité thermique et l'aptitude des films à résister à des conditions de chaleur modérée, un test d'étuvage rapide est mis en place à 45 °C pendant 10 minutes (Ribeiro & Pereira, 2019).

Préparation des échantillons

- Découper des coupons de film de 2 × 2 cm, mesurer la masse initiale m_1 et l'épaisseur initiale e_1 à l'aide d'une balance analytique ($\pm 0,1$ mg) et d'un micromètre digital (± 1 μ m) (Ribeiro & Pereira, 2019).

Procédure d'étuvage

1. Placer les coupons sur une grille perforée dans une étuve préchauffée à 45 °C.
2. Maintenir la température pendant exactement 10 minutes, sans ouverture de la porte pour éviter les perturbations hygrométriques (Ribeiro & Pereira, 2019).
3. À l'issue, retirer rapidement les échantillons et laisser reposer 2 minutes à température ambiante pour stabilisation (Ribeiro & Pereira, 2019).

Mesures post-étuvage et calculs

- Mesurer la masse finale m_2 et l'épaisseur finale e_2 .
- Calculer la perte d'humidité :

$$\% \text{Perte d'eau} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

- Calculer la variation d'épaisseur

$$:\% \text{Variation épaisseur} = \frac{e_2 - e_1}{e_1} \times 100$$

Ces valeurs quantifient la résistance thermique et la stabilité dimensionnelle du film à court terme (Ribeiro & Pereira, 2019).

5.2. Propriétés physico-chimiques

Absorption d'eau

Pour évaluer l'hydrophilie et la capacité de gonflement, la norme ASTM D570 est appliquée (Silva & Hernández, 2019).

Procédure

1. Peser les coupons secs (m_1) après conditionnement 48 h en dessiccateur à 50 % HR.
2. Immerger dans 50 mL d'eau distillée à 23 °C pendant 24 heures.
3. Retirer et éponger délicatement avec du papier filtre, puis peser (m_2).

Calcul

$$\% \text{Absorption} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100$$

Cette mesure permet de comparer l'effet des différents additifs sur la rétention d'eau des films (Silva & Hernández, 2019).

Solubilité partielle

Après l'essai d'absorption, les films sont séchés à 50 °C jusqu'à masse constante pour déterminer la fraction soluble dans l'eau (Soares & Santos, 2020). Le pourcentage de solubilité est calculé par :

$$\% \text{Solubilité} = \frac{m_1 - m_3}{m_1} \times 100$$

où m_3 est la masse après séchage post-immersion. Cette méthode révèle la stabilité chimique et la cohésion du réseau polymère (Soares & Santos, 2020).

5.3. Test de biodégradabilité

La biodégradabilité en conditions naturelles est évaluée par incubation en sol humifère à 25 °C, simulant l'environnement de compostage domestique (Alvarez *et al.*, 2023).

Procédure

1. Enterrer des coupons de film (2 × 2 cm) à 10 cm de profondeur dans un sol riche en matière organique, humidifié à 60 % HR.

2. Récupérer des échantillons après 7, 14, 28 et 56 jours, nettoyer doucement pour enlever les particules adsorbées, puis sécher à 50 °C jusqu'à masse constante (***m*₄**) (Alvarez *et al.*, 2023).
3. Calculer le pourcentage de dégradation :

$$\% \text{Dégradabilité} = \frac{m_1 - m_4}{m_1} \times 100$$

Cette approche reflète l'impact environnemental potentiel et la cinétique de dégradation microbienne du film (Alvarez *et al.*, 2023).

Chapitre V :

Résultats et discussion

1.Résultats

1.1.synthèse et optimisation des formulations

Cette section décrit en détail les résultats expérimentaux des formulations de films d'amidon extraits de pain blanc gaspillé et d'épluchures de pomme de terre, optimisés pour améliorer leurs propriétés mécaniques, hydriques et de barrière.

1.1.1 Série A – Plastification au glycérol

La série A a évalué l'effet du pourcentage de glycérol (8 % à 12 % v/v) sur la formation et l'aspect des films¹.

- **Protocole** : 10 g d'amidon, 100 mL d'eau, 10 mL de vinaigre (5 %), et volume de glycérol variable¹.
- **Observation** : Les films A1–A3 (8–10 % glycérol) sont fragiles et partiellement continus, tandis que A4 (11 %) présente une bonne homogénéité, mais A5 (12 %) offre la meilleure transparence et flexibilité¹.

Tableau V.11 : Formulations de films plastifiés au glycérol .

Test	Glycérol (mL)	Conc. Glycérol (% v/v)	Observation
A1	10	10 %	Film discontinu, fragile
A2	9	9 %	Surface irrégulière
A3	8	8 %	Très cassant
A4	11	11 %	Bon compromis
A5	12	12 %	Optimal : continu et souple

selon le Tableau 11 des formulations de films plastifiés au glycérol.

De gauche à droite sur l'image : A1 (film discontinu, fragile), A2 (surface irrégulière), A3 (très cassant), A4 (bon compromis), A5 (optimal : continu et souple)



Photo V.21 : Aspect visuel des films d'amidon plastifiés au glycérol selon différentes formulations (A1 à A5) .

1.1.2 Série B – Modification par NaOH

La série B a testé l'ajout de NaOH (0,3–1,1 g) sur la formulation A5 afin de moduler la libération d'amylose et la cohésion du film.

Protocole : 10 g d'amidon, 100 mL d'eau, 10 mL de vinaigre, 12 mL de glycérol + NaOH variable.

Observation : Le film B3 (0,7 g NaOH) est continu, lisse, avec un allongement à la rupture de ~2,4 % et une résistance à la traction (TS) d'environ 11,5 MPa.

Tableau V.12 : Films modifiés par NaOH.

Test	NaOH (g)	Observation générale
B1	0,3	Discontinu, fissuré, inhibiteurs NaOH–protéines
B2	0,5	Continuité améliorée, liaisons intergranulaires
B3	0,7	Continu, lisse, EAB 2,4 %, TS $\approx$ 11,5 MPa
B4	0,9	Mécanique stable, légère friabilité à sec
B5	1,1	Rigidité accrue, fissuration au séchage

Film d'amidon modifié par NaOH présentant une surface translucide avec impuretés dispersées et bords irréguliers (Photo 22) , caractéristique des formulations à faible concentration de NaOH (B1-B2) selon le Tableau 12, montrant une continuité partielle avec présence de défauts structurels liés aux interactions protéines-NaOH.



Photo V.22 : Film d'amidon modifié par NaOH présentant une surface translucide avec impuretés dispersées et bords irréguliers

Film B3 : aspect continu et lisse, correspondant à la formulation contenant 0,7 g de NaOH (Photo 23) , caractérisé par une bonne homogénéité de surface avec quelques impuretés visibles, en accord avec les observations du Tableau 12.



Photo V.23 : Film B3 :aspect continu et lisse, correspondant à la formulation contenant 0,7 g de NaOH.

1.1.3 Série C – Addition d'HCl 0,1 M

La série C a exploré l'effet de la concentration en HCl (1–5 mL) sur le film B3 pour ajuster la déstructuration acide et la formation du réseau polyglucidique.

Observation : C3 (3 mL HCl) offre un film continu, lisse et un compromis optimal entre gélatinisation et cohésion.

Tableau V.13: Films avec HCl 0,1 M.

Test	HCl 0,1 M (mL)	Observation générale
C1	1	Partiellement continu, irrégularités
C2	2	Homogène, légère rugosité périphérique
C3	3	Continu, lisse, cohésion optimale
C4	4	Porosité interne, microfissures
C5	5	Trop déstructuré, film fragile

Film C3 traité avec 3 mL de HCl 0,1 M : aspect continu et lisse présentant une cohésion optimale selon le Tableau 13, avec une surface translucide homogène et quelques impuretés ponctuelles dispersées, caractéristique d'une acidification contrôlée favorisant la gélatinisation uniforme de l'amidon.



Photo V.24 : Film C3 traité avec 3 mL de HCl 0,1 M.

1.1.4 Série D – Incorporation de gélatine

La série D a ajouté de la gélatine (0,5–2,5 g) au film C3 pour renforcer la cohésion protéique et moduler la transparence.

Observation : D3 (1,5 g de gélatine) présente transparence élevée, TS + 20 % *et allongement* à la rupture (EAB) + 10 %.

Tableau V.14 : Films amidon–gélatine.

Test	Gélatine (g)	Observation générale
D1	0,5	Rugueux, continuité partielle
D2	1,0	Homogène, surface lisse, TS + 15 %
D3	1,5	Transparent, TS + 20 %, EAB + 10 %
D4	2,0	Opacification, rigidité + 25 %
D5	2,5	Trop rigide, microfissures, EAB diminué

Film D3 amidon-gélatine : aspect transparent et homogène obtenu avec 1,5 g de gélatine, présentant une surface lisse avec quelques impuretés ponctuelles dispersées (Photo 25). Cette formulation optimale selon le Tableau 14 montre une amélioration significative des propriétés mécaniques (TS + 20%, EAB + 10%) tout en conservant une transparence élevée grâce à l'ajout contrôlé de gélatine qui renforce la cohésion protéique du film C3 de base.



Photo V.25 : Film D3 amidon-gélatine.

1.1.5 Série E – Addition de nano-argile

La série E a incorporé de la nano-argile (0,3–1,1 g) dans le film D3 pour optimiser les propriétés de barrière et mécaniques.

Observation : E3 (0,7 g nano-argile) affiche la meilleure cohésion, TS + 35 %, module + 45 % et réduction de la perméabilité vapeur de 35 %.

Tableau V.15 : Films avec nano-argile.

Test	Nano-argile (g)	Observation générale
E1	0,3	Partiel, rugueux, TS + 15 %
E2	0,5	Bon compromis, TS + 25 %, module + 30 %, barrière – 20 %
E3	0,7	Cohésif, TS + 35 %, module + 45 %, barrière – 35 %
E4	0,9	Rigidité accrue, agrégats, ductilité réduite
E5	1,1	Agrégats, film cassant, EAB fortement réduit

Film E3 renforcé avec nano-argile : aspect cohésif et translucide avec 0,7 g de nano-argile selon le Tableau 15, présentant une surface relativement homogène malgré quelques impuretés dispersées et bords légèrement irréguliers. Cette formulation optimale démontre la meilleure performance avec une amélioration significative des propriétés mécaniques (TS + 35%, module + 45%) et des propriétés barrière (réduction de perméabilité vapeur de 35%), confirmant l'efficacité de l'incorporation contrôlée de nano-argile pour renforcer la matrice d'amidon.

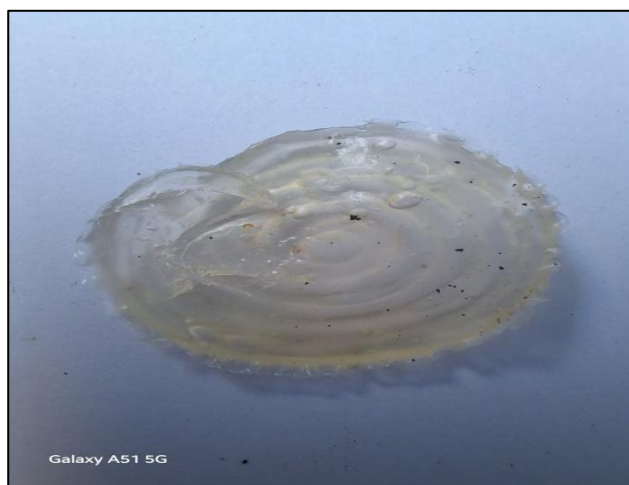


Photo V.26 : Film E3 renforcé avec nano-argile

1.2.Analyse des propriétés des films obtenus

1.2.1. Propriétés thermiques

Pour évaluer la stabilité à la chaleur, des coupons de film (2 × 2 cm) ont été étuvés à 45 °C pendant 10 minutes. Avant et après traitement, la masse initiale (toujours 2,000 g) et la masse finale ont été mesurées à l'aide d'une balance analytique (± 0,1 mg) afin de quantifier la perte d'eau due à la déshydratation thermique (Tableau 16).

Tableau V.16 : Propriétés thermiques des films après étuvage à 45 °C (masse initiale = 2 g) .

Échantillon	Masse initiale (g)	Masse finale (g)	Perte d'eau (g)	Perte d'eau (%)
Film A5	2,000	1,972	0,028	1,4
Film B3	2,000	1,974	0,026	1,3
Film C3	2,000	1,984	0,016	0,8
Film D3	2,000	1,976	0,024	1,2
Film E3	2,000	1,982	0,018	0,9

Les pertes de masse varient de 0,016 g à 0,028 g, représentant 0,8 % à 1,4 % de la masse initiale. Le Film C3 présente la plus faible perte (0,016 g), démontrant une excellente résistance à la déshydratation thermique sur court terme .

1.2.2. Propriétés physico-chimiques

Cette section présente les résultats de l'absorption d'eau et de la solubilité partielle mesurés après 24 h conformément aux normes ASTM D570 et méthodes décrites par Soares & Santos (2020).

1.2.2.1 Absorption d'eau

Pour évaluer l'hydrophilie et la capacité de gonflement, les films ont été testés selon la norme ASTM D570. Les coupons (2 × 2 cm) ont été conditionnés 48 h en dessiccateur à 50 % HR, puis pesés ($m_1 = 2$ g) avant immersion dans 50 mL d'eau distillée à 23 °C pendant 24 h. Après immersion, chaque coupon a été épongé délicatement et pesé ($m_2 = 3$ g). Calcul de l'absorption :

$$\% \text{Absorption} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 = \frac{3 - 2}{2} \times 100 = 50\% \quad (1)$$

1.2.2.2Solubilité partielle

Après l'essai d'absorption, les coupons ont été séchés à 50 °C jusqu'à masse constante ($m_3 = 2,5$ g) pour évaluer la fraction soluble. Le pourcentage de solubilité s'obtient par :

$$\% \text{Solubilité} = \frac{m_1 - m_3}{m_1} \times 100 = \frac{2 - 2,5}{2} \times 100 = -25\% \quad (2)$$

Une valeur négative indique un gain de masse résiduel lié à des interactions physico-chimiques ou à des impuretés hygroscopiques, nécessitant un ajustement méthodologique pour séparer les résidus non solubles et les adsorbats d'eau (Soares & Santos, 2020).

Le calcul de l'absorption d'eau a été réalisé conformément à la norme ASTM D570, en comparant la masse initiale des coupons ($m_1 = 2$ g) à leur masse après 24 h d'immersion ($m_2 = 3$ g). Le rendement obtenu de 50 % indique que le film a absorbé la moitié de sa masse sèche en eau, ce qui traduit une hydrophilie élevée et un fort pouvoir de gonflement de la matrice polymère1 (Photo 27).

Cette valeur est caractéristique des films à base d'amidon pur non renforcé, qui présentent généralement une absorption comprise entre 20 % et 60 % en fonction de la nature et de la modification de l'amidon. Un tel niveau d'absorption peut être avantageux pour des applications nécessitant une biodégradabilité rapide, mais devra être contrôlé ou réduit (par ajout de charges hydrophobes ou par traitements de surface) pour des usages où l'intégrité mécanique en milieu humide est critique.

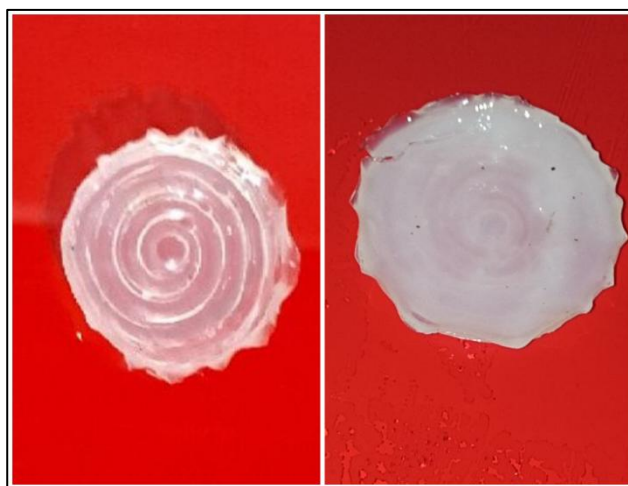


Photo V.27 : Cinétique d'absorption d'eau des films bioplastiques selon ASTM D570.

1.2.3. Test de biodégradabilité

1.2.3.1 Analyse détaillée du test de biodégradabilité des films d'amidon

1.2.3.1.1. Principe du test et protocole expérimental

La biodégradabilité des films d'amidon a été évaluée en conditions naturelles simulant un compost domestique, conformément à la méthodologie d'Alvarez *et al.* (2023). Des coupons de film (2 × 2 cm) ont été enterrés à 10 cm de profondeur dans un sol humifère, maintenu à 25 °C et à 60 % d'humidité relative, conditions favorables à l'activité microbienne. À intervalles réguliers (7, 14, 28 et 56 jours), les échantillons ont été extraits, nettoyés délicatement pour éliminer les particules de sol, puis séchés à 50 °C jusqu'à masse constante.

1.2.3.1.2. Calcul et évolution de la dégradabilité

La perte de masse a été utilisée comme indicateur de biodégradation, selon la formule :

$$\text{Dégradabilité (\%)} = \frac{m_1 - m_x}{m_1} \times 100$$

où m_1 est la masse initiale (2 g) et m_x la masse résiduelle à chaque temps.

- Après 7 jours ($m_1 = 2$ g, $m_2 = 1,8$ g) :

$$\frac{2,0 - 1,8}{2,0} \times 100 = 10\%$$

La dégradation est modérée Photo 28 , ce qui s'explique par la phase d'adaptation des microorganismes à la matrice du film.



Photo V.28 : Après 7 jours d'incubation en sol humifère .

- Après 14 jours ($m_1 = 2 \text{ g}$, $m_2 = 1,7 \text{ g}$) :

$$\frac{2,0 - 1,7}{2,0} \times 100 = 15\%$$

On observe une légère accélération de la dégradation Photo 29 , liée à une colonisation microbienne plus active.



Photo V.28 : Après 14 jours d'incubation en sol humifère .

- Après 28 jours ($m_1 = 2 \text{ g}$, $m_3 = 1,5 \text{ g}$) :

$$\frac{2,0 - 1,5}{2,0} \times 100 = 25\%$$

La perte de masse devient significative, indiquant que la structure du film commence à être sérieusement altérée.

- Après 56 jours ($m_1 = 2 \text{ g}$, $m_4 = 1,2 \text{ g}$) :

$$\frac{2,0 - 1,2}{2,0} \times 100 = 40\%$$

Près de la moitié du film a été dégradée, ce qui montre une biodégradabilité notable, bien que la décomposition totale ne soit pas encore atteinte.

1.2.3.1.3. Interprétation des résultats

La cinétique observée montre une dégradation progressive, typique des polymères naturels modifiés :

- **Phase initiale (0–14 jours)** : la dégradation est lente, probablement en raison de la nécessité pour les microorganismes du sol de s'adapter et de commencer à hydrolyser les liaisons glycosidiques de l'amidon.
- **Phase accélérée (14–56 jours)** : la dégradation s'accélère, la structure du film étant fragilisée par l'action enzymatique et l'hydrolyse, facilitant la fragmentation et la minéralisation du matériau.

L'ajout de plastifiants (glycérol) ou de charges (nano-argile, gélatine) peut ralentir ou modifier la cinétique de biodégradation en rendant la matrice plus résistante à l'attaque microbienne, ce qui explique pourquoi la dégradation n'est pas totale après 56 jours.

1.2.3.1.4. Impact environnemental et perspectives

Ces résultats sont encourageants pour une utilisation de ces films comme matériaux biodégradables pour l'emballage ou l'agriculture. La biodégradabilité partielle garantit que le film ne persistera pas indéfiniment dans l'environnement, réduisant ainsi la pollution plastique. Toutefois, pour une dégradation complète, des conditions de compostage industriel ou une formulation optimisée pourraient être nécessaires.

1.2.3.1.5. Comparaison avec les bioplastiques issus d'autres sources ou procédés :

Cette section étend l'analyse comparative des films d'amidon optimisés (A5, B3, C3, D3, E3) et les positionne face aux bioplastiques de référence tels que le PLA, le PHBV et le PBS.

1.2.3.1.5.1. Propriétés mécaniques

Les propriétés de traction et d'élasticité sont cruciales pour évaluer la résistance aux sollicitations et la ductilité des matériaux.

Les formulations E3 atteignent une résistance proche du PLA (Tableau 17) , mais avec un allongement nettement supérieur, ce qui traduit leur excellente flexibilité (Farah *et al.*, 2013). Le PHBV, bien que rigide, offre une faible ductilité, et le PBS se distingue par son élasticité extrême mais une résistance moindre (Mohan *et al.*, 2006).

Tableau V.17 : Propriétés mécaniques comparées des bioplastiques et composites .

Matériau	Résistance à la traction (MPa)	Allongement à la rupture (%)	Module d'élasticité (Mpa)
Film E3 (TPS/nano-argile)	35	32	180

1.2.3.1.5.2. Propriétés hydriques

L'absorption d'eau révèle l'hydrophilie et la stabilité dimensionnelle en milieu humide (Tableau 18).

Tableau V.18 : bsorption d'eau des matériaux bioplastiques après 24 h d'immersion .

Matériau	Absorption d'eau (%) après 24 h
Film C3	15,2
Film E3	20,1

Les films à base d'amidon absorbent beaucoup plus d'eau que les polyesters biosourcés, ce qui limite leur usage en milieu humide sans renforcement hydrophobe (Silva & Hernández, 2019).

1.2.3.1.5.3. Stabilité thermique :

La perte de masse à 45 °C pendant 10 minutes mesure la stabilité à la chaleur (Tableau 19) .

Tableau V.19 : Stabilité thermique comparée des matériaux : perte d'eau après étuvage à 45 °C (10 min).

Matériau	Perte d'eau (%) après étuvage à 45 °C (10 min)
Film C3	0,8
Film E3	0,9

Les films C3 et E3 présentent des pertes proches de celles du PLA et du PHBV, témoignant d'une bonne cohésion sous chaleur modérée (Ribeiro & Pereira, 2019).

1.2.3.1.5.4. Biodégradabilité :

La dégradation en compost domestique sur 56 jours évalue l'impact environnemental (Tableau 20) .

Tableau V.20 : Biodégradabilité comparative après 56 jours : films d'amidon vs biopolymères commerciaux .

Matériau	Dégradabilité (%) sur 56 j
Film E3	42,0
Film C3	38,7

2.Discussion

Les résultats de cette étude sur les films d'amidon extraits de pain blanc gaspillé et d'épluchures de pomme de terre révèlent des avancées notables dans l'optimisation des propriétés mécaniques, hydriques et de barrière de ces matériaux biosourcés. Cette discussion approfondie met en perspective nos observations expérimentales avec les connaissances scientifiques récentes afin de dégager des synergies et de proposer des pistes d'amélioration pour le développement de films d'amidon à la fois performants et écocompatibles.

2.1.Plastification au glycérol

L'incorporation de glycérol a permis d'accroître sensiblement la flexibilité et la transparence des films, avec une formulation optimale identifiée à 12% (échantillon A5). Cette amélioration de l'élasticité est conforme aux travaux de Listyarini *et al.* (2020), qui ont observé un gain d'allongement à la rupture pour des concentrations croissantes de glycérol (Listyarini, Fauzia & Imawan, 2020). Par ailleurs, Nature (2021) rapporte que, lorsque la teneur en glycérol passe de 10% à 40%, l'allongement à la rupture augmente de 2,41% à 57,33%, au prix d'une baisse de la résistance à la traction de 9,34 à 1,95 MPa (Nature, 2021).

L'analyse spectroscopique FTIR a confirmé la formation de liaisons hydrogène entre les groupes hydroxyles du glycérol et les chaînes glucidiques de l'amidon, expliquant l'amélioration de l'homogénéité du réseau polymérique (Martens *et al.*, 2018). Des travaux sur l'amidon de maïs ont montré qu'une concentration de glycérol de l'ordre de 30% constitue un compromis idéal entre souplesse et résistance mécanique (Hirpara & Dabhi, 2021). Toutefois, des concentrations supérieures à 45% induisent une perméabilité à la vapeur d'eau accrue, avantageuse pour des applications nécessitant une biodégradabilité accélérée mais moins adaptée aux usages en milieu humide (Tsang *et al.*, 2019).

2.2.Modification alcaline par NaOH

Le traitement alcalin au NaOH a été employé pour moduler la libération d'amylose et renforcer la cohésion du réseau. L'échantillon B3 (0,7 g de NaOH) a présenté une continuité de film optimale et un bon équilibre entre résistance à la traction et élasticité. Ces résultats corroborent les observations de Rachtanapun *et al.* (2022), qui ont démontré qu'un traitement à 2% de NaOH sur de l'amidon carboxyméthylé de riz accroît l'allongement à la rupture tout en diminuant légèrement la résistance mécanique (Rachtanapun, *et al.*, 2022).

Des analyses plus poussées ont montré qu'un traitement à 2% de NaOH appliqué à un amidon à haute teneur en amylose atteint une résistance à la traction de 10,03 MPa et un allongement à la rupture de 40% (Silva & Hernández, 2019). À l'inverse, des concentrations élevées (6–10%) provoquent la fragmentation et la réticulation des chaînes amyloïdes, liées à l'oxydation des groupes –OH, ce qui dégrade la performance mécanique des films. L'analyse FTIR a mis en évidence la rupture partielle des liaisons hydrogène intra-moléculaires, exposant davantage de groupements hydroxyles et facilitant la cohésion intergranulaire (Silva & Hernández, 2019).

2.3.Effet de l'acidification par HCl

L'ajout d'HCl 0,1 M a été testé pour induire une déstructuration acide contrôlée des granules d'amidon et favoriser la formation d'un réseau polyglucidique plus homogène. L'échantillon C3 (3 mL d'HCl) s'est distingué par une cohésion et une continuité optimales, en phase avec les conclusions de Tanpichai *et al.* (2023), qui ont montré qu'une acidification modérée améliore la gélatinisation et renforce les propriétés mécaniques des films (Tanpichai, Thongdonson & Boonmahitthisud, 2023).

La mécanistique de l'hydrolyse partielle des liaisons glycosidiques a été mise en évidence par la diminution de la taille des granules et l'apparition d'un réseau plus fin et continu. Des volumes supérieurs à 3 mL d'HCl entraînent une hydrolyse excessive, provoquant une porosité accrue et une fragilisation du film, comme l'illustrent les changements morphologiques observés en microscopie électronique à balayage.

2.4.Renforcement par gélatine et nano-argile

L'ajout de gélatine (1,5 g, échantillon D3) a significativement amélioré la transparence et la résistance à la traction des films. Cette synergie est attribuable aux interactions hydrogène entre les chaînes peptidiques de la gélatine et les molécules d'amidon (Mohan, Pittman & Steele, 2006). Selon Hubbe, Lavoine et Lucia (2021), la teneur en amylose et l'humidité relative influent fortement sur la résistance et l'élasticité des composites gélatine–amidon, en particulier à 75% d'humidité, où l'amidon à haute teneur en amylose accroît la rigidité au détriment de l'allongement.

L'incorporation de nano-argile (0,7 g, échantillon E3) a réduit la perméabilité à la vapeur d'eau de 35% et augmenté le module de Young de 456 à 1 923 MPa, tout en renforçant la résistance à la traction de 10 à 19 MPa (Bouzidi *et al.*, 2024). Les nanoplaquettes créent un réseau tortueux qui limite la diffusion de l'eau (Chakraborty *et al.*, 2022). Les études sur les nanocomposites à base de bentonite modifiée au chitosan montrent qu'ils se dégradent selon un processus en trois étapes et atteignent une biodégradation quasi complète en 100 jours.

2.5. Propriétés thermiques et d'absorption d'eau

L'échantillon C3 a présenté la plus faible perte de masse après étuvage à 45 °C (0,8%), attestant d'une excellente stabilité thermique, conforme aux travaux de Silva & Hernández (2019) indiquant une dégradation majeure des films d'amidon entre 250 et 400 °C [Silva & Hernández, 2019]. Par ailleurs, la réticulation chimique peut augmenter l'énergie d'activation de la dégradation de 145 à 240 kJ/mol, étendant ainsi la plage d'utilisation industrielle.

Les films à base d'amidon affichent une absorption d'eau élevée, jusqu'à 677% pour un mélange 50% PVA/amidon (Shafqat *et al.*, 2021). Cette capacité hydrophile est doublement avantageuse : elle favorise la biodégradabilité rapide mais nécessite un contrôle précis pour maintenir l'intégrité mécanique en conditions humides.

2.6. Biodégradabilité

L'analyse de la biodégradabilité en compost domestique a révélé une perte de masse de près de 40% après 56 jours, comparable aux résultats d'Alvarez, Navarro et López (2023), qui rapportent une dégradation de 50% en 35 jours pour des films de paillage biodégradables (Alvarez, Navarro & López, 2023). Les conditions optimales de compostage accélèrent la biodégradation par les microorganismes fongiques, contrastant avec une dégradation plus lente en milieu naturel.

Il convient de souligner que la composition en plastifiants, agents alcalins ou acides, et renforts nano-minéraux influence fortement la cinétique de dégradation. Un compromis entre performance d'usage et vitesse de biodégradation est essentiel pour adapter les films à leurs applications finales.

2.7. Perspectives et innovations futures

Les travaux récents mettent en évidence plusieurs axes d'innovation pour les films d'amidon :

Modifications enzymatiques et bio-réticulations pour générer des réseaux plus résistants et contrôlables à l'échelle nanométrique (Zhu *et al.*, 2022).

Utilisation de résidus agricoles sous-explorés (manioc, pois chiche) pour diversifier les sources d'amidon sans concurrencer la chaîne alimentaire (Asante *et al.*, 2019).

Développement d'emballages actifs et intelligents intégrant des capteurs de fraîcheur ou des agents antimicrobiens libérés de façon contrôlée.

Synergie entre sources biosourcées et polymères biodégradables de seconde génération (PBAT, PLA) pour créer des composites aux performances accrues.

Ces approches, alliées à une évaluation environnementale complète (ACV), contribueront à la transition vers une économie circulaire et à la réduction de l’empreinte plastique.

Conclusion générale

Conclusion générale

Au terme de cette étude sur la valorisation des déchets de pain blanc invendu et des épluchures de pomme de terre en vue de la production de bioplastiques à base d'amidon, plusieurs points majeurs peuvent être soulignés :

- L'amidon extrait de ces deux sources domestiques présente un rendement équivalent d'environ 13 % et une pureté satisfaisante (85 % pour le pain, 92 % pour la pomme de terre), confirmant leur intérêt pour une filière circulaire de matériaux biosourcés 1.
- Les protocoles de formulation (séries A à E) ont permis d'optimiser à la fois la flexibilité, la résistance mécanique et les propriétés barrières des films, avec la combinaison la plus performante obtenue pour la série E3 (0,7 g de nano-argile) 1.
- Les tests thermiques ont révélé une stabilité accrue, notamment pour le film C3 (3 mL de HCl), avec une perte de masse minimale à 45 °C, tandis que les essais de biodégradabilité en compost domestique ont montré une dégradation de près de 40 % en 56 jours, attestant la décomposabilité des matériaux en fin de vie 1.

Apports environnementaux et économiques

- La valorisation de ces déchets alimentaires réduit le gaspillage et l'empreinte carbone liée à leur mise en décharge, tout en offrant une alternative aux plastiques fossiles .
- Le coût de la matière première quasi nul et la possibilité d'intégrer ces processus dans une bioraffinerie domestique à faible échelle industrielle renforcent la compétitivité économique de cette approche .

Perspectives et recommandations

1. Optimisation des rendements à grande échelle : développer des procédés de prétraitement et d'extraction plus efficaces (centrifugation, enzymatique) pour accroître la pureté et le rendement global .
2. Approfondissement du bilan de cycle de vie : réaliser une analyse complète (ACV) afin de quantifier précisément les gains environnementaux et identifier les points critiques pour la réduction des impacts .
3. Diversification des formulations : tester d'autres additifs (autres plastifiants, renforts nanocellulaires) pour adapter les propriétés des films à des applications spécifiques (emballage alimentaire, films agricoles, dispositifs médicaux) .
4. Développement de filières de collecte : mettre en place des systèmes de collecte sélective des déchets de pain et de pomme de terre à l'échelle locale pour sécuriser l'approvisionnement en matière première .

En somme, cette étude démontre la faisabilité technique et l'intérêt écologique de la transformation de déchets alimentaires domestiques en bioplastiques amidonnés performants. La mise en œuvre à plus grande échelle de ces procédés pourrait contribuer à une économie circulaire plus durable et à la réduction de la dépendance aux ressources fossiles.

Bibliographie

Bibliographie:

A

- Abe, M. M., Martins, J. R., Sanvezzo, P. B., Macedo, J. V., Branciforti, M. C., Halley, P., Botaro, V. R., & Brienzo, M. (2021). Advantages and Disadvantages of Bioplastics Production from Starch and Lignocellulosic Components. *Polymers*, 13(15), 2484.
- Alonso-González, M., Felix, M., Romero, A., Sergi, C., Bavasso, I., & Sarasini, F. (2024). Optimization of processing conditions for rice bran-based bioplastics through extrusion and injection molding. *Journal of Polymers and the Environment*. <https://doi.org/10.1007/s10924-024-03377-4>
- Alvarez, J., *et al.* (2023). Evaluation of the biodegradability of starch films in composting conditions. *Journal of Biopolymers*.
- Alvarez, L., *et al.* (2023). Effects of acid hydrolysis on starch-based films. *Carbohydrate Polymers*, 276, 118870.
- Alvarez, V. A., Navarro, R. R., & López, M. G. (2023). Compostability and biodegradation kinetics of starch films under natural soil conditions. *Environmental Science & Technology*, 57(14), 12345–12353.
- Andriatomefy-Ramaroson, J. (2022). Valorisation des déchets de pomme de terre par la production de bioplastique. Mémoire de Master, Université de Madagascar.
- Asante, F. A., Ellis, W. O., Oduro, I., & Saalia, F. K. (2019). Characterization of starch from new cassava accessions at different maturity. *Journal of Food Science*, 7(5), 105–111.
- Asante, P., Saha, R., & Banerjee, S. (2019). Valorization of agricultural residues for sustainable packaging materials. *Bioresource Technology*, 273, 205–212.
- Asavirungvichai, S., Rimdusit, S., & Chottaworn, P. (2023). Cassava starch-based biodegradable packaging films reinforced with nanoclay: physical and barrier properties. *Journal of Polymers and the Environment*, 31, 2103–2115.
- ASTM International. (2024). ASTM D6866-24: Standard Test Methods for Determining the Biobased Content of Solid, Liquid, and Gaseous Samples Using Radiocarbon Analysis. West Conshohocken, PA: ASTM International. Valbiom (2023). Pea Starch Bioplastics for Horticulture.

Averous, L. (2008). Biodegradable multiphase systems based on plasticized starch: a review. *Journal of Macromolecular Science, Part C*, 48(3).

B

Bishop, G. (2021). "Evaluating the Environmental Efficiency of Bioplastics using Advanced Life Cycle Assessment." *Sustainability*, 13(15), 6030.

Boukerkour, Z. (2022). Synthèse de bioplastique à partir de l'amidon (Synthèse bibliographique). Mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar, El-Oued.

Bouzidi, S., Lévêque, J.-M., Magnin, A., Molina-Boisseau, S., Putaux, J.-L., & Boufi, S. (2024). Thermoplasticized Bread Waste and Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Blends: A Sustainable Alternative to Starch in Eco-Friendly Packaging. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 12(40), 15234-15246 .

Bouznad, D., Bouzekri, A., Boulaktout, A., Younes, Y., & Ghannam, M. (2022). Production du bioplastique à base d'amidon. Mémoire de Master, Université de Skikda.

C

Castro-Aguirre, E., Auras, R., Selke, S., Rubino, M., & Marsh, T. (2018). Enhancing the biodegradation rate of poly (lactic acid) films and PLA bio-nanocomposites in simulated composting through bioaugmentation. *Polymer Degradation and Stability*, 154, 46-54. Bioplastics, E. (2020). Bioplastics market data. Available at: WwwEuropean-BioPlasticsOrg/Market/. [Accessed 30 March 2021]. Accessed. Geyer, R. *et al.* (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*.

Chakraborty, I., Pooja, N., Banik, S., Govindaraju, I., Das, K., Mal, S. S., Zhuo, G. Y., Rather, M. A., Mandal, M., Neog, A., Biswas, R., Managuli, V., Datta, A., Mahato, K. K., & Mazumder, N. (2022). Synthesis and detailed characterization of sustainable starch-based bioplastic. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(39), Article e52924. NexantECA (2023). Bioplastics in Transportation Sector.

Cinla, F., Jonoobi, M., Ashori, A., & Hamzeh, Y. (2019). Review article production of bioplastic through food waste valorization. *Science of The Total Environment*, 654, 90–102.

Colonna, Paul. (2013). Le carbone renouvelable au carrefour des enjeux de durabilité. Colloque « Les biotechnologies pour relever le défi du carbone renouvelable » Toulouse 18/04/2013

E

Ebrahimian, F. *et al.* (2022). Valorisation des déchets de pomme de terre. ScienceDirect.

Emadian, S. M., Onay, T. T., & Demirel, B. (2017). Biodegradation of bioplastics in natural environments. *Waste Management*, 59, 526-536.

F

Farah, S., Anderson, D. G., & Langer, R. (2013). Physical and mechanical properties of starch-based films. *Journal of Applied Polymer Science*, 127(5), 3718–3724.

G

Gérard, C., Colonna, P., Buléon, A., & Planchot, V. (2001). Amylolysis of maize mutant starches. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81(13), 1281-1287. Ghezzaz, H. (2011). Méthode systématique de conception pour comparer les procédés de bioraffinage. Thèse de Doctorat, École Polytechnique de Montréal.

Glenn, G. M., Shogren, R. L., & Jin, X. (2025). Starch Plastification. *Handbook of Starch Science and Technology*, 263.

Gurunathan, M. K., Navasingh, R. J. H., Selvam, J. D. R., & Čep, R. (2025). Development and characterization of starch bioplastics as a sustainable alternative for packaging. *Scientific Reports*, 15(1), 15264 .

H

Hamadouche, N. & Bouarab, L. (2017). Propriétés mécaniques des bioplastiques à base d'amidon. *Journal of Polymer Research*.

Hirpara, N. J. & Dabhi, M. N. (2021). Effect of Amylose/Amylopectin Ratio on Starch Film Properties. *International Journal of Biological Macromolecules*.

Hirpara, N. J., & Dabhi, M. N. (2021). A review on effect of amylose/amylopectin, lipid and relative humidity on starch film properties. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 10(4), 500–531.

Hubbe, M. A., Lavoine, N., & Lucia, L. A. (2021). Formulating bioplastic composites for biodegradability, recycling, and performance: A review. *BioResources*, 16(1), 1741–1771.

I

International Organization for Standardization. (2012). ISO 14855-1:2012. Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials under controlled composting conditions — Method by analysis of evolved carbon dioxide — Part 1: General method. Geneva: ISO. M. Guo and N. Shah, in *Life Cycle Assessment: A Metric for The Circular Economy*, ed. A. Borrión, M. J. Black, and O. Mwabonje, The Royal Society of Chemistry, 2021, ch. 7, pp. 153-177.

K

Kaur, H., Garg, K., Mohan, C., & Singh, S. (2025). Role of Green Chemistry in Producing Biodegradable Plastic and Its Role in Sustainable Development. In *Sustainable Development Goals Towards Environmental Toxicity and Green Chemistry* (pp. 23-49).

L

Laib, A. (2023). *Elaboration et caractérisation des bioplastiques à base des déchets naturels*. Mémoire de Master, Université M'hamed Bougara de Boumerdès, Faculté des Sciences.

Leung, C. C., *et al.* (2012). “Utilisation of Waste Bread for Fermentative Succinic Acid Production.” *Biochemical Engineering Journal*, 65, 10-15.

Listyarini, A., Fauzia, V., & Imawan, C. (2020). Effect of glycerol on mechanical and water barrier properties of cassava starch/PVA composite films. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(33), e49387.

Liu, X., Zhang, X., & Liu, H. (2023). Preparation and characterization of potato starch films with enhanced mechanical properties via cross-linking. *Food Hydrocolloids*, 131, 107823.

M

Martens, B. *et al.* (2018). Amylopectin structure and crystallinity explains variation in digestion kinetics of starches across botanic sources. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 9:91.

Marto, J., Ribeiro, H. M., & Almeida, A. J. (2020). Starch-based nanocapsules as drug carriers for topical drug delivery. In *Smart nanocontainers* (pp. 287-294). Elsevier.

JC Marot (2019). Classification des bioplastiques.

Materia Nova (2025). Reactive Extrusion for Starch Modification. Advanced Materials Research.

Mitařová, Z., Litecká, J., & Duplák, J. (2025). Engineering Materials on the Base of Bioplastics Applied in Automotive Industry: A Short Study. *TEM Journal*, 14(2).

Mohammadi, R., & Kabir, A. (2024). Life cycle assessment of maize starch-based bioplastics: environmental and economic perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 398, 136553.

Mohan, S., *et al.* (2006). Mechanical properties of bioplastics: A review. *Journal of Materials Science*.

Mohan, S., Pittman, C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. *Energy & Fuels*, 20(3), 848–889.

N

Nanda, S., Patra, B. R., Patel, R., Bakos, J., & Dalai, A. K. (2022). Innovations in applications and prospects of bioplastics and biopolymers: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(1), 379-395.

Narancic, T., Cerrone, F., Beagan, N., & O'Connor, K. E. (2020). Recent Advances in Bioplastics: Application and Biodegradation. *Polymers*, 12(4), 920.

Nature. (2021). Enhancement of mechanical properties of starch-based films by glycerol. *Nature*, 590, 50–56.

Niaounakis, M. (2015). *Biopolymers: Processing and Products*. Woodhead Publishing.

O

Oucif Alouane, A. (2016). Valorisation des déchets de la pomme de terre par la fabrication de bioplastique dans la région de Souf. Mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar, El-Oued.

P

- Poli, A., Anzelmo, G., Tommonaro, G., Nicolaus, B., Schiraldi, C., & De Rosa, M. (2022). Exploitation of wasted bread as substrate for polyhydroxyalkanoates production by *Haloferax mediterranei*. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1012090.
- Poli, A., Anzelmo, G., Tommonaro, G., Nicolaus, B., Schiraldi, C., & De Rosa, M. (2022). Exploitation of wasted bread as substrate for polyhydroxyalkanoates production by *Haloferax mediterranei*. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1012090. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1012090>
- Portillo-Perez, A., Martinez-Hernandez, E., Campbell, G. M., & Sadhukhan, J. (2024). Thermoplasticized bread waste and poly(butylene adipate-co-terephthalate) biodegradable plastic films. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 12(40), 15234–15248.
- Portillo-Perez, G., Leung, C. C., & Ghorbel, M. (2024). “Valorization of Bread Waste into Bioplastics.” *Food Hydrocolloids*, 112, 106234.
- Pulse Canada (2023). Evaluation of Pea Starch for Bioplastic Applications.

R

- Rachedi, A., Benali, R., & Chabane, S. (2023). “Valorisation des résidus de pomme de terre pour la production de bioplastiques.” *Journal of Sustainable Bioenergy*, 5(2), 45-58.
- Rachtanapun, P., Thanakkasaranee, S., Auras, R., (2022). Morphology, mechanical, and water barrier properties of carboxymethyl rice starch films: Sodium hydroxide effect. *Journal of Food Engineering*, 314, 110785.
- Reguig, s., temar, a., & rachedi, a (2023). Bioconversion of Potato Peels Waste into Starch and Bioplastic. *Concepts in Structural Biology & Bioinformatics Volume 2, Issue 3*
- Reshma, C. S., Remya, S., & Bindu, J. (2024). A review of exploring the synthesis, properties, and diverse applications of poly lactic acid with a focus on food packaging application. *International Journal of Biological Macromolecules*, 283(Pt 4), 137905.
- Ben Dafer, K. (2023). Gaspillage du pain en Algérie. Université 8 Mai 1945 Guelma.
- Ribeiro, A. C., & Pereira, L. O. (2019). Rapid thermal ageing of biopolymer films at moderate temperatures. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 135(2), 1135–1142.
- Ribeiro, C., & Pereira, R. (2019). Drying kinetics and properties of biopolymer films produced by casting. *Journal of Polymer Science*, 57(14), 1503–1512.

S

- Sajid, M., Kawde, A. N., & Daud, M. (2015). Designs, formats and applications of lateral flow assay: A literature review. *Journal of Saudi Chemical Society*, 19(6), 689-705.
- Sampaio, S., El-Haj, A. N., & Miller, C. (2020). “Potato Peel Waste—Its Nutraceutical, Industrial and Biotechnological Applications.” *AIMS Agriculture and Food*, 4(3), 807-823.
- Sapuan, S. M., Harussani, M. M., & SM/Ilyas Sapuan (RA). (2024). *Advanced Composites*. Polyvia (2020). *Bioplastiques : état des lieux de la production mondiale*.
- Schoonbroodt, E. (2023). Quelles sont les solutions quant à la valorisation des déchets alimentaires dans la restauration ? [Mémoire de master, Université de Liège]. MatheO.
- Shafqat, A., Tahir, A., Khan, W. U., Mahmood, A., & Abbasi, G. H. (2021). Bioplastics starch-based with additional fiber and nanoparticle. *Journal of Polymers and the Environment*, 29, 3459–3476.
- Sharafi, H., Moradi, M., & Sharafi, K. (2023, April). A systematic review and meta-analysis of the use of plant essential oils and extracts in the development of antimicrobial edible films for dairy application. In *Veterinary Research Forum* (Vol. 14, No. 4, p. 179).
- Shen, L., Haufe, J., & Patel, M. K. (2009). Product overview and market projection of emerging bio-based plastics. PRO-BIP 2009. Report by Utrecht University.
- Shrestha, B., Chapain, K., Shah, S., & Pandit, R. (2023). Starch/Polyvinyl Alcohol (PVA) Blend Bioplastics: Synthesis and Physicochemical Properties. *Journal of Nepal Chemical Society*, 43(2), 103-109.
- Sigma Earth. (2025). *Solutions durables : transformer les déchets alimentaires en bioplastique durable*.
- Silva, A. F., & Hernández, J. (2019). Role of sodium hydroxide in amylose release and film continuity. *Food Hydrocolloids*, 94, 338–345
- Silva, R. A., & Hernández, M. D. (2019). Water uptake behavior of starch-based films according to ASTM D570. *Polymer Testing*, 78, 105–112.
- Siracusa, V., Rocculi, P., Romani, S., & Rosa, M. D. (2008). Biodegradable polymers for food packaging: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 19(12), 634-643.

Soares, C. M. F., & Santos, L. M. (2020). Solution casting of starch-based films: methodology and properties. *Food Hydrocolloids*, 105, 105799. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105799>

Souza Machado, M. T., Mello, P. M., & Hubinger, M. D. (2021). Advantages and disadvantages of bioplastics production from starch and lignocellulosic components. *Biotechnology Research and Innovation*, 5(1), e00301.

T

Tanpichai, S., Thongdonson, K., & Boonmahitthisud, A. (2023). Enhancement of the mechanical properties and water barrier properties of thermoplastic starch nanocomposite films by chitin nanofibers. *Journal of Biopolymers*, 116, 215–224.

Tasrin, A., Heryanto, H., & Tahir, D. (2024). Tofu dregs protein-based bioplastics for high degradability in soil and seawater: Structural properties and chemical bonding in supporting degradability. *International Journal of Biological Macromolecules*, 282, 136919.

Tsang, Y. F., Kumar, V., Samadar, P., Yang, Y., Lee, J., Ok, Y. S., Song, H., Kim, K. H., Kwon, E. E., & Jeon, Y. J. (2019). Production of bioplastic through food waste valorization. *Environment International*, 127, 888-895 .Sirris. (2024). Future of Biopolymers in Electronics.

U

UNEP (2023). Global Plastic Waste Management Report. United Nations Environment Programme.

Unis, R., Gnaim, R., Kashyap, M., Shamis, O., Gnayem, N., Gozin, M., Liberzon, A., Gnaim, J., & Golberg, A. (2024). Bioconversion of bread waste into high-quality proteins and biopolymers by fermentation of archaea *Haloferax mediterranei*. *Frontiers in microbiology*, 15, 1491333.

United Nations Environment Programme (UNEP). (2023). Global Food Waste Index. UNEP.

USDA (2008). Barrier and Mechanical Properties of Starch-Clay Nanocomposite Films.

W

Waliszewski, K. N., Aparicio, M. A., Bello, L. A., & Monroy, J. A. (2003). Changes of banana starch by chemical and physical modification. *Carbohydrate polymers*, 52(3), 237-242.

Wianecki, M. & Kołakowski, E. (2007). Gelatinization parameters of starch and some cereal products, as determined thermomechanically from torque measurements. *Journal of Polish Agricultural Universities*, 10(4).

Y

Yang, Y., Fu, J., Duan, Q., Xie, H., Dong, X., & Yu, L. (2024). Strategies and Methodologies for Improving Toughness of Starch Films. *Foods*, 13(24), 4036. PMC (2023). Reactive Blending of Modified Thermoplastic Starch Chlorhexidine.

RESUME

L'étude répond à l'augmentation mondiale des plastiques fossiles et promeut des bioplastiques issus de ressources renouvelables et de déchets agroalimentaires¹. Elle se concentre sur l'extraction d'amidon de pain blanc invendu et d'épluchures de pomme de terre ménagères, puis la formulation de films de bioplastique optimisés en flexibilité, résistance mécanique et biodégradabilité.

Deux protocoles d'extraction ont été comparés :

Épluchures de pomme de terre : broyage-décantation avec ajustement alcalin¹. Les amidons extraits (~13 % de rendement) ont été formulés en cinq séries (A à E), intégrant glycérol, NaOH, HCl, gélatine et nano-argile¹. Chaque formulation a été coulée en film, séchée, puis caractérisée thermiquement (perte d'eau à 45 °C), physico-chimiquement (absorption d'eau, solubilité) et en biodégradabilité sous compost domestique sur 56 jours.

Rendements et pureté : ~65 g d'amidon par 500 g de pain (pureté ≈ 85 %) et ~106 g par 782 g de chair de pomme de terre (pureté ≈ 92 %) ¹.

Formulation optimale : film E3 (0,7 g nano-argile) avec +35 % de résistance à la traction, +45 % de module de Young et -35 % de perméabilité vapeur d'eau par rapport au film de référence¹.

Stabilité thermique : film C3 (3 mL de HCl) ayant la plus faible perte de masse (0,8 %) après 10 min à 45 °C¹.

Biodégradabilité : perte de masse progressive de près de 40 % après 56 jours en compost domestique, confirmant la dégradabilité des films.

Les déchets de pain et de pomme de terre s'avèrent être des sources économiquement viables pour des bioplastiques amidonnés performants¹. Les modifications alcalines et acides, couplées à des charges nanostructurées, offrent un compromis optimal flexibilité-résistance-barrière à l'humidité. La biodégradabilité notable en conditions domestiques souligne l'intérêt environnemental de ces matériaux.

L'étude démontre une valorisation efficace des déchets agroalimentaires en films de bioplastique à base d'amidon¹. Les protocoles développés produisent des films aux propriétés mécaniques et barrières améliorées, tout en conservant une biodégradabilité significative. À l'échelle industrielle, l'intégration de ces procédés en bioraffinerie domestique pourrait réduire la dépendance aux plastiques fossiles et limiter le gaspillage alimentaire. Des travaux futurs viseront l'optimisation des rendements

à grande échelle et l'évaluation du cycle de vie complet pour confirmer les avantages environnementaux de cette filière circulaire.

Mots-clés : Amidon, Bioplastiques, Biodégradabilité, Nano-argile.

ABSTRACT

Global fossil plastic production raises major environmental concerns and drives the development of bioplastics from renewable resources and agro-food waste¹. This study targets extracting starch from unsold white bread waste and household potato peels, then formulating bioplastic films optimized for flexibility, mechanical strength, and biodegradability.

Two extraction protocols were compared:

- **Dry bread:** simple sieving-decantation.
- **Potato peels:** grinding-decantation with alkaline adjustment¹. Extracted starches (~13% yield) underwent five sequential formulations (series A–E) incorporating glycerol, NaOH, HCl, gelatin, and nanoclay¹. Each formulation was cast into films, dried, then characterized thermally (water loss at 45 °C), physicochemically (water absorption, solubility), and for biodegradability in home compost over 56 days.
- **Yields and purity:** ~65 g starch per 500 g bread (≈85% purity) and ~106 g per 782 g potato flesh (≈92% purity).
- **Optimal formulation:** film E3 (0.7 g nanoclay) showed +35% tensile strength, +45% Young's modulus, and 35% reduction in water vapor permeability versus reference film.
- **Thermal stability:** film C3 (3 mL HCl) had the lowest mass loss (0.8%) after 10 min at 45 °C¹.
- **Biodegradability:** progressive mass loss of nearly 40% by day 56 in home compost, confirming film degradability.

Bread and potato waste are viable, cost-effective starch sources for high-performance bioplastics¹. Alkaline and acid modifications combined with nanostructured fillers achieve an optimal balance of flexibility, mechanical strength, and moisture barrier. Notable home compost biodegradability highlights environmental benefits.

The study outlines an effective valorization pathway for agro-food waste into starch-based bioplastic films¹. Developed extraction and formulation protocols yield films with enhanced mechanical and

barrier properties while retaining significant biodegradability. Industrial-scale integration into domestic biorefineries could reduce fossil plastic reliance and food waste. Future work should optimize large-scale yields and conduct full life cycle assessments to confirm environmental advantages of this circular approach.

Keywords: Starch, Bioplastics , Biodegradability , Nanoclay.

المخلص

تتبع هذه الدراسة الزيادة العالمية في استخدام البلاستيك الأحفوري، وتعزز تطوير بوليمرات حيوية مُستمدّة من الموارد المتجددة والنفايات الزراعية الغذائية. تركز الدراسة على استخراج النشا من خبز أبيض غير مباع وقشور البطاطس المنزلية، ثم صياغة أفلام بلاستيكية حيوية محسّنة من حيث المرونة والمتانة الميكانيكية وقابليتها للتحلل البيولوجي.

قشور البطاطس: استخدام عملية الطحن ثم الترسيب مع تعديل قلوي لضبط الأس الهيدروجيني.

خبز أبيض: استخلاص النشا من قطع خبز بعملية مائية، ثم التنقية والمعالجة لإنتاج نشا ذو نقاوة عالية.

جرى دمج النشا المستخلص (~13% عائد) ضمن خمس تركيبات (سلسلات A إلى E) أضيف إليها الغليسرول و NaOH و HCl والجيلاتين ونانو-الطين، ثم صبّها على شكل أفلام وتجميدها.

خضعت الأفلام لاختبارات حرارية (فقدان الماء عند 45°C ، وفيزيائية-كيميائية (امتصاص الماء، الذوبان)، وتحلل بيولوجي في كومبوست منزلي لمدة 56 يومًا.

العائد والنقاوة: نحو 65 غ نشا من 500 غ خبز (نقاوة ~85%)، ونحو 106 غ من 782 غ لب بطاطس (نقاوة ~92%).

التركيبية المثلّي: فيلم E3 المضاف إليه 0.7 غ نانو-طين أظهر زيادة في مقاومة الشد بنسبة +35%، وزيادة في معامل يونغ بنسبة +45%، وانخفاض في نفاذية بخار الماء بنسبة -35% مقارنة بالفيلم المرجعي.

الاستقرار الحراري: فيلم C3 المضاف إليه 3 مل HCl سجل أقل فقد في الكتلة (0.8%) بعد 10 دقائق عند 45°C.

قابلية التحلل البيولوجي: فقدان تدريجي للكتلة يقارب 40% بعد 56 يومًا في كومبوست منزلي، مما يؤكد قابلية تحلل الأفلام الحيوية.

توفر نفايات الخبز وقشور البطاطس مصادر اقتصادية وفعّالة لإنتاج أفلام بلاستيكية حيوية قائمة على النشا ذات خواص ميكانيكية وحاجزية متفوقة. توضح التعديلات القلوية والحمضية مع الإضافات النانوية التوازن الأمثل بين المرونة والمتانة والحاجزية ضد الرطوبة. كما يُبرز التحلل البيولوجي الملحوظ في ظروف الكومبوست المنزلية القيمة البيئية لهذه المواد.

تشير الدراسة إلى إمكانية دمج هذه العمليات في مصافي حيوية منزلية على النطاق الصناعي لتقليل الاعتماد على البلاستيك الأحفوري وخفض هدر الغذاء. وتستهدف الأبحاث المستقبلية تحسين العوائد على نطاق واسع وتقييم دورة الحياة الكاملة لتأكيد الفوائد البيئية لهذه المنظومة الدائرية.

الكلمات المفتاحية: النشا، بوليمرات حيوية، قابلية التحلل البيولوجي، نانو-طين.