



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar TELIDJI - Laghouat

**FACULTE : SCIENCES
DEPARTEMENT : SCIENCES AGRONOMIQUES**

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : AMAMRA Hadjer Ahlame

DOMAINE : SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE (SNV)

FILIERE : SCIENCES ALIMENTAIRES

OPTION : AGROALIMENTAIRE ET CONTROLE DE QUALITE

Thème

**Amélioration des propriétés d'un bioplastique produit à base
des rebuts de pomme de terre pour l'emballage alimentaire**

Jury de soutenance

Nom et prénom	Grade	Qualité
LOUNICI Safia	Maître de conférences B	Présidente
BOURAKNA Zineb	Maître de conférences B	Examinatrice
ALLALI Khadîdja	Maître de conférences A	Encadrante
BRAHIMI Imane	Doctorante	Co-encadrante

Année universitaire :2024-2025

Remerciement

*Je voudrais tout d'abord à remercier **ALLAH** le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.*

*Je tiens à remercier très profondément mon encadrante Dr. **ALLALI Khadîdja** Pour m'avoir proposée ce sujet, pour son aide, sa confiance, je vous suis infiniment reconnaissante. Et n'oublions pas non plus de mentionner la doctorante **BRAHIMI Imane**.*

*Je tiens exprimer mes sincères remerciements aux membres du jury Dr. **LOUNICI Safia** la présidente et Dr. **BOURAKNA Zineb** l'examinatrice pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon sujet de fin d'étude en acceptant d'examiner mon travail.*

Je remercie également tous les ingénieurs des laboratoires pédagogiques de notre université, pour leurs aides.

J'adresse mes remerciements les plus sincères à ma famille qui m'ont toujours aidés et soutenus.

Je ne saurais oublier de remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, qu'ils trouvent ici l'expression de ma sincère gratitude.

Dédicace

Avec tout mon amour et ma gratitude, je dédie ce travail,

À ma chère mère ;

À mon cher père ;

*À ma grand-mère et à ma deuxième mère, que Dieu ait pitié
d'elles ;*

*Merci pour votre amour inconditionnel et votre soutien pour
réaliser mes rêves.*

*À mes sœurs : **Fatima Al-Zahra, Maria** ;*

*À mes frères : **Younes, Youssef** ;*

Merci pour vos encouragements.

À toute la grande famille.

*À tous ceux qui ont eu un lien, avec la réalisation de ce
travail merci.*

Hadjer

Thème : Amélioration des propriétés d'un bioplastique produit à base des rebuts de pomme de terre pour l'emballage alimentaire.

Résumé

Face aux défis environnementaux liés à la pollution par les plastiques conventionnels, il est devenu impératif de rechercher des alternatives durables et respectueuses de l'environnement. Cette étude s'inscrit dans cette démarche, utilisant une ressource agricole locale, les rebuts de pommes de terre, pour produire un bioplastique biodégradable et résistant à l'humidité. L'objectif principal est d'améliorer certaines propriétés de ce bioplastique en ajoutant de l'argile en différentes proportions (2 %, 4 % et 6 %) comme charge naturelle. La biodégradabilité dans le sol et la solubilité dans l'eau de ces films de bioplastique produits ont été testés. Les résultats obtenus ont montré que l'ajout de l'argile réduisait la solubilité dans l'eau de 58,29 % à 54,41 %, mais affectait négativement le taux de dégradabilité dans le sol, car les pourcentages diminuaient de 84,86 % dans l'échantillon de référence à 23,04 %. Le biofilm avec 6% d'argile représente une dégradabilité dans le sol et une hydrosolubilité significative. Ce qui l'a permis d'être retenu pour une optimisation en utilisant la méthodologie du design expérimental de Plackett-Burman. Quatre facteurs sont déterminés comme variables (HCl/NaOH, Température, Temps et agent plastifiant). Les résultats remportés ont montré que HCl/NaOH et la température sont les deux facteurs les plus significatifs ($p < 0,05$) en augmentant la solubilité dans l'eau. Le modèle est très satisfaisant avec des valeurs de R^2 et R^2 ajusté, de 94,82% et de 91,25%, respectivement.

Mots clés : Valorisation, Biofilm, Argile, Biodégradabilité, Hydrosolubilité, Plackett-Burman.

Theme: Improving the properties of a bioplastic produced from potato waste for food packaging.

Abstract

Faced with the environmental challenges related to pollution from conventional plastics, it has become imperative to seek sustainable and environmentally friendly alternatives. This study is part of this approach, using a local agricultural resource, potato waste, to produce a biodegradable and moisture-resistant bioplastic. The main objective is to improve certain properties of this bioplastic by adding clay in different proportions (2%, 4%, and 6%) as a natural filler. The biodegradability in soil and the solubility in water of these produced bioplastic films were tested. The results obtained showed that the addition of clay reduced water solubility from 58.29% to 54.41%, but negatively affected the soil degradability rate, as the percentages decreased from 84.86% in the reference sample to 23.04%. The biofilm with 6% clay represents degradability in the soil and significant hydro-solubility. This allowed it to be selected for optimization using the Plackett-Burman experimental design methodology. Four factors are determined as variables (HCl/NaOH, Temperature, Time, and plasticizing agent). The results obtained showed that HCl/NaOH and temperature are the two most significant factors ($p < 0.05$) in increasing water solubility. The model is very satisfactory with R^2 and adjusted R^2 values of 94.82% and 91.25%, respectively.

Keywords: Valorization, Biofilm, Clay, Biodegradability, Water Solubility, Plackett-Burman.

الموضوع: تحسين خصائص البلاستيك الحيوي المنتج من نفايات البطاطس لتغليف المواد الغذائية.

ملخص

في مواجهة التحديات البيئية المرتبطة بالتلوث الناتج عن البلاستيك التقليدي، أصبح من الضروري البحث عن بدائل مستدامة وصديقة للبيئة. وتدرج هذه الدراسة ضمن هذا المسعى، حيث تم استخدام مورد زراعي محلي، وهو بقايا البطاطا، لإنتاج بلاستيك حيوي قابل للتحلل ومقاوم للرطوبة. يتمثل الهدف الرئيسي في تحسين بعض خصائص هذا البلاستيك الحيوي من خلال إضافة الطين بنسب مختلفة (2%، 4% و 6%) كمادة داعمة طبيعية. وقد تم اختبار قابلية التحلل في التربة والذوبانية في الماء للأفلام الحيوية المنتجة. وأظهرت النتائج أن إضافة الطين ساهمت في تقليل الذوبانية في الماء من 58.29% إلى 54.41%، لكنها أثرت سلبًا على معدل التحلل في التربة، حيث انخفضت النسبة من 86.84% في العينة المرجعية إلى 23.04%. وقد تميز الفيلم الحيوي 6% من الطين بتوازن بين قابلية التحلل في التربة وذوبانيته المنخفضة، مما جعله مؤهلاً للخضوع، لعملية تحسين باستخدام تصميم تجريبي (Plackett-Burman). وقد تم تحديد أربعة عوامل كمتغيرات مستقلة (HCL/NaOH، درجة الحرارة، الزمن والعامل الملدن) وأظهرت النتائج أن كلاً من درجة الحرارة و HCL/NaOH هما العاملان الأكثر تأثيرًا في زيادة الذوبانية في الماء ($p < 0,05$). كما أن النموذج الإحصائي كان مرضيًا جدًا، حيث بلغت قيمتي R^2 و R^2 المعدلة على التوالي 94,82% و 91,25%.

الكلمات المفتاحية: تثمين، فيلم حيوي، طين، قابلية التحلل، الذوبانية في الماء، Plackett-Burman.

Liste des abréviations

ASTM: American Society for Testing and Materials

Bio-PE: Polyéthylène biosourcé.

Bio-PET : Polyéthylène téréphtalate biosourcé.

Bio-PP: Polypropylène biosourcé.

FTIR : Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier.

MEB : Microscopie Électronique à Balayage.

PBAT: poly-butylène adipate téréphtalate.

PHB: Poly-hydroxybutyrate.

PHBV: Poly-hydroxybutyrate valerate.

PHA: Poly-hydroxyalkanoates.

PCL: Poly-caprolactones.

PLA : Acide Poly-lactide.

PEA : Polyester amides.

Liste des tableaux

Tableau 01 : Classes de biopolymères issus de la biomasse	7
Tableau 02 : recapitule les bienfaits de bioplastiques comparativement au pétro plastiques	12
Tableau 03 : Les différents formulation de films réalisées	20
Tableau 04 : Les facteurs utilisés dans le plan expérimental Plackett-Burman et leurs niveaux	22
Tableau 05 : Matrice expérimentale obtenu par le plan expérimental Plackett-Burman	23
Tableau 06 : Taux d'humidité de l'amidon extraits	25
Tableau 07 : Hydrosolubilité des bioplastiques obtenus par le plan expérimentale plackett-burman	28
Tableau 08 : Estimation des coefficients du modèle	29

Liste des figures

Figure 01 : classification des bioplastiques	6
Figure 02 : capacité de production mondiale de bioplastiques par types de matériau	11
Figure 03 : Les différents étapes de l'extraction de l'amidon	18
Figure 04 : Les étapes de fabrication de bioplastique à base de pomme de terre	19
Figure 05 : Le test de la biodégradabilité dans le sol	20
Figure 06 : Le test de solubilité dans l'eau	21
Figure 07 : Films de bioplastique à base amidon de pomme de terre	26
Figure 08 : Diagramme illustrant la biodégradabilité des films de bioplastique	27
Figure 09 : Résultats de test de solubilité dans l'eau des films de bioplastique	28
Figure 10 : Diagramme de Pareto des effets standard des facteurs étudiés	29

Table des matières

Résumé	I
Abstract	II
ملخص	III
Liste des abréviations	IV
Liste des tableaux	V
Liste des figures	VI
Table des matières	VII

Introduction	1
---------------------	----------

Chapitre I

Synthèse bibliographique

I.Généralités sur le bioplastique	4
I.1. Définition de bioplastique	4
I.2. Historique de bioplastique	4
I.3. Compositions de bioplastique	5
I.3.1.Interphase / Matrice	5
I.4. Classification des bioplastiques	6
I.4.1.Bioplastiques naturels issus directement de la biomasse	6
I.4.2.Bioplastiques issus des microorganismes par fermentation microbienne	8
I.4.3.Bioplastiques obtenus par synthèse à partir de monomères renouvelables	9
I.4.4.Bioplastiques Pétrochimiques Biodégradables	9
I.5. Utilisation de bioplastique	9
I.5.1.Industrie médicale	9
I.5.2.Industrie de l'emballage alimentaire	10
I.5.3.Dans le domaine agricole	10
I.6. Capacité mondiale de production de bioplastique	11
I.7. Les avantages et les inconvénients liés aux bioplastiques	11
I.7.1.Les avantages	11
I.7.2.Inconvénients issus du bioplastique	12
I.8. Caractérisation de bioplastique	13
I.8.1.La biodégradabilité	13
I.8.2.Perméabilité à la vapeur d'eau	13
I.8.3.Biocompatibilité et biorésorbabilité	13
I.9.Utilisation de la méthodologie de la surface de réponse dans le domaine agroalimentaire	14

I.10. Contraintes techniques et opportunités dans l'utilisation des biopolymères	14
Chapitre II	
Matériel et Méthodes	
II.1. Objectif de l'étude	17
II.2. La biomasse étudiée	17
II.3. Extraction d'amidon	17
II.4. Caractérisation d'amidon extrait	18
II.4.1. Détermination du taux d'humidité	18
II.5. Préparation de bioplastique à base de l'amidon de pomme de terre	19
II.6. Amélioration des caractéristiques de bioplastique par l'ajoute d'argile	20
II.7. Caractérisation des bioplastiques obtenus	20
II.7.1. Biodégradabilité dans le sol	20
II.7.2. Solubilité dans l'eau	21
II.8. Optimisation de bioplastiques par le design expérimental Plackett-Burman	21
Chapitre III	
Résultats et Discussions	
III.1. Résultats	25
III.1.1. Caractérisation de l'amidon extrait	25
III.1.1.1. Résultats du taux d'humidité	25
III.1.2. Production de bioplastique	25
III.1.3. Caractérisation de bioplastique	26
III.1.3.1. Résultats de la biodégradabilité des bioplastiques	26
III.1.3.2. Résultats de solubilité dans l'eau	27
III.1.4. Résultats de l'optimisation du bioplastique obtenu	28
III.2. Discussions	30
Conclusion	34
Références bibliographiques	37

Introduction

Introduction

Au cours des dernières décennies, l'utilisation de plastiques dérivés du pétrole a créé un problème environnemental majeur, car ils sont utilisés que pendant une courte période et mettent beaucoup de temps à se décomposer dans l'environnement (Phosri et *al.*,2022).

Environ 4 % de la production mondiale de pétrole est transformée en plastique, qui est utilisé dans une large gamme de produits. Étant donné que la production de plastiques dérivés du pétrole nécessite de grandes quantités d'énergie, et en raison du déclin progressif des réserves de combustibles fossiles, des problèmes liés à la gestion du plastique et des préoccupations environnementales, tout cela a conduit à un intérêt accru pour les bioplastiques. Ces derniers, dérivés de matières biologiques, ont des propriétés biodégradables (Chen,2014 ; Shrestha et *al.*, 2020 ; Phosri et *al.*,2022).

Les bioplastiques sont souvent considérés comme une solution viable car ils sont fabriqués à partir de ressources naturelles renouvelables et leurs propriétés peuvent rivaliser avec celles des polymères à base de pétrole. Il est désormais très important de choisir les bioplastiques car, en plus de leur principal avantage de « biodégradabilité », ils permettent également la valorisation organique des déchets plastiques, en les transformant en gaz méthane et en exploitant le biocarburant d'origine végétale pour alimenter les moteurs, créant ainsi des opportunités économiques en réduisant la dépendance aux ressources fossiles (Matondo ,2018 ; Arnaud, 2024).

Néanmoins, bien que l'utilisation des bioplastiques soit en hausse, il est essentiel de reconnaître que ces matériaux présentent des défis. Actuellement, les bioplastiques font face à plusieurs difficultés qui entravent leur adoption à grande échelle et leur efficacité à résoudre les problèmes environnementaux liés aux plastiques traditionnels non biodégradables. Parmi ces difficultés, on trouve la durabilité limitée de certains bioplastiques, leur coût de production relativement élevé, la nécessité de conditions spécifiques pour une biodégradation optimale, ainsi que des propriétés mécaniques parfois jugées insuffisantes. Pour maximiser l'impact positif des bioplastiques, il est crucial d'investir dans la recherche et le développement afin de surmonter ces défis (Aouay,2024).

Dans ce contexte, notre étude vise à produire des films plastiques biodégradables et résistants à l'eau à partir d'amidon de pomme de terre. Notre objectif aussi est de faire un essai de l'optimisation par l'utilisation du modèle de Plackett-Burman. Dans ce travail, trois chapitres seront présentés :

Le premier chapitre comprend une synthèse bibliographique, Le seconde chapitre est une étude expérimentale. Les résultats obtenus ont été représentés, interprétés et discutés les dans le dernier chapitre, et nous avons terminé par une conclusion générale.

Chapitre I
Synthèse Bibliographique

I. Généralités sur le bioplastique

I.1. Définition de bioplastique

Les bioplastiques peuvent être définis comme des matériaux biosourcés et /ou biodégradables (tonuk,2016).

En plus, il existe aussi une définition des bioplastiques où il est défini comme des polymères qui peuvent être décomposés en CO₂, H₂O et des composés inorganiques ou biomasse, surtout par les effets enzymatiques des micro-organismes. Proprement, le terme « biosourcé » désigne des produits dérivés de matériaux biologiques issus de la biomasse. Ce qui signifie que l'expression « biosourcé » fait référence à des matériaux fabriqués en partie ou entièrement à partir de ressources renouvelables (Ibrahim et al,2021).

I.2. Historique de bioplastique

En 1941, Henry Ford a commencé à expérimenter avec des plastiques fabriqués à partir de fèves de soja, une initiative qui a joué un rôle clé dans le développement des bioplastiques durant la Seconde Guerre mondiale.

Puis, en 1992, la société Metabolix Biosciences a vu le jour, proposant des solutions pour répondre à la demande mondiale croissante en plastiques, produits chimiques et énergies renouvelables.

En 2000, cette même entreprise a lancé des programmes de recherche pour développer des cultures industrielles génétiquement modifiées, spécifiquement pour la production de bioplastiques.

En 2005, Toyota a ouvert une usine pilote à Toyota Hi Rose, au Japon, pour tester la viabilité de la production industrielle de bioplastiques.

L'année suivante, en 2006, NEC Corporation, basée à Londres, a créé un matériau bioplastique renforcé avec des fibres naturelles, dans le but de diminuer l'impact environnemental des téléphones portables.

Enfin, en 2010, Cardia Bioplastics CBMM, en Malaisie, a mis au point des procédés de fabrication pour des produits bioplastiques, marquant une étape significative vers l'adoption de matériaux durables (Rajendran et al.,2012).

I.3. Compositions de bioplastique

Les bioplastiques sont fabriqués à partir de nombreuses sources et matériaux différents. Provenant de certaines sources : huiles végétales, cellulose, féculé de maïs, féculé de pomme de terre, canne à sucre, chanvre, etc. (Reddy *et al.*, 2013). Cependant, malgré leurs nombreux avantages, ces matériaux ont encore quelques limites, comme une certaine fragilité, une sensibilité à l'humidité et parfois une stabilité thermique insuffisante, ce qui peut freiner leur utilisation dans certaines applications (Rhim *et al.*, 2013).

Pour améliorer leurs performances, les chercheurs ajoutent des plastifiants, comme le glycérol, pour rendre les structures plus flexibles, ou utilisent des charges naturelles comme l'argile. Cette dernière, grâce à sa structure en feuillets et à sa bonne compatibilité avec les polymères, renforce non seulement la résistance mécanique des films, mais limite également leur perméabilité à l'eau et aux gaz). Ces ajustements permettent ainsi de développer des bioplastiques mieux adaptés aux exigences de l'emballage alimentaire, tout en préservant leur caractère biodégradable (Tang *et al.*, 2008 ; Zhao *et al.*, 2023)

I.3.1. Interphase / Matrice

Les propriétés des matériaux composites hétérogènes dépendent largement de quatre facteurs clés : les caractéristiques intrinsèques des composants, leur proportion, la structure du composite, et les interactions interfaciales. Contrairement à une vision simpliste où l'interface serait vue comme une simple surface bidimensionnelle, il existe presque toujours une interphase, une zone tridimensionnelle avec des propriétés qui diffèrent de celles des phases présentes. Cette interphase est le résultat de phénomènes tels que l'adsorption du polymère sur la charge, l'inter diffusion dans les mélanges, ou encore des réactions chimiques, notamment lors de traitements aux silanes. Ces mécanismes complexes compliquent la généralisation, même si l'existence de l'interphase est aujourd'hui largement acceptée. On peut la caractériser grâce à diverses techniques spectroscopiques comme FTIR, bien que ces méthodes aient leurs limites, surtout pour les interphases très fines ou celles régies par des interactions faibles (comme la dispersion). L'impact de l'interphase sur les propriétés finales du matériau dépend directement de son épaisseur, de la nature de l'interaction, et de la quantité de matière à cette interface. Cet effet est particulièrement prononcé dans les nano composites, où la grande surface de contact confère aux matériaux des propriétés mécaniques et thermiques améliorées (Pukánszky, 2005).

I.4. Classification des bioplastiques

Les bioplastiques peuvent être classés en fonction de leur composition chimique, de leurs procédés de fabrication, de leurs propriétés, de leurs méthodes de synthèse, de leur importance économique et leurs diverses applications (Lapointe,2012). Dans la figure 01 ci-dessous ont classé le bioplastique selon leur procédés de fabrication :

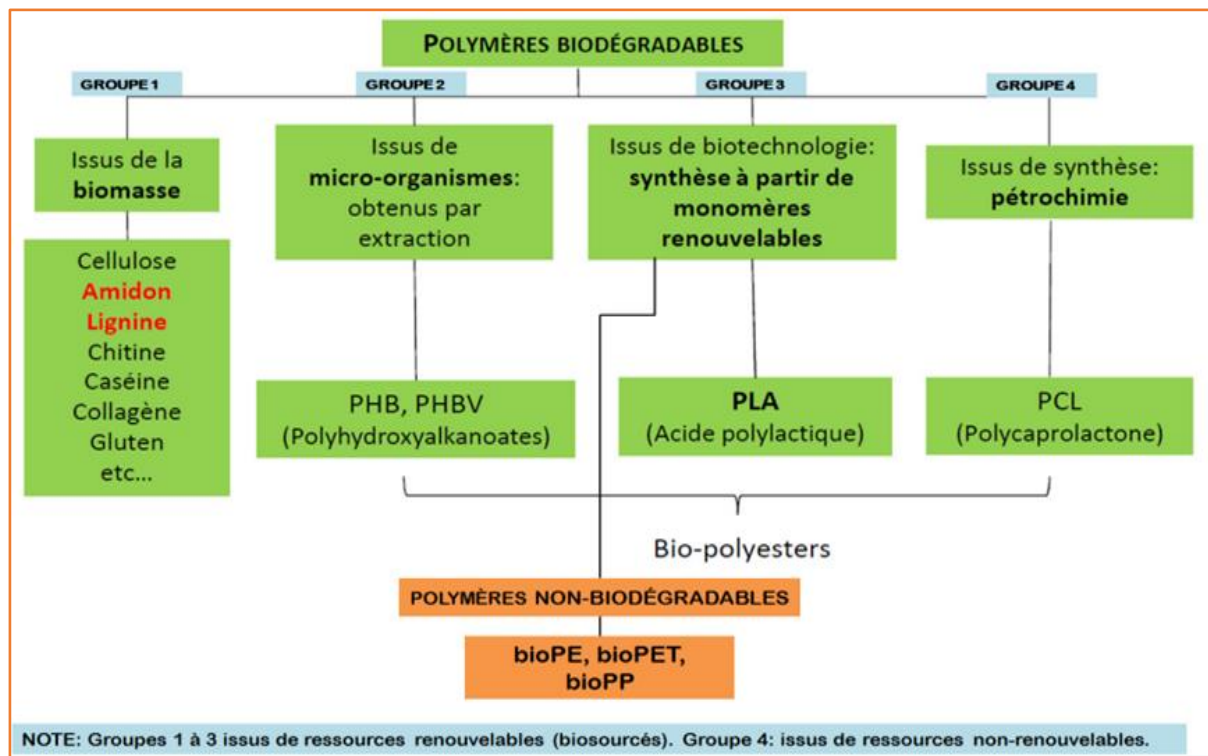


Figure 01 : classification des bioplastiques (Lapointe, 2012)

I.4.1. Bioplastiques naturels issus directement de la biomasse

Les bioplastiques issus des plantes ou biopolymères constituent dans la plupart du temps les parois cellulaires des végétaux comme la cellulose et la lignine. Ils servent également de réserves aux plantes en vue de leur croissance. On peut montrer dans ce cas l'exemple de l'amidon. Ces polymères sont extraits directement des plantes. Des monomères simples peuvent être également obtenus à partir des plantes après transformations chimiques et/ou enzymatiques de ces molécules (Rabetafika, 2006).

Les bioplastiques peuvent être créés à partir d'une variété de ressources naturelles, comme les plantes, les algues, les champignons, et même certaines bactéries. Chaque source offre des caractéristiques uniques, qui peuvent être très utiles selon l'application envisagée. Le tableau

ci-dessous présente un aperçu des principales catégories, leurs origines, ainsi que quelques exemples concrets.

Tableau 01 : Classes de biopolymères issus de la biomasse (Yu, 2009) (modifié)

Catégorie	Origine	Exemples
Polysaccharides	Plantes / Algues	Amidon (présent dans les pommes de terre, le maïs, etc.) ; cellulose (la fibre des plantes), alginate (extrait d'algues utilisé pour épaissir), carraghénane (gélifiant tiré d'algues rouges).
	Fongique	Pullulane et scléroglycane (sucres produits par des champignons, souvent utilisés comme épaississants naturels)
	Bactérienne	Chitine (trouvée dans les coquilles de crustacés), levane , xanthane , curdlan , (différents types de sucres ou gélifiants fabriqués par des bactéries utiles dans l'alimentation ou l'emballage)
Protéines	Végétale	Soya (protéine de soja), zéine (protéine extraite du maïs), gluten de blé (protéine naturelle du blé, qui donne son élasticité au pain)
	Animale	Sérum (protéine du lait), albumine (protéine de l'œuf), collagène/gélatine (protéine extraite des tissus animaux, utilisée pour gélifier des aliments comme les bonbons)
Lipides	—	Acétoglycérides (formes modifiées de graisses naturelles), surfactants (molécules qui aident à mélanger l'eau et l'huile), émulsifiants (utilisés pour stabiliser les mélanges, par exemple dans la mayonnaise)
Polymères de spécialité	—	Lignine (composant du bois), shellac (résine naturelle produite par un insecte, utilisée dans les vernis alimentaires), caoutchouc naturel (latex provenant des arbres, utilisé dans de nombreux objets du quotidien)

Quand l'amidon est soumis à un traitement thermomécanique en présence d'eau et de plastifiants, il développe des propriétés thermoplastiques. Ce processus entraîne la déstructuration des granules d'amidon natif, ce qui donne naissance à un matériau homogène connu sous le nom d'amidon thermoplastique (Thermoplastic Starch, TPS). Ce dernier peut être façonné à l'aide de techniques classiques comme l'extrusion ou le moulage par injection. Des plastifiants tels que le glycérol et le sorbitol sont souvent utilisés, car leur point d'ébullition élevé limite leur évaporation durant le traitement (Shogren *et al.*, 1993 ; Mali *et al.*, 2005).

La transformation de l'amidon en matériau thermoplastique dépend de plusieurs éléments, comme les conditions de traitement, la teneur en eau et la quantité de plastifiant. Ce procédé entraîne une perte de cristallinité, une réduction de la viscosité à l'état fondu, ainsi qu'une dépolymérisation partielle des chaînes d'amylose et d'amylopectine (Van Soest et *al.*, 1996 ; Imam et *al.*, 1999). Les caractéristiques finales du TPS sont fortement influencées par le type d'amidon utilisé, notamment le rapport amylose/amylopectine, ainsi que par la quantité de plastifiant. Ces propriétés évoluent également avec le temps, en raison de la réorganisation moléculaire, ce qui provoque un durcissement progressif du matériau pendant le stockage (Lourdin et *al.*, 1997).

Bien que l'amidon thermoplastique soit une alternative prometteuse aux polymères synthétiques grâce à sa biodégradabilité, son utilisation est encore limitée à cause de sa faible résistance mécanique et de sa sensibilité à l'humidité. Pour surmonter ces défis, plusieurs études ont examiné la possibilité de le combiner avec des polyesters biodégradables comme le PLA ou le PBAT, ou de le renforcer avec des fibres naturelles. À ce sujet, les recherches de Stanojlovic-Davidovic (2006) ont démontré que l'ajout de fibres végétales améliore significativement les propriétés du matériau.

I.4.2. Bioplastiques issus des microorganismes par fermentation microbienne

Ces polymères sont obtenus par fermentation grâce à des bactéries. Cela implique la production *in situ* de polymères qui s'accumulent dans le cytoplasme de certaines bactéries soumises à des conditions de fermentation (Boudjema, 2016). Les principales matières premières utilisées sont les sucres et l'amidon. Certaines de ces bactéries permettent de produire de la cellulose bactérienne, mais le Poly β -Hydroxybutyrate (PHB) est le polymère bactérien le plus connu. Il s'agit d'un polyester biotechnologique hautement cristallin, avec des températures de fusion (180°C) et de transition vitreuse (4°C) comparables à celles des polymères courants, comme le polypropylène (Ly, 2008). Elles varient d'un matériau rigide et fragile à un matériau élastique, ce qui limite leur utilisation dans le secteur de l'emballage. Néanmoins, ces polymères suscitent un grand intérêt en raison de leur potentiel d'application dans les domaines biomédical et pharmaceutique (Boudjema, 2016).

I.4.3. Bioplastiques obtenus par synthèse à partir de monomères renouvelables

Ces bioplastiques sont transformés par synthèse chimique à partir des monomères issus de matières premières agricoles. Le principal groupe de biopolymère inclut les polylactides (PLA), produits par synthèse chimique de l'acide lactique (véronique, 2012).

Ces bioplastiques renouvelables se divisent en deux catégories principales : les bioplastiques biodégradables, tels que l'acide polylactique (PLA), et les bioplastiques non biodégradables, comme le polyéthylène biosourcé (Bio PE).

Le PLA est dérivé de l'acide lactique, qui peut être produit par des méthodes chimiques ou biologiques, notamment par la fermentation de glucides tels que le maïs, la canne à sucre ou la betterave grâce à des lactobacilles. Ce type de bioplastique est le plus couramment utilisé dans le secteur de l'emballage. (Avérous, 2004).

Quant au Bio-PE, il s'agit de bioplastiques issus de sources renouvelables mais qui ne se décomposent pas naturellement (Oliveira, 2023). Parmi les exemples de ce sous-groupe, on trouve le polypropylène biosourcé (Bio-PP) et le polyéthylène téréphtalate biosourcé (Bio-PET) (Pierce, 2011)

I.4.4. Bioplastiques Pétrochimiques Biodégradables

Les bioplastiques appartenant à cette catégorie sont dérivés de matières fossiles. De ce fait, ils ne sont pas issus de ressources renouvelables, même s'ils présentent des propriétés biodégradables. On peut les diviser en trois sous-catégories : les polycaprolactones (PCL), les polyester amides (PEA) et divers Co-polyesters, qu'ils soient aromatiques ou aliphatiques. (Avérous, 2007).

I.5. Utilisation de bioplastique

Le plastique biodégradable a fait ses preuves dans de nombreuses applications notamment:

I.5.1. Industrie médicale

L'industrie médicale utilise tous jour de grandes quantités des produits à usage unique. Comme les gants en plastique et autres produits d'hygiène ne sont pas recyclés et sont jetés dans des décharges. Les bioplastiques fabriqués à partir de déchets naturels sont utilisés dans le domaine médical, car ils peuvent provoquer moins d'allergies que les plastiques à base de produits chimiques (Palaniswamy et *al.*, 2020).

I.5.2. Industrie de l'emballage alimentaire

L'emballage alimentaire constitue un secteur majeur d'utilisation des plastiques, où ces derniers sont principalement employés comme emballage primaire, ainsi que dans les emballages secondaires et tertiaires. L'emballage primaire est en contact direct avec les aliments, offrant une barrière essentielle contre les dangers environnementaux, tels que les bactéries et la contamination, tout en préservant l'intégrité des produits durant le transport et le stockage. Pour garantir l'hygiène et prolonger la durée de conservation des aliments, il est crucial de considérer divers facteurs lors du choix des matériaux d'emballage, notamment leurs propriétés physicochimique, thermiques, mécaniques, de barrière et optiques (Zhao et *al.*, 2023).

Les matériaux d'origine biologique, tels que ceux dérivés de micro-organismes, d'amidon et de cellulose, ont conduit à des avancées notables dans le domaine de l'emballage alimentaire. L'utilisation de plastiques biodégradables nécessite une attention particulière sur des aspects comme la durée de conservation des produits et le respect des normes de sécurité alimentaire. Parmi les plastiques biosourcés les plus courants figurent le PLA, les plastiques à base d'amidon et la cellophane, chacun ayant des caractéristiques spécifiques. De plus, de nombreux plastiques biosourcés possèdent des certifications qui garantissent leur adéquation pour un contact avec les aliments (Palaniswamy et *al.*, 2020).

I.5.3. Dans le domaine agricole

Les applications agricoles des bioplastiques à base de PHAs se concentrent principalement sur les filets, les sacs de culture et les films de paillage. Les filets en bioplastique représentent une alternative au polyéthylène haute densité, qui est couramment utilisé pour améliorer la qualité et le rendement des cultures tout en les protégeant des oiseaux, des insectes et des conditions climatiques défavorables. Les sacs de culture, également désignés sous le nom de sacs de plantation ou de semis, sont habituellement fabriqués en polyéthylène basse densité. En revanche, les sacs de culture à base de PHAs sont biodégradables, bénéfiques pour les racines et non nocifs pour les écosystèmes aquatiques environnants. Enfin, les bioplastiques utilisés dans les films de paillage sont essentiels pour maintenir une structure de sol adéquate, conserver l'humidité, contrôler les mauvaises herbes et éviter la contamination, remplaçant ainsi les plastiques issus des combustibles fossiles (Coppola et *al.*, 2021).

I.6. Capacité mondiale de production de bioplastique

Le marché des plastiques biosourcés et/ou biodégradables est en constante évolution. Après de nombreuses années de lents progrès, la prise de conscience industrielle et sociétale est devenue possible pour que le marché franchisse une nouvelle étape et entre dans une phase de croissance plus importante, il faudra que l'offre de polymères biodégradables explose.

La capacité totale de production devrait à terme atteindre 7,5 tonnes par an, soit 3 fois plus qu'elle ne l'est actuellement (Ramaroson,2023). Production mondiale de bioplastiques Il est représenté sur la figure 02 :

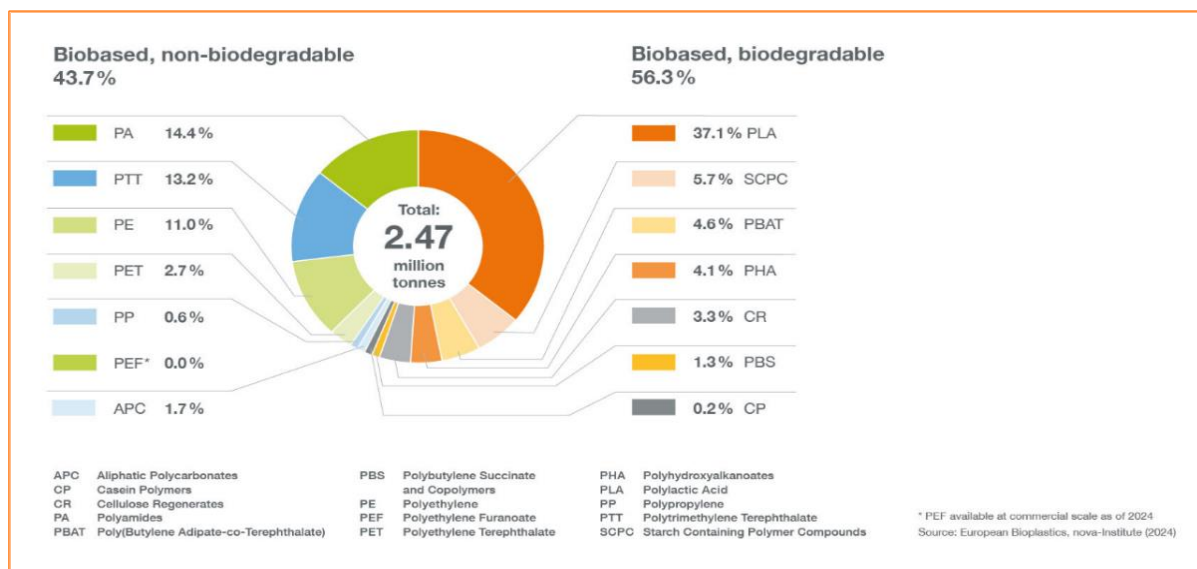


Figure 02 : capacité de production mondiale de bioplastiques par types de matériau (Européen bioplastiques - nova institue,2024)

I.7. Les avantages et les inconvénients liés aux bioplastiques

I.7.1. Les avantages

Selon Chen (2014), les principaux avantages de bioplastique sont les suivants :

- Réduction des déchets et amélioration de la compo-stabilité grâce à l'utilisation de bioplastiques biodégradables. L'avantage le mieux compris des bioplastiques biodégradables réside dans la réduction des déchets permanents.
- Des coûts énergétiques plus faibles dans la production. D'autre part, les plastiques sont fabriqués à partir d'environ 4 % du pétrole consommé chaque année dans le monde.
- Une empreinte carbone potentiellement bien plus faible. Il convient de souligner que l'empreinte carbone d'un bioplastique dépend étroitement de la capacité du plastique à

stocker de manière permanente le carbone extrait de l'air par la plante en croissance. Un plastique issu d'une source biologique séquestre le CO₂ capturé par la plante lors du processus de photosynthèse.

I.7.2. Inconvénients issus du bioplastique

D'après Arikian *et al*, (2015), voici les principaux inconvénients :

- Coûts élevés : Il est reconnu que les bioplastiques coûtent deux fois plus cher que les plastiques conventionnels.
- Réduction des matières premières : Les bioplastiques produits à partir de sources renouvelables pourraient réduire les réserves de matières premières.
- Problèmes de recyclage : Les bioplastiques peuvent contaminer le processus de recyclage s'ils ne sont pas séparés des plastiques conventionnels. Par exemple, En travaillant avec des rayons infrarouges dans un système de tri des déchets, Les bioplastiques ne peuvent pas être séparés et les plastiques séparés peuvent être contaminés par des bioplastiques.

Dans le tableau ci-dessous, les principales différences entre les bioplastiques et les plastiques pétrochimiques sont résumées :

Tableau 02 : Analyse comparative entre les bioplastiques et les plastiques pétrochimiques (Chen,2014).

Propriétés	Bioplastiques	Péto-plastiques
Ressources renouvelables	Oui partiellement	Non
Durable	Oui	Non
Répartition de l'environnement	Biodégradable et/ou compostable	Certains dégradables par polymère Oxydation
Gamme de polymères	Limitée mais en pleine	Croissance
Croissance		
Émissions de GES	Habituellement faibles	Relativement élevées
Message de combustible fossile	Habituellement faibles	Relativement élevées
Utilisation des terres arables	Actuellement	Aucun

I.8. Caractérisation de bioplastique

I.8.1. La biodégradabilité

Il est essentiel de différencier les polymères dégradables des polymères biodégradables. Les polymères dégradables se caractérisent par leur capacité à être dépolymérisés ou recyclés dans des conditions et des processus spécifiques (Attallah et *al.*, 2021).

D'après la définition de l'American Society for Testing and Materials (ASTM), les polymères biodégradables sont ceux qui peuvent se décomposer en dioxyde de carbone, méthane, eau, composés inorganiques ou biomasse, selon des tests normalisés, sur une période déterminée, en tenant compte des conditions d'élimination disponibles.

I.8.2. Perméabilité à la vapeur d'eau

La majorité des biopolymères, tels que l'amidon, la cellulose et les protéines, présentent des caractéristiques hydrophiles, ce qui leur confère une perméabilité à la vapeur d'eau. Ces propriétés sont significatives. En particulier, la présence de groupes hydroxyles et/ou d'amines polaires influence fortement l'interaction avec l'eau par la formation de liaisons hydrogène. La perméabilité à la vapeur d'eau peut constituer un inconvénient pour l'emballage des produits alimentaires qui ne doivent pas être conservés dans des environnements très humides afin de rester frais. En revanche, cette caractéristique est bénéfique pour le conditionnement des produits frais (fruits et légumes), car elle prévient la condensation et prolonge leur durée de conservation. (Rabetafika et *al.*, 2006)

I.8.3. Biocompatibilité et biorésorbabilité

Un matériau biocompatible est défini comme étant capable d'exercer une fonction tout en garantissant une réponse adéquate sans effets indésirables sur l'environnement biologique. La réponse biologique d'un matériau dépend de trois facteurs : ses propriétés intrinsèques, les caractéristiques de l'hôte et les exigences fonctionnelles. Les biopolymères, en raison de leur origine naturelle, sont particulièrement adaptés à cette fonction, et les implants en polyéthylène sont progressivement remplacés par des polymères d'origine naturelle (Middleton, 1998 ; Liu et *al.*, 2001).

En outre, la recherche se concentre également sur des matériaux biorésorbables pour des applications médicales spécifiques. Ces matériaux ont la capacité de se décomposer naturellement dans l'organisme, étant ensuite remplacés par du tissu vivant. Les biopolymères se dégradent par hydrolyse enzymatique, libérant des molécules non toxiques et assimilables.

La biorésorbabilité des polymères est essentielle en pharmacie, notamment pour les médicaments à libération contrôlée (Djuikom,2012).

I.9. Utilisation de la méthodologie de la surface de réponse dans le domaine agroalimentaire

La méthodologie de surface de réponse (RSM) est un ensemble de techniques statistiques et mathématiques utiles pour développer, améliorer et optimiser des processus. Elle a également des applications importantes dans la conception, le développement et la formulation de nouveaux produits, ainsi que dans l'amélioration des conceptions de produits existants (Myers et *al.*, 2009).

Cette approche est couramment employée dans le secteur agroalimentaire afin d'optimiser divers processus. Elle permet d'identifier les conditions idéales pour rehausser la qualité, l'efficacité, et la durabilité des produits en analysant les interactions entre plusieurs variables et niveaux. Le plan de Plackett–Burman s'avère très utile pour le criblage des facteurs. En général, ce plan facilite la distinction entre les facteurs peu significatifs et ceux qui ont un impact majeur (Rosa et *al.*,2023)

I.10. Contraintes techniques et opportunités dans l'utilisation des biopolymères

Les biopolymères ont un grand potentiel dans divers secteurs, mais leur adoption est entravée par plusieurs obstacles majeurs. Parmi ces inconvénients, on note que leurs propriétés mécaniques et thermiques sont souvent inférieures à celles des matériaux synthétiques, ce qui limite leur utilisation dans des domaines tels que la biomédecine, l'emballage et le stockage d'énergie (Dutta et Sit, 2024).

Les recherches actuelles visent à améliorer ces propriétés grâce à des matériaux composites et des techniques de synthèse microbienne. Les biopolymères nécessitent des avancées en matière de résistance thermique pour répondre aux exigences des applications pratiques, en particulier dans les environnements à haute température.

Bien qu'ils soient biodégradables, leur taux de décomposition varie en fonction des conditions environnementales, ce qui rend leur gestion en tant que déchets plus complexes. Les stratégies de recyclage, y compris les méthodes enzymatiques, sont essentielles pour garantir une utilisation durable (Serrano-Aguirre,2024).

La viabilité commerciale des biopolymères est également un défi, avec des obstacles tels que le manque d'étiquetage normalisé et de sensibilisation des consommateurs. Les recherches sur les bioplastiques d'origine microbienne sont prometteuses, mais ils doivent encore être

développés pour atteindre une échelle commerciale. Malgré ces défis, les biopolymères peuvent jouer un rôle essentiel dans un avenir durable, d'autant plus que la recherche progresse pour améliorer leurs propriétés.

En ce qui concerne la stabilité chimique, certains biopolymères tels que le chitosane peuvent connaître une efficacité diminuée à de faibles niveaux de pH, affectant leurs performances dans diverses applications. Les limitations fonctionnelles incluent une personnalisation limitée. Bien que certains biopolymères soient modifiables, l'obtention de propriétés spécifiques nécessite souvent des recherches approfondies (Baranwal et *al.*, 2022). De plus, la variabilité des propriétés des biopolymères naturels peut conduire à des incohérences dans leurs performances, en fonction de leur origine et des méthodes de traitement utilisées.

En bref, bien que les biopolymères représentent des alternatives durables aux plastiques conventionnels, leurs limites en termes de résistance mécanique, de stabilité environnementale, de défis de traitement, de résistance chimique et de polyvalence fonctionnelle doivent être prises en compte lors de leur utilisation. Les recherches en cours visent à surmonter ces défis grâce à des innovations et des techniques de traitement avancées. (Dutta et Sit, 2024).

Chapitre II
Matériel et Méthodes

II. Matériel et méthodes

II.1. Objectif de l'étude

Ce travail vise à produire un bioplastique biodégradable à base de rebuts de pomme de terre, et améliorer certaines de ses propriétés et faire une optimisation par le design expérimental Plackett-Buramn.

II.2. La biomasse étudiée

L'amidon de pomme de terre est retenu dans notre étude. Il est un polymère naturel qui a beaucoup de potentiel pour créer des plastiques biodégradables. Sa richesse en amylose et amylopectine lui donne un excellent équilibre entre rigidité et flexibilité. Il est facile à transformer, surtout avec des plastifiants comme le glycérol, ce qui en fait un choix prisé pour sa biodégradabilité (Azeredo *et al.*, 2012)

II.3.Extraction d'amidon

Pour l'extraction d'amidon, les étapes suivantes sont effectuées (Figure 3) :

- **Echantillonnage**

Les échantillons de pomme de terre sont collectés d'une ferme agricole locale. La variété utilisée nommée Spunta, est une variété de pomme de terre de type allongé, à peau jaune et à chair ferme (Elorn Plants,2025), elle est connue par sa grande adaptabilité aux différents types de sols et largement appréciée pour son rendement et sa bonne résistance aux mildiou et aux nématodes. Les tubercules de Spunta sont de taille homogène, avec une peau lisse et une chair ferme, idéale pour une variété d'utilisations culinaires (STET Holland,2025).

Après échantillonnage, cinq kg des pommes de terre sont lavés pour éliminer la saleté, elles sont ensuite pelées et râpées pour récupérer la pulpe.

- **Trempage**

La pulpe de pomme terre a été trempées dans des bécher (1L) avec 500 ml d'eau et distillée, mélanger bien ces suspensions et laisser pendant 2 à 3 heures pour la durée de trempage.

- **Filtration**

La suspension a été filtrée à travers une passoire et pressée à la main pour obtenu un jus. Le filtrat est ensuite laisse reposer afin que l'amidon se former une sédimentation.

- Séchage

Enlever l'eau et récupérer l'amidon obtenu, séché à l'air libre pendant 24 à 48 heures.

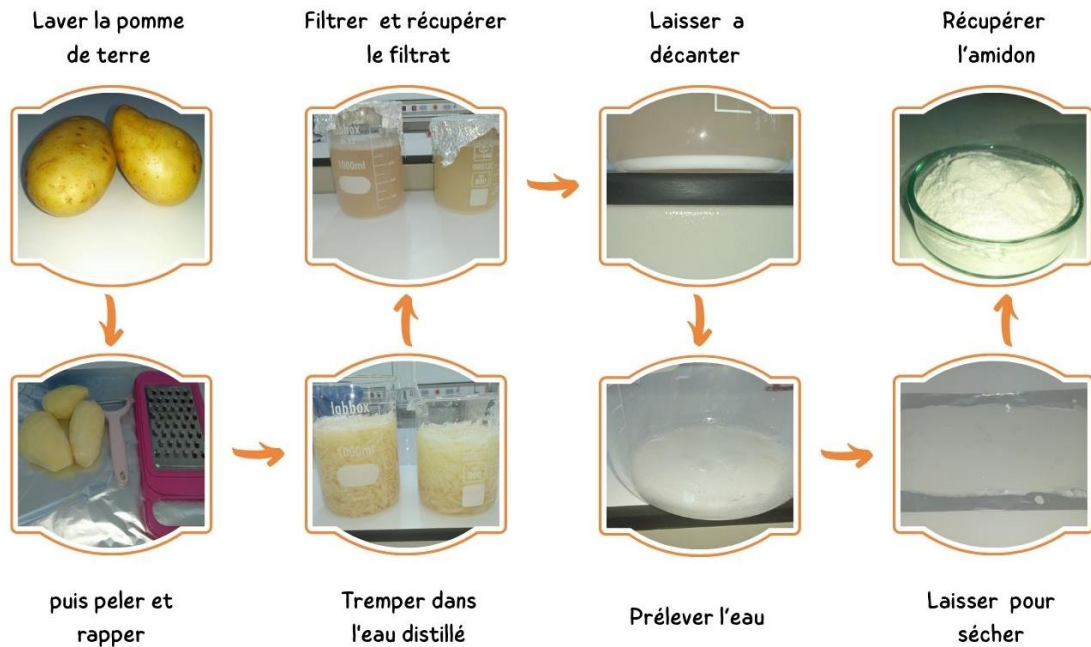


Figure 03 : Les différentes étapes de l'extraction de l'amidon (photographie originale).

II.4. Caractérisation d'amidon extrait

II.4.1. Détermination du taux d'humidité

Peser 5 g d'amidon, dans un creuset en utilisant une balance précise. Placer ensuite le creuset dans une étuve réglée à 135°C pendant 90 minutes. Ensuite, retirer le creuset à partir l'étuve et le laisser refroidir dans un dessiccateur contenant du gel de silice pendant 30 minutes. Une fois refroidis, peser le creuset à nouveau pour déterminer la masse finale. Le taux d'humidité est donné par la relation suivante :

$$\text{Taux d'humidité : } H(\%) = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 - m_0)} \times 100 \quad \text{Où :}$$

H (%) : taux d'humidité exprimé en pourcentage, en masse.

m₀ : masse en gramme du creuset vide.

m₁ : masse en gramme du creuset et de prise d'essai.

m₂ : masse en gramme du creuset et de résidu sec.

II.5. Préparation de bioplastique à base de l'amidon de pomme de terre

Suivant la méthode de Meite (2015), dans un bécher (250 ml), mettre 5 g d'amidon de pomme de terre avec 25 ml d'eau distillée. Mettre le bécher sur un plaque chauffante à 65-70°C, ajouter 4 ml de glycérol et 6 ml de l'acide chloridrique (**HCL**) à une concentration de 0,1 mol/l, puis agiter bien le mélange à l'aide d'un barreau magnétique pendant 15 à 20 minutes.

Ensuite, ajouter 4 ml de la solution d'hydroxyde de sodium (**NaOH**) à 0,1 mol/l. Agiter la solution jusqu'à ce que devienne homogène et visqueuse. Après cela le mélange obtenu est versé sur une plaque en verre ou papier aluminium et bien étalé. Placer le tout dans une étuve à une température de 80°C pendant 1 heure. A la fin retirer les films et le laisser sécher à l'air libre pendant 3 à 4 jours.

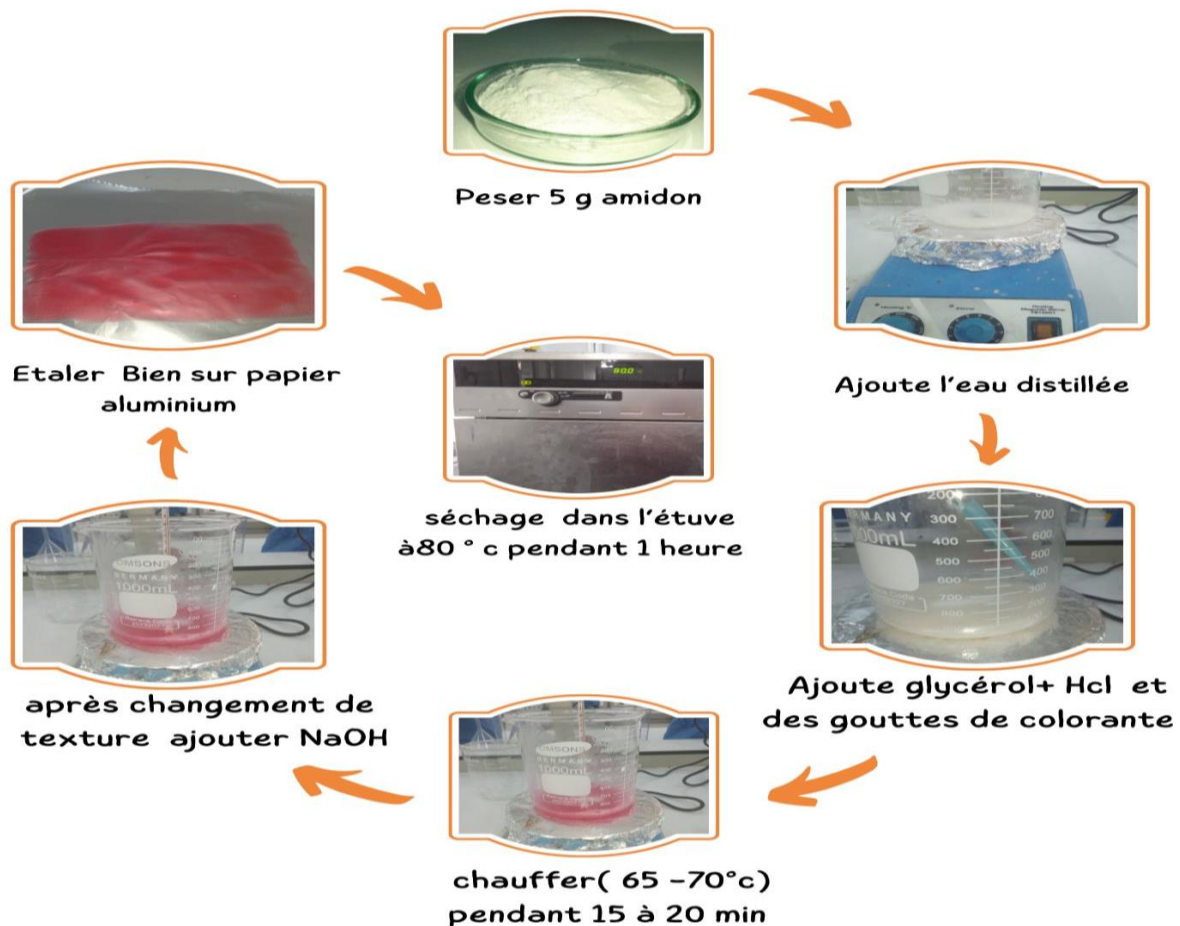


Figure 04 : Les étapes de fabrication de bioplastique a base amidon de pomme de terre (photographie originale).

II.6. Amélioration des caractéristiques de bioplastique par l'ajoute d'argile

Les différents films ont été élaborés selon le même protocole que celui utilisé pour le bioplastique. Ainsi, au mélange de base constitué d'amidon, d'eau et de glycérol, des proportions variables d'argile (2 %, 4 % et 6 % en poids) ont été incorporées. L'argile a été ajoutée après le glycérol, sous agitation magnétique, afin d'assurer une dispersion homogène de la charge minérale dans la matrice.

Tableau 03 : Les différentes formulations de film réalisées.

Film	Amidon (g)	Argile (g)	Glycérol (ml)	HCL (ml)	Eau (ml)	NaOH (ml)
F1	5	0	4	6	25	4
F2	5	0,02	4	6	25	4
F3	5	0,04	4	6	25	4
F4	5	0,06	4	6	25	4

II.7. Caractérisation des bioplastiques obtenus

II.7.1. Biodégradabilité dans le sol

Pour effectuer le test de biodégradabilité, les échantillons du bioplastique obtenu doivent être peser pour déterminer la masse initiale (M_0). Puis mettre les échantillons de plastique dans le sol à une profondeur de 15 à 20 cm, pendant 15 jours (Adeyemo et *al.*,2024)



Figure 05 : Le test de la biodégradabilité dans le sol (photographie originale).

II.7.2. Solubilité dans l'eau

Les échantillons doivent être séchés dans une étuve à 110 °C pendant 6 heures afin de déterminer la masse initiale des films secs. Par la suite, les films secs sont plongés dans des béchers contenant 40 ml d'eau distillée à température ambiante. Les béchers sont ensuite recouverts de papier aluminium et les échantillons sont maintenus immergés pendant 24 heures, avec une légère agitation de temps à autre (Rhim *et al.*, 2005).

Les échantillons sont ensuite soigneusement retirés de l'eau. Puis, sont séchés à nouveau dans une étuve à 110°C pendant 6 heures pour déterminer la masse finale des films.

Le taux de solubilité (TS) du film dans l'eau est donné par la relation suivante (Noshivani *et al.*, 2016) :

$$TS (\%) = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100$$

Où :

M_f : la masse finale des films.

M_i : la masse initiale des films secs.



Figure 06 : Le test de solubilité dans l'eau (photographie originale).

II.8. Optimisation de bioplastiques par le design expérimental Plackett-Burman

La solubilité du bioplastique produit à base de pomme de terre dans l'eau est testée par l'utilisation de l'optimisation de la méthodologie de réponse en surface (RSM). Le design expérimental de Plackett-Burman est une initiation pour l'optimisation de la production de bioplastiques.

Un plan expérimental de type Plackett-Burman, a été mis en place pour examiner comment différents facteurs influencent. Cette méthode permet de repérer rapidement les

variables les plus importantes en réduisant le nombre d'essais nécessaires, ce qui simplifie l'optimisation des conditions de fabrication (Plackett et Burman, 1946).

Dans cette étude le protocole de la préparation du bioplastique avec 6% du taux d'argile a été retenue pour une optimisation commençant par le plan de Plackett-Burman.

Au total, quatre facteurs sont sélectionnés pour l'étude. Chaque variable représentant deux niveaux, maximum (+1) et minimum (-1). Les facteurs et leurs niveaux étaient indiqués dans le tableau ci-dessous.

Tableau 04: Les facteurs utilisés dans le plan expérimental Plackett-Burman et leurs niveaux.

Facteurs	Niveaux	
	Minimum (-1)	Maximum (+1)
X1 : HCL/NaOH	0	0,2 mol/l
X2 : Température (°C)	70 °C	120°C
X3 : Temps (min)	30 min	90 min
X4 : Plastifiant	Sorbitol	Glycérol

Minitab est un logiciel d'analyse statistique largement utilisé en recherche scientifique et industrielle pour mettre en œuvre des tests d'analyse de données, concevoir des expériences et améliorer la qualité. Son interface conviviale en fait un outil puissant pour prendre des décisions statistiques précises (Minitab, 2023).

Le logiciel Minitab utilisé dans notre étude nous a permis de réaliser douze types d'essais. Le plan expérimental de douze essais figure dans le tableau ci-dessous.

Tableau 05 : Matrice expérimentale obtenue par le plan expérimental Plackett-Burman.

Essais	X1	X2	X3	X4
1	-1	+1	-1	-1
2	-1	-1	-1	+1
3	+1	+1	-1	+1
4	+1	-1	-1	-1
5	-1	+1	+1	-1
6	-1	+1	+1	+1
7	+1	-1	+1	-1
8	-1	-1	-1	-1
9	+1	+1	-1	+1
10	+1	+1	+1	-1
11	-1	-1	+1	+1
12	+1	-1	+1	+1

Chapitre III
Résultats et Discussion

III.1. Résultats

Ce chapitre présente les résultats des expériences réalisées au laboratoire de notre département, sur des échantillons de bioplastiques fabriqués à partir d'amidon de pomme de terre.

III.1.1. Caractérisation de l'amidon extrait

III.1.1.1. Résultats du taux d'humidité

Les résultats de la teneur en humidité de l'amidon de pomme de terre extrait sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 06 : Taux d'humidité de l'amidon extrait.

Masse	m_0 (g)	m_1 (g)	m_2 (g)	Taux d'humidité (%)
Amidon extrait	44,938	49,938	49,267	$13,42 \pm 0,05$

Moyenne \pm écart-type de trois répétitions.

III.1.2. Production de bioplastique

La figure 07 illustre les différents types de films bioplastiques obtenus à la fin du processus de séchage à l'air libre, incluant ceux formulés avec l'ajout d'argile ainsi que ceux élaborés sans argile.

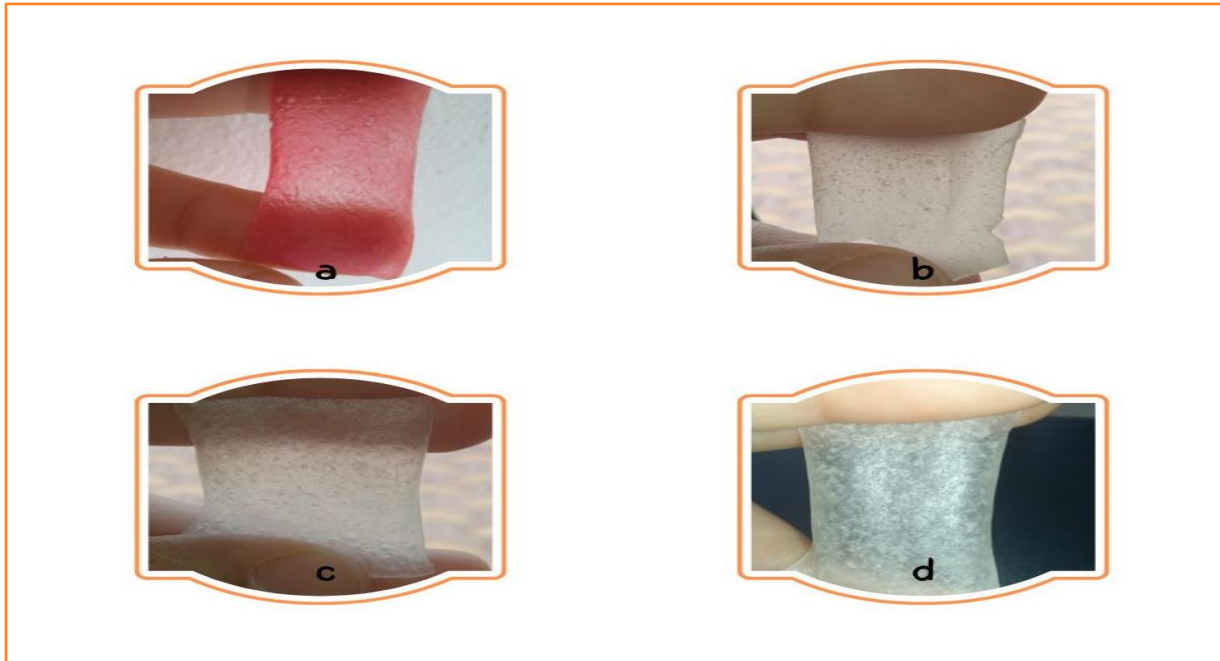


Figure 07 : films de bioplastique à base amidon de pomme de terre (photographie originale).

- a)** film standard (0% d'argile); **b)** film amélioré (2% d'argile)
c) film amélioré (4% d'argile); **d)** film amélioré (6% d'argile)

III.1.3. Caractérisation de bioplastique

III.1.3.1. Résultats de la biodégradabilité des bioplastiques

Les résultats des essais de biodégradabilité réalisés sur les différents films bioplastiques sont regroupés dans la figure 8. Ces données expriment la perte de poids (%) des échantillons après une période d'incubation de 15 jours, reflétant une variabilité allant de 23,04% à 86,84%.

L'ajout d'argile a entraîné une diminution significative du taux de biodégradabilité des bioplastiques dans le sol. La plus faible dégradation a été observée avec la formulation contenant 4 % d'argile, indiquant un effet retardateur, marqué à ce taux.

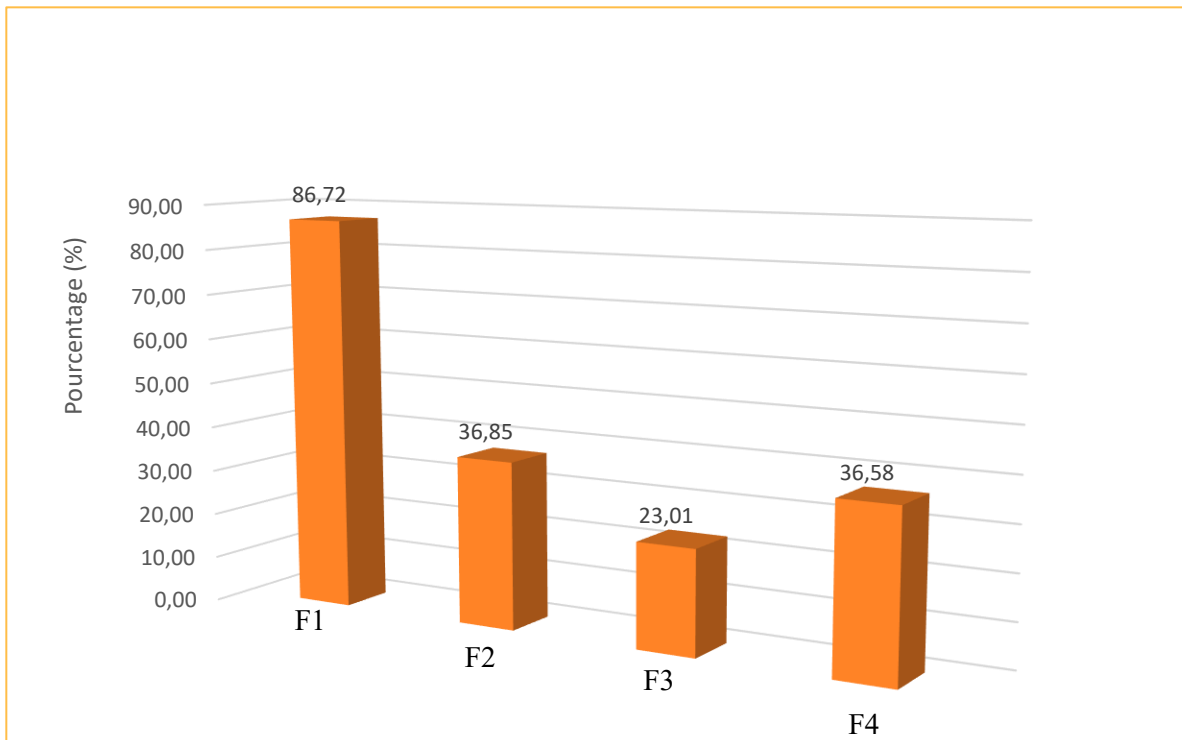


Figure 08 : Diagramme illustrant la biodégradabilité des films de bioplastique.

(F1 : film sans argile ; F2 : film avec 2% d'argile ; F3 : film avec 4% d'argile ; F4 : film avec 6% d'argile.)

II.1.3.2. Résultats de solubilité dans l'eau

Les différents pourcentages de la solubilité d'eau pour les films sont représentés dans la figure ci-dessous, l'ajout d'argile aux films d'amidon de pomme de terre a progressivement diminué leur solubilité dans l'eau, passant de $58,29 \pm 1,10$ % (F1, sans argile) à $54,41 \pm 1,74$ % (F3, avec 4 % d'argile). Cette baisse suit une tendance linéaire claire, avec un $R^2 = 0,8461$ qui montre une bonne corrélation entre la quantité d'argile et la réduction de la solubilité. Cela indique que l'argile joue un rôle important dans l'amélioration de la résistance à l'eau des films.

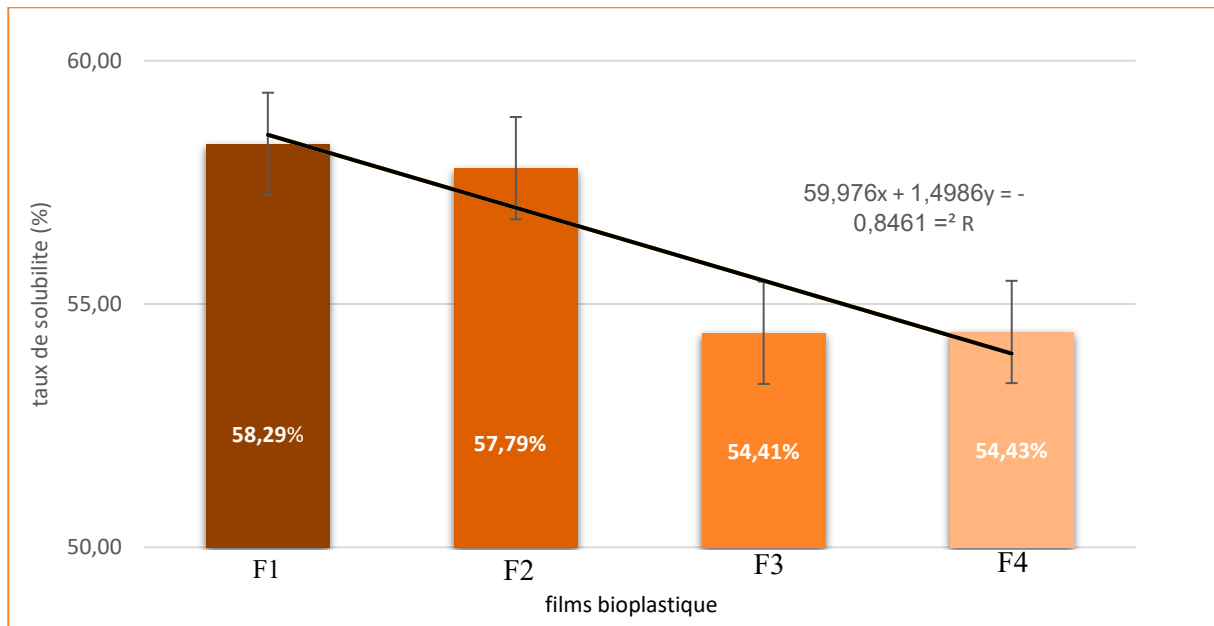


Figure 09 : Résultats de test de solubilité dans l'eau des films bioplastique.

(F1 : film sans argile ; F2 : film avec 2% d'argile ; F3 : film avec 4% d'argile ; F4 : film avec 6% d'argile.)

II.1.4. Résultats de l'optimisation du bioplastique obtenu

La solubilité des bioplastiques dans l'eau a été évaluée en mesurant la perte de poids en pourcentage (%). Les résultats obtenus à partir des formulations issues du plan d'expérience Plackett-Burman sont présentés dans le tableau 07.

Tableau 07 : Hydrosolubilité des bioplastiques obtenus par le plan expérimental Plackett-Burman.

Essais	Hydrosolubilité (%)
1	38,50
2	16,35
3	52,50
4	35,30
5	33,50
6	32,30
7	39,40
8	17,10
9	68,40
10	32,10
11	16,50
12	39,50

Les données montrent une variation notable des taux de biodégradabilité parmi les 12 essais, allant de 16,35% à 68,40 %, ce qui témoigne d'une dégradation totale de certains échantillons de bioplastique. Parmi l'ensemble des variables testées, HCl/NaOH et la température se sont révélées avoir un effet significatif et positif sur la solubilité des bioplastiques ($p < 0,05$), comme indiqué dans le tableau 08. En revanche, les autres facteurs, n'ont montré aucun effet sur la solubilité dans l'eau.

Tableau 08 : Estimations des coefficients du modèle.

Terme	Probabilité	Niveau de signification
Constante	<,0001*	S
HCl/NaOH	0,008*	THS
Température	0,018*	S
Temps	0,292	N.S
Plastifiant	0,365	N.S

N.S : non significatif ; S : significatif ; THS : Très hautement significatif.

Le diagramme de Pareto (figure 10) montre l'influence des facteurs étudiés sur la solubilité des plastiques produits.

Les analyses statistiques des données ont montré que parmi l'ensemble des facteurs testés, l'existence du HCl/NaOH et la température avaient les effets les plus significatifs sur la solubilité. La concentration du HCl/NaOH est le facteur le plus significatif avec un effet positif. La valeur de R^2 était de 94,82% alors de R^2 ajusté est de 91,25%.

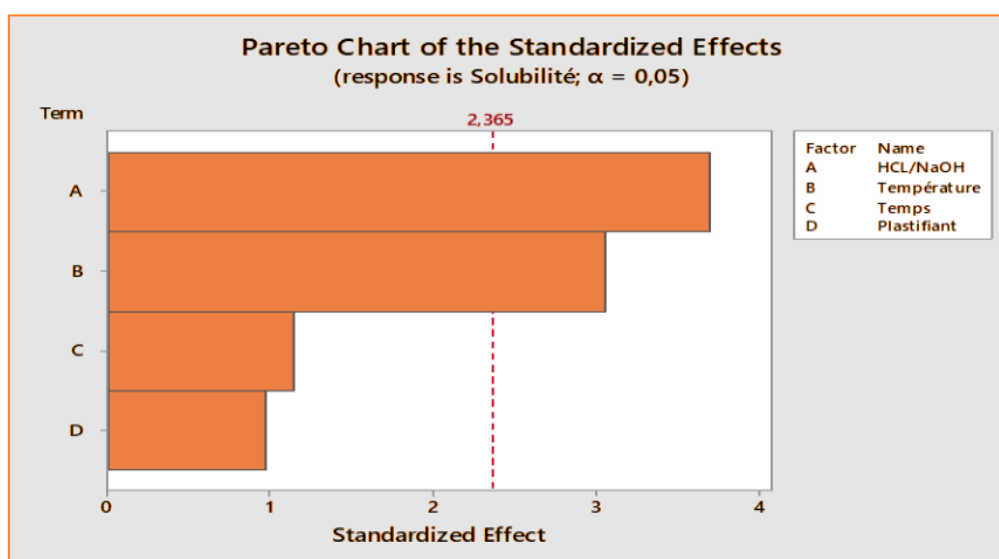


Figure 10 : Diagramme de Pareto des effets standard de facteurs étudiés.

III.2. Discussions

L'objectif principal de notre étude est d'améliorer et optimiser les propriétés d'un bioplastique biodégradable à base de rebuts de pomme de terre.

Le taux d'humidité d'amidon déterminé dans notre étude avait une valeur de 13,42 %. Cette valeur est inférieure à celles rapportées par Alliche (2021) et inférieure à celle rendue par Seghier (2024), qui a trouvé un taux de 24 %. Cependant, notre résultat est supérieure de celui obtenu par Bourdache (2021), estimé à 9,33 %, et concorde avec les observations d'Irinislimane (2019), qui a mesuré un taux d'environ 13 % dans des conditions similaires. Ces différences peuvent s'expliquer par les variétés de pommes de terre, les conditions expérimentales ou les méthodes de séchage utilisées. Selon Kowalczuk et *al.* (2020), un taux d'humidité compris entre 10 % et 16 % est considéré comme idéal pour garantir une bonne transformabilité de l'amidon et une stabilité adéquate pendant le stockage.

Cette étude a analysé l'effet de l'ajout d'argile sur la biodégradabilité des films d'amidon de pomme de terre dans le sol. Les résultats indiquent que l'échantillon sans argile (F1) a montré le taux de dégradation le plus élevé, dépassant 86 %. En revanche, les échantillons contenant de l'argile ont présenté une biodégradabilité nettement réduite, en particulier l'échantillon F3 avec 4 % d'argile, qui a enregistré la dégradation la plus faible (23,04%).

La réduction de la biodégradabilité est due à la densification de la structure du film causée par l'argile, ce qui empêche la pénétration de l'eau et des micro-organismes nécessaires à la décomposition. Des recherches antérieures, comme celles d'Avérous et al. (2004), ont démontré que les charges minérales, telles que l'argile, diminuent la perméabilité et augmentent la cohésion des films, ralentissant ainsi leur dégradation. De plus, Tharanathan (2003) a mis en évidence que l'incorporation de composants non biodégradables dans des matrices naturelles réduit leur interaction avec l'environnement, ce qui contribue à ralentir leur décomposition.

Ce qui est captivant, c'est que l'échantillon contenant 6 % d'argile (F4) n'a pas présenté la dégradation la plus faible comme on aurait pu le supposer ; ses résultats sont en réalité similaires à ceux de l'échantillon à 2 %. Cela indique que l'impact de l'argile ne dépend pas seulement de la quantité ajoutée, mais également de sa distribution dans le mélange et de son interaction avec les autres éléments du film, comme l'ont souligné Chiellini et al (2001) dans leurs études sur les films renforcés.

Lors de l'évaluation de la solubilité dans l'eau, nous avons constaté une diminution progressive du pourcentage de solubilité, les valeurs variantes entre 58,29 % et 54,41 %. Cette

légère baisse de la solubilité semble justifiée au regard des recherches antérieures sur l'amélioration des propriétés de barrière à l'eau des biofilms.

Par ailleurs, Tang et *al.* (2008) ont montré que la solubilité dans l'eau des films d'amidon de maïs enrichis en argile diminuait de 42,1 % à 29,8 % lorsque la proportion d'argile passait de 0 % à 6 %.

Dans une étude menée par Slavutsky et *al.* (2012), il a été prouvé que l'ajout de 5 % d'argile montmorillonite aux films d'amidon de maïs entraînait une réduction significative de la solubilité dans l'eau, atteignant $17,26 \pm 0,55$ %. Cette amélioration a été attribuée à la création de couches d'argile qui établissent un chemin plus complexe pour le passage des molécules d'eau à travers la membrane, ralentissant ainsi le processus de dissolution. Ce résultat est partiellement en accord avec les observations de notre étude, où l'augmentation de la teneur en argile contribuait également à la diminution de la solubilité. Toutefois, l'effet observé dans notre cas était moins marqué, probablement en raison de l'utilisation d'argile naturelle, contrairement à la nanoargile modifiée employée dans l'autre étude, qui présente une structure plus organisée et une meilleure résistance à l'humidité.

L'analyse des résultats de solubilité dans l'eau et de taux de biodégradation a permis d'identifier l'échantillon F4 (avec une teneur en argile de 6 %) comme l'une des formulations les plus équilibrées. Cet échantillon a enregistré la plus faible solubilité avec un taux de biodégradation significatif. Cet équilibre indique une bonne résistance à l'humidité – une propriété essentielle dans les applications d'emballage – sans impact négatif sur la biodégradabilité du film.

Concernant la solubilité, l'échantillon optimisé présente un taux inférieur de 30,03 % par rapport à celui obtenu dans des conditions standard. De plus, ce même échantillon s'est révélé 48,92 % moins hydrosoluble qu'un plastique commercial de référence en comparant avec les résultats obtenus par Seghir, (2024). Ces résultats mettent en évidence l'effet bénéfique de l'optimisation des conditions de formulation sur la capacité du matériau à se décomposer dans l'environnement et à réduire sa solubilité dans l'eau, soulignant ainsi le potentiel de ces bioplastiques en tant qu'alternative durable aux plastiques conventionnels, ce qui a montré l'efficacité du modèle mathématique de Plackett-Burman dans l'optimisation de la production des bioplastiques. Le modèle est très satisfaisant, avec un $R^2 = 0,94$. Selon Chen et *al.* (2009), un modèle ayant une valeur R^2 supérieure à 0,9 est considérée comme adéquat. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Seghir (2024).

L 'échantillon amélioré optimal montre une biodégradabilité supérieure par rapport aux Plusieurs bioplastiques examinés ce qui signifie que nos films à base d'amidon de pomme de terre sont respectueux de l'environnement car ils ne provoquent pas de pollution, comparés aux autres plastiques non biodégradables qui mettent des années à se décomposer, pouvant ainsi endommager les plantes et les animaux et générer des gaz à effets de serre.

Conclusions

Conclusion

Cette étude avait pour but de concevoir des films bioplastiques biodégradables, en se servant de l'amidon de pomme de terre comme matériau naturel de base, tout en améliorant leurs caractéristiques par l'incorporation de quantités spécifiques d'argile naturelle. L'objectif principal était d'améliorer la biodégradabilité et minimiser la solubilité de ces films, afin de les utiliser comme une alternative durable pour les emballages alimentaires.

Les résultats de cette étude ont révélé que l'ajout d'argile naturelle dans la formulation des films bioplastiques a eu un impact notable sur leurs caractéristiques environnementales. Cela a notamment permis de diminuer leur solubilité dans l'eau, augmentant ainsi leur résistance à l'humidité, une propriété essentielle pour les matériaux d'emballage. Les tests ont également montré que l'influence de l'argile sur la biodégradabilité ne dépendait pas seulement du pourcentage incorporé, mais qu'elle était également affectée par d'autres éléments tels que la structure du film, son épaisseur, et la distribution de l'argile dans la matrice d'amidon.

En conséquence, l'efficacité des matériaux bioplastiques analysés repose sur un équilibre subtil entre plusieurs propriétés structurelles et chimiques, y compris l'homogénéité, l'épaisseur et la flexibilité face aux conditions environnementales. Ces constatations mettent en évidence la nécessité d'adopter une approche intégrée dans la conception de ces matériaux, en prenant en compte les interactions entre résistance à l'eau, biodégradabilité et facilité de mise en œuvre.

Les résultats de l'essai de l'optimisation par le modèle mathématique Plackett-Burman, nous ont pu déterminer les facteurs ayant un effet sur l'hydrosolubilité des bioplastiques testés. Ces facteurs sont la présence de l'acide chloridrique et l'hydroxyde de sodium ensemble, qui a montré un effet très hautement significatif ($p < 0,001$). Le deuxième facteur déterminant était la température. Ce dernier a présenté un effet significatif ($p < 0,05$) sur la solubilité du bioplastique amélioré dans l'eau.

Le développement d'emballages biodégradables et respectueux de l'environnement ne repose pas uniquement sur le choix des composants, mais nécessite également une compréhension approfondie de leurs interactions structurelles et fonctionnelles dans le cadre des conditions d'utilisation réelles.

Perspectives :

- ✓ Effectuer des tests supplémentaires sur les propriétés mécaniques, comme la résistance à la traction et à la flexion, afin d'assurer l'efficacité des films d'emballage.
- ✓ Appliquer des méthodes d'analyse précises (comme le MEB et le FTIR) pour analyser la structure du film et la distribution de l'argile à l'intérieur.

- ✓ Examiner plus en profondeur l'influence de l'épaisseur et de la densité du film sur la dissolution et la décomposition.
- ✓ Évaluer l'efficacité des films dans des conditions réelles avec différents produits alimentaires.
- ✓ Suggérer de nouvelles formulations avec l'utilisation des méthodologies de réponses en surface (RSM) en intégrant d'autres ingrédients naturels pour optimiser les performances tout en préservant la biodégradabilité.

Références
Bibliographiques

Références bibliographiques

- Arikan, E. B.; Ozsoy, H. D. (2015). A Review: Investigation of Bioplastics. *J. Civil Eng. Arch*, 9, 188-192. page 190. DOI: 10.17265/1934-7359/2015.02.007
- Attallah, O.A.; Mojicevic, M.; Garcia, E.L.; Azeem, M.; Chen, Y.; Asmawi, S.; Brenan Fournet, M. Macro and Micro Routes to High Performance Bioplastics: Bioplastic Biodegradability and Mechanical and Barrier Properties. *Polymers* 2021, 13, 2155. <https://doi.org/10.3390/polym13132155>
- Aristote Matondo (2018). Fabrication d'un Bioplastique. Université de Kinshasa.
- Arnaud Stéphanie (2024). Les bioplastiques sont-ils fantastiques ? <https://blog-isige.minesparis.psl.eu/2024/10/03/les-bioplastiques-sont-ils-fantastiques/>
- Avérous, L., Moro, L., Dole, P., & Fringant, C. (2004). Properties of thermoplastic blends: Starch–polycaprolactone. *Polymer*, 41(11), 4157–4167. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(99\)00546-4](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(99)00546-4)
- Adeyemo, F., Ogunwumi, O. T., Oyedeko, K. O., & Amodu, O. S. (2024). Statistical modeling and optimization of bioplastic synthesis from waste corn using polynomial regression analysis. *Green Energy and Environmental Technology*, 3(1), 1–22. <https://doi.org/10.5772/geet.20240012>
- Azeredo, H. M. C., Mattoso, L. H. C., & McHugh, T. H. (2012). Nanocomposites in food packaging – A review. *Journal of Food Science*, 77(1), R37–R49.
- Alliche, I. (2021). Elaboration et caractérisation de biomatériaux issus des déchets alimentaires Université M'hamed Bougara de Boumerdes.
- American Society for Testing and Materials (ASTM) (2012). Standard Specification for Labeling of Plastics Designed to be aerobically Composted in Municipal or Industrial Facilities. West Conshohocken, ASTM International, 3p. (D6400-12).
- Boudjema Hayat Latifa, (2016). Elaboration des matériaux Composites biodégradables issus de ressources renouvelables. Thèse de doctorat, université d'Oran 2.
- Bourdache, M. ; Laidi, L. (2021). Synthèse et caractérisation des biofilms à base d'amidon de pomme de terre renforcés par deux types de charges (MCC et sépiolite). Université A. Mira de Bejaïa.
- Coppola, G., Gaudio, M.T., Lopresto, C.G. (2021). Bioplastic from Renewable Biomass: A Facile Solution for a Greener Environment. *Earth System Environ* 5, 231–251. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00208-7>

- Chen, Y.J (2014). Bioplastics and their role in achieving global sustainability. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 226-231.
- Chiellini, E., Corti, A., D'Antone, S., & Solaro, R. (2001). Biodegradation of poly (vinyl alcohol) based blown films under different environmental conditions. *Polymer Degradation and Stability*, 73(3), 315–322.
- Dutta, D., & Sit, N. (2024). A comprehensive review on types and properties of biopolymers as sustainable bio-based alternatives for packaging. *Food Bio macromolécules*. <https://doi.org/10.1002/fob2.12019>
- Davidovic Andréa Stanojlovic (2006). Matériaux biodégradables à base d'amidon expansé renforcé de fibres naturelles - Application à l'emballage alimentaire. Université du Sud Toulon Var, France.
- Djuikom Noutsu. (2012). Valorisation des fractions de la production d'éthanol de maïs en bioplastique. Université de Québec.
- Européen Bioplastiques, Nova Institute, Nova Institute (2024).
- Elorn Plants. (n.d.). Seed Potato Spunta Variety. Retrieved from <https://www.elornplants.com/seed-potatoes/spunta>.
- Ibrahim, N.I.; Shahar, F.S.; Sultan, M.T.H.; Shah, A.U.M.; Safri, S.N.A.; Mat Yazik, M.H. (2021). Overview of Bioplastic Introduction and Its Applications in Product Packaging. Coatings. <https://doi.org/10.3390/coatings11111423>
- Imam, S. H., Gordon, S. H., Shogren, R. L., & Tosteson, T. R. (1999). Biodegradation of starch–poly (beta-hydroxybutyrate-co-beta-hydroxyvalerate) bioplastic. *Journal of Environmental Polymer Degradation*, 7, 123–128.
- Irinislmane, H. (2019). Extraction et caractérisation du biopolymère amidon en vue de son utilisation comme matériau adsorbant. Thèse de doctorat. Ecole nationale polytechnique.
- Liu, H., Xie, F., Yu, L., Chen, L. et Li, L. (2009). Thermal processing of starch-based polymers. *Progress in Polymer Science*, 1348–1368. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.07.001>
- Lapointe Richard (2012). Bioplastiques biodégradables, compostables et biosourcés pour les emballages alimentaires, distinctions subtiles mais significatives (Doctoral dissertation Université Sherbrooke).

- Ly Elhadji Babacar. (2008). Nouveaux matériaux composites thermoformables à base de fibres de cellulose. Matériaux. Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Lourdin, D., Coignard, L., Bizot, H., & Colonna, P. (1997). Influence of equilibrium relative humidity and plasticizer concentration on the water content and glass transition of starch materials. *Polymer*, 38(21), 5401–5406.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2009). *Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments* (3rd ed.). Wiley.
- Mohamed Aouay (2024). Amélioration des performances des plastiques biodégradables via l'intégration de nanoparticules biosourcées dans le PLLA et les mélanges PBAT/amidon. Université Grenoble.
- Middleton, J.C. et A.J., Tipton 1998. Synthetic biodegradable polymers as medical devices. *Med. Plast. Biomater. Mag.*, p. 30-39.
- Meite Namory. (2015). Elaboration des matériaux bioplastique a base d'amidon de manioc renforcés au kaolin. Université Felix Houphouet Boigny.
- Minitab, LLC. (2023). Minitab Statistical Software. Retrieved from <https://www.minitab.com>
- Mali, S., Grossmann, M. V. E., Garcia, M. A., Martino, M. N., & Zaritzky, N. E. (2005). Effects of controlled storage on thermal, mechanical and barrier properties of plasticized films from different starch sources. *Journal of Food Engineering*, 75(4), 453–460.
- Noshirvani, N., Ghanbarzadeh, B., Fasihi, H. & Almasi, H. (2016). Starch–PVA Nanocomposite Film Incorporated with Cellulose Nanocrystals and MMT: A Comparative Study. *International Journal of Food Engineering*, 12(1), 37-48.
<https://doi.org/10.1515/ijfe-2015-0145>
- Oliveira, S. M. (2023). Recent advances in bio-based polyethylene: Synthesis, properties, and applications.
- Phosri S, Kunjiek T, Mukkhakang C, Suebthep S, Sinsup W, Phornsirigarn S and Charoeythornkhajhornchai P (2022) Biodegradability of bioplastic blown film in a marine environment. *Front. Mar. Sci.* 9:917397. Doi: 10.3389/fmars.2022.917397
- Pierce, L.M. (2011). PHA and bio-derived PE to drive bioplastic packaging market to 2020: study. In *Packaging Digest*. Site de *Packaging Digest*, [En ligne].

- Palaniswamy, R & Venkatachalam, H. (2020). BIOPLASTIC WORLD: A REVIEW. *Journal of Advanced Scientific Research*, 11(3), 43–53.
- Pukánszky, B. (2005). Influence of interface interaction on the ultimate tensile properties of polymer composites. *European Polymer Journal*, 41(3), 645. doi:10.1016/j.eurpolymj.2004.10.035
- Plackett, R.L. & Burman, J.P. (1946). The design of optimum multifactorial experiments. *Biometrika*, 33(4), 305–325. <https://doi.org/10.2307/2332195>
- Rabetafika., Paquot et Dubois. (2006). Les polymères issus du végétal : matériaux à propriétés spécifiques pour des applications ciblées en industrie plastique. *Biotechnologie, agronomie, société et environnement*.
- Rajendran, N. et al. *Journal of pharmacy research* 2012,5(3), 1476, 1479. (Seaweeds as a new source for bioplastics).
- Reddy., Gupta et Reddy. (2013). Study of bio-plastics as green and sustainable alternative to plastics. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*.
- Rhim, J.-W., Park, H.-M., & Ha, C.-S. (2013). Bio-nanocomposites for food packaging applications. *Progress in Polymer Science*, 38(10), 1629–1652.
- Ramaroson Jessi Andriatomefy. (2023). Valorisation des déchets de pomme de terre par la fabrication de bioplastiques dans la commune MERIMANDROSO IVATO. Université d'Antananarivo.
- Shrestha, A., van-Eerten Jansen, M. C. A. A., & Acharya, B. (2020). Biodegradation of Bioplastic Using Anaerobic Digestion at Retention Time as per Industrial Biogas Plant and International Norms Sustainability, 12(10), 4231. <https://doi.org/10.3390/su12104231>
- SCHWACH Emmanuelle. (2004). Etude de systèmes multi phases biodégradables à base d'amidon de blé plastifié relations structure – propriétés approche de la comptabilisation. Thèse de doctorat, université de Reims – champagne Ardenne.
- Slavutsky, A. M., & Bertuzzi, M. A. (2012). Water barrier properties of starch films reinforced with natural fiber and montmorillonite. *Industrial Crops and Products*, 36(1), 362–370. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.10.039>
- STET Holland. (n.d.). Spunta Potato Variety Characteristics. Retrieved from <https://holland.stet-potato.com/en/varieties/spunta>.

- Seghir, B. K. (2024). Valorisation des rebuts de légumes et production d'emballage biologique. Université de Amar Thelidji- Laghouat.
- Tonuk, D., Shove, E., & Suchman, L. (2016). Making bioplastics: an investigation of material-product relationships (Doctoral dissertation, Lancaster University). Page 8.
- Tharanathan, R. N. (2003). Biodegradable films and composite coatings: Past, present and future. *Trends in Food Science & Technology*, 14(3), 71–78.
[https://doi.org/10.1016/S0924-\(224402\)00280-7](https://doi.org/10.1016/S0924-(224402)00280-7)
- Tang, X., Alavi, S., & Herald, T. J. (2008). Barrier and mechanical properties of starch–clay nanocomposite films. *Cereal Chemistry*, 85(3), 433–439. DOI : 10.1094/CCHEM-85-3-0433
- Véronique, V. H ; Theo, G. (2012). Bioplastiques : définitions, normes, possibilités d'application, impact sur l'environnement, (2012).
- Van Soest, J. J. G., Tournois, H., de Wit, D., & Vliegthart, J. F. G. (1996). Short-range structure in (partially) crystalline potato starch determined with attenuated total reflectance Fourier-transform IR spectroscopy. *Carbohydrate Polymers*, 29(3), 225–232.
- WERTZ, J. L. (2011). L'amidon et le PLA : deux biopolymères sur le marché. Note de synthèse. Document FARR-Wal.
- Yu, L. (2009). *Biodegradable Polymers Blends and Composites from Renewable resources*. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 487p
- Zhao, He, R., Li, S., G.; Zhai, L., Qin, P., & Yang, L. (2023). Starch Modification with Molecular Transformation, Physicochemical Characteristics, and Industrial Usability: A State-of-the-Art Review. *Polymers*, 15(13), 2935.
<https://doi.org/10.3390/polym15132935>