



People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
University of El Oued
Faculty of natural and life sciences
Laboratory biology health environment



A Doctoral Thesis

Submitted in fulfilment of the requirements for the/ Doctorate degree in the third cycle (LMD)

Field: Ecology and environment

Specialization: Ecology and environment

**Etude physico-chimique et biologique du bioplastique fabriqué
à partir la patate douce (*Ipomoea batatas* Lam. 1793)**

Presented by: AHMED SALAH Roumaisa

Supervised by:

Defended in the presence of the Examination Committee:

Name	Rank	Affiliation	Role
SELMANE Mahdi	MCA	Univ. El Oued	Chair
ALIA Zeid	MCA	Univ. El Oued	Supervisor
GAHTAR Abdelouahab	MCA	Univ. El Oued	Assistant Supervisor
KhEZZANI Bachir	Pr	Univ. El Oued	Examiner
MOUANE Aicha	MCA	Univ. El Oued	Examiner
BOUNAR Rabeh	Pr	Univ. M'sila	Examiner
RIZKALLAH CHafika	Pr	Univ. Tebessa	Examiner

Academic Year: 1447-14478AH / 2025-2026

Dédicace

*Mes premiers mots d'amour et de reconnaissance vont vers mon paradis sur terre
mes chers parents Mohammed Salah et Samia . Vous m'avez offert l'éducation et
la force de croire en mes rêves. Cette thèse est le fruit de vos enseignements.*

*A mon époux bien-aimé Salah Eddine, partenaire de chaque instant, dont la foi en moi
n'a jamais vacillé. Cette victoire est la nôtre.*

*Mes chères sœurs Ilham, Radhia, Radja, Sondes, Nour elhouda et Raihana, merci
d'avoir été le refuge quand j'étais fatigué, et la joie quand j'ai réussi.*

*Ma plus belle source de bonheur et de motivation Douaa
Vous êtes ma force quand la mienne faiblissait et ma raison de persévérer. Merci
d'avoir illuminé chaque étape de cette aventure.*

Remerciements

﴿ وَمَا تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ عَلَيْهِ تَوَكَّلْتُ وَإِلَيْهِ أُنِيبُ ﴾

Cette thèse est le fruit d'années de recherche assidue et porte en elle un héritage de gratitude et de reconnaissance envers tous ceux qui ont soutenu ce parcours scientifique. Tout comme une fleur ne pousse que dans un sol fertile, ce travail n'aurait pas pu voir le jour sans un environnement scientifique favorable, des conseils précieux et une généreuse providence divine. J'exprime ma profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué à enrichir ma carrière de chercheur :

Un grand merci aux encadrant académique ;

À Monsieur **ALIA Zeid**, Maitre de conférences class (A) au département des sciences agronomiques de la faculté des sciences de la nature et de la vie de l'université d'El Oued mon directeur de thèse, Merci pour votre précieux soutien et vos commentaires approfondis qui ont contribué à améliorer la recherche.

À Monsieur **GAHTAR Abdelouahab**, Maitre de conférences class (A) au département des biologies de la faculté des sciences de la nature et de la vie de l'université d'El Oued, mon co-directeur, Vous avez été d'une grande aide pour détailler les idées et mettre le cap, alors merci beaucoup.

J'adresse également mes sincères remerciements aux honorables membres du comité de discussion ;

Je remercie **SELMANE Mahdi**, Maître de conférences classe (A) au département de biologie de l'université d'El Oued, d'avoir présidé ce jury.

Je remercie **KHEZZANI Bachir**, Professeur au département de biologie de l'université d'El Oued, d'avoir examiné ce travail.

Je remercie **MOUANE Aicha**, Maître de conférences classe (A) au département de biologie de l'université d'El Oued, d'avoir examiné ce travail.

Je remercie **BOUNAR Rabeh**, Professeur à la faculté des sciences de la nature et de la vie de l'université de M'sila, d'avoir examiné ce travail.

Je remercie **RIZKALLAH CHafika**, Professeur à la faculté des sciences de la nature et de la vie de l'université de Tebissa, d'avoir examiné ce travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma gratitude à tous les membres du laboratoire de biologie ; l'environnement et la santé pour leur soutien scientifique en fournissant les moyens et le matériel nécessaires à la préparation de cette thèse, sans cela je n'aurais pas pu mener à bien ce parcours de recherche, Je remercie particulièrement le responsable du laboratoire de recherche monsieur : **Houssam** Laaouid et la responsable du laboratoire pédagogique : **GOUBI Sana**.

A tout le personnel du Laboratoire de Chimie et de Physique de la Faculté des Sciences Exactes, Université d'El oued, pour leur aide dans la fourniture de certains équipements dont les résultats ont contribué à enrichir cette thèse.

À l'honorable **Dr Haddad Larbi**, aucun mot d'éloge ne peut rendre justice à votre droit. J'apprécie profondément votre temps et vos efforts, sur lesquels vous n'avez pas lésiné, afin de réaliser ce travail de la meilleure façon possible, sans aucune compensation.

Au créatif **Khalifa Wafaa** propriétaire d'une ferme biologique dans la commune de Hassi Khalifa, merci de me fournir la matière première à chaque fois que j'en ai besoin.

Etude physico-chimiques et biologique de bioplastique fabriqué à partir la patate douce (*Ipomoea batatas* Lam. 1793)

Résumé :

La prolifération des déchets plastiques d'origine pétrochimique, caractérisés par leur persistance environnementale et leur contribution à la pollution des écosystèmes, constitue un enjeu planétaire majeur. Dans ce contexte, cette recherche doctorale s'inscrit dans une démarche d'éco-innovation visant à développer un matériau alternatif et durable : un bioplastique biodégradable élaboré à partir d'amidon extrait de tubercules de patate douce (*Ipomoea batatas* Lam. 1793) issus de l'agriculture biologique dans la région d'El Oued, en Algérie. L'objectif principal était de maîtriser l'ensemble de la chaîne de valeur, de l'extraction de la matière première à la caractérisation approfondie du matériau fini, en passant par l'optimisation de sa formulation.

La première phase expérimentale a consisté en l'extraction de l'amidon en évaluant l'influence du pH du milieu. Les résultats ont démontré que le milieu aqueux neutre permettait d'obtenir un rendement d'extraction significativement élevé, avec une moyenne de 7,67 g d'amidon pour 50 g de tubercule, contre 6,57 g en milieu basique et 5,83 g en milieu acide. L'amidon issu du milieu neutre, sélectionné pour la suite de l'étude, a ensuite servi de base à l'élaboration des films par gélatinisation en présence de glycérol comme plastifiant et d'acide chlorhydrique.

Afin d'optimiser les propriétés du bioplastique, une Méthodologie de Surface de Réponse (RSM) selon un plan expérimental de type Box-Behnken a été employée. Cinq facteurs indépendants ont été systématiquement variés : la quantité d'amidon, le volume de plastifiant, le volume d'acide, le temps de chauffage et le temps de séchage. L'analyse statistique (ANOVA) des modèles mathématiques obtenus a révélé une adéquation significative, avec des coefficients de détermination (R^2) élevés, dépassant souvent 0,90, confirmant la robustesse des modèles pour prédire les réponses telles que l'absorption d'eau,

la solubilité et l'humidité. L'optimisation multi-objective par la fonction de désirabilité a permis d'identifier des conditions opératoires optimales spécifiques.

La caractérisation des films optimisés a fait l'objet d'une investigation multidisciplinaire. La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) a confirmé la structure chimique du bioplastique, mettant en évidence les pics caractéristiques des liaisons O-H (à 3272 cm^{-1}), C-H (2929 cm^{-1}) et C-O (1013 cm^{-1}) de la matrice d'amidon plastifiée. La caractérisation optique par spectrophotométrie UV-Vis a révélé une forte absorption des rayons UV en dessous de 300 nm, conférant au matériau un potentiel pour la protection contre les UV, tandis que sa transparence dans le visible a été démontrée. Le diagramme de Tauc a permis d'estimer une bande interdite optique (E_g) d'environ 1,91 eV, classant le bioplastique parmi les semi-conducteurs à gap étroit. L'évaluation de la biodégradation, réalisée par enfouissement dans trois types de sol (standard, stérilisé et enrichi en compost), a fourni des résultats particulièrement probants. Alors qu'aucune dégradation notable n'a été observée en sol stérilisé, confirmant le rôle essentiel des micro-organismes, la biodégradation en sol enrichi a été remarquablement rapide et efficace, atteignant un taux de 89% après seulement 8 jours. Cette cinétique accélérée a été corrélée à une baisse significative du pH du milieu (de 8,4 à 7,8), indicateur d'une activité métabolique microbienne intense générant des acides organiques comme sous-produits de la dépolymérisation de l'amidon.

Mots clés : Bioplastique, Patate douce, Amidon, Analyse FTIR et UV-Vis

دراسة الخصائص الفيزيوكيميائية للبلاستيك الحيوي المصنوع من نشاء البطاطا الحلوة

(*Ipomoea batatas* Lam, 1793)

الملخص

يُشكل انتشار نفايات البلاستيك البتروكيماوية، التي تتسم بثباتها البيئي ومساهمتها في تلوث النظام البيئي، تحديًا عالميًا كبيرًا. في هذا السياق، يُعدّ بحث الدكتوراه هذا جزءًا من نهج الابتكار البيئي الهادف إلى تطوير مادة بديلة ومستدامة: بلاستيك حيوي قابل للتحلل الحيوي مصنوع من النشا المستخرج من درنات البطاطا الحلوة (*Ipomoea batatas* Lam. 1793) المزروعة عضوياً في منطقة الوادي بالجزائر. كان الهدف الرئيسي هو التحكم في سلسلة القيمة بأكملها، بدءاً من استخراج المواد الخام وحتى تحسين التركيبة والتوصيف المتعمق للمادة النهائية.

تألّفت المرحلة التجريبية الأولى من استخراج النشاء مع تقييم تأثير درجة الحموضة (pH) للبيئة. أظهرت النتائج أن الوسط المائي المحايد حقق إنتاجية استخراج عالية بشكل ملحوظ، بمتوسط 7.67 غرام من النشاء لكل 50 غرام من الدرنه، مقارنةً بـ 6.57 غرام في الوسط القاعدي و 5.83 غرام في الوسط الحمضي. استُخدم النشا من الوسط المحايد، المُختار لما تبقى من الدراسة، كأساس لتطوير الأغشية عن طريق الجلتنه بوجود الجلسرين كمادة ملينة وحمض الهيدروكلوريك.

لتحسين خصائص البلاستيك الحيوي، استُخدمت منهجية استجابة السطح (RSM) القائمة على تصميم تجريبي لـ Box-Behnken. تم تغيير خمسة عوامل مستقلة بشكل منهجي: كمية النشاء، وحجم المِلدن، وحجم الحمض، وزمن التسخين، وزمن التجفيف. كشف التحليل الإحصائي (ANOVA) للنماذج الرياضية الناتجة عن توافق كبير، مع معاملات تحديد عالية (R^2)، غالباً ما تتجاوز 0.90، مما يؤكد متانة النماذج في التنبؤ باستجابات مثل امتصاص الماء، والذوبان، والرطوبة. حدد التحسين متعدد الأهداف باستخدام دالة الرغبة ظروف تشغيل مثالية محددة.

كان توصيف الأغشية المُحسّنة موضوع بحث متعدد التخصصات. أكد التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء بتقنية تحويل فورييه (FTIR) التركيب الكيميائي للبلاستيك الحيوي، مسلطاً الضوء على القمم المميزة لروابط O-H عند 3272 cm^{-1} ، و 2929 cm^{-1} (C-H)، و 1013 cm^{-1} (C-O) في مصفوفة النشا المُلدّن. كشف التوصيف البصري باستخدام مطيافية الأشعة فوق البنفسجية-المرئية عن امتصاص قوي للأشعة فوق البنفسجية تحت 300 نانومتر، مما يمنح المادة قدرة على الحماية من الأشعة فوق البنفسجية، مع إثبات شفافيتها في النطاق المرئي. أتاح مخطط تاك تقدير فجوة النطاق الضوئي (Eg) بحوالي 1.91 إلكترون فولت، مما يُصنّف البلاستيك الحيوي ضمن أشباه الموصلات ذات فجوة النطاق الضيق. وقد قدّم تقييم التحلل البيولوجي، الذي أُجري بالدفن في ثلاثة أنواع من التربة

(القياسية، والمعقمة، والمُخصبة بالسماذ)، نتائج مُقنعة للغاية. في حين لم يُلاحظ أي تحلل ملحوظ في التربة المعقمة، مما يؤكد الدور الأساسي للكائنات الدقيقة، كان التحلل الحيوي في التربة المُخصبة سريعًا وفعالًا بشكل ملحوظ، حيث وصل معدله إلى 89% بعد 8 أيام فقط. وارتبطت هذه الحركية المتسارعة بانخفاض كبير في درجة حموضة الوسط (من 8.4 إلى 7.8)، وهو مؤشر على نشاط أيضي ميكروبي مكثف يُنتج أحماضًا عضوية كمنتجات ثانوية لتحلل النشا.

الكلمات المفتاحية: البلاستيك الحيوي، البطاطا الحلوة، النشا، تحليل تحت الاشعة الحمراء والفوق بنفسجية

Physicochemical and biological study of bioplastic made from sweet potato (*Ipomoea batatas* Lam. 1793)

Abstract:

The proliferation of petrochemical plastic waste, characterized by its environmental persistence and its contribution to ecosystem pollution, constitutes a major global challenge. In this context, this doctoral research is part of an eco-innovation approach aimed at developing an alternative and sustainable material: a biodegradable bioplastic made from starch extracted from sweet potato tubers (*Ipomoea batatas* Lam. 1793) grown organically in the El Oued region of Algeria. The main objective was to control the entire value chain, from raw material extraction to formulation optimization and in-depth characterization of the finished material.

The first experimental phase consisted of starch extraction while evaluating the influence of the pH of the environment. The results demonstrated that the neutral aqueous medium achieved a significantly high extraction yield, with an average of 7.67 g of starch per 50 g of tuber, compared to 6.57 g in the basic medium and 5.83 g in the acidic medium. The starch from the neutral medium, selected for the remainder of the study, was then used as the basis for the development of films by gelatinization in the presence of glycerol as a plasticizer and hydrochloric acid.

To optimize the properties of the bioplastic, a Response Surface Methodology (RSM) based on a Box-Behnken experimental design was used. Five independent factors were systematically varied: the amount of starch, the volume of plasticizer, the volume of acid, the heating time, and the drying time. Statistical analysis (ANOVA) of the obtained mathematical models revealed significant fit, with high coefficients of determination (R^2), often exceeding 0.90, confirming the robustness of the models for predicting responses such as water absorption, solubility, and humidity. Multi-objective optimization using the desirability function identified specific optimal operating conditions.

The characterization of the optimized films was the subject of a multidisciplinary investigation. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) confirmed the chemical structure of the bioplastic, highlighting the characteristic peaks of the O-H (at 3272 cm^{-1}), C-H (2929 cm^{-1}), and C-O (1013 cm^{-1}) bonds of the plasticized starch matrix. Optical characterization by UV-Vis spectrophotometry revealed strong absorption of UV rays below 300 nm, giving the material potential for UV protection, while its transparency in the visible range was demonstrated. The Tauc diagram made it possible to estimate an optical band gap (E_g) of approximately 1.91 eV, classifying the bioplastic among narrow band gap semiconductors. The biodegradation assessment, carried out by burial in three types of soil (standard, sterilized and enriched with compost), provided particularly convincing results. While no significant degradation was observed in sterilized soil, confirming the essential role of microorganisms, biodegradation in enriched soil was remarkably rapid and efficient, reaching a rate of 89% after only 8 days. This accelerated kinetics was correlated with a significant drop in the pH of the medium (from 8.4 to 7.8), an indicator of intense microbial metabolic activity generating organic acids as by-products of starch depolymerization.

Keywords: Bioplastic, Sweet potato, Starch, FTIR and UV-Vis analysis

Liste des figures

N	Titre	Page
Figure 1	Schéma des différents types des racines	9
Figure 2	Champ de patate douce	10
Figure 3	Structure chimique de l'amidon : unités glucose (a), amylose (b), amylopectine	17
Figure 4	Classification de plastiques	22
Figure 5	Représentation schématique de la trajectoire environnementale des matériaux polymères et de leurs impacts délétères sur l'intégrité éco systémique	26
Figure 6	Consommation de plastique par habitant (Algérie) Kg/an	30
Figure 7	Importations de plastique par kilotonne en Algérie	31
Figure 8	Les six pays africains importateurs et consommateurs de plastique les plus importants	32
Figure 9	Avantages des bioplastiques	34
Figure 10	Classification de bioplastique	35
Figure 11	La vie de bioplastique	36
Figure 12	Capacités mondiales de production de bioplastiques	37
Figure 13	Comparaison entre les plastiques d'origine fossile et les bioplastiques	43
Figure 14	Situation géographique de la vallée d'oued souf	46
Figure 15	Localisation et schéma de la ferme biologique	47
Figure 16	Différentes étapes d'extraction de l'amidon	49
Figure 17	Amidon extrait dans les trois milieux	50
Figure 18	Ingrédients du bioplastique pur	51

Figure 19	Production de bioplastique	52
Figure 20	Matrices utilisées pour l'enfouissement des bioplastiques	58
Figure 21	Rendement en amidon par milieu	63
Figure 22	Rendement en bioplastique par milieu.	65
Figure 23	Courbe des valeurs attendues et expérimentales de l'humidité %	73
Figure 24	Courbes de perturbation pour l'efficacité d'absorption d'humidité	74
Figure 25	Modification de l'absorption d'humidité des bioplastiques en fonction de la teneur en amidon	74
Figure 26	Modification de l'absorption d'humidité des bioplastiques en fonction du volume de plastifiant	75
Figure 27	Modification de l'absorption d'humidité des bioplastiques en fonction du volume d'acide.	76
Figure 28	Modification de l'absorption d'humidité des bioplastiques en fonction de la variation du temps de chauffage	76
Figure 29	Modification de l'absorption d'humidité des bioplastiques en fonction de variation du temps de séchage	77
Figure 30	Courbes de valeurs optimales pour le test d'humidité	79
Figure 31	Étude des variations d'absorbance en fonction de la surface d'un échantillon plastique	79
Figure 32	Courbe des valeurs attendues et expérimentales du l'absorption de l'eau	84
Figure 33	Optimisation à l'aide de la fonction de désirabilité	85
Figure 34	Courbe des valeurs attendues et expérimentales du la solubilité dans l'eau	89
Figure 35	Optimisation à l'aide de la fonction de désirabilité	89
Figure 36	Courbe des valeurs attendues et expérimentales du la solubilité dans l'alcool	93
Figure 37	Optimisation à l'aide de la fonction de désirabilité	94
Figure 38	Courbes des valeurs attendues et expérimentales du masse totale	98
Figure 39	Optimisation à l'aide de la fonction de désirabilité	98
Figure 40	Courbe des valeurs attendues et expérimentales du rendement	102

Figure 41	Optimisation à l'aide de la fonction de désirabilité	103
Figure 42	Biodégradation d'échantillon d'application dans les trois types de sol	104
Figure 43	Evolution du pH dans les trois types de sol lors de l'enfouissement de bioplastique	105
Figure 44	Spectres FTIR du bioplastique	106
Figure 45	Caractérisation spectrophotométrique UV-Vis bioplastique synthétisé	108

Liste de tableaux

N°	Titre	Page
Tableau 1	Composition moyenne des tubercules de patates douces	13
Tableau 2	Productivité de la patate douce en termes de matière sèche et d'apport énergétique par rapport aux tubercules et céréales de consommation courante	15
Tableau 3	Les caractéristiques physico-chimiques des deux éléments essentiels de l'amidon : l'amylose et l'amylopectine	18
Tableau 4	Les différents produits et matériel utilisées	47
Tableau 5	Les variables indépendants étudiés, unités et leurs niveaux d'étude	53
Tableau 6	Protocole d'expériences selon le plan de Box-Behnkrn	54
Tableau 7	Ph de sol d'enfouissement	59
Tableau 8	Rendement d'extraction de l'amidon de patate douce	62
Tableau 9	Tableau ANOVA du rendement en amidon des trois milieux	63
Tableau 10	Rendement de bioplastique fabriquée	64
Tableau 11	Tableau ANOVA du rendement de bioplastique des trois milieux	65
Tableau 12	Matrice de comparaison des moyennes (test de la Turquie) du rendement en bioplastique des trois milieux.	66
Tableau 13	Résultats du protocole d'expérience	66
Tableau 14	Réponse ANOVA d'humidité	69
Tableau 15	Statistiques d'ajustement du modèle mathématique pour la réponse de l'humidité	70
Tableau 16	Réponse ANOVA d'absorption de l'eau	80
Tableau 17	Statistiques d'ajustement du modèle mathématique pour la réponse d'absorption de l'eau	81
Tableau18	Réponse ANOVA de la solubilité dans l'eau	85
Tableau 19	Statistiques d'ajustement du modèle mathématique pour la réponse de la solubilité dans l'eau	86
Tableau20	Réponse ANOVA de la solubilité dans l'alcool	90
Tableau 21	Statistiques d'ajustement du modèle mathématique pour la réponse	91

	de la solubilité dans l'alcool	
Tableau 22	Réponse ANOVA de la masse totale	94
Tableau 23	Statistiques d'ajustement du modèle mathématique pour la réponse de la masse totale	95
Tableau 24	Réponse ANOVA de rendement	99
Tableau 25	Statistiques d'ajustement du modèle mathématique pour la réponse de rendement	100

Liste des abréviations

ANOVA : Analyse de Variance

RSM : Méthodologie de Surface de Réponse

FTIR : Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier

UV-Vis : Spectroscopie Ultraviolet-Visible

PLA : Acide Polylactique

PHB : Polyhydroxybutyrate

PE : Polyéthylène

PP : Polypropylène

PS : Polystyrène

PVC : Polychlorure de Vinyle

PET : Polyéthylène Téréphtalate

GES : Gaz à Effet de Serre

CIP : Centre International de la Pomme de Terre

SPI: Society of the Plastic Industry

WVP : Perméabilité à la Vapeur d'Eau

DSM : Déchets Solides Municipaux

Tableau des matières

Dédicace		
Remerciement		
Résumé		
Liste des figures		
Liste de tableaux		
Liste des abréviations		
Tableau des matières		
Introduction		
Partie I :	Etude bibliographique	5
CHAPITRE I :	Généralité sur la patate douce	6
1-	Origine et Taxonomie	7
2-	Description botanique et culture	7
3-	Exigences écologiques de la patate douce	10
3-1-	Exigence climatique	10
3-1-1-	La température	10
3-2-	Le sol	10

3-3-	Besoins en eau	11
3-4-	L'Ensoleillement	11
3-5-	Altitudes et latitudes	11
4-	Utilisation de la patate douce	11
5-	Variété et Variabilité	12
6-	Intérêts et importance économique	13
6-1-	Importance mondiale	13
6-2-	Valeur nutritionnelle	13
7-	Amidon de patate douce	16
7-1-	Définition	16
7-2-	Structure chimique de l'amidon	16
7-2-1-	L'amylose	17
7-2-2-	L'amylopectine	17
CHAPITRE II :	Plastiques et Bioplastiques	19
1-	Plastique	20
1-1-	Définition	20
1-2-	Origine	20
1-3-	Forme/morphologie	20
1-4-	Composition chimique	20
1-5-	Classification de plastiques	21

1-6-	Impacts délétères des déchets plastiques sur les écosystèmes	24
1-7-	Impacts des déchets plastiques sur les propriétés pédologiques	26
1-8-	Impacts sur les systèmes hydrologiques et l'intégrité atmosphérique	27
1-9-	Impact des Déchets Plastiques sur la Faune	28
1-10-	Impact des déchets plastiques sur la santé humain	29
1-11-	La pollution plastique en Algérie	29
2-	Bio polymères plastique	33
2-1-	Définition	33
2-2-	Classification	33
2-3-	Production de plastiques Biosourcé et de leur recyclage	36
2-4-	Production mondiale de bioplastique	36
2-5-	Application de bioplastiques	37
2-5-1-	Industrie médicale	37
2-5-2	Industrie des emballages alimentaires	37
2-5-3	Agriculture	38
2-5-4-	Produits de beauté	38
2-5-5-	Automobile	39

2-6-	Facteurs influençant la biodégradation des bioplastiques	39
2-7-	Avantages et inconvénients des bioplastiques	41
2-7-1-	Avantages	41
2-7-2-	Inconvénients	42
Partie II :	ETUDE PRATIQUE	44
Chapitre I :	Matérielles et méthodes	45
1-	Source de l'échantillon d'<i>Ipomoea batatas</i> Lam, 1793	46
2-	Méthodologie expérimentale	47
2-1-	Produits chimiques et matériels utilisé	47
2-2-	Méthodologie d'extraction de l'amidon	48
2-2-1-	Extraction de l'amidon dans des milieux avec différentes acidités	48
2-3-	Elaboration de bioplastique	50
2-3-1-	Matériels et méthodes	50
2-3-1-1-	Apport et critères de choix des matériaux de départ	50
2-3-2-	Méthode de préparation de bioplastique	51
3-	Optimisation par la méthodologie de la surface de réponse RSM	52
3-1-	Analyse statistique	55
3-2-	Paramètres mesuré	56

3-2-1-	Solubilité dans l'eau	56
3-2-2-	Solubilité dans l'alcool	56
3-2-3-	Absorption de l'eau	56
3-2-4-	l'absorption d'humidité	57
3-2-4-1-	Effet de la surface sur l'absorption d'humidité	57
4-	Biodégradabilité	58
4-1-	Enfouissement des bioplastiques	58
4-2-	Détermination le pH du sol	58
5-	Caractérisation physico-chimique des biopolymères élaborés	59
5-1-	FTIR Analyse	59
5-2-	La spectrophotométrie UV visible	60
Chapitre II :	Résultats et discussion	61
1-	Résultats	62
1-1-	Rendements d'extraction d'amidon	62
1-2-	Test ANOVA sur le rendement d'amidon	63
1-3-	Performance de bioplastique	64
1-4-	Test ANOVA sur le rendement de bioplastique	65
1-5-	Test de Turkey	66
1-6-	Optimisation par la méthodologie de la surface de réponse RSM	66

1-6-1-	Réponse de l'absorption d'humidité	69
1-6-2-	Réponse de l'absorption d'eau	80
1-6-3-	Réponse de la solubilité dans l'eau	85
1-6-4-	Réponse de la solubilité dans l'alcool	89
1-6-5-	Réponse de la masse totale	94
1-6-6-	Réponse du rendement	99
1-7-	Analyse biologique de bioplastique	103
1-8-	Caractérisations physico-chimiques	105
1-8-1-	Analyse de FRIT	105
1-8-2-	L'analyse d'UV-visible (Propriétés optiques)	106
2-	Discussion	109
	Conclusion et perspectives	115
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	120

INTRODUCTION

Introduction générale

Aujourd'hui, l'approche durable est considérée comme une priorité absolue à l'échelle mondiale. L'augmentation des déchets plastiques constitue l'un des principaux obstacles au développement durable.(Emadian, Onay, & Demirel, 2017).

Les plastiques, omniprésents dans de multiples applications, sont désormais un élément essentiel de notre société. La moitié de la production mondiale totale de plastiques depuis 1950 a été réalisée au cours des treize dernières années(Geyer, Jambeck, & Law, 2017).

la production de plastique à l'échelle mondiale dépassera le seuil des 600 millions de tonnes dans les 20 ans à venir(Glaser, 2017), L'expansion des plastiques synthétiques dérivés de la pétrochimie s'est donc transformée en une question majeure affectant la santé, l'environnement et l'économie(Karan, Funk, Grabert, Oey, & Hankamer, 2019).

Le premier désavantage associé à l'environnement est la réduction de la capacité des sites d'enfouissement due à l'accroissement du volume des déchets plastiques dans les décharges(Philp, Ritchie, & Guy, 2013), L'accroissement des résidus plastiques conduit à une crise des sites d'enfouissement en raison de l'augmentation des dépenses et d'une réglementation sévère. De plus, les océans sont également contaminés par les détritiques plastiques. La détérioration de l'écosystème marin représente le second inconvénient. Le troisième point négatif concerne l'insuffisance des solutions de gestion des déchets. Le taux de recyclage du plastique est très bas. De plus, la combustion du plastique produit des émissions nocives comme le dioxyde de carbone et le méthane. Ces gaz à effet de serre (GES) influencent défavorablement le changement climatique global(Netz, Davidson, Bosch, Dave, & Meyer, 2007).

Le quatrième inconvénient réside dans le fait que le plastique n'est pas dégradé ou qu'il est durable. Nous savons que les plastiques ne sont pas biodégradables et qu'ils peuvent subsister dans l'environnement pendant des centaines d'années(El-Kadi, 2010).

Introduction

La prise de conscience des conséquences environnementales et sanitaires significatives associées aux plastiques issus du pétrole, ainsi que la demande persistante en faveur de leur emploi dans divers domaines, a entraîné un intérêt majeur pour l'étude des plastiques écologiques au cours des dernières décennies. La politique de développement durable de l'Union européenne ainsi que les Objectifs de Développement Durable 2030 des Nations Unies (Schillaci, Jones, Vieira, Munafò, & Montanarella, 2023), Par rapport aux plastiques d'origine pétrolière, les bioplastiques nécessitent 65 % d'énergie en moins pour leur production et génèrent entre 30 % et 80 % moins d'émissions de gaz à effet de serre (Jayakumar, Radoor, Siengchin, Shin, & Kim, 2023; Mousavi-Avval, Sahoo, Nepal, Runge, & Bergman, 2023).

La décomposition du bioplastique est réalisée par des micro-organismes naturels, comme les bactéries, les champignons et les algues. Ce procédé génère du CO₂, du méthane, de l'eau et de la biomasse sans produire de sous-produits nocifs (Gadhawe, Das, Mahanwar, & Gadekar, 2018; García-Depraect et al., 2021). Les plastiques biodégradables peuvent être issus de différentes sources, y compris des polymères de synthèse comme l'acide polylactique (PLA), les polyesters et le polyhydroxybutyrate (PHB), ou encore de polymères naturels tels que le chitosane, l'amidon et la gélatine (Bhattacharya, 1998). L'amidon, grâce à sa biodégradabilité complète, est un choix judicieux pour la fabrication de matériaux durables parmi les polymères naturels (Araújo, Cunha, & Mota, 2004), de son faible coût et de sa nature renouvelable (J.-F. Zhang & Sun, 2004).

Le polymère biodégradable le plus prometteur provenant de ressources renouvelables pour la fabrication de plastiques biodégradables est l'amidon, qui provient d'une multitude de cultures. On a étudié l'amidon pour son application dans les détergents solubles dans l'eau, les conditionnements d'insecticides, les doublures et sachets à usage unique pour les toilettes, ainsi que dans les systèmes et dispositifs de délivrance pharmaceutique (Chang, Jian, Zheng, Yu, & Ma, 2010).

La texture, la solubilité, la viscosité, la stabilité, la gélification, la rétention d'eau, la rétrogradation et la synérèse sont toutes influencées par le rapport amylose/amylopectine.

Introduction

Par conséquent, un amidon à forte teneur en amylose produit une structure gélifiée plus rigide. Ces critères déterminent ensuite l'application et les caractéristiques du produit obtenu (Karakelle, Kian-Pour, Toker, & Palabiyik, 2020; Marta, Cahyana, Bintang, Soeherman, & Djali, 2022).

Ce travail de recherche vise à développer et à caractériser un film de bioplastique à base d'amidon extrait de patates douces issues de l'agriculture biologique. La stratégie expérimentale a comporté plusieurs axes. Tout d'abord, l'amidon a été extrait en évaluant l'impact de trois milieux différents (acide, basique et neutre) sur le rendement et la qualité, le milieu neutre ayant été sélectionné pour la suite de l'étude. Ensuite, la formulation du bioplastique a été optimisée à l'aide de la Méthodologie de Surface de Réponse (RSM) afin d'identifier les conditions expérimentales optimales pour obtenir des propriétés physico-chimiques et barrières souhaitables.

Les films optimisés ont ensuite été soumis à une caractérisation approfondie incluant l'analyse de l'absorption de l'humidité en fonction de la surface spécifique, et une étude de biodégradation dans trois types de sols (standard, stérilisé et enrichi en compost) en monitorant l'évolution du pH du milieu. Enfin, une caractérisation physico-chimique a été réalisée par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) et l'UV-Visible pour étudier les propriétés optiques des films produits.

Partie: Etude bibliographique

Chapitre I: Généralité sur la patate douce

1- Origine et Taxonomie

La patate douce (*Ipomoea batatas* Lam. 1793) est une plante dicotylédone appartenant à la classe des angiospermes et à la famille des Convolvulacées (Lebot, 2010). Cette espèce présente une hexaploïdie, avec un nombre de chromosomes de $2n=6x=90$ (D. Zhang, Rossel, Kriegner, & Hijmans, 2004).

C'est une plante herbacée vivace qui est cultivée chaque année (Vernier & Varin, 1994). Ses caractéristiques et ses valeurs nutritionnelles diffèrent de celles des autres plantes. Grâce à ses caractéristiques agronomiques uniques, sa richesse en calories, en énergie, en fibres alimentaires, en vitamines et en minéraux, ainsi que son rendement élevé en matière sèche par unité de surface de terre correctement cultivée, il peut être considéré comme une source naturelle de calories dans l'alimentation humaine (Hesam, TAHERI, & Balali, 2015; Padmaja, Sheriff, & Sajeev, 2012; M. Ruiz, Lozano, & Ruiz, 1981). La patate douce est l'une des cultures tubéreuses les plus cultivées au monde.

2- Description botanique et culture

la reproduction de la patate douce se fait par bouturage ou par voie sexuée (L. Chen, Lo, Chen, & Lee, 1992),

Le cycle de croissance des variétés à chair orange est généralement court (3 à 5 mois) tandis que d'autres ont un cycle de croissance plus long (6 à 11 mois) (Ehisianya, Lale, Umeozor, Amadi, & Zakka, 2011; Richardson, 2011). La patate douce est la seule espèce du genre *Ipomoea* à avoir des racines tubéreuses comestibles (Afuape, Nwankwo, Omodamiro, Echendu, & Toure, 2014).

Les racines sont de plusieurs types (Bouhassan, 1984):

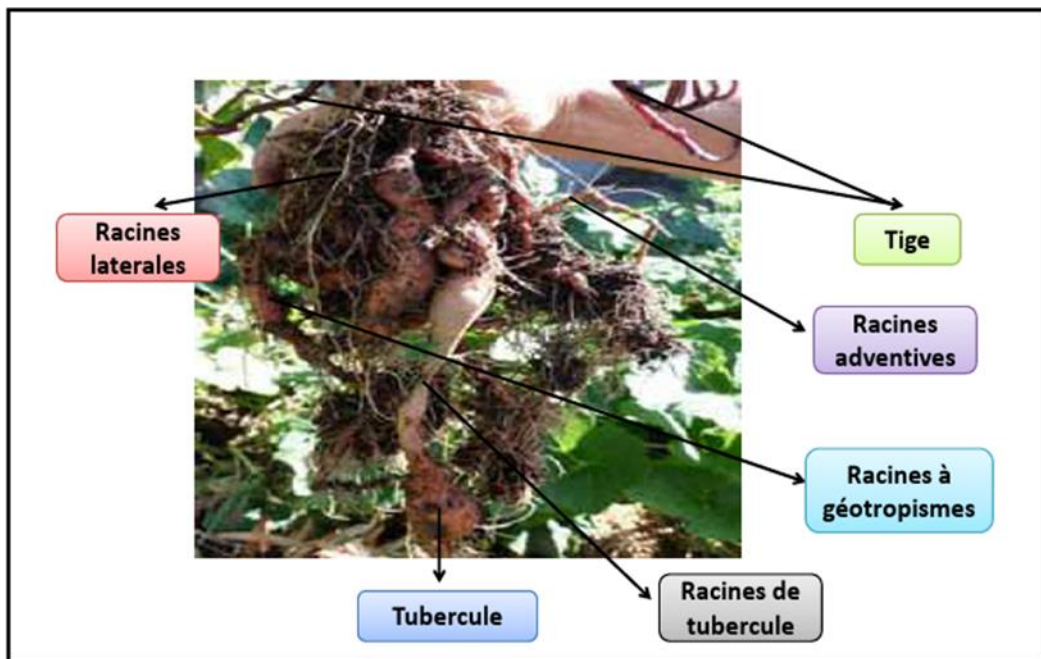
- ✓ Racines adventives : elles se développent directement sur la tige. On trouve des racines à géotropisme positif ou des racines portant des tubercules (racines fines, racines épaisses, racines filandreuses), dont certaines peuvent accumuler des réserves pour former des racines tubéreuses. Il existe également des racines agéotropiques qui restent fines.

CHAPITRE I : Généralité sur la patate douce

- ✓ Racines latérales qui apparaissent sur des racines existantes. Racines tubéreuses qui naissent sur des tubercules.

Les racines adventives qui apparaissent sur les boutures de tige sont de deux types :

- ✓ Racines nodales : Ce sont des racines préformées, présentes en nombre variable à chaque nœud, de part et d'autre de l'insertion du pétiole.
- ✓ Racines internodales : Ce sont de fines racines néoformées qui se développent le plus souvent à la base de la bouture.



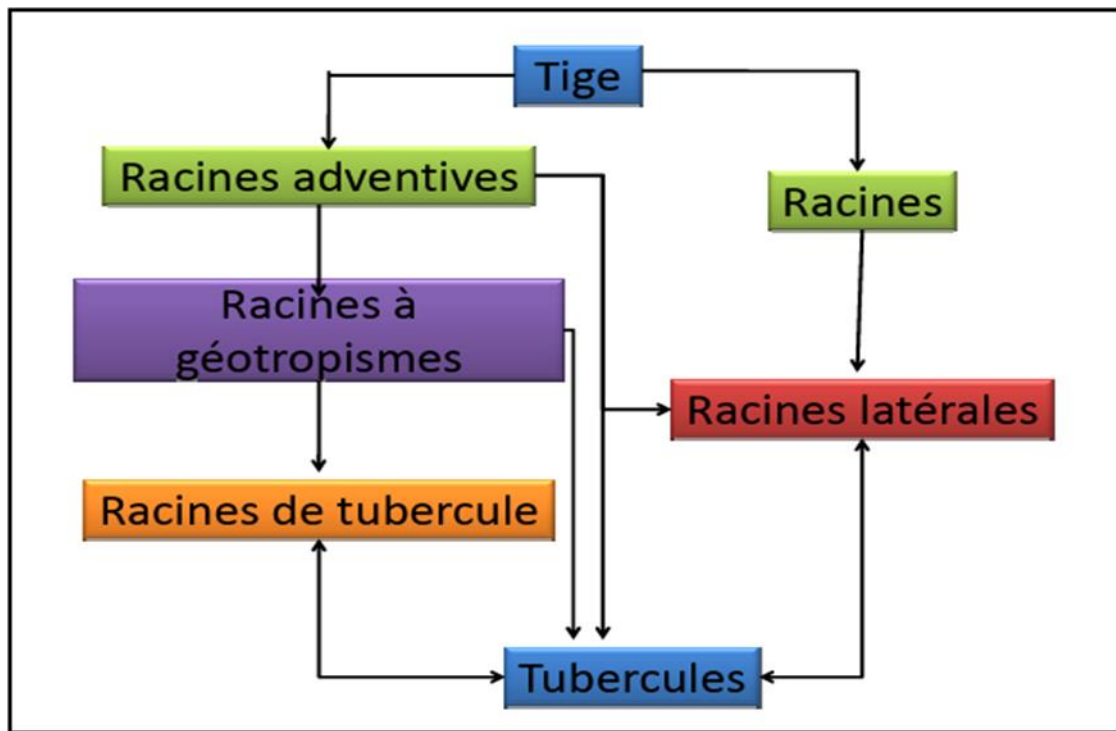


Figure1:Schéma des différents types des racines(Ndangui, 2015)

Les feuilles sont simples et alternes, elles se présentent sous plusieurs formes : rondes, triangulaires, divisées..., En conditions normales, la floraison des patates douces varie selon les variétés : certaines fleurissent peu, tandis que d'autres produisent de nombreuses fleurs. La formation des tubercules peut être groupée autour de la tige, de manière dispersée ou très dispersée. On observe plusieurs types de tubercules : ronds, ronds-elliptiques, ovales, subovales, oblongs, longs-oblongs, longs-elliptiques, courbés.

Les fleurs, hermaphrodites et actinomorphes, sont en forme de cloche, leur couleur varie selon la plante : elle peut être violette, rouge ou blanche. Chez la patate douce, la floraison est rare et les fleurs sont souvent stériles. Cependant, lors de la fécondation on obtient un fruit au péricarpe sec et déhiscent, appelé capsule. Cette capsule est formée d'au moins deux carpelles soudés.



Figure2: Champ de patate douce(Ndangui, 2015)

3- Exigences écologiques de la patate douce

3-1-Exigence climatique

La patate douce se trouve dans toutes les régions intertropicales et subtropicales, jusqu'à une latitude de 30 degrés nord-sud, ainsi que dans les régions tempérées, comme les régions du sud de l'Espagne, des États-Unis et du Japon(Vernier & Varin, 1994).

3-1-1-La température

La température idéale pour la culture des patates douces est d'environ 24 °C, avec une bonne exposition au soleil et des nuits douces. Dans les régions tempérées, les tiges disparaissent à des températures inférieures à 10 °C et leur développement s'interrompt en dessous de 15 °C(Vernier & Varin, 1994).

3-2-Le sol

La patate douce peut être cultivée dans différents types de sols, mais elle donne de meilleurs résultats dans des sols légers, riches en humus et sans excès d'azote ni d'eau. Elle supporte les sols acides dont le pH est proche de 4,0. Une concentration excessive d'azote dans le sol pourrait favoriser la croissance des parties aériennes au détriment des tubercules. Il est préférable que le sol ait une profondeur supérieure à 25 cm. Il est donc recommandé de

cultiver sur des sols légers, meubles et profonds, car la récolte est compliquée sur des sols qui se développent abondamment pendant la saison sèche(Adabe, Maïga, & Diendere, 2019).

3-3-Besoins en eau

Les patates douces nécessitent au moins 600 mm de végétation répartis tout au long du cycle végétatif, qui varie de 120 à 210 jours selon la variété. Lors de la plantation, il est essentiel que le sol soit humide pour favoriser une bonne reprise des boutures. Le rendement est affecté par un manque d'eau pendant la tubérisation (50 à 60 jours après la plantation). Des périodes de sécheresse sont ensuite tolérées. De même, une humidité excessive entraîne le développement précoce de maladies foliaires et racinaires. En fin de cycle, un excès d'humidité provoque l'éclatement des tubercules : en cas d'irrigation, il est donc nécessaire d'interrompre l'arrosage environ un mois avant la récolte(Adabe et al., 2019).

3-4-L'Ensoleillement

La patate douce a besoin de jours courts et une photopériode inférieure à 11 heures peut favoriser la floraison. En revanche, si la durée d'ensoleillement dépasse 13,5 heures, la floraison est interrompue(Sihachakr & Ducreux, 1987).

3-5-Altitudes et latitudes

La culture de la patate douce s'étend du 40°N au 40°S. Elle est visible depuis le niveau de la mer à 2 100 m d'altitude. Elle constitue une alternative avantageuse au manioc au-dessus de 1 500 m(Dibi, Essis, & Nzue, 2015).

4- Utilisation de la patate douce

Les racines tubéreuses de la patate douce ne sont pas les seules à pouvoir être utilisées en alimentation humaine. Outre les vitamines A et C, les feuilles, très appréciées en Afrique, sont riches en protéines, glucides, calcium, phosphore et fer.(XIAODING, 1995). Il est possible de transformer les racines de patate douce en différents produits tels que des

confiseries, des produits industriels, des bonbons, de la farine, de l'amidon, des nouilles, des aliments pour enfants et des chips. (Massaroto, Maluf, Gomes, Franco, & Gasparino, 2014).

Les patates douces produisent plus d'énergie comestible par hectare que le blé, le riz ou le manioc. Elles contiennent une grande quantité de glucides (de 13 à 29 %) et de sucres réducteurs (de 5 à 8 %), ce qui leur apporte entre 110 et 125 calories pour 100 grammes. Elles contiennent également des minéraux, de la vitamine C et des vitamines du complexe B, certaines variétés étant riches en vitamine A (FURLANETO, FIRETTI, & MONTES, 2012)

Les feuilles de patate douce sont considérées comme un aliment végétal qui peut augmenter les niveaux de prolactine et la production de lait chez les mères qui allaitent après la période post-partum en raison de leur effet galactogène (Kusuma et al., 2017), Le galactagogue est un composé présent dans les feuilles de patate douce qui peut favoriser la production de lait (Sun, Mu, Xi, Zhang, & Chen, 2014).

Les tiges de patate douce constituent une excellente option pour l'alimentation animale grâce à leur teneur élevée en sucres et vitamines, leur teneur élevée en protéines brutes, leur digestibilité totale et leur digestibilité élevée. Elles peuvent être fournies fraîches, séchées ou en ensilage. (Monteiro, 2007).

5- Variété et Variabilité

D'après (da Silva et al., 2013), La culture de la patate douce repose principalement sur la multiplication végétative. Elle présente une grande variété de caractères et une base génétique étendue, ce qui permet aux programmes de sélection de développer de nouvelles variétés plus productives et plus résistantes aux ravageurs et aux maladies.

Cette espèce présente une grande variabilité, probablement due à une ploïdie élevée ($2n = 6x = 90$), et les graines botaniques d'une même plante sont génétiquement différentes les unes des autres, ce qui peut entraîner la création d'une nouvelle variété (Jones, 1965).

Un des plus importants réservoirs de gènes de patate douce est le Centre international de la pomme de terre (CIP), qui compte plus de 5 500 variétés cultivées en Amérique, en Afrique,

en Asie et en Océanie (CIP, 2023). Au cours de cette recherche, la composition polyphénolique des feuilles de patate douce a été identifiée et analysée(MILIEN & FONDWA).

6- Intérêts et importance économique

6-1-Importance mondiale

Selon (Mano, Ogasawara, Sato, Higo, & Minobe, 2007), Sweet potato is the seventh most cultivated food in the world, after wheat, rice, corn, potato, barley and cassava. In tropical countries, it ranks second in terms of roots and tubers after cassava (FAOSTAT 2006), and it ranks third in sub-Saharan Africa after cassava and yam(Karyeija, Gibson, & Valkonen, 1998).

La production est la plus élevée en Asie, avec plus de 75 %, suivie de l'Afrique avec 20 %, de l'Amérique avec 4 % et de l'Europe avec moins de 1 %. En Asie, on compte 4,02 millions d'hectares de surfaces cultivées, contre 3,74 millions en Afrique. Les rendements moyens varient de 5,4 t/ha en Afrique à 19,5 t/ha en Asie. En 2011, la production de patate douce était réalisée sur environ 8 millions d'hectares de terres arables dans le monde, dont plus de 95 % provenaient des pays en développement (FAO STAT 2018).

6-2-Valeur nutritionnelle

La composition chimique de la patate douce varie selon la variété, le type de sol et la période de culture. C'est un légume très nutritif et une excellente source de vitamines. Sa haute valeur nutritionnelle le rend principalement utilisé en alimentation humaine(F. S. Ruiz, 1984).

Le tableau 01 présente la composition chimique et nutritionnelle des tubercules de patate douce.

Tableau 01 : Composition moyenne des tubercules de patate douce

Composés	Unité	Nepa (2006)	Unifesp (2008)	Soares <i>et al.</i> (2002)	Ruiz (1984)	Antonio (2006)
Energie	kcal/100g	114,0	105,0	110-125	68-70	70
Humidité	g/100 g	70,0	73,0	59,1 - 77,7	-	-
Protéines	g/100g	1,0	2,0	2,0 - 2,9	4,13	-
Lipides totaux	g/100g	0	0	0,3 - 0,8	0,87	-
dont						
Cholestérol	g/100g	0	-	-	-	-
Glucides	g/100g	28,0	24,0	13,4-29,2	90,13	33,5
Fibres	g/100g	2,6	3,0	1,3-3,8	2,19	2,9
Cendres	g/100g	0,9	1,0	0,6-1,7	2,68	1,0
Minéraux						
K	mg/100g	340,0	204,0	273,0	-	420,0
P	mg/100g	36,0	28,0	49,0	-	-
Ca	mg/100g	21,0	22,0	30,0	-	-
Mg	mg/100g	17,0	10,0	24,0	-	-
Na	mg/100g	9,0	13,0	13,0	-	-
Fe	mg/100g	0,4	1,0	0,8	-	-
Mn	mg/100g	0,2	-	-	-	-
Zn	mg/100g	0,2	-	-	-	-
Cu	mg/100g	0,11	-	-	-	-
Se	mg/100g	-	1,0	-	-	-
S	mg/100g	-	-	26,0	-	-
Vitamines						
Thiamine	mg/100g	0,06	-	0,10	-	-
Riboflavine	mg/100g	<0,02	-	0,06	-	-
Acide ascorbique	mg/100g	-	23,0	25,0-40,0	40,0	-
β-carotène	mg/100g	-	-	1,0-12,0	0,512	0,682

«-» : les valeurs n'ont pas été déterminées par les auteurs

Selon les travaux de(Campinas, 2004), Les patates douces sont énergétiques et riches en vitamines, minéraux (principalement le potassium), fibres et protéines. De plus, elles contiennent plus de 80 glucides (sur la base sèche), principalement sous forme d'amidon.

La teneur en sucre et en amidon varie considérablement selon la variété. Les glucides varient de 13,4 à 29,2 %, dont 4,8 et 7,8 % de sucres réducteurs, et leur valeur nutritionnelle varie entre 110 et 125 calories pour 100 g. Elles sont également une bonne source de vitamines A et B (ces dernières existent sous différentes formes chimiques : thiamine, riboflavine, niacine). Elles ont une teneur élevée en eau (59,1 à 77,7 %) et une faible teneur en protéines (2,0 à 2,9 %) et en matières grasses (0,3 à 0,8 %).

La patate douce contient divers minéraux : calcium (30 mg/100 g), phosphore (49 mg/100 g), potassium (273 mg/100 g), magnésium (24 mg/100 g), soufre (26 mg/100 g)

et sodium (13 mg/100 g). Selon l'Unifesp (2008), ses feuilles sont riches en nutriments et peuvent être consommées comme les autres légumes verts.

La teneur en solides solubles des tubercules frais est généralement faible, mais elle tend à augmenter pendant le stockage en raison du séchage. Les patates douces fraîches contiennent 16 à 40 % de matière sèche et sont principalement composées de glucides (75 à 90 % des glucides totaux) sous forme d'amidon, de sucre, de cellulose, de pectine et d'hémicellulose.(Bouwkamp, 2018)

D'un point de vue économique, les patates douces présentent des avantages souvent négligés. En d'autres termes, leur productivité en termes de matière sèche et d'apport énergétique est très élevée et dépasse celle des autres grandes cultures largement répandues dans la zone de production(Ndangui, 2015)(Tableau 02).

Tableau 02: Productivité de la patate douce en termes de matière sèche et d'apport énergétique par rapport aux tubercules et céréales de consommation courante(Bell, Mück, & Schuler, 2000)

Culture	Matière sèche (kg/ha/jour)	Apport énergétique (10 ³ kcal/ha/jour)
Patate douce	22	70
Pomme de terre	18	54
Igname	14	47
Manioc	13	27
Riz	18	49
Blé	14	40

Considérant cette zone comme une ressource à exploiter économiquement, la productivité des patates douces devrait jouer un rôle important dans les politiques de sécurité

alimentaire, en particulier dans les régions où les patates douces naturelles jouent un rôle important et représentent un atout. Le sol est l'un des facteurs limitants de la production agricole (Bell et al., 2000).

7- Amidon de patate douce

7-1-Définition

L'amidon est un polysaccharide produit pour stocker l'énergie et synthétisé dans les amyloplastes des plantes supérieures. Il constitue le deuxième produit de biomasse le plus important sur Terre après la cellulose (J. Jane, Maningat, & Wongsagonsup, 2010). Il est produit dans l'amyloplaste de diverses plantes sous forme de granules discrets de morphologies variées, allant de rondes, ovales, ovales ou allongées à tabulaires, lenticulaires ou polyédriques, et dont la taille varie selon les sous-espèces. Leur diamètre varie de quelques microns à plus de 100 μm . (J. L. Jane, Kasemsuwan, Leas, Zobel, & Robyt, 1994). L'amidon est composé de deux polysaccharides majeurs : l'amylose et l'amylopectine. Tous deux sont constitués de chaînes de résidus de D-glucose liés en α -(1,4)-glucosidiques, formant des ramifications au sein du polymère. Bien que l'amylose soit traditionnellement considérée comme linéaire, les molécules d'amylose ramifiées contiennent peu de ramifications (Hizukuri, Takeda, Yasuda, & Suzuki, 1981).

7-2-Structure chimique de l'amidon

La biosynthèse de l'amidon se produit sous forme de granules dont la taille, la forme et la structure cristalline varient en fonction de son origine botanique (Alcázar-Alay & Meireles, 2015). La conformation de l'amidon la plus stable est C1, avec les groupes hydroxyles C2, C3, C4 et C6 en position équatoriale (figure 03). Le D-glucose est principalement lié par des liaisons α : (1 $\rightarrow$ 4) (95-96 %), et dans une moindre mesure par des liaisons α : (1 $\rightarrow$ 6) (4-5 %). Chaque molécule possède une fonction réductrice pseudoaldéhyde à son extrémité C1.

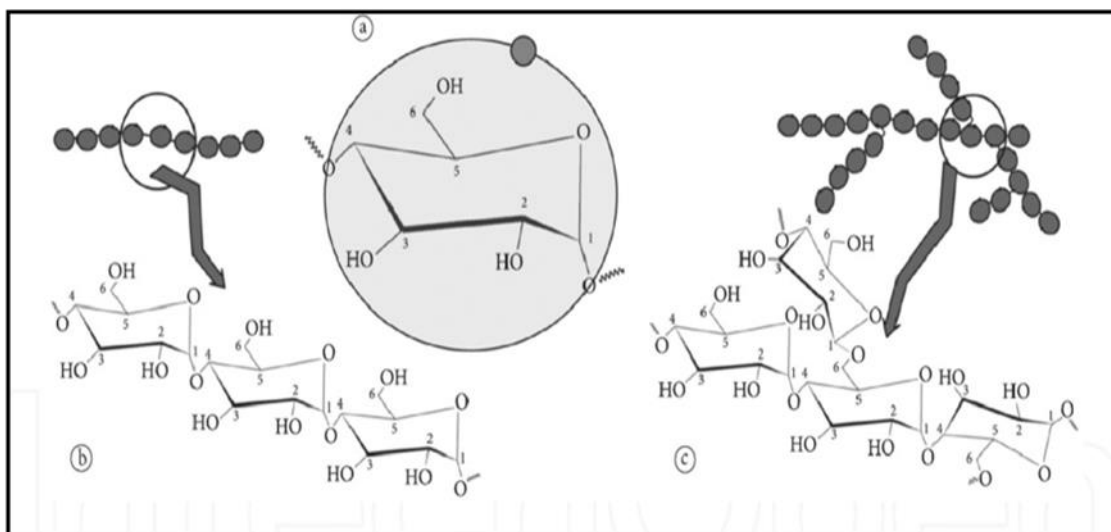


Figure 03: Structure chimique de l'amidon: unités glucose(a), amylose(b), amylopectine(c)
(Buleon, Colonna, Planchot, & Ball, 1998)

7-2-1-L'amylose

Selon les études de (Gao, Vasanthan, & Hoover, 2009; Tester & Morrison, 1990; Vandeputte, Derycke, Geeroms, & Delcour, 2003; Visser, Suurs, Steeneken, & Jacobsen, 1997), Les granules d'amidon sans amylose (appelés amidon cireux) présentent un gonflement plus prononcé que leurs homologues contenant de l'amylose. Les amidons contiennent des quantités d'amylose variables, selon la variation génétique et l'origine botanique. La localisation de l'amylose et sa contribution à l'architecture granulaire des granules d'amidon ordinaires et riches en amylose restent encore inconnues.(Vamadevan, Hoover, Bertoft, & Seetharaman, 2014).

Cependant, la présence et le stockage d'amylose dans les granules d'amidon peuvent entraîner une liaison entre l'amylose et l'amylopectine, entraînant ainsi la formation d'une hélice partielle. De cette façon, l'amylose ralentit la croissance des granules(Sasaki & Matsuki, 1998; Vasanthan, 1996), probablement en les affaiblissant.

7-2-2-L'amylopectine

Le composant principal du grain d'amidon est l'amylopectine. Le poids sec du grain d'amidon est de 70 à 80 %. Il contient entre 10 000 et 500 000 résidus de glucose pour une masse d'environ 108 Dalton (Da). L'amylopectine présente une ramification 1,6-ène beaucoup plus élevée que l'amylose. Le taux de connexion varie de 4 à 6 %. La distance

entre les deux points de connexion est d'environ 20 à 25 résidus de glucose.(Zabawinski, 1999).

Tableau 03 : Les caractéristiques physico-chimiques des deux éléments essentiels de l'amidon : l'amylose et l'amylopectine.

	Amylose	Amylopectine
% en poids sec du granule	15à30%	70 à 85%
% des points de branchement	<1%	4 à 6%
Masse moléculaire (Da)	104à105	107 à 108
Dégré de polymerization	100à10000	10000à100000
Longueur des chaînes	3à1000	3 à 50
Couleur en presence d'iode	Verte	Rouge
À max.	>600nm	530 à 550nm
Capacité à lier l'iode(poids/poids)	20%	<1%
Solubilité	Variable	Soluble
Stabilité en solution aqueuse	Rétrograde	Stable

Ce tableau présente les valeurs d'un amidon accumulé par les organes de réserve des végétaux supérieurs.(Zabawinski, 1999)

Chapitre II: Plastiques et Bioplastiques

1- Plastique :

1-1- Définition

Les plastiques sont des polymères caractérisés par leur légèreté, leur durabilité, leur résistance et leur prix abordable, contenant des particules organiques, synthétiques ou semi-synthétiques (Van Eygen, Feketitsch, Laner, Rechberger, & Fellner, 2017). Ils sont constitués des chaînes polymères (M. Zhou et al., 2021), d'atomes de carbone et sont fabriqués à partir de la polymérisation des monomères dérivés des sources fossiles comme le pétrole, le charbon ou la biomasse (Kim, Yoon, & Kim, 2021).

1-2- Origine

Les micro plastiques primaires sont fabriqués délibérément en dessous de 5 mm pour diverses applications commerciales, industrielles et autres, tandis que les micro plastiques secondaires résultent de la décomposition ou de la dégradation de plastiques primaires de toutes tailles.

Les micro plastiques secondaires sont issus d'une multitude de matériaux, ce qui entraîne des variations de forme, de taille et de composition polymère selon leur origine, leurs mécanismes de dégradation, de fragmentation et d'érosion, ainsi que la durée d'exposition (M. Zhou et al., 2021).

1-3- Forme / Morphologie

La structure des plastiques donne un aperçu de leur comportement, de l'origine des micro plastiques et de leurs éventuels impacts environnementaux. (Strafella, López Correa, Pyko, Teichert, & Gomiero, 2022).

(Dey, Uddin, & Jamal, 2021) ont proposé une classification morphologique des micro plastiques, divisée en six catégories : sphères, granulés, fibres, mousses, films, feuilles et fragments. Voici les formes les plus fréquemment rencontrées (Kelly et al., 2021).

1-4- Composition chimique

Les micro plastiques se divisent en deux grandes catégories chimiques. La première comprend les polymères à chaîne carbonée pure, tels que le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), le polystyrène (PS) et le polychlorure de vinyle (PVC). Ces matériaux, largement utilisés pour les produits à usage unique, sont sensibles à la photodégradation et à la chaleur. La seconde catégorie comprend les plastiques tels que le polyéthylène

téréphtalate (PET) et le polyuréthane (PU), dont la chaîne polymère contient des hétéroatomes. Cette structure moléculaire les rend plus résistants aux processus normaux de dégradation (Strafella et al., 2022).

Bien que le paysage commercial des polymères soit extrêmement diversifié – comprenant des milliers de formulations distinctes intégrant des plastifiants, des retardateurs de flamme et d'autres additifs –, cette étude se concentre sur les six variétés dominantes sur les plans environnemental et industriel. Ces polymères comprennent le polyéthylène basse densité (PEBD), le polyéthylène haute densité (PEHD), le polyéthylène téréphtalate (PET), le polypropylène (PP), le polystyrène (PS) et le polychlorure de vinyle (PVC). Les autres formulations sont regroupées dans une catégorie distincte afin de simplifier la classification proposée, sans négliger leur impact potentiel (Ramkumar, Balasubramani, Santosh, & Nagarajan, 2022).

1-5- Classification de plastiques

Les plastiques sont classés selon plusieurs critères, notamment : leur origine, leur structure moléculaire, leurs forces intermoléculaires, leur mécanisme de réaction de polymérisation, leur comportement thermique et leurs techniques de stabilisation. On les divise en trois grandes catégories selon leur origine : naturels, semi-synthétiques et synthétiques. L'utilisation de polymères naturels remonte à l'Antiquité. Les polymères extraits de sources naturelles, comme la lignine, la chitine et l'amidon, et de matériaux comme la corne, l'ambre et les carapaces de tortue, sont appelés plastiques naturels. Les polymères synthétiques, quant à eux, sont dérivés de composés pétrochimiques, comme le silicone, le polyéthylène, le polystyrène et le nylon (Khan, Ahmed, & Najmi, 2019; Napper & Thompson, 2020). Les plastiques semi-synthétiques sont définis comme des matériaux polymères d'origine naturelle qui ont subi des modifications chimiques, tels que les plastiques dérivés de la cellulose (Khan et al., 2019).

La classification structurale permet de différencier les polymères en trois architectures distinctes : ramifiés, linéaires et réticulés. Parallèlement, la classification moléculaire est

organisée en quatre grandes catégories : fibres, élastomères, thermodurcissables et thermoplastiques (Pilapitiya & Ratnayake, 2024). (figure04)

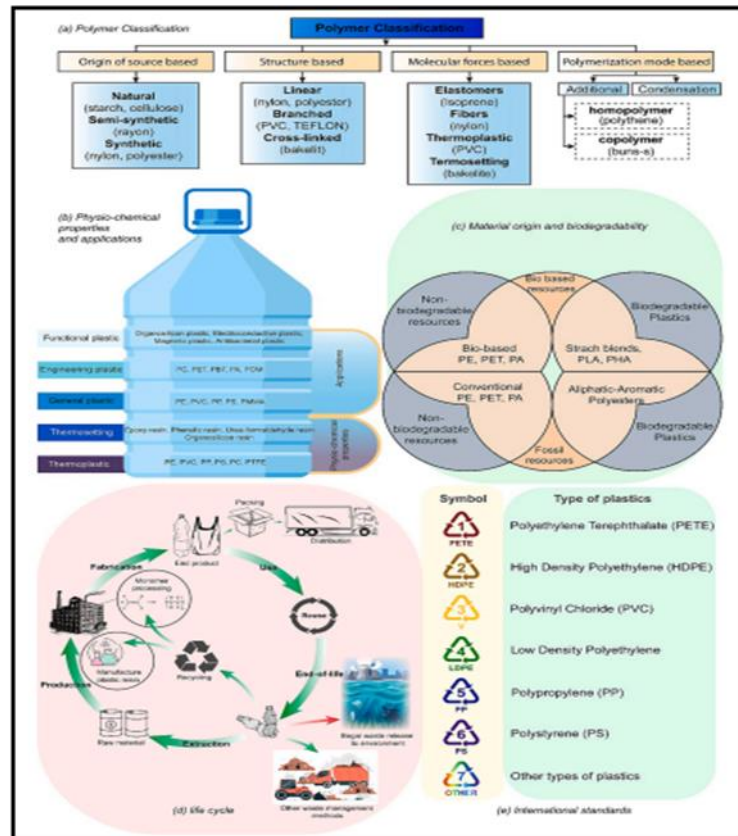


Figure 04: Classification des plastiques (Pilapitiya & Ratnayake, 2024)

Il existe des approches alternatives applicables à la classification spécifique des matières plastiques. À titre d'illustration, le système de classification basé sur les caractéristiques physico-chimiques et les domaines d'application concerne principalement les thermoplastiques et les polymères thermodurcissables. La figure 04 illustre la classification spécifique des matières plastiques, intégrant une analyse multidimensionnelle basée sur : leurs propriétés physico-chimiques et leurs domaines d'application, leur origine et leur biodégradabilité, leur cycle de vie, ainsi que leur conformité aux normes internationales. D'un point de vue physico-chimique et selon leur comportement sous traitement thermique, les polymères sont divisés en deux catégories fondamentales : les thermoplastiques et les thermodurcissables. Les thermoplastiques ont la particularité de fondre sous l'effet thermique, permettant ainsi le moulage en diverses formes, puis de se solidifier par

refroidissement. Cette propriété réversible confère à ces matériaux une capacité de déformation répétée, caractéristique de leur plasticité intrinsèque. Statistiquement, cette famille de polymères représente environ 80 % de la consommation mondiale de plastique(Al-Salem, Lettieri, & Baeyens, 2009). Les polymères thermodurcissables subissent une décomposition irréversible sous l'application d'un apport continu de chaleur (R. Chen, Li, Xu, & Zhang, 2019).

La classification des polymères selon leur domaine d'application permet de les classer en trois groupes distincts : les plastiques à usage général, les plastiques techniques et les plastiques fonctionnels.

Les plastiques à usage général se caractérisent par des propriétés standardisées, adaptées à une variété d'applications.

Les plastiques techniques, quant à eux, possèdent des propriétés mécaniques et thermiques optimisées, notamment en termes de rigidité, de ténacité et de résistance thermique, ce qui explique leur utilisation privilégiée comme substituts aux matériaux métalliques dans les applications structurelles.

Enfin, les plastiques fonctionnels se distinguent par des caractéristiques spécifiques, telles que la conductivité électrique, la résistance aux radiations, la résistance à la corrosion et des propriétés magnétiques contrôlées(Pan, Su, Liu, & Guo, 2020).

En fonction de l'origine du matériau et des propriétés de biodégradabilité, Les plastiques peuvent être classés en quatre catégories distinctes (figure 04). La différence fondamentale entre les plastiques biodégradables et non biodégradables réside dans leur capacité à se dégrader par des processus naturels. Par exemple, les plastiques biodégradables se décomposent spontanément dans l'environnement, tandis que les plastiques non biodégradables conservent leur intégrité structurelle sur de longues périodes.(Chandran, Tamilkolundu, & Murugesan, 2020).

Selon leur cycle de vie, Les plastiques peuvent être classés de manière dichotomique en : plastiques à usage unique, identifiés comme la principale source de contamination environnementale persistante, et plastiques réutilisables caractérisés par leur potentiel de réutilisation multiple.(McGain, McAlister, McGavin, & Story, 2010).

Outre les classifications conventionnelles susmentionnées, la Société de l'Industrie du Plastique (SPI) a établi un système de codage numérique normalisé pour les polymères plastiques (Figure 04). Ce référentiel attribue une séquence numérique codifiée (allant de 1 à 7) aux résines polymères selon l'ordre hiérarchique suivant : 1 – polyéthylène téréphtalate (PETE), 2 – polyéthylène haute densité (PEHD), 3 – polychlorure de vinyle (PVC), 4 – polyéthylène basse densité (PEBD), 5 – polypropylène (PP), 6 – polystyrène (PS) et 7 – désignant une catégorie composite regroupant les plastiques non spécifiés. (Figure 01). Ce système normatif vise à optimiser l'identification et le recyclage des matériaux par les acteurs de la chaîne de recyclage. Parallèlement, une typologie alternative distingue les plastiques selon leur origine : biosourcée ou fossile. Les bioplastiques, quant à eux, sont divisés en trois sous-catégories distinctes en fonction de leur potentiel de décomposition : biodégradables (issus de ressources biosourcées), biodégradables (synthétisés à partir de matériaux pétrochimiques) et non biodégradables (issus de sources biosourcées)(Pilapitiya & Ratnayake, 2024).

1-6- Impacts délétères des déchets plastiques sur les écosystèmes

Les matières plastiques, bien que couramment utilisées dans diverses sphères sociétales, ont un cycle de vie post-utilisation qui peut altérer significativement les équilibres des écosystèmes en l'absence de réglementation adéquate. Ces perturbations peuvent avoir des répercussions néfastes sur l'environnement, notamment sur la santé humaine. En préalable à toute analyse des stratégies de gestion des déchets plastiques, il est essentiel d'examiner les externalités négatives résultant d'une mauvaise gestion de ces matières après consommation. Parmi ces effets, la persistance environnementale due à la non-biodégradabilité, conjuguée à de mauvaises pratiques de gestion, constitue un facteur de risque majeur pour la sécurité écologique, notamment par la compromission des infrastructures hydrauliques urbaines et des zones de production.(Gu, 2021).

Les caractéristiques physico-chimiques intrinsèques des polymères plastiques sont un déterminant clé de leur fonctionnalité. Les résidus post-consommation de ces matériaux sont systématiquement éliminés, ce qui accroît leur résistance à la dégradation, renforçant ainsi leur utilité opérationnelle et leur durabilité. Cette synergie entre inertie chimique et gestion

post-utilisation favorise leur persistance à long terme dans des matrices environnementales hétérogènes (Vanapalli et al., 2021).

Les déchets solides municipaux, qui représentent environ 10 à 12 % des déchets plastiques, sont majoritairement destinés à l'incinération. Après pyrolyse, des émissions de gaz résiduels sont rejetées dans l'atmosphère, contribuant à l'augmentation de la pollution atmosphérique et à l'amplification des gaz à effet de serre. Parmi les substances chimiques prioritaires identifiées dans ces rejets figurent les furanes, le mercure, les dioxines et les polychlorobiphényles (PCB). Atténuer ces impacts nécessite la mise en place de protocoles de traitement et de gestion adaptatifs, conditions essentielles à la préservation des équilibres environnementaux. Ce problème s'étend également aux écosystèmes aquatiques et aquacoles, où, en raison de la nature hydrophobe prédominante de ces polluants, les matrices plastiques aquatiques servent de puits à ces substances, réduisant leur biodisponibilité pour la faune marine, notamment lorsqu'elles sont séquestrées dans les sédiments benthiques (Abdul-Latif, Menouer, Baleh, & Deiab, 2021). Les conséquences d'une gestion inadéquate des déchets plastiques, tant en termes d'élimination que de traitement, se répartissent en trois sphères d'impact distinctes : les interactions néfastes avec la faune sauvage, les risques sanitaires pour les populations humaines et la dégradation des équilibres écosystémiques. Cette tripartition est systématisée par la figure 05, qui modélise le comportement des polymères plastiques dans l'environnement tout en mettant en évidence leurs répercussions néfastes sur les liens biotiques et abiotiques des écosystèmes (Ali et al., 2021).

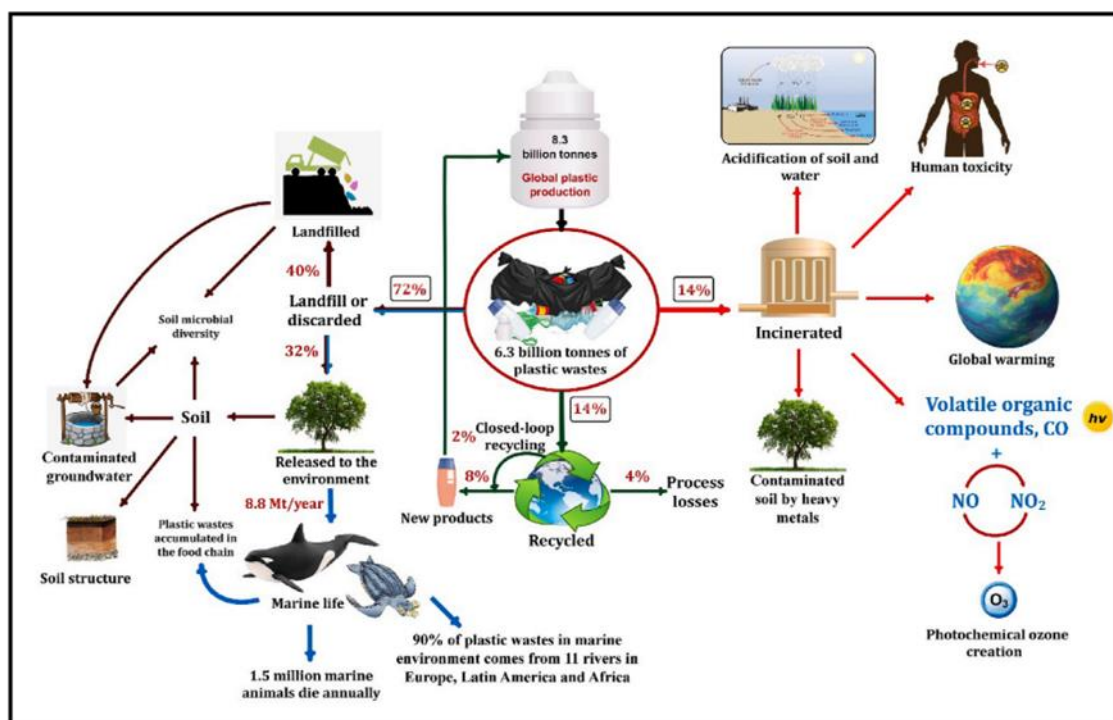


Figure 05: Représentation schématique de la trajectoire environnementale des matériaux polymères et de leurs impacts délétères sur l'intégrité des écosystèmes (Ali et al., 2021).

01-7-Impacts des déchets plastiques sur les propriétés pédologiques

La pollution est définie comme l'introduction dans l'environnement de substances résiduelles ou nocives résultant de procédés post-utilisation. Ces entités, nocives pour les milieux naturels ou anthropiques, sont désignées sous le terme générique de polluants. Ces derniers se subdivisent en deux catégories distinctes : les polluants d'origine naturelle (cendres volcaniques, exsudats végétaux et animaux) et les polluants anthropiques, générés par les activités humaines (rejets des industries agroalimentaires, pharmaceutiques, cosmétiques, textiles et autres bioproductions). Les agents contaminants libérés altèrent significativement la qualité des hydrosystèmes, induisent une mortalité accrue de la faune aquatique, dégradent la qualité de l'air et perturbent les propriétés des sols, affectant ainsi les systèmes agroalimentaires. (Bilal, Mehmood, & Iqbal, 2020).

La pollution des sols est définie comme un phénomène environnemental caractérisé par la détérioration et l'altération progressives des propriétés des sols, causées par des processus directs ou indirects liés à l'intervention humaine. Cette dégradation résulte principalement

de divers facteurs anthropiques, notamment les activités socio-économiques actuelles, les pratiques industrielles, l'expansion urbaine incontrôlée, ainsi que l'utilisation intensive d'intrants agricoles, tels que les engrais organiques. Elle est également accentuée par l'infiltration de substances synthétiques (polluants chimiques, résidus industriels) dans les matrices pédologiques, provoquant des modifications substantielles de leur composition chimique. Ces perturbations, notamment au niveau des équilibres acido-basiques (pH) et des paramètres géochimiques, entraînent une perturbation des écosystèmes terrestres, affectant à la fois la fertilité agronomique et la biodiversité tellurique (Asgher, Khalil, Ayaz, Ahmad, & Khan, 2020; Qamar, Ashiq, Jahangeer, Riasat, & Bilal, 2020).

La toxicité des sols est causée par les déchets plastiques, via leurs processus de dégradation chimique. Ces derniers constituent également des vecteurs de microparticules de plastique, dont l'introduction dans les écosystèmes résulte de mécanismes primaires (émissions directes) et secondaires (fragmentation des macro plastiques). La présence omniprésente de ce micro plastique dans les sols, l'atmosphère et, principalement, les milieux aquatiques, constitue un problème crucial, en raison du manque de connaissances scientifiques sur leur dynamique environnementale. Ce problème est exacerbé par les récentes découvertes attestant de leur détection dans diverses matrices : sels marins, produits de la pêche en conserve, eau potable (réseaux de distribution et en bouteille), ainsi que dans le sucre et les produits apicoles. Ces observations alimentent les inquiétudes croissantes quant aux risques potentiels pour la santé humaine et aux perturbations écologiques. (Pannetier et al., 2019).

1-8- Impacts sur les systèmes hydrologiques et l'intégrité atmosphérique

La dégradation des écosystèmes aquatiques suscite une attention croissante au sein de la communauté scientifique. L'industrialisation intensive contemporaine exige une vigilance accrue, notamment en raison des méthodes actuelles d'emballage plastique. Ces pratiques génèrent des flux de polluants aux conséquences sans précédent, entraînant des altérations critiques des paramètres physico-chimiques et écologiques des hydro systèmes (Chu, Liu, & Salvo, 2021).

Les écosystèmes planétaires sont principalement constitués de masses d'eau (70 %), réparties entre les systèmes lentique (lacs), lotique (rivières) et pélagique (océans). La contamination des milieux aquatiques se produit lorsque des agents contaminants exogènes, principalement des composés chimiques de synthèse et des microbes pathogènes, s'accumulent dans ces réservoirs aquatiques. Cette intrusion entraîne une altération de leurs propriétés physico-chimiques et une prolifération incontrôlée de substances écotoxiques, compromettant leur biocompatibilité pour les organismes vivants et l'équilibre des écosystèmes (Bilal et al., 2020).

La décomposition des plastiques, en raison de leur structure chimique complexe, émet divers gaz capables d'altérer l'atmosphère sous diverses formes. Parmi ces émissions, le dioxyde de carbone (CO₂) et d'autres gaz contribuent à des phénomènes tels que le changement climatique, la hausse des températures mondiales, les précipitations acides et la contamination des milieux hospitaliers. Ces perturbations pourraient également accroître les risques de propagation d'agents pathogènes aéroportés, tels que le virus SARS-CoV-2 responsable de la pandémie de COVID-19, qui a touché l'ensemble de la planète ces derniers temps, ainsi que d'autres maladies respiratoires comme la tuberculose et la pneumonie (F. Ahmed et al., 2019).

1-9- Impact des Déchets plastiques sur la Faune

Les données scientifiques mettent en évidence une menace croissante pour la survie des cétacés, liée à la prolifération des déchets plastiques déversés dans les océans, mettant en péril la durabilité de ces espèces emblématiques. (Karleskint, Turner, & Small, 2009),

La pollution marine due aux déchets plastiques représente une menace majeure pour les tortues marines et les espèces dont le régime alimentaire repose principalement sur les méduses. Ces dernières confondent fréquemment les sacs plastiques flottants avec leurs proies naturelles en raison de similitudes morphologiques ou comportementales. Un phénomène similaire est observé chez les oiseaux marins, qui, comme les tortues, confondent les micro plastiques avec des seiches, et chez certains poissons piscivores, incapables de distinguer les débris plastiques de leurs proies habituelles. Ce mécanisme de

confusion trophique illustre les impacts systémiques des plastiques sur la biodiversité marine.(Gregory, 2009).

L'ingestion de déchets plastiques par les oiseaux peut provoquer une occlusion intestinale et des lésions du système digestif, altérant ainsi sa fonction digestive. Cette détérioration entraîne une diminution de l'absorption des nutriments, provoquant famine, malnutrition progressive et, à terme, décès(Hammer, Kraak, & Parsons, 2012).

Les récifs coralliens sont sujets à une dégradation structurelle due à l'abaissement des défauts dans les zones environnantes, ce qui permet une technologie d'abrasion quantitative (Gregory, 2009).

Les filets de pêche abandonnés, communément appelés « filets fantômes », entraînent fréquemment l'engloutissement passif d'organismes marins, provoquant des épisodes de malnutrition sévère et de mortalité résultant d'une incapacité prolongée à se libérer(Alabi, Ologbonjaye, Awosolu, & Alalade, 2019).

1-10- Impact des déchets plastiques sur la santé humain

Bien que les polymères plastiques soient généralement perçus comme chimiquement inertes et présentant un risque négligeable pour la santé publique, les additifs chimiques et les monomères résiduels associés à ces matériaux peuvent constituer des vecteurs de risques sanitaires avérés ou potentiels(Araujo, Sayer, Giudici, & Poco, 2002).

Les micro plastiques sont des polluants préoccupants, capables de s'accumuler biologiquement au sein des réseaux trophiques suite à leur ingestion par une diversité d'espèces aquatiques, d'eau douce et marines, constituant ainsi une menace importante pour la santé publique(Galloway, 2015).

1-11- La pollution plastique en Algérie

L'augmentation de la pollution plastique à l'échelle mondiale est principalement due à trois facteurs, qui concernent particulièrement les pays en développement : l'expansion démographique, le développement urbain et la croissance des activités industrielles(Waters

et al., 2016), Si ces facteurs temporaires deviennent plus prononcés, la prolifération du plastique pourrait s'accélérer, entraînant des conséquences environnementales plus dramatiques(Mounir, 2023).

Selon les données publiées, il existe une forte corrélation entre le PIB d'un pays et sa consommation de plastique(Hossain, Chen, Chen, Wang, & Cai, 2021), Ce phénomène touche également les pays africains. En Algérie, par exemple, la consommation annuelle de plastique par habitant est passée de 12,6 kg en 2009 à 20,9 kg en 2015, soit un quasi-doublement en moins de dix ans, illustrant une croissance particulièrement marquée (figure06).

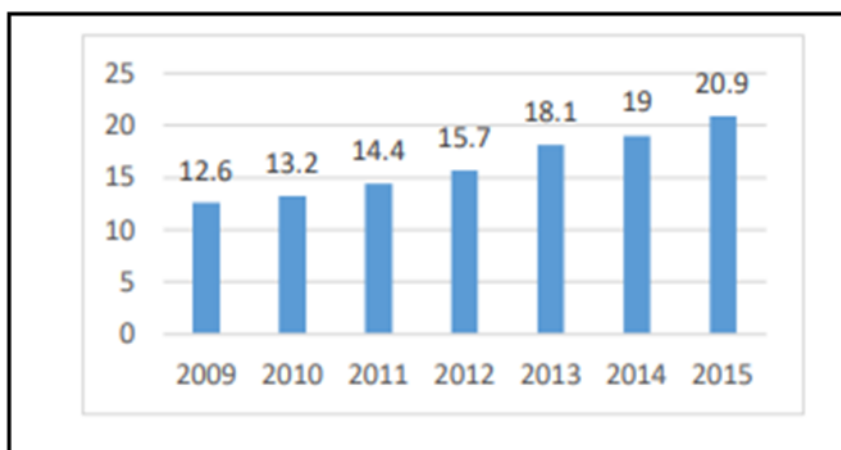


Figure 06 : Consommation de plastique par habitant (Algérie) Kg/an (Adapté de EURO MAP(2016))

Par ailleurs, des études montrent que les pays africains importent principalement des plastiques à l'état brut plutôt que transformés. Cette tendance se reflète dans des taux élevés de transformation et de production locale utilisant ces polymères importés. En Algérie, selon les données du Centre national de l'informatique et des statistiques des douanes (CNIS), les importations de plastiques ont atteint 2,174 milliards USD en 2020, dont 87,58 % (1,904 milliard USD) correspondaient à des matières premières pour l'industrie, contre seulement 269 millions USD en produits finis. Ce déséquilibre met en évidence une forte dépendance aux intrants industriels étrangers, avec une capacité limitée à importer des articles manufacturés(des Déchets, 2020).

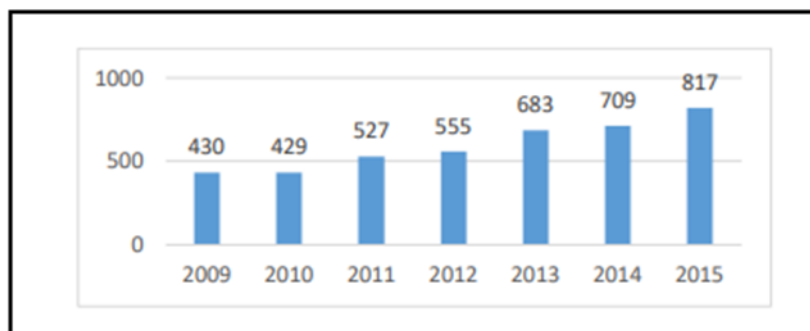


Figure 07 : Importations des plastiques par kilotonne en Algérie (Adapté d'EURO MAP (2016))

La figure 07 montre l'évolution des importations algériennes de plastique entre 2009 et 2016, marquée par une augmentation continue : de 430 000 tonnes (430 kt) en 2009, le volume annuel a atteint 817 000 tonnes (817 kt) en 2016. Sur cette période, le total cumulé s'est élevé à 4,15 millions de tonnes (4 150 kt), ce qui correspond à 11,3 % des importations africaines de plastiques primaires. Entre 1990 et 2017, les 33 pays africains examinés par (Babayemi, Nnorom, Osibanjo, & Weber, 2019). L'Afrique a importé 118 millions de tonnes de plastique. Les données mettent en évidence une forte concentration : 75 % de ces importations sont imputables à six pays (Égypte, Nigéria, Afrique du Sud, Algérie, Maroc, Tunisie), contribuant à 51 % de la consommation totale de plastique du continent.

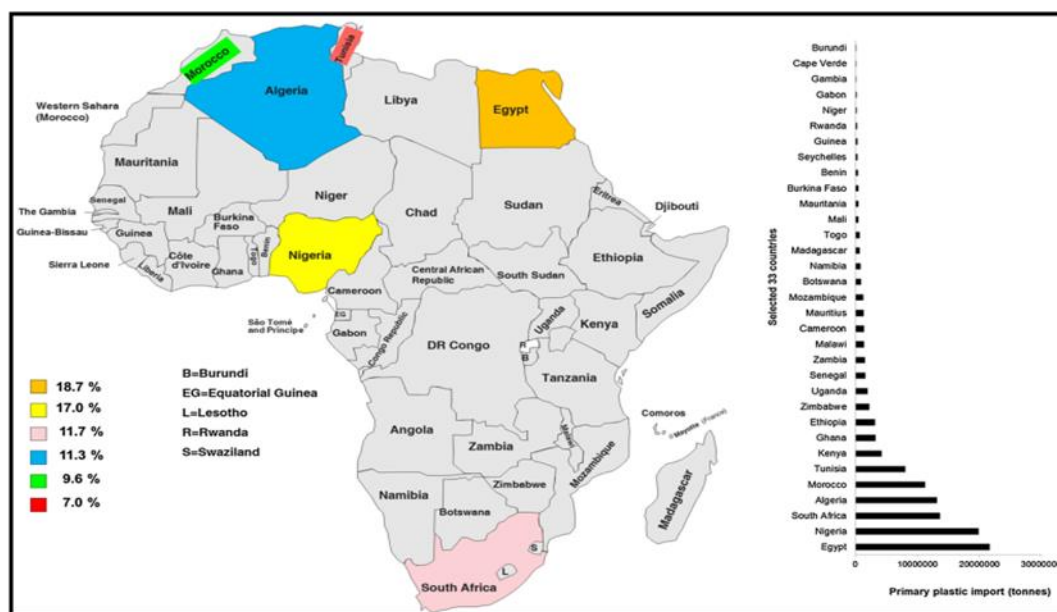


Figure 08: Les six pays africains importateurs et consommateurs de plastique les plus importants (1990/2017)(Babayemi et al., 2019).

L'urbanisation accélérée et incontrôlée des pays en développement est un facteur clé de la pollution plastique. Cette croissance urbaine s'accompagne d'une mauvaise gestion des déchets, qu'ils soient solides, liquides ou toxiques, aggravant la crise environnementale. Par exemple, en 2015, l'Afrique a produit 19 millions de tonnes de déchets plastiques, dont près de 90 % (17 millions de tonnes) n'ont pas été traités correctement et ont souvent fini par être rejetés dans l'environnement(Babayemi et al., 2019), À titre de comparaison, les plus petits formats de plastique sont plus chers que les 60 et 99 millions d'euros précédents en 2015. D'autres projections sont valables : le prix est fixé à 2060 €, et il existe des différences radicales entre les deux projets. Des écosystèmes informatiques sans précédent.(Lebreton & Andrady, 2019).

Dans de nombreux pays en développement, les systèmes de gestion des déchets restent déficients, tandis que les impacts de cette négligence sur la santé et l'environnement ne reçoivent pas suffisamment d'attention(Browning, Beymer-Farris, & Seay, 2021), L'Algérie est confrontée à un problème croissant de prolifération de déchets, alimenté par une démographie dynamique, l'évolution des modes de vie et une urbanisation accélérée. Le pays génère 34 millions de tonnes de déchets par an, dont 13,1 millions de tonnes de déchets

solides municipaux (DSM). Ces derniers se caractérisent par une diversité de composants, notamment des matières organiques, des plastiques et du carton. Les plastiques, en particulier, constituent 15 % des DSM, dont environ 0,52 million de tonnes sont gérées chaque année. Parmi ces résidus, une part importante, estimée entre 70 000 et 190 000 tonnes, est transformée en débris marins, aggravant les défis environnementaux du pays(des Déchets, 2020).

Outre la pollution issue des décharges, la légèreté des sacs, emballages, pailles et polystyrène favorise leur dispersion par le vent, qui les emporte souvent dans les cours d'eau. Avec d'autres déchets plastiques, comme les bouteilles en PET, ils constituent une part importante des déchets marins. L'Algérie, avec un littoral de plus de 1 600 km, abrite un écosystème vulnérable régulièrement exposé à de multiples sources de pollution, notamment celles générées par le plastique. Ces matières synthétiques représentent 81 % des déchets recensés dans les milieux marins du pays(des Déchets, 2020).

2- Biopolymères plastiques

2-1-Définition

Les bioplastiques sont des matériaux chimiquement distincts, produits en tout ou partie à partir de ressources renouvelables d'origine biologique. Ces matières premières peuvent provenir de cultures agricoles, de micro-organismes (bactéries, levures) ou même de macromolécules comme les polysaccharides, dont les chaînes glucidiques atteignent parfois plusieurs nanomètres(Kuddus, 2021).

Les biopolymères se caractérisent par leur polyvalence, leur résistance et leur biodégradabilité complète. Ils trouvent des applications dans de nombreux domaines, notamment l'agriculture, la médecine, le textile, sans oublier l'emballage et les contenants(Beevi et al., 2020).

2-2-Classification

On qualifie de bioplastiques des matériaux polymères qui peuvent être d'origine biosourcée, biodégradable, ou combiner ces deux propriétés(Shruti & Kutralam-Muniasamy, 2019), Ces

propriétés montrent que la présence de biomasse n'est pas un critère obligatoire pour définir un bioplastique(Shamsuddin et al., 2017).

Certains polymères d'origine fossile, en raison de leur biodégradabilité, sont classés comme bioplastiques. À l'inverse, certains plastiques biosourcés ne sont pas biodégradables. Le bioplastique idéal, alliant durabilité et dégradabilité, est celui qui combine ces deux propriétés : une origine biosourcée et une biodégradation(Chauhan, Kaur, & Chauhan, 2024), la figure 09 démontre la pertinence des bioplastiques.

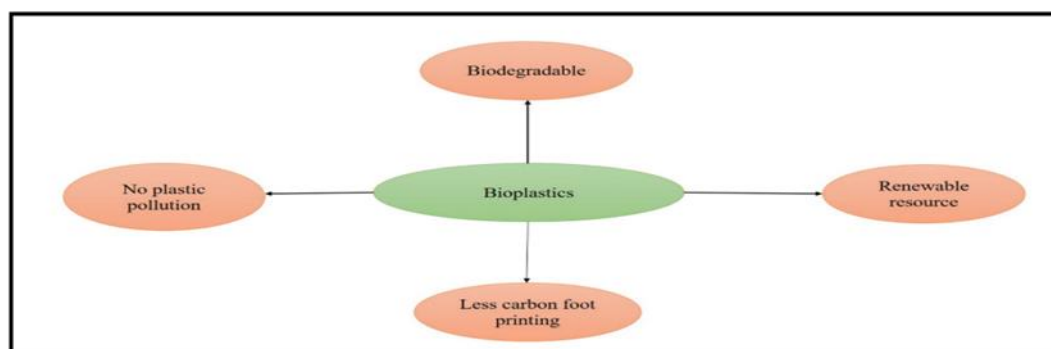


Figure 09:Avantages des bioplastiques(Chauhan et al., 2024)

Un bioplastique est un matériau plastique composé entièrement ou en grande partie de polymères dérivés de matières biologiques, comme l'amidon ou la cellulose contenus dans le bois, la paille ou le coton. Selon l'European Bioplastics, un plastique est classé comme bioplastique s'il est biosourcé, biodégradable, ou s'il présente ces deux propriétés(Van den Oever, Molenveld, van der Zee, & Bos, 2017).

Biodégradable : Mécanisme naturel par lequel l'action de micro-organismes provoque la fragmentation d'un polymère en éléments plus petits, avec production de méthane, d'eau et de CO₂. La vitesse de biodégradation du polymère dépend de son épaisseur et de sa composition chimique(Shamsuddin et al., 2017).

Dégradable : Décomposition d'un polymère en fractions moléculaires réduites sous l'effet combiné de trois agents abiotiques : rayonnement UV, oxygène et activité biologique. Ce phénomène concerne principalement les polyéthylènes modifiés, principaux représentants des plastiques dégradables(Van den Oever et al., 2017).

Biosourcé: Les plastiques à la fois biodégradables et biosourcés, fabriqués en partie à partir de biomasse ou de ressources naturelles, sont appelés matériaux « biosourcés ». Bien que recyclables, leur capacité à se dégrader naturellement reste incertaine. Leurs caractéristiques mécaniques présentent une similitude notable avec celles des plastiques d'origine fossile, tels que le Bio-PVC et le Bio-PE issus de la canne à sucre(Kershaw, 2015).

Compostable : Matière plastique capable de se décomposer biologiquement dans un environnement compostable, se transformant en substances minérales, CO₂, eau et biomasse, sans émettre de résidus toxiques. Ces matières peuvent également être fragmentées par action enzymatique. Par exemple, le PLA (acide polylactique) possède cette double capacité de biodégradation complète.(Van den Oever et al., 2017).

Pour une compréhension claire, les bioplastiques se répartissent en trois catégories principales(Shamsuddin et al., 2017)(figure10):

1. Les bioplastiques biodégradables issus des ressources fossiles
2. Les bioplastiques biodégradables d'origine biologique
3. Les bioplastiques non-biodégradables mais d'origine biologique

La classification des bioplastiques est systématiquement établie en trois catégories distinctes, déterminées par deux critères fondamentaux : l'origine des matières premières et leur comportement environnemental(Chauhan et al., 2024).

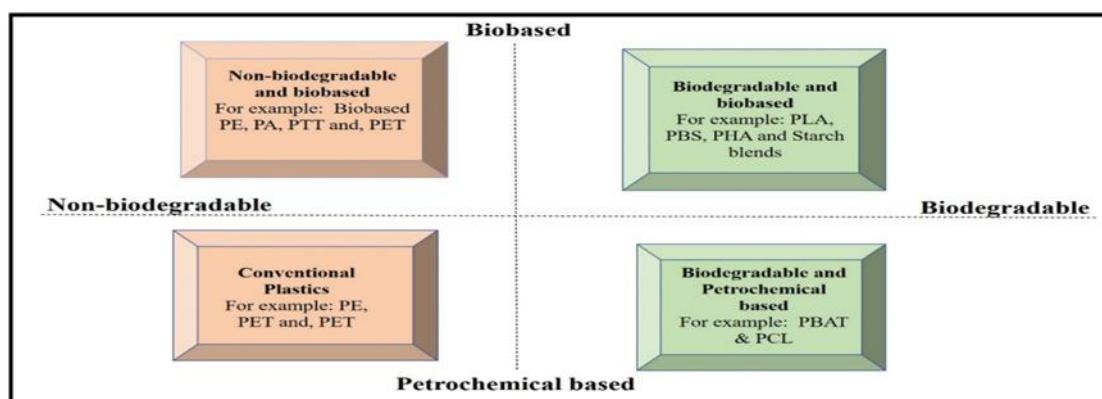


Figure 10: Classification de bioplastique(Shamsuddin et al., 2017)

2-3- Production de plastiques biosourcés et leur recyclage :

Les composants neutres en carbone des polymères sont issus de la biomasse ou du CO₂ direct. Ces polymères sont conçus pour offrir des propriétés adaptées à divers usages, ainsi qu'une méthode de recyclage spécifique en fin de vie. Le plastique peut être recyclé mécaniquement pour retrouver son état d'origine, ou dépolymérisé dans des conditions contrôlées pour récupérer les monomères, puis réutilisé pour reformer le polymère ou être transformé en un nouveau produit (recyclage chimique). Un polymère biodégradable peut subir une décomposition microbienne en milieu aérobie (compost) ou anaérobie, le résidu étant ensuite utilisé pour nourrir les plantes.(Hatti-Kaul, Nilsson, Zhang, Rehnberg, & Lundmark, 2020).

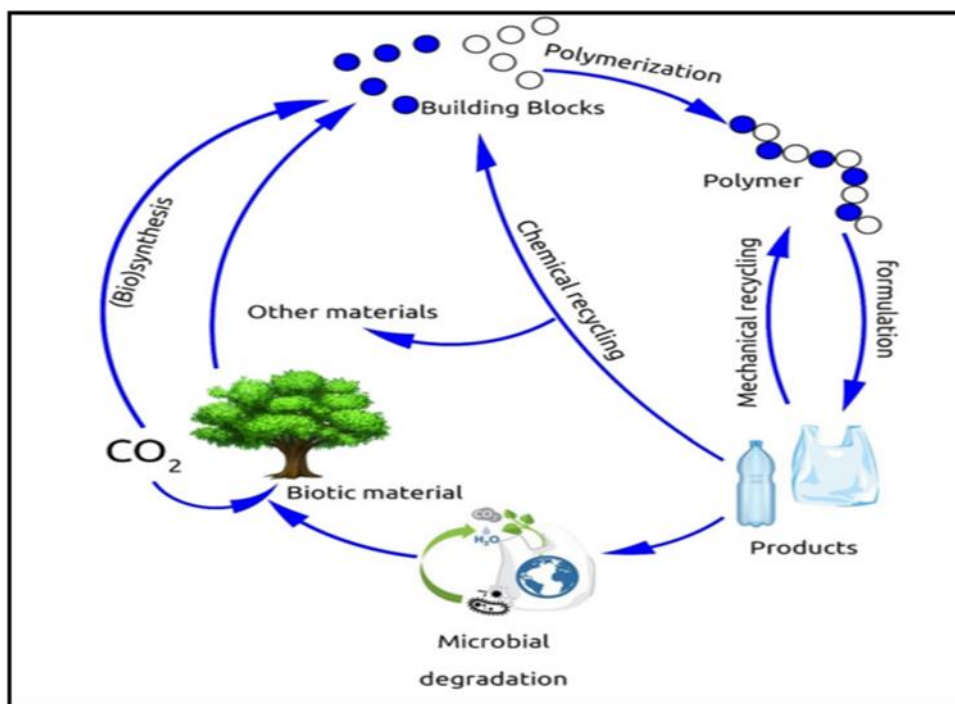


Figure 11: La vie de bioplastique(Ghasemi, Neekzad, Ajdari, Kowsari, & Ramakrishna, 2021)

2-4- Production mondiale de bioplastique

Bien que les bioplastiques fassent l'objet de recherches depuis plus d'un siècle, leur industrialisation et leur production à grande échelle restent limitées. La figure 1 illustre l'évolution de la production ces dernières années et les projections. En 2019, seulement 1,95

million de tonnes de bioplastiques ont été produites, soit seulement 0,6 % de la production mondiale de plastique(Costa, Encarnação, Tavares, Todo Bom, & Mateus, 2023).

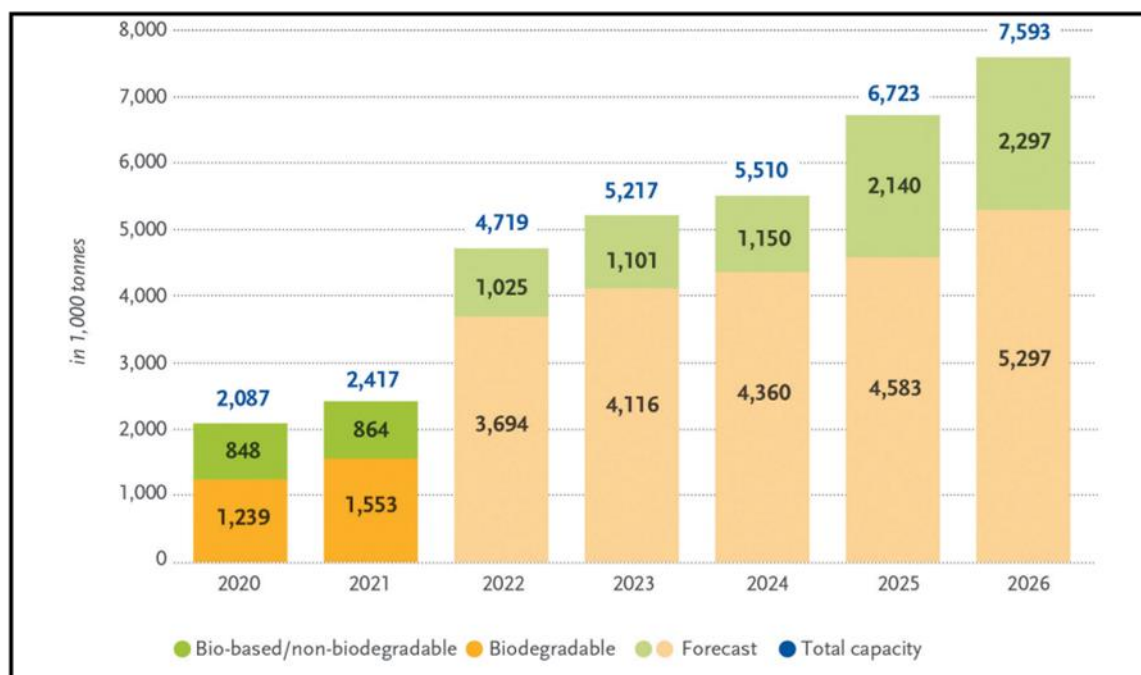


Figure 12 : Capacité mondiale de production de bioplastiques

2-5-Application de bioplastique

Les bioplastiques sont utilisés dans divers secteurs : les emballages alimentaires dominent (48 %, soit 1,15 million en 2021), suivis des biens de consommation (11 %), des fibres (10 %), de l'agriculture (9 %) et d'autres domaines comme l'automobile ou l'électronique (3 à 5 % chacun). Leurs applications devraient encore se développer.

2-5-1- Industrie médicale

Les bioplastiques constituent une alternative idéale aux polymères traditionnels, notamment parce qu'ils sont moins allergènes que les produits chimiques couramment utilisés. Ces matériaux durables sont parfaits pour la production en série d'articles à usage unique. Certains bioplastiques, grâce à leur perméabilité à la vapeur d'eau et à leur imperméabilité, conviennent à des applications sanitaires telles que les alèses, les protège-couches ou les gants jetables(Venkatachalam & Palaniswamy, 2020).

2-5-2-Industrie des emballages alimentaires

L'utilisation des bioplastiques dans le secteur de l'emballage alimentaire connaît une croissance rapide. Les matériaux utilisés pour ces applications doivent posséder des propriétés spécifiques pour garantir la conservation des produits et respecter les normes de sécurité alimentaire. Les bioplastiques les plus couramment utilisés sont le PLA, l'amidon et la cellulose(Venkatachalam & Palaniswamy, 2020).

Plusieurs certifications confirment l'utilisation de plastiques biosourcés dans les applications en contact avec les aliments. Les polymères biosourcés non biodégradables, tels que le bio-PE et le bio-PET récemment développés, trouvent leur principale application dans le domaine de l'emballage alimentaire. Leur développement et leur adoption par la société s'expliquent par une prise de conscience croissante des impacts environnementaux des emballages traditionnels(Molenveld, Van den Oever, & Bos, 2015).

Avec 60 % de la production mondiale de bioplastiques, le secteur de l'emballage est le principal débouché des plastiques biodégradables, le marché étant encore segmenté en d'autres catégories(Muthusamy & Pramasivam, 2019).

2-5-3-Agriculture

Dans certaines pratiques agricoles, l'utilisation de films plastiques de couverture est essentielle pour optimiser les rendements. Alors que les films traditionnels à base de pétrole laissent des résidus persistants, leur équivalent en bioplastique offre les mêmes avantages agronomiques tout en se dégradant complètement, réduisant ainsi les coûts post-récolte liés à l'enlèvement et à l'élimination des déchets(Venkatachalam & Palaniswamy, 2020).

Un film polymère, aussi appelé film de paillage, est utilisé pour couvrir les zones ensemencées. Son rôle est de protéger les jeunes plants des mauvaises herbes et du froid, tout en conservant l'humidité du sol. Ces films agissent comme de mini-serres pour les cultures. Traditionnellement fabriqués en PE noir, ils devaient être collectés puis jetés après utilisation. En revanche, les films de paillage biodégradables se décomposent naturellement. Quant aux films de polyéthylène photodégradables, bien que leur biodégradation soit partielle et incomplète, ils présentent néanmoins des avantages écologiques(Chauhan et al., 2024)

2-5-4-Produit de beauté

Des nombreux produits cosmétiques, tels que les gommages, les dentifrices et les gels douche, intègrent volontairement des microbilles de plastique pour leurs propriétés exfoliantes. Cependant, leur taille microscopique les rend impossibles à retenir dans les stations d'épuration. Par exemple, les microbilles d'alginate, de chitosane et de gélatine constituent des alternatives biodégradables à ces polluants.(Chauhan et al., 2024).

2-5-5-Automobile

Le développement durable progresse grâce à l'adoption croissante des bioplastiques. L'industrie automobile, dont la production ne cesse d'augmenter, joue un rôle clé dans cette transition. Une voiture européenne moyenne intègre aujourd'hui près de 500 pièces en plastique différentes. Plusieurs constructeurs se sont déjà tournés vers ces matériaux innovants(Chauhan et al., 2024):

- Toyota, pionnier dans ce domaine, utilise du PET issu de la canne à sucre pour ses garnitures intérieures, avec pour objectif d'atteindre 20 % de bioplastiques dans ses composants d'ici 2015.
- Fiat utilise des polyamides issus de la canne à sucre et des polyuréthanes dérivés du soja pour certaines pièces automobiles.
- Ford incorpore de la mousse de soja dans 75 % de ses appuis-tête produits chaque année.
- Mazda a développé des intérieurs contenant plus de 80 % de matériaux d'origine végétale, avec des housses de siège 100 % en bio tissu..

2-6-Facteurs influençant la biodégradation des bioplastiques

L'efficacité du processus de biodégradation est conditionnée par les spécificités de la matière plastique, de l'organisme dégradant et des méthodes de prétraitement. (Emadian et al., 2017)

La biodégradation du plastique dépend fortement de ses propriétés, notamment de sa taille, de sa forme, de son poids moléculaire, de ses groupes fonctionnels et des additifs incorporés(Sintim et al., 2019)

Humidité : L'eau influence la biodégradation des plastiques à plusieurs niveaux, car elle est essentielle à la prolifération microbienne. Un environnement très humide stimule l'activité des micro-organismes, améliorant ainsi la dégradation. De plus, une humidité élevée favorise également l'hydrolyse en intensifiant la rupture des chaînes polymères(Sander, 2019)

pH : Le pH influence la cinétique des réactions d'hydrolyse en modulant l'acidité ou l'alcalinité du milieu. Par exemple, l'hydrolyse des capsules de PLA atteint son efficacité maximale à un pH de 5. La dégradation des plastiques modifie elle-même le pH environnant, impactant à la fois la vitesse de décomposition et le développement des micro-organismes(Emadian et al., 2017)

Température : La température joue également un rôle clé dans la biodégradation enzymatique en modifiant la rigidité des bioplastiques. Les plastiques à point de fusion élevé présentent une biodégradation moins efficace, car leur dégradabilité enzymatique est inversement proportionnelle à la température(Emadian et al., 2017)

Propriétés enzymatiques : Chaque enzyme possède un site actif spécifique, lui permettant de dégrader certains bioplastiques. Les dépolymérase, produites par des micro-organismes spécialisés, jouent un rôle particulièrement déterminant dans la régulation de ce processus de biodégradation(Tokiwa & Calabia, 2004), De plus, des études ont confirmé l'implication d'enzymes extracellulaires dans la dépolymérisation du PHB. La dépolymérase microbienne, produite spécifiquement par ces micro-organismes, module significativement les voies de dégradation du PHB(T. Ahmed et al., 2018).

Le poids moléculaire

Est un facteur clé de la biodégradation des bioplastiques, influençant directement leurs propriétés physiques. Plus leur poids moléculaire est élevé, plus leur dégradabilité microbienne est faible. Par exemple, des tests avec la lipase de R. Delmar ont montré que les PCL de poids moléculaire élevé (> 4 000) se dégradaient moins efficacement que les PCL de faible poids moléculaire(Tokiwa, Calabia, Ugwu, & Aiba, 2009), L'efficacité des enzymes microbiennes est favorisée par un substrat de faible masse molaire, ce qui semble justifier cette observation (Auras, Harte, & Selke, 2004), De plus, un poids moléculaire élevé diminue souvent la solubilité, rendant le substrat moins vulnérable aux attaques

microbiennes. Pourtant, il est essentiel à l'assimilation par les bactéries, et subit ensuite une dégradation accrue sous l'action des enzymes cellulaires(Zhao et al., 2020).

Forme et taille : La biodégradation des bioplastiques est influencée par leurs caractéristiques physiques, notamment leur forme et leurs dimensions(Emadian et al., 2017), Le taux de biodégradation des bioplastiques augmente avec leur surface : plus elle est grande, plus la dégradation est rapide (Kijchavengkul & Auras, 2008).

Additifs : L'efficacité de la biodégradation des bioplastiques dépend étroitement de leur structure et de leur composition. Ainsi, l'incorporation d'additifs riches en sucres solubles peut modifier leur composition et, par conséquent, améliorer leur biodégradabilité (Emadian et al., 2017), Bien que les biocomposites dérivés de bioplastiques puissent offrir des propriétés mécaniques améliorées, comme une résistance élevée à la traction, leur biodégradation peut être compromise dans certaines conditions ou s'arrêter prématurément. Ainsi, l'optimisation des additifs utilisés dans ces biocomposites pourrait favoriser à la fois leur applicabilité pratique et leur biodégradabilité(T. Ahmed et al., 2018).

Biosurfactants : Les biosurfactants, molécules amphiphiles, présentent une affinité particulière pour les surfaces biologiques. Leur caractère non toxique et hautement biodégradable peut ainsi contribuer à améliorer la dégradation des bioplastiques(Hadar & Sivan, 2004), De plus, les groupements fonctionnels caractéristiques des biosurfactants sont susceptibles d'accélérer la biodégradation des bioplastiques tout en potentialisant leur activité, y compris dans des environnements extrêmes (pH, température ou salinité élevés)(Kawai et al., 2004).

1-1- Avantages et inconvénients des bioplastiques

2-7-1- Avantages

Les bioplastiques représentent une solution potentielle au problème environnemental du traitement inadéquat des déchets plastiques. Leur principale caractéristique est d'être produits à partir de matières premières renouvelables, remplaçant ainsi les ressources fossiles(Thielen, 2014), L'utilisation de matières premières renouvelables permet une réduction significative des émissions de GES, grâce à un bilan carbone plus favorable par rapport aux ressources fossiles (Demirbas, 2007; Gross & Kalra, 2002).

Selon des études, l'empreinte carbone des bioplastiques est réduite jusqu'à 80 % par rapport aux plastiques conventionnels issus de la pétrochimie (Yu & Chen, 2008).

La production de bioplastiques nécessite 65 % d'énergie en moins que celle des plastiques pétrochimiques, selon les analyses du cycle de vie (Bezirhan & Ozsoy, 2014).

En fin de cycle de vie, après avoir épuisé toutes les possibilités de réutilisation et de recyclage mécanique, la biomasse constituant les bioplastiques peut être valorisée énergétiquement via des procédés de recyclage en cascade (Gilbert, Ricci, & Tang, 2015).

Les bioplastiques présentent un double avantage : optimiser le recyclage des ressources et réduire certaines pollutions spécifiques, telles que les rejets terrestres et marins ou les émissions toxiques. Cependant, leur potentiel écologique exige impérativement leur mise en œuvre (Muthusamy & Pramasivam, 2019):

- Les performances des systèmes sont collectées
- Infrastructures de recyclage adaptées
- Une éducation active des consommateurs

2-7-2- Inconvénients

Les bioplastiques présentent certes des avantages environnementaux majeurs par rapport aux plastiques traditionnels, mais leurs résultats ne sont pas sans inconvénients. Une gestion inadéquate de ces déchets engendre les mêmes problèmes que les plastiques fossiles : pollution des sols et des eaux, menace pour la biodiversité et émissions de GES dans les décharges. De plus, leur production soulève deux défis majeurs : un coût industriel encore prohibitif et une possible concurrence avec les cultures vivrières pour l'utilisation des terres (Gilbert et al., 2015).

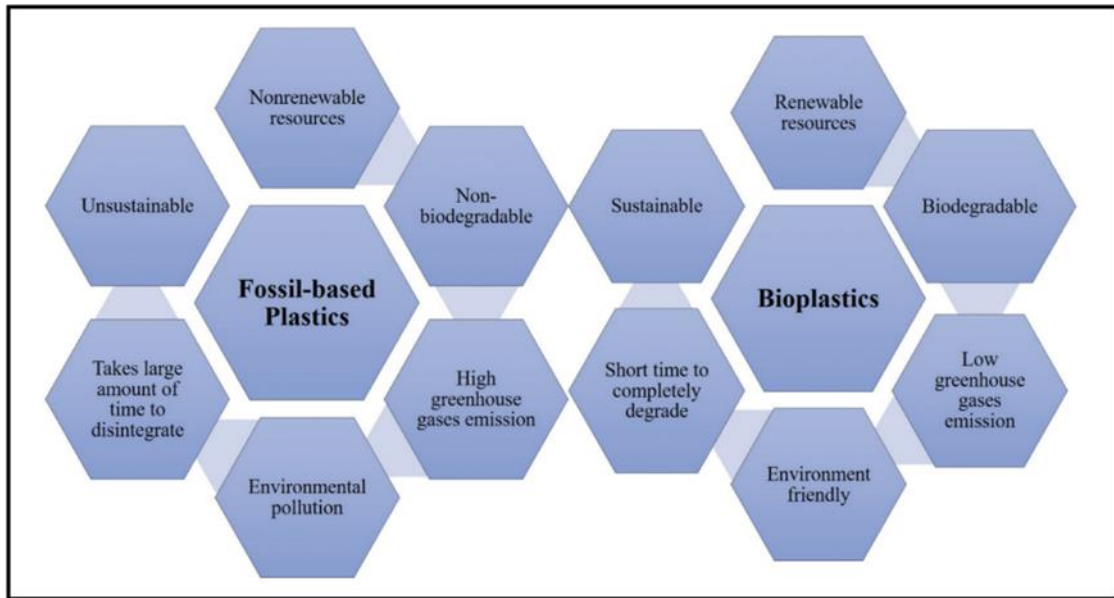


Figure 13: Comparaison entre les plastiques d'origine fossile et les bioplastiques (Chauhan et al., 2024)

Partie II

Etude pratique

Chapitre I :

Matériel et

Méthodes

1- Source de l'échantillon de patate douce

Des tubercules de patate douce 100 % biologiques (*Ipomoea batatas* Lam. 1793) ont été utilisés dans cette étude. Ils provenaient de la ferme de l'agriculteur Khalaifa Wafa, située dans la municipalité de Hassi Khalifa, dans la province d'El Oued. Les échantillons ont été sélectionnés selon des critères stricts, sans aucun produit chimique ni OGM.

Les patates douces revêtent une importance environnementale majeure en raison de leur rôle essentiel dans la bioéconomie durable. Elles représentent une source prometteuse pour la production de plastiques biodégradables, grâce à leur richesse en amidon et en sucre, une matière première idéale pour la fabrication de biopolymères.

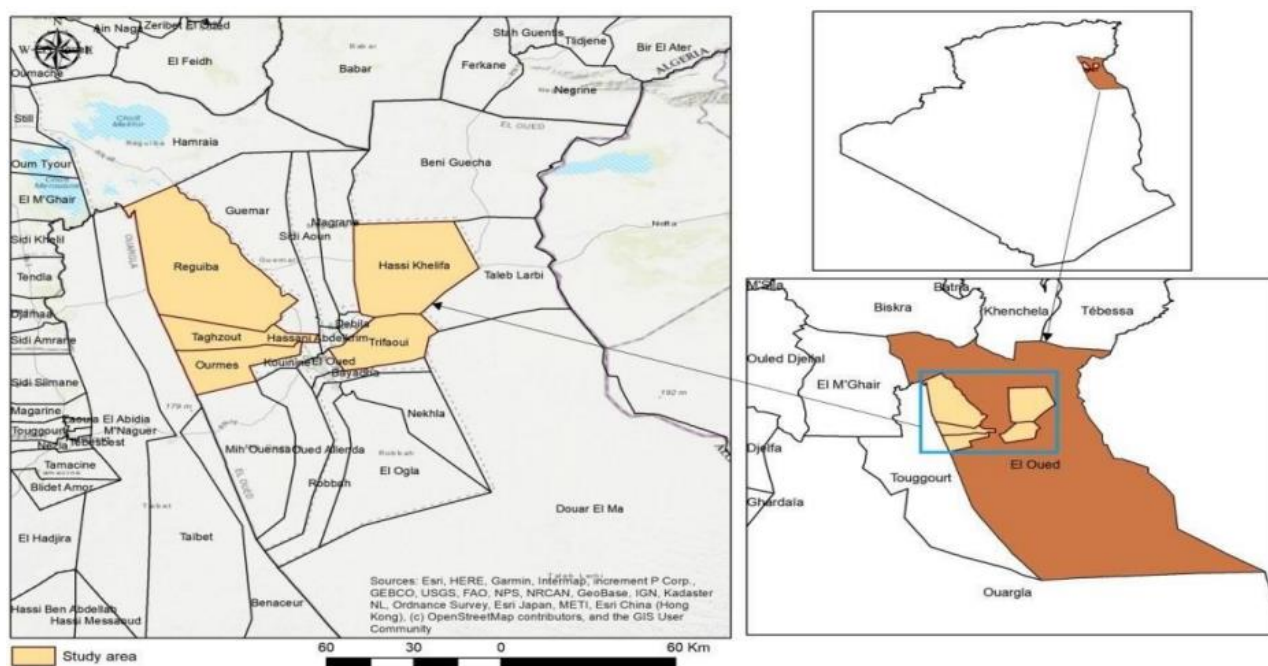
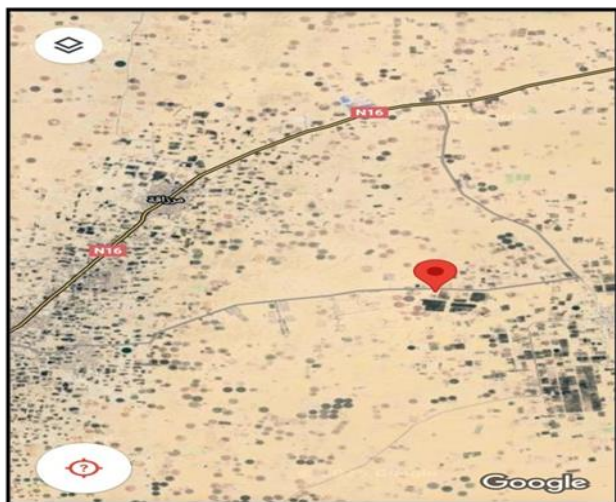


Figure 14: Situation géographique de la vallée de oued souf citée en (Tarek et al., 2025)



Google Earth(2025)



khalaifa wafa(2025)

Figure 15 : Localisation et schéma de la ferme biologique

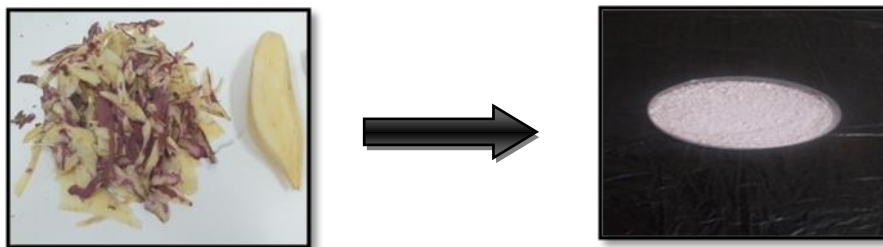
2- Méthodologie expérimentale

2-1- Produits chimiques et matériels utilisés

Tableau 04 : Les différentes produits et matériels utilisées

Verrierie	Matériel	Produits	Appareils
Cristallisoir	Une râpe	Patate douce	Ph mètre
Bécher	Un couteau	Eau distillée	Agitateur avec les barreaux magnétiques
Cuillère en verre	Un éplucheur	glycérol	Centrifugeuse
	Une passoire	Acide chloridrique Hcl	Etuve
	Papier absorbant	NaOH(Poudre)	Une balance sensible
	Boîte péturie		FTIR

	Une pipette		UV visible
	Lame		



2-2- Méthodologie d'extraction de l'amidon

Il est possible d'obtenir de l'amidon à partir des tubercules de patate douce, comme décrit dans les références (Ismail et al., 2016; Stanojlovic-Davidovic, 2006; Tsakama, Mwangwela, Manani, & Mahungu, 2010) Avec les modifications appropriées. Pour commencer, les tubercules doivent être soigneusement lavés et pelés. Ensuite, ils sont pulvérisés et placés dans un récipient, puis additionnés d'eau distillée. Le mélange est ensuite agité et tamisé. Après quelques minutes de repos, l'amidon se dépose au fond du récipient. L'amidon brut est ensuite purifié par centrifugation à 3 500 tr/min pendant 3 minutes. 100 ml d'eau distillée sont ajoutés au culot obtenu et centrifugés à nouveau pour obtenir de l'amidon pur. L'amidon recueilli est séché pendant 24 heures dans une étuve à air chaud à une température de 40 à 45 °C.

2-2-1- Extraction de l'amidon par trois solutions

a- Extraction de l'amidon dans l'eau distillé

Dans notre propre expérience, nous avons extrait l'amidon de 100 g de patates douces (*Ipomoea batatas* Lam, 1793), soigneusement lavées, râpées et placées dans 500 ml d'eau distillée. Nous avons laissé le mélange reposer trois heures, puis l'avons filtré.

Ensuite, nous avons placé la patate douce râpée dans 500 ml supplémentaires d'eau distillée, laissé reposer une heure, puis filtré le tout avec l'eau de la première expérience. Nous avons répété ce processus deux fois afin d'extraire un maximum d'amidon du tubercule.

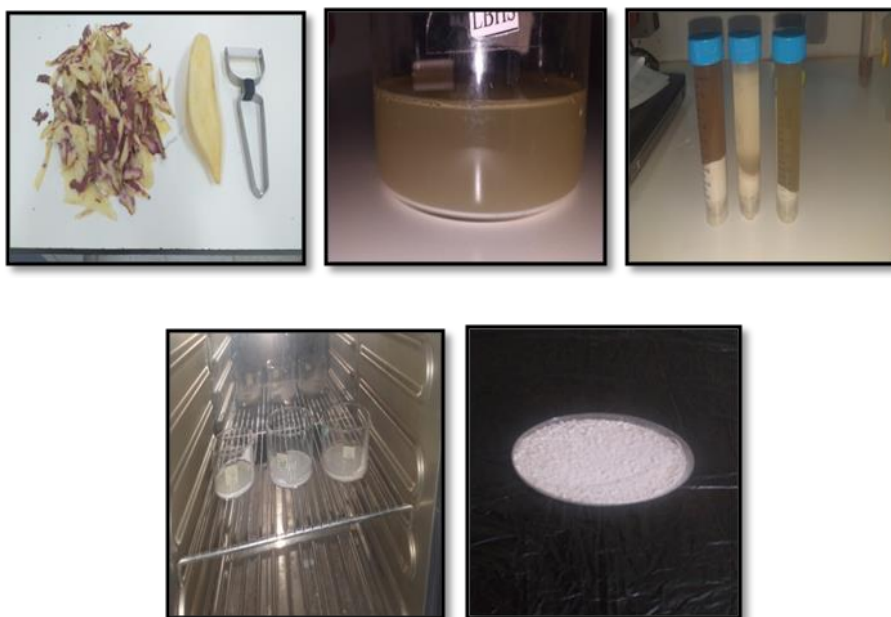


Figure 16 : Différentes étapes d'extraction de l'amidon

b- Extraction de l'amidon dans une solution d'acide chlorhydrique HCl avec une concentration de 0.05mol/l

On répète l'expérience précédente en remplaçant le volume d'eau distillée par une solution d'acide chlorhydrique à 0,05 mol/l. Pour ce faire, on mélange 2,07 ml de solution d'acide chlorhydrique (37 %) à 500 ml d'eau distillée.

c- Extraction d'amidon dans une solution de NaOH à une concentration de 0,05 mol/l

La même expérience avec le milieu alcalin en utilisant le même volume d'eau distillée avec 1 g de soude en poudre afin d'obtenir un milieu basique avec une concentration molaire de 0,05 mol/l.



Figure 17 : Amidon extrait dans par les trois solutions (Eau D : amidon de solution neutre, NaOH : amidon de solution basale, Hcl : amidon de solution acide).

2-3- Elaboration de bioplastique

2-3-1-Matériels et méthodes

2-3-1-1-Apport et critères de choix des matériaux de départ

Amidon de patate douce (*Ipomoea batatas* Lam, 1793) ($C_6H_{10}O_5$)_n

L'amidon, de formule $(C_6H_{10}O_5)_n$, est composé de deux types de molécules : l'amylose et l'amylopectine. La structure linéaire de l'amylose lui confère des propriétés mécaniques plus robustes et plus flexibles, tandis que sa version ramifiée présente une résistance moindre à la traction et à l'allongement(Fakhouri et al., 2012; Kurbanova, Ashfaq, Tahir, Maharramov, Dege, & Koroglu, 2023; Kurbanova, Ashfaq, Tahir, Maharramov, Dege, Ramazanzade, et al., 2023).

Utilisés comme emballages alimentaires écologiques, ces matériaux présentent un potentiel significatif de réduction de la pollution environnementale. De plus, l'incorporation de divers biopolymères permet d'optimiser les propriétés fonctionnelles de ces matériaux biodégradables (C.-Y. Cheng et al., 2020; H. Cheng et al., 2021; Kansız et al., 2022; Raza et al., 2023)

Glycérol ($C_3H_8O_3$)

Le glycérol a été ajouté comme agent plastifiant aux bioplastiques à base d'amidon afin d'améliorer leurs propriétés mécaniques. Cette incorporation augmente significativement la

flexibilité des films tout en réduisant leur rugosité de surface(Behera, Mohanta, & Thirugnanam, 2022).

Acide chloridrique Hcl

L'acide chlorhydrique (HCl), également appelé chlorure d'hydrogène, acide muriatique ou esprit de sel, joue un rôle essentiel en chimie organique et minérale. Il se présente sous forme gazeuse, incolore à légèrement jaunâtre, ou en solution aqueuse. Ses applications sont nombreuses : il est utilisé en métallurgie (décapage, décalaminage et désétamage des métaux), dans les industries pharmaceutique, alimentaire et photographique, ainsi que dans la production de plastiques, de colorants, de colles et de gélatines. Il sert également d'agent d'hydrolyse, de catalyseur, de réactif analytique et participe à la synthèse de chlorures, de sels métalliques et d'engrais(COlognesi & FLorence, 2003).

2-3-2- Méthode de préparation de bioplastique

Les bioplastiques sont pour la plupart biodégradables, durables et biocompatibles. L'équation suivante permet de former un bioplastique simple : BIOPLASTIQUE = Biopolymère(s) + plastifiant(s) + autre(s) additif(s)(Stevens, 2002).



Figure 18: Ingrédients du bioplastique pur(Özdamar, Ateş, Bal, & Şentürk, 2017)

Pour fabriquer le bioplastique à partir d'amidon de patate douce, nous avons incorporé 2,5 g d'amidon pur dans un bécher contenant 25 ml d'eau distillée. Nous y avons ensuite ajouté 2 ml d'acide chlorhydrique et 2 ml de glycérine.

Le mélange a été porté à ébullition pendant 15 minutes, en recouvrant le bécher d'un verre de montre pour éviter l'évaporation de l'eau. De l'hydroxyde de sodium a été ajouté pour équilibrer le pH du mélange.

Enfin, le mélange a été placé dans des boîtes de Petrie et nivelé à l'aide d'une tige de verre. Les échantillons ont ensuite été exposés à un flux d'air laminaire pendant deux jours pour sécher. Au bout de deux jours, de l'amidon plastifié a été produit, prenant la forme d'une feuille (Ismail et al., 2016).

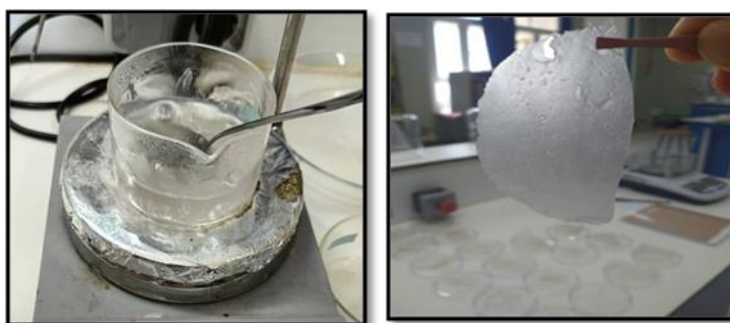


Figure 19 : Production de bioplastique

Afin d'obtenir un modèle idéal et une étude complète des meilleures conditions initiales pour tenter de préparer du bioplastique comme alternative au plastique traditionnel à partir d'amidon de patate douce, en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RSM).

3- Optimisation par la méthodologie de la surface de réponse RSM

La méthode des surfaces de réponse (RSM) est une approche mathématique et statistique utilisée pour planifier des séries d'expériences. Son objectif principal est d'optimiser une variable de réponse en analysant son interaction avec plusieurs facteurs indépendants (Veza, Spraggon, Fattah, & Idris, 2023).

La synthèse des bioplastiques et leur caractérisation expérimentale représentent un processus long et gourmand en ressources. La méthode RSM (Response Surface Methodology) a donc été utilisée pour optimiser le plan expérimental, permettant ainsi d'évaluer efficacement l'impact des paramètres sur les propriétés des matériaux. Cette approche statistique et mathématique fournit un cadre rigoureux pour la modélisation des

procédés et l'aide à la décision. Couramment utilisée dans l'industrie (procédés chimiques, opérations de fabrication et traitements thermiques), la RSM permet à la fois l'optimisation des procédés existants et le développement de nouvelles solutions (Myers, Montgomery, & Anderson-Cook, 2016).

Le protocole expérimental adopté est de type Box-Behnken, conçu pour modéliser efficacement les effets linéaires et quadratiques ainsi que les interactions entre les facteurs d'influence. Cinq variables indépendantes ont été sélectionnées comme facteurs expérimentaux : quantité d'amidon (g), teneur en plastifiant (ml), volume d'acide (ml), temps de chauffage (min) et temps de séchage (h), chacun étant étudié à trois niveaux, comme indiqué dans le tableau suivant (Marichelvam et al., 2022; Shafqat, Al-Zaqri, Tahir, & Alsalmé, 2021; Singh et al., 2025) (tableau 05) :

Tableau 05 : Les variables indépendantes étudiées, unités et leurs niveaux d'étude

Variables indépendantes	Unités	Niveaux des variables		
		-1	0	+1
Quantité d'amidon	g	2	6	10
Teneur en plastifiant	mL	0	2.5	5
Volume d'acide	mL	0	3	6
Temps de chauffage	min	5	17.5	30
Temps de séchage	h	24	36	48

Le plan comprend 46 expériences, réalisées par lots : pour chaque essai, les matières premières sont mesurées selon les combinaisons définies par le plan, puis mélangées à de l'eau distillée (50 ml) et chauffées sous agitation à la température et pendant la durée spécifiées. Après gélatinisation, la pâte obtenue est moulée en plaques standardisées, puis séchée pour obtenir des films bioplastiques. Cinq paramètres ont été mesurés : absorption d'eau (%), solubilité aqueuse (%), solubilité dans l'alcool (%), humidité et rendement en bioplastique (%) afin de modéliser la réponse du système et d'identifier les conditions de

Chapitre I: Matériel et Méthodes

formulation optimales. Le tableau récapitulatif du plan expérimental suivi, contenant tous les paramètres opératoires et mesurables, est présenté ci-dessous :

Tableau 06 : Protocole d'expériences selon le plan de Box-Behnkrn

N° d'expérience	Amidon	Gly	Hcl	Chauffage	Séchage	A de l'eau	S dans l'eau	S dans l'alcool	Rendement	Humidité
	G	ml	ml	min	H	%	%	%	%	%
1	6	0	3	30	36					
2	10	5	3	17.5	36					
3	6	5	3	17.5	24					
4	2	2.5	3	30	36					
5	6	2.5	0	17.5	24					
6	6	2.5	6	5	36					
7	6	2.5	0	17.5	48					
8	6	2.5	3	17.5	36					
9	6	0	3	5	36					
10	6	0	0	17.5	36					
11	6	2.5	3	30	48					
12	2	2.5	3	5	36					
13	2	2.5	3	17.5	24					
14	10	0	3	17.5	36					
15	10	2.5	3	30	36					
16	6	2.5	0	30	36					
17	10	2.5	3	17.5	48					
18	6	0	3	17.5	48					
19	6	2.5	3	5	48					
20	6	5	3	30	36					
21	6	5	3	5	36					
22	6	5	0	17.5	36					
23	2	0	3	17.5	36					
24	10	2.5	3	5	36					
25	2	2.5	3	17.5	48					
26	6	2.5	3	17.5	36					
27	10	2.5	6	17.5	36					
28	6	2.5	6	17.5	48					
29	6	2.5	3	17.5	36					

30	6	2.5	3	17.5	36					
31	6	2.5	3	30	24					
32	2	2.5	6	17.5	36					
33	10	2.5	3	17.5	24					
34	6	0	3	17.5	24					
35	6	2.5	6	30	36					
36	2	2.5	0	17.5	36					
37	6	2.5	3	5	24					
38	6	0	6	17.5	36					
39	6	2.5	3	17.5	36					
40	2	5	3	17.5	36					
41	6	5	6	17.5	36					
42	6	5	3	17.5	48					
43	6	2.5	3	17.5	36					
44	10	2.5	0	17.5	36					
45	6	2.5	6	17.5	24					
46	6	2.5	0	5	36					

3-1- Analyse statistique

L'analyse des données collectées a été réalisée à l'aide d'outils statistiques informatiques, notamment SPSS (IBM20), Excel-Stat (2014.5.03), Minitab (17.1.0) et DesignExpert (12.1.2). Les méthodes d'analyse employées incluent l'ANOVA (conçue pour les données normalement distribuées), la méthode Kruskal-Wallis (adaptée aux données non normalement distribuées) et la méthode Wilcoxon.

Test ANOVA

L'ANOVA, ou analyse de la variance, est un type de modèle linéaire général (MLG) fréquemment appliqué aux plans factoriels. Lorsque les conditions expérimentales peuvent être classées selon un ou plusieurs facteurs, chacun comportant deux niveaux ou plus, le plan est dit factoriel (Winer, Brown, & Michels, 1971).

Par exemple, deux types de stimuli visuels différents (visages et maisons) pourraient être présentés dans une expérience, chacun avec trois degrés d'excentricité distincts. Dans une ANOVA 2~3, les six conditions représenteraient des appariements distincts de chaque niveau des variables « type de stimulus » et « excentricité » (Henson, 2015).

3-2- Paramètres mesurés

3-2-1-Solubilité dans l'eau

Après immersion d'un matériau sec dans l'eau pendant 24 heures, sa solubilité est déterminée par la quantité de matériau solubilisé. La composition initiale en matière sèche de chaque film a été déterminée en le séchant à poids constant dans une étuve à 105 °C. Deux disques de film d'un centimètre ont été découpés, pesés et immergés dans cent millilitres d'eau. Les morceaux de film ont été immergés pendant 24 heures à 20 °C sous agitation régulière. Ils ont ensuite été retirés et séchés à poids constant dans une étuve à 105 °C afin de déterminer le poids de matière sèche non dissoute dans l'eau. L'équation (1) a été utilisée pour déterminer la solubilité :

$$SW(\%) = [(W_0 - W)/W_0] \times 100\% (1)$$

Où W_0 et W sont respectivement les poids des échantillons secs avant et après l'essai, et SW est la solubilité dans l'eau (da Rosa Zavareze et al., 2012) (Galus, Turska, & Lenart, 2012)

3-2-2- Solubilité dans l'alcool

Les échantillons de bioplastique de 1,5 cm² ont été initialement déshydratés à 85 °C pendant 24 heures afin de déterminer leur masse sèche (W_1). Ils ont ensuite été placés dans des tubes en verre contenant 3 ml d'éthanol, munis d'un bouchon, à température ambiante pendant 24 heures. Le bioplastique résiduel a été extrait par filtration de l'eau après 24 heures, puis séché une seconde fois à 85 °C pendant 24 heures avant d'être pesé pour déterminer son poids final (W_2). La formule (2) a été utilisée pour déterminer la solubilité (Sanyang, Sapuan, Jawaid, Ishak, & Sahari, 2016b).

$$SA(\%) = ((W_1 - W_2)/W_1) 100 \quad (2)$$

3-2-3- Absorption d'eau

Après avoir été découpés et immergés dans une solution de glycérol à 1 % (v/v), des disques de film de 1 cm de diamètre ont été retirés et séchés.

Pour éliminer l'eau de la surface, le film a été séché à l'air libre pendant environ 240 heures et son poids a été enregistré. À l'aide de la formule (3), le pourcentage d'absorption d'eau a été déterminé :

$$AW(\%) = [(W_f - W_0) / W_0] \times 100 \quad (3)$$

où W_0 et W_f sont les poids des échantillons avant et après le test, respectivement, et AW représente l'absorption dans l'eau (Tsou et al., 2014) (Galus et al., 2012).

3-2-4- Absorption d'humidité

La sensibilité à l'humidité des bioplastiques a été évaluée via un test d'absorption de vapeur d'eau, s'inspirant de la méthode décrite par (Asrofi et al., 2018). Après découpe en dimensions standardisées (2×2 cm), les échantillons ont été séchés dans une étuve à 50°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante (W_1). Ils ont ensuite été placés dans des enceintes climatiques fermées (dessiccateurs) où l'humidité relative était maintenue à $75 \pm 5\%$ à l'aide d'une solution saline saturée. Le suivi cinétique de l'absorption a été réalisé par pesées successives jusqu'à stabilisation de la masse (W_2). Le taux d'absorption hygroscopique a finalement été déterminé à l'aide de la relation (4) :

$$\text{Absorption de vapeur d'eau (\%)} = (W_2 - W_1) / W_1 \times 100 \quad (4)$$

Où W_1 est le poids initial de l'échantillon séché (grammes) et W_2 est le poids final de l'échantillon (grammes) après exposition dans un récipient scellé rempli de solutions salines à des conditions d'humidité contrôlées.

3-2-4-1- Effet de la surface sur l'absorption d'humidité

Dans le cadre de l'évaluation des performances des bioplastiques à base d'amidon de patate douce pour des applications de contrôle hygrométrique (Silica Gel), Cette étude se propose d'analyser l'incidence de la surface des échantillons sur leur capacité d'absorption hydrique. Quatre échantillons, présentant des surfaces distinctes ($0.5/0.5$ cm, $1/1$ cm, $2/2$ cm, $3/3$ cm) ont été soumis à des conditions expérimentales contrôlées (température et humidité relative constantes) afin de déterminer la corrélation entre l'aire exposée et la cinétique d'absorption.

Cette approche méthodologique permet d'établir des paramètres optimaux pour la conception de matériaux biosourcé efficaces dans la régulation de l'humidité, ouvrant ainsi des perspectives pour leur utilisation dans des domaines tels que l'emballage ou le stockage de produits sensibles

4- Biodégradabilité

4-1- Enfouissement des bioplastiques

L'évaluation du devenir environnemental des bioplastiques s'appuie sur des essais d'enfouissement en conditions réelles de sol, à température stable. Ces essais impliquent les processus naturels de biodégradation médiés par l'écosystème microbien du sol (bactéries, archées et microchampignons), principaux acteurs du recyclage de la matière organique (Accinelli, Saccà, Mencarelli, & Vicari, 2012; Kumaravel, Hema, & Lakshmi, 2010). Les essais d'enfouissement ont été réalisés selon trois méthodes distinctes : sol naturel, sol stérilisé et sol enrichi. La stérilisation du sol a été réalisée par calcination à 250 °C pendant 4 heures dans un four. Pour l'enrichissement microbien, on a utilisé de la bouse de bœuf tamisée (granulométrie ≤ 2 mm), séchée à l'air (72 heures), collectée sur un marché aux bestiaux.



Figure 20 : Matrices utilisées pour l'enfouissement des bioplastiques

4-2- Détermination le pH du sol

Le pH du sol a été déterminé selon la méthode de Forster (Forster, 1995). Après séchage à température ambiante (72 h) et calibrage (granulométrie ≤ 2 mm), un mélange sol-eau

distillée (1:2 p/v) a été préparé. Après agitation (3 min) et filtration par gravité (15 min), le pH du filtre a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre.

Tableau 07 : Ph de sol d'enfouissement

Type de sol	pH
Sol naturel	7.9
Sol stérilisé	7.2
Sol enrichie	8.4

L'équation (5) a été utilisée pour déterminer la quantité de biodégradation (Ismail et al., 2016) .

$$WL (\%) = [(W_0 - W) / W_0] \times 100 \quad (5)$$

Les poids de départ et fin des échantillons de bioplastique sont désignés respectivement par W_0 et W . WL signifie également la perte de poids.

5- Caractérisation physico-chimique de biopolymères élaboré

L'évaluation des propriétés physiques et chimiques du bioplastique s'appuie sur une méthodologie analytique intégrée, combinant la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) pour l'étude des groupes fonctionnels et la spectroscopie ultraviolette-visible (UV-Vis) pour l'analyse de sa transparence et de son absorption lumineuse. Cette synergie analytique permet une compréhension approfondie des relations structure-fonction et constitue un prérequis pour démontrer l'adéquation du matériau à ses applications potentielles

5-1- Analyse de Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier FTIR

Le domaine de la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) a considérablement progressé au cours des dix dernières années, offrant un diagnostic plus

simple, plus rapide et plus objectif (Byrne, Bonnier, McIntyre, & Parachalil, 2020; Diem, Chiriboga, Lasch, & Pacifico, 2002). La spectroscopie FTIR examine l'interaction entre les matériaux et le rayonnement électromagnétique pour produire un spectre lumineux visible. Chaque molécule possède une empreinte spectrale qui la distingue des autres.

La spectroscopie FTIR est une autre technique utile et non destructive pour suivre les changements cellulaires (Cooper & Knutson, 1995; Mantsch & Chapman, 1996). L'analyse spectrale FTIR a permis de quantifier plusieurs macromolécules, dont des protéines, et de caractériser des troubles dans différents organes (Cooper & Knutson, 1995), acides nucléiques (Banyay, Sarkar, & Gräslund, 2003; Liquier, 1996), et lipides (Brandenburg & Seydel, 1998). Des nombreux articles scientifiques soulignant la valeur des méthodes spectroscopiques pour l'identification du cancer ont été publiés (Gremlich & Yan, 2000; Mantsch & Chapman, 1996; Mostaco-Guidolin, Murakami, Nomizo, & Bachmann, 2009).

La FTIR utilise des bandes ou des groupes individuels pour identifier précisément les conformations moléculaires, les types de liaisons, les groupes fonctionnels et les interactions intermoléculaires qui composent l'échantillon afin de différencier et de caractériser les cellules et les tissus (Byrne et al., 2020; Mostaco-Guidolin et al., 2009).

5-2- Spectrophotométrie UV visible

La transparence des films a été évaluée selon la méthode de (Dai, Zhang, & Cheng, 2019). Des échantillons rectangulaires (10 × 30 mm) ont été placés contre la paroi de la cuvette. Les mesures d'absorbance ont été réalisées avec un spectrophotomètre UV-Vis (Jenway 6705, Royaume-Uni), en utilisant une cuvette vide comme témoin.

Chapitre II :

Résultats et

Discussion

1- Résultats

1-1- Rendements d'extraction d'amidon

Pour déterminer le rendement en amidon, l'expérience a été menée trois fois sur trois milieux présentant des acidités différentes : basique, acide et neutre.

L'objectif était de déterminer s'il existait des différences significatives de rendement en amidon. Les résultats obtenus sont les suivants :

Tableau 08 : Rendement d'extraction de l'amidon de patate douce

	Les milieux		
	Basique	Neutre	Acide
Expérience 01	7.6	9	7
Expérience 02	6.2	6	5.5
Expérience03	5.9	8	5
Moyenne	6.567	7.667	5.833
Erreur standard	0.689	1.111	0.778

La quantité moyenne d'amidon la plus élevée a été obtenue à partir d'un milieu neutre, avec une moyenne de 7,6 g pour 50 g de patate douce. En revanche, le milieu acide contenait la plus faible quantité d'amidon, avec une moyenne de 5,8 g, et le milieu alcalin contenait 6,5 g d'amidon pour 50 g de patate douce. Les résultats obtenus confirment que le pH affecte significativement le rendement en amidon extrait du tubercule de patate douce.

De plus, le rendement de ce dernier augmente également lorsque le pH du milieu se rapproche de la modération.

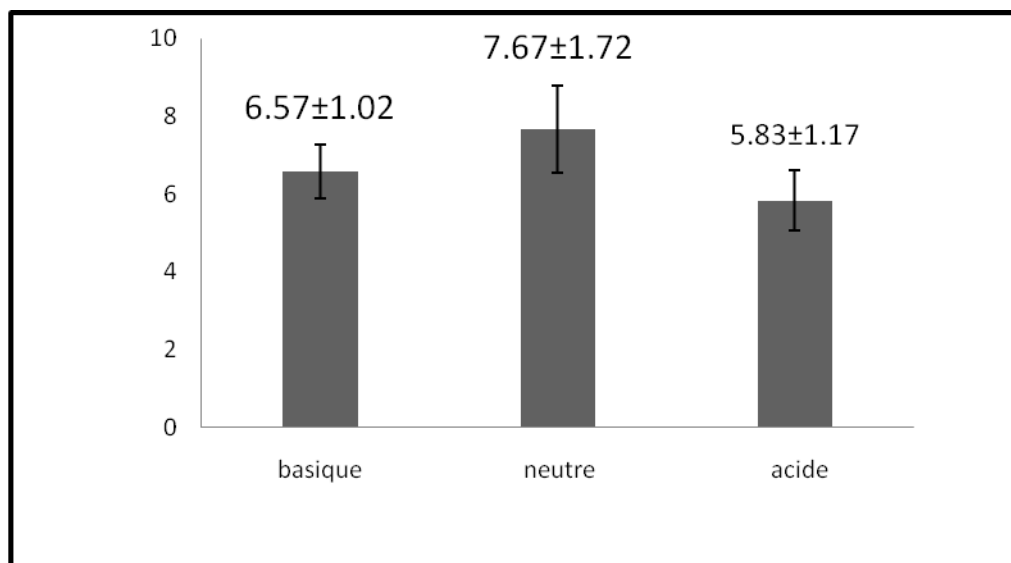


Figure 21 : Rendement en amidon par milieu

1-2- Test ANOVA sur le rendement d'amidon

Le tableau ci-dessous présente le test ANOVA réalisé sur les rendements en amidon extraits des trois milieux précédents.

Tableau 09 : Tableau ANOVA du rendement en amidon des trois milieux

Source de variation	SS	Df	MS	F	P-value	Fcrit
Entre les Groups	5.109	2	2.554	1.807	0.243	5.143
Dans les Groups	8.48	6	1.413			
Totale	13.589	8				

Afin d'évaluer et d'étudier l'effet du pH sur le rendement en amidon extrait de 50 g de patate douce (*Ipomea batatas* Lam. 1793), nous avons réalisé un test ANOVA

unidirectionnel, en considérant les trois milieux susmentionnés (acide, neutre et basique) comme groupes d'étude.

Lors de la comparaison du test ANOVA, aucune différence significative n'a été constatée ($p = 0,243 > 0,05$) entre les catégories résultant de l'extraction d'amidon dans les milieux.

1-3- Performance de bioplastique

Afin de déterminer le rendement d'un bioplastique fabriqué à partir de 5 g d'amidon, l'étude d'extraction a été répétée trois fois pour trois milieux présentant différents degrés d'acidité (basique, acide et neutre). Les résultats obtenus sont les suivants :

Tableau 10 : Rendement de bioplastique fabriquée

	Les milieux		
	Basique	Acide	Neutre
Expérience 01	18.3	17	21.7
Expérience 02	19	17.7	21.3
Expérience 03	18.8	17.1	22
Moyenne	18.7	17.27	21.67
Erreur standard	0.267	0.289	0.244

Parmi les trois milieux, le milieu neutre a présenté le taux de production de bioplastique le plus élevé, avec un rendement moyen de 21,7 g. En revanche, les milieux alcalin et acide ont produit respectivement 18,7 g et 17,3 g, ce qui est relativement inférieur au rendement du milieu neutre.

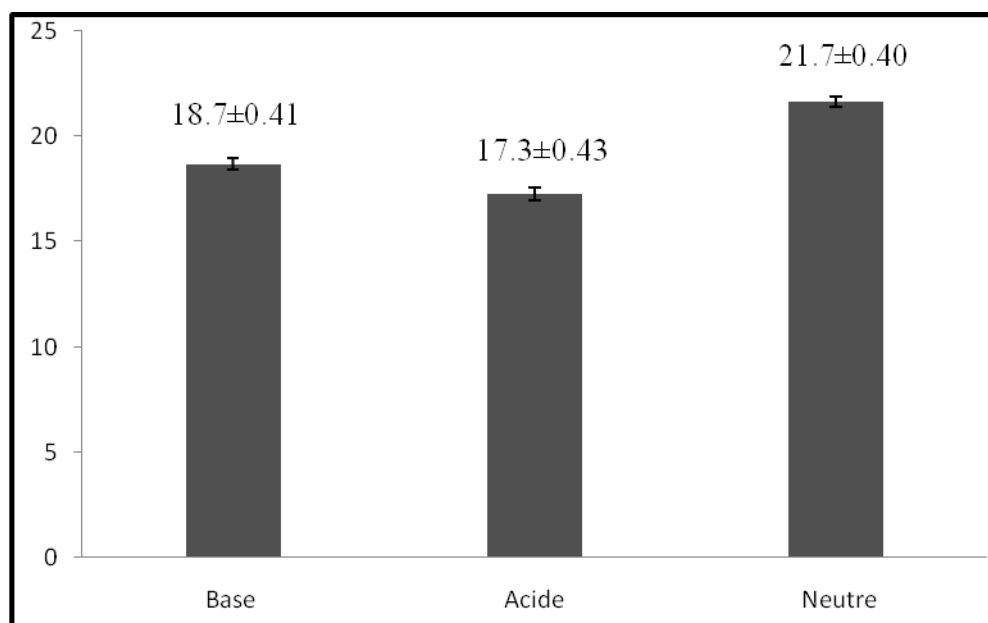


Figure 22 : Rendement en bioplastique par milieu.

Ces résultats confirment les résultats obtenus dans la première étude concernant l'effet clair et significatif du pH du milieu sur l'étude liée dans cette expérience au rendement en bioplastiques fabriqués à partir de 5g d'amidon.

1-4- Test ANOVA sur le rendement de bioplastique

Le tableau ci-dessous présente le test ANOVA réalisé sur le rendement en bioplastique extrait des trois milieux (amidon de milieu neutre, amidon de milieu acide et amidon de milieu basique).

Tableau 11 : Tableau ANOVA du rendement de bioplastique des trois milieux

Source de variation	SS	Df	MS	F	P-value	Fcrit
Entre les groups	30.2155556	2	15.1077778	114.260504	1.6746E-05	5.14325285
Dans les groups	0.79333333	6	0.13222222			

Totale	31.0088889	8				
---------------	------------	---	--	--	--	--

Le test ANOVA montre qu'il existe une différence hautement significative ($p\text{-value} = 1,6746\text{E-}05 < 0,05$) entre les contenus en bioplastique des milieux examinés.

1-5- Test de Turkey

Tableau 12 : Matrice de comparaison des moyennes (test de la Turquie) du rendement en bioplastique des trois milieux.

	Neutre	Basique
Basique	0.000143	
Acide	0.000015	0.00697

Le test de la Turquie a révélé qu'il existe trois milieux différents, le milieu A est acide et à la plus forte proportion de bioplastique. Il existe une différence significative entre les milieux alcalins et neutres avec des valeurs p de 0,00697 et 0,000015, respectivement (tableau 12). Le milieu B est alcalin et a un taux intermédiaire par rapport aux autres milieux d'extraction. Il existe une différence significative entre les milieux neutres et acides avec des valeurs p de 0,000143 et 0,00697, respectivement (tableau 12). Le milieu C est neutre et a une teneur en amidon légèrement inférieure à celle des autres milieux. Il existe une différence significative entre les milieux alcalins et acides avec des valeurs p de 0,000143 et 0,000015, respectivement (tableau 12).

1-6- Optimisation par la méthodologie de la surface de réponse RSM

Tableau 13 : Résultats du protocole d'expérience

Exp	Amidon	Glucose	HCl	Chauffage	Séchage	A d'eau		S dans l'eau		S dans l'alcool		Masse		Rendement		Humidité	
						%		%		%		g		%		%	
	G	mL	mL	min	H	Exp	RS M	Exp	RS M	Exp	RS M	Exp	RS M	Exp	RS M	Exp	RS M
1	6	0	3	30	36	77.73	65.4377	18.58	11.8417	0.97	0.81	1.69	2.07	71.83	70.21	89.79	85.13
2	10	5	3	17.5	36	48.52	47.73	41.97	46.35	29.34	26.23	6.56	6.9	41.50	41.40	26.99	23.59

Chapitre II : Résultats et Discussion

3	6	5	3	17.5	24	26.8 4	29.9 8	55.2 9	53.1 4	35.6 0	33.6 9	4.1 2	4.64 6	31.3 3	24.3 7	28.2 1	32.6 3
4	2	2.5	3	30	36	20	17.1 4	53.2 9	59.2 8	57.2 3	49.5 2	0.9 8	0.73 3	51.0 0	50.9 6	78.3 8	82.5 1
5	6	2.5	0	17.5	24	41.6 1	36.3 9	34.4 1	37.5 583	20.0 4	21.8 323	3.0 2	3.10 567	49.6 7	43.4 607	34.7 4	26.9 093
6	6	2.5	6	5	36	58.4 9	44.2 3	34.7 2	31.1 813	20.3 4	14.8 396	3.2 2	3.96 463	46.3 3	36.8 868	13.8 3	15.7 878
7	6	2.5	0	17.5	48	48.5	45.2 0	52.1 6	61.8 621	20.3 7	23.5 26	2.7 5	3.03 817	39.3 6	32.4 793	20.3 3	21.2 743
8	6	2.5	3	17.5	36	7.52	7.52	40.1 1	40.1 1	25.4 1	25.4 1	3.2 3	3.23	46.1 7	43.6 037	20.3 3	20.3 328
9	6	0	3	5	36	83.9 4	74.3 7	9.59	12.7 029	1.75	9.12 833	2.1 5	2.97 732	64.1 7	55.3 511	25.4 4	16.8 241
10	6	0	0	17.5	36	60.8 3	66.7 1	11.7 8	18.2 85	2.59	2.53 75	2.1 1	2.56 857	64.8 3	67.3 179	13.0 1	19.7 619
11	6	2.5	3	30	48	21.4 2	31.7 3	59.5 2	50.4 788	13.3 6	19.9 344	1.3	2.00 567	61.3 4	52.9 171	77.1 9	71
12	2	2.5	3	5	36	2.78	4.01	58.9 9	59.1 915	59.4 8	54.6 39	1.6 7	1.53 925	16.5 0	18.5 656	20.9 8	19.7 133
13	2	2.5	3	17.5	24	41.4 6	56.1 6	62.4 1	67.1 373	43.9 4	42.8 892	1.2 8	1.21 154	36.0 0	36.2 222	26.7 6	30.3 723
14	10	0	3	17.5	36	84.4	85.5 1	4.80	3.20 896	0.63	0.82 3125	4.3 6	3.60 178	56.4 0	63.4 724	20.9 2	21.1 321
15	10	2.5	3	30	36	30.5 3	30.2 4	16.8 9	24.3 2	5.40	7.86 021	4.6 1	4.17 065	53.9 0	57.6 918	68.6 8	79.2 836
16	6	2.5	0	30	36	14.8 3	29.0 3	31.7 4	31.0 4	20.1 6	16.5 296	3.2 6	2.81 213	45.6 7	47.0 706	81.4 4	80.8 664
17	10	2.5	3	17.5	48	91.8	80.7 5	46.1 5	38.2	2.76	2.13	4.0 8	4.46 6	59.2 0	56.9 8	32.1 8	25.5 98
18	6	0	3	17.5	48	83.7 8	83.9 7	19.4 3	18.8 75	0.66	- 7.93 771	2.3 5	1.68 961	60.8 3	65.8 289	23.0 0	24.9 118
19	6	2.5	3	5	48	12.2 9	28.0 0	45.9 3	42.2 8	17.6 6	16.4 919	3.4 2	3.25 192	43.0 0	37.3 782	39.8 4	34.0 468
20	6	5	3	30	36	7	11.7 7	55.2 0	49.3 654	50.9 8	45.1 058	4.8 9	4.37 592	27.8 3	38.4 397	82.5 2	83.3 742
21	6	5	3	5	36	2.31	9.81 146	48.0	52.0 967	39.2	42.5 783	5.5	5.58 217	7.00	10.4 052	31.6	28.5 068

Chapitre II : Résultats et Discussion

								8		9		8				1	
2 2	6	5	0	17.5	36	20 .1	20.7 267	62 .0 7	55.5 688	55 .4 6	52.4 425	5. 8 1	5.31 842	3. 17	8.62 211	27 .2 3	27.5 327
2 3	2	0	3	17.5	36	83 .4 1	77.1 358	43 .7 1	40.9 64	19 .2 0	29.6 194	0. 9 3	0.69 4733	53 .5 0	62.0 974	19 .2 3	20.6 454
2 4	10	2.5	3	5	36	46 .5 3	50.3 377	26 .3 6	28.0 065	4. 84	10.1 627	5. 8 7	5.54 69	41 .3 0	47.1 906	13 .6 9	18.9 064
2 5	2	2.5	3	17.5	48	8. 3	1.80 979	71 .6 7	74.1 31	62 .1 6	60.6 879	0. 4 4	0.10 9042	30 .5 0	33.3 102	17 .4 5	19.2 739
2 6	6	2.5	3	17.5	36	7. 52	7.52	40 .1 1	40.1 1	25 .4 1	25.4 1	3. 2 3	3.23	46 .1 7	43.6 037	20 .3 3	20.3 328
2 7	10	2.5	6	17.5	36	53 .9 8	55.8 154	33 .7 6	32.5 398	6. 76	4.68 187	5. 6 3	5.61 19	43 .7 0	45.9 499	13 .8 1	14.9 664
2 8	6	2.5	6	17.5	48	28 .6 8	32.9 931	36 .6 8	40.0 833	9. 84	14.4 835	2. 9 3	2.69 942	51 .1 7	57.8 16	13 .2 4	20.6 618
2 9	6	2.5	3	17.5	36	7. 52	7.52	40 .1 1	40.1 1	25 .4 1	25.4 1	3. 2 3	3.23	46 .1 7	43.6 037	20 .3 3	20.3 328
3 0	6	2.5	3	17.5	36	7. 52	7.52	40 .1 1	40.1 1	25 .4 1	25.4 1	3. 2 3	3.23	46 .1 7	43.6 037	20 .3 3	20.3 328
3 1	6	2.5	3	30	24	41 .4 5	29.6 329	33 .3 3	36.2 95	3. 56	14.7 356	2. 5 0	2.62 817	58 .3 3	55.7 414	95 .5 6	98.3 914
3 2	2	2.5	6	17.5	36	17 .9 9	25.2 304	69 .3 6	60.3 848	58 .1 6	52.5 981	0. 9 4	0.92 425	53 .0 0	52.5 249	20 .5 9	18.6 355
3 3	10	2.5	3	17.5	24	26 .4 8	36.6 36	42 .5 0	36.8 723	24 .0 4	19.5 679	3. 6 5	4.29 919	52 .7 0	47.8 972	24 .8 0	20.0 131
3 4	6	0	3	17.5	24	79 .6	92.6 498	36 .7 4	28.4 663	27 .9 2	15.6 635	2. 4 8	2.33 711	58 .6 7	59.7 41	24 .6 0	24.4 661
3 5	6	2.5	6	30	36	16 .0 1	13.9 773	36 .2 0	42.1 15	21 .5 3	20.3 121	2. 7 5	3.25 338	73 .3 3	61.5 879	85 .0 0	77.9 933
3 6	2	2.5	0	17.5	36	13 .7 8	14.3 904	72 .1 6	67.2 735	50 .0 6	53.1 506	1. 6 7	1.82 8	16 .5 0	17.0 075	26 .0 3	20.4 747
3 7	6	2.5	3	5	24	46 .7 5	40.3 342	39 .7 3	48.0 863	22 .1 6	25.5 931	4. 3 1	3.56 442	28 .1 7	28.3 781	8. 95	12.1 732
3 8	6	0	6	17.5	36	83 .6 7	91.5 542	5. 16	15.4 463	2. 66	7.36	2. 6 9	2.88 982	55 .1 7	58.2 52	15 .9 6	19.0 799
3 9	6	2.5	3	17.5	36	7. 52	7.52	40 .1 1	40.1 1	25 .4 1	25.4 1	3. 2 3	3.23	46 .1 7	43.6 037	20 .3 3	20.3 328

Chapitre II : Résultats et Discussion

40	2	5	3	17.5	36	4.86	-3.31 167	71.5 1	74.7 377	76.4 6	83.5 794	1.5 0	2.36 898	6.00	7.43 495	30.3 1	28.1 118
41	6	5	6	17.5	36	16.7	19.3 217	57.8 0	55.0 8	35.0 9	36.8 25	5.8 7	5.11 967	34.1 7	40.2 228	24.5 7	21.2 333
42	6	5	3	17.5	48	38.1 3	28.4 21	65.5 4	71.1 138	51.6 4	53.3 973	4.3 5	4.35 946	27.5 0	24.4 664	20.2 1	26.6 714
43	6	2.5	3	17.5	36	7.52	7.52	40.1 1	40.1 1	25.4 1	25.4 1	3.2 3	3.23	46.1 7	43.6 037	20.3 3	20.3 328
44	10	2.5	0	17.5	36	48.0 2	43.2 254	26.1 1	28.9 785	8.35	14.9 244	4.4 3	4.58 565	55.7 0	58.9 325	22.5 5	20.1 086
45	6	2.5	6	17.5	24	69.6 4	62.0 344	59.1 6	56.0 096	16.8 0	20.0 798	4.0 0	3.56 692	33.3 3	40.6 587	21.8 9	20.5 404
46	6	2.5	0	5	36	3.77	5.74 854	55.7 2	45.5 75	37.3 3	29.4 171	4.4 9	4.28 338	25.1 7	28.8 695	11.5 1	19.8 961

1-6-1- Réponse de l'absorption d'humidité

ANOVA pour le modèle quadratique

Tableau 14 : Réponse ANOVA d'humidité

Source	Somme des carrés	Df	Moyenne quadratique	Valeur F	Valeur p
Modèle	25273.18	20	1263.66	36.23	< 0.0001
A-Quantité d'amidon	16.28	1	16.28	0.4668	0.5007
B-Quantité de plastifiant	98.49	1	98.49	2.82	0.1053
C-HCl	48.74	1	48.74	1.40	0.2483
D-Temps de chauffage	15172.28	1	15172.28	434.98	< 0.0001
E-Temps de séchage	30.40	1	30.40	0.8715	0.3595
AB	6.27	1	6.27	0.1798	0.6752
AC	2.73	1	2.73	0.0782	0.7821
AD	1.47	1	1.47	0.0420	0.8392
AE	69.58	1	69.58	1.99	0.1702
BC	7.89	1	7.89	0.2262	0.6385
BD	45.17	1	45.17	1.29	0.2659
BE	10.26	1	10.26	0.2940	0.5925
CD	0.3814	1	0.3814	0.0109	0.9175
CE	8.28	1	8.28	0.2375	0.6303
DE	606.65	1	606.65	17.39	0.0003

A ²	0.2215	1	0.2215	0.0064	0.9371
B ²	89.16	1	89.16	2.56	0.1224
C ²	23.11	1	23.11	0.6625	0.4234
D ²	7818.09	1	7818.09	224.14	< 0.0001
E ²	115.69	1	115.69	3.32	0.0806
Résiduel	872.01	25	34.88		
Man d'ajustement	872.01	20	43.60		
Erreur pure	0.0000	5	0.0000		
Cor Total	26145.19	45			

Source : Résultats du traitement des données

La valeur $F = 36,23$ confirme la significativité du modèle. Il y a seulement 0,01 % de chance que cette valeur soit due au hasard. Les termes avec $p < 0,05$ (tels que D, DE et D²) sont significatifs, tandis que ceux avec $p > 0,10$ ne le sont pas. Si trop de termes sont non significatifs (sauf ceux nécessaires à la hiérarchie), une simplification du modèle pourrait l'améliorer.

Statistiques d'ajustement

Tableau 15 : Statistiques d'ajustement du modèle mathématique pour la réponse de l'humidité

Écart-type.	5.91	R ²	0.9666
Signifier	32.50	R²ajusté	0.9400
C.V.%	18.17	R²prédit	0.8666

D'après le tableau 15, nous notons que la valeur du coefficient de régression pour le modèle $R^2=0,9666$ très proche à 1, ce qui témoigne de l'acceptabilité du modèle mathématique. Comme nous le notons, le R^2 prédictif de 0,8666 s'accorde raisonnablement avec le R^2 ajusté de 0,9400 la différence étant inférieure à 0,2.

Adeq Précision mesure le rapport signal/bruit. Un rapport supérieur à 4 est souhaitable.

Équation finale en termes de facteurs codés

Selon le programme de conception expérimentale, l'humidité mesurée et les variables indépendantes ont été liées dans l'équation mathématique comme suit :

Humidité =	+20.33
-1.01	A
+2.48	B
-1.75	C
+30.79	D
-1.38	E
-1.25	AB
-0.8258	AC
-0.6053	AD
+4.17	AE
-1.40	BC
-3.36	BD
-1.60	BE
+0.3088	CD
+1.44	CE
-12.32	DE
-0.1593	A ²
+3.20	B ²
-1.63	C ²
+29.93	D ²
+3.64	E ²

L'équation en termes des facteurs codés permet de prédire la réponse pour des niveaux donnés de chaque facteur. Par défaut, les niveaux élevés des facteurs sont codés +1 et les niveaux faibles -1. L'équation codée permet d'identifier l'impact relatif des facteurs en comparant leurs coefficients

Équation finale entre les facteurs réels

-2.52950	Quantité d'amidon
+3.55158	Volume de plastifiant
-0.199169	HCl
-0.968483	Temps de chauffage
-1.00637	Temps de séchage
-0.125213	quantité d'amidon * Volume de plastifiant
-0.068815	quantité d'amidon * HCl
-0.012106	quantité d'amidon * Temps de chauffage
+0.086892	quantité d'amidon * Temps de séchage
-0.187247	Volume de plastifiant * HCl

-0.107529	Volume de plastifiant * Temps de chauffage
-0.053374	Volume de plastifiant * Temps de séchage
+0.008235	HCl * Temps de chauffage
+0.039974	HCl * Temps de séchage
-0.082101	Temps de chauffage * Temps de séchage
-0.009957	quantité d'amidon ²
+0.511413	Volume de plastifiant ²
-0.180799	HCl ²
+0.191554	Temps de chauffage ²
+0.025284	Temps de séchage ²

L'équation en termes de facteurs réels peut être utilisée pour prédire la réponse pour des niveaux donnés de chaque facteur. Ici, les niveaux doivent être spécifiés dans les unités d'origine de chaque facteur. Cette équation ne doit pas être utilisée pour déterminer l'impact relatif de chaque facteur, car les coefficients sont mis à l'échelle pour tenir compte des unités de chaque facteur et l'ordonnée à l'origine n'est pas au centre de l'espace de conception.

Elle ne convient pas à l'évaluation de l'impact relatif des facteurs, car les coefficients sont normalisés en fonction des unités de chaque facteur et l'interception ne correspond pas au centre de l'espace expérimental.

2-1-5- Diagnostique

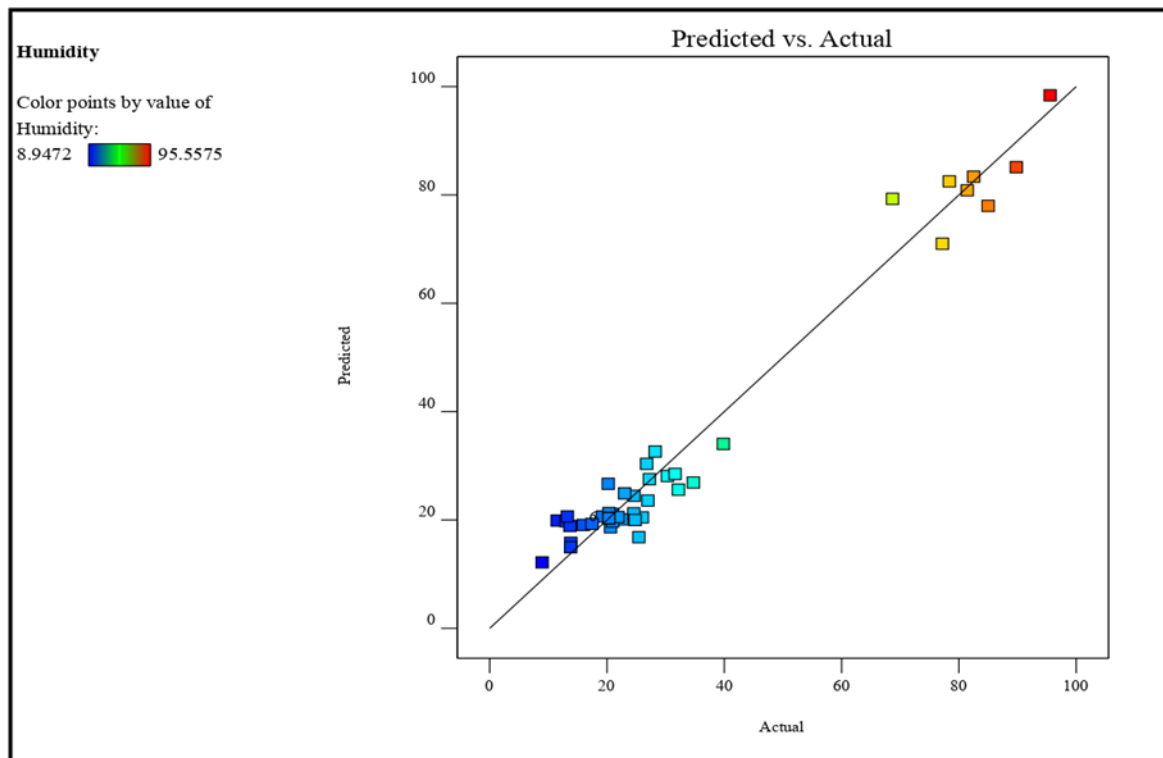


Figure 23 : Courbe des valeurs attendues et expérimentales de l'humidité %

La figure 23 illustre la répartition des valeurs d'humidité expérimentales et prédites par rapport à la première bissectrice, à l'aide du modèle mathématique d'humidité. Le graphique montre une bonne linéarité entre les valeurs d'humidité prédites et réelles, ce qui démontre la robustesse et la capacité du modèle à prédire le comportement de l'humidité.

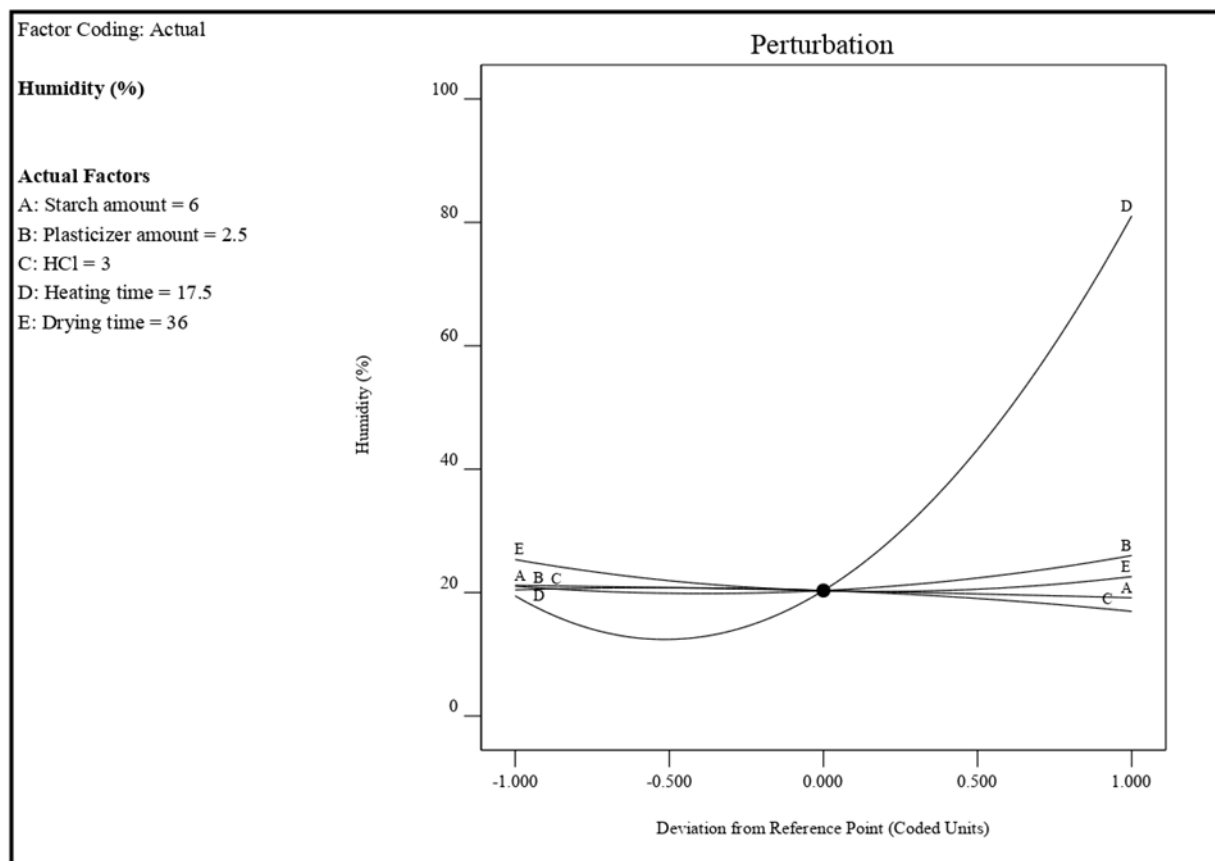


Figure 24 : Courbes de perturbation pour l'efficacité d'absorption d'humidité. (A) amidon ; (B) glycérol ; (C) HCL (D) temps de chauffage et (E) temps de séchage.

Effet des facteurs indépendants sur l'absorption d'humidité

a- Effet d'amidon

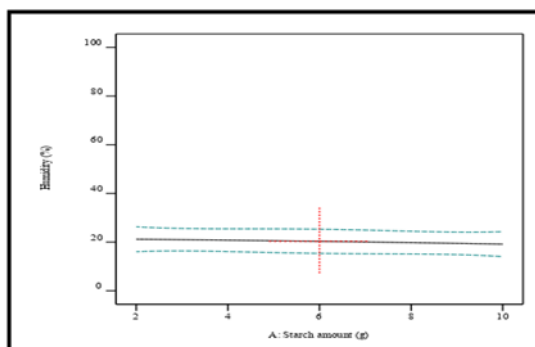


Figure 25 : Modification de l'absorption d'humidité des bioplastiques en fonction de la teneur en amidon

À travers du courbe graphique présentée dans le la figure 25, qui représente les changements dans l'absorption d'humidité par les bioplastiques en fonction de la variation de la quantité d'amidon, nous constatons qu'il n'y a pas de changement significatif dans les pourcentages d'humidité le long de la plage étudiée.

b- Effet de plastifiant

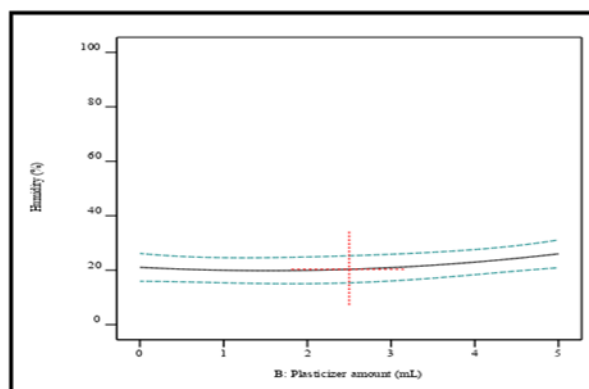


Figure 26 : Modification de l'absorption d'humidité des bioplastiques en fonction du volume de plastifiant

La courbe présentée dans le document 26 montre les changements d'absorption d'humidité en fonction du changement du volume de glycérol, où l'on remarque une stabilité de l'absorption à des valeurs de glycérol inférieures à 3 ml et son augmentation à partir de cette valeur.

c- Effet d'acide

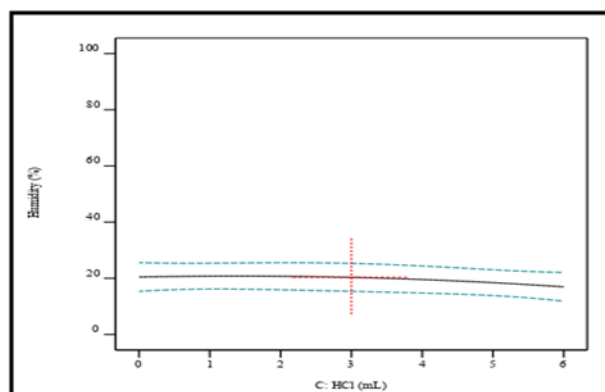


Figure 27 : Modification de l'absorption d'humidité des bioplastiques en fonction du volume d'acide.

La courbe 27 de la figure représente l'évolution de l'absorption d'humidité en fonction du volume d'acide. On constate que cette dernière n'a pas d'effet notable à des valeurs inférieures à 4.5ml. Compte tenu de cette valeur, on observe un début de diminution des taux d'absorption d'humidité avec l'augmentation de la quantité d'acide chlorique.

d- Effet du temps de chauffage

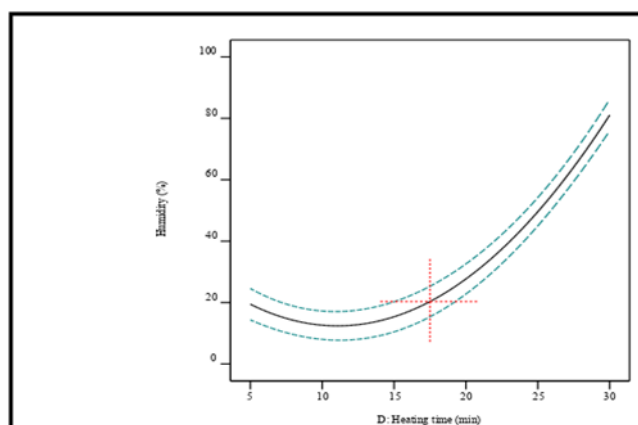


Figure 28 : Modification de l'absorption d'humidité des bioplastiques en fonction de la variation du temps de chauffage

La courbe dans la figure 28 montre l'évolution de l'absorption d'humidité du bioplastique en fonction de la durée de chauffage, La courbe montre une relation positive et apparemment linéaire entre le temps de chauffage et l'absorbance du bioplastique. Cela signifie que l'absorbance augmente de manière proportionnelle à l'augmentation du temps de chauffage.

e- Temps de séchage

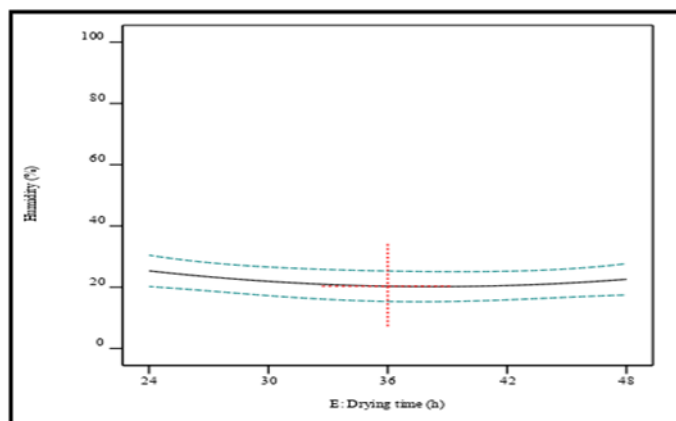


Figure 29 : Modification de l'absorption d'humidité des bioplastiques en fonction de variation du temps de séchage

La courbe représente les variations de l'absorption d'humidité du bioplastique en fonction de la variation de la durée de son séchage, L'évolution montre une baisse continue de l'absorption durant 36 heures, avant une remontée légère en phase finale.

Optimisation à l'aide de la fonction de désirabilité

L'approche d'optimisation multi-réponse formalisée par (Derringer & Suich, 1980), et désignée sous le terme de « **fonction de désirabilité** », constitue une méthode de référence pour la résolution de problèmes d'optimisation multi-objectifs, comme en témoigne son utilisation rapportée par (Shengli et al., 2018).

La fonction de désirabilité transforme les réponses brutes en indicateurs normalisés où la valeur 1 correspond à l'état optimal souhaité, tandis que la valeur 0 indique un dépassement des seuils d'acceptabilité prédéfinis pour le processus d'optimisation (Mourabet et al., 2012).

La fonction de désirabilité représente une méthodologie robuste pour l'optimisation multi-objectifs de paramètres de procédé, permettant de déterminer simultanément les conditions optimales des variables opératoires (A : masse d'amidon, B : volume de plastifiant, C : volume d'acide, D : durée de chauffage, E : durée de séchage) conduisant à la performance idéale de la réponse cible, c'est-à-dire l'absorption d'humidité (Shengli et al., 2018).

Conformément aux résultats présentés dans la figure 30, les conditions opératoires optimales ont permis d'atteindre un taux d'absorption d'humidité de 82,51 %, correspondant à une valeur de désirabilité maximale de 1. L'optimisation numérique a identifié les paramètres optimaux suivants : masse d'amidon (2 g), volume de glycérol (2,5 ml), volume d'acide (3 ml), durée de chauffage (30 min) et durée de séchage (36 h). Des essais de validation tripliqués ont confirmé la robustesse du modèle, montrant une adéquation remarquable entre les valeurs prédites et expérimentales.

Ces valeurs optimales ont été validées par des expériences de confirmation répétées et ont donné des résultats dans des conditions optimales avec des taux de récupération de 79.36 %, 79.88 % et 78.14 %, et une efficacité moyenne de 79.12 %. En prédisant une efficacité d'adsorption de 82.51 %, nous constatons que :

Erreur absolue = |valeur prédite – valeur expérimentale|=3.39.

Erreur relative = ((valeur expérimentale + erreur absolue) - valeur expérimentale) / valeur expérimentale = 0,043. Cela représente 3.43 %. Cela indique que ce modèle mathématique peut être utilisé pour améliorer les conditions expérimentales d'adsorption d'humidité (Jawad et al., 2021).

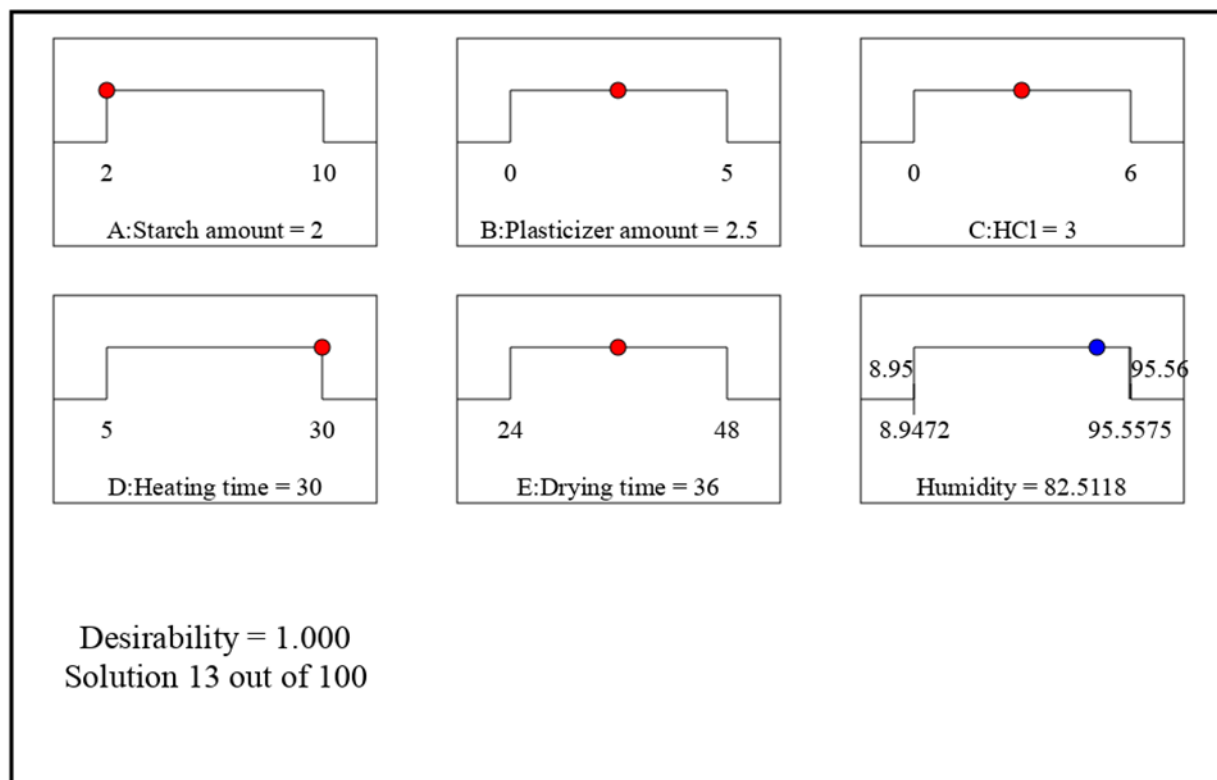


Figure 30 : Courbes des valeurs optimales pour le test d'humidité

2-1-8- Effet de la surface sur l'absorption d'humidité

Les résultats de cette étude sont présentés dans le graphique suivant :

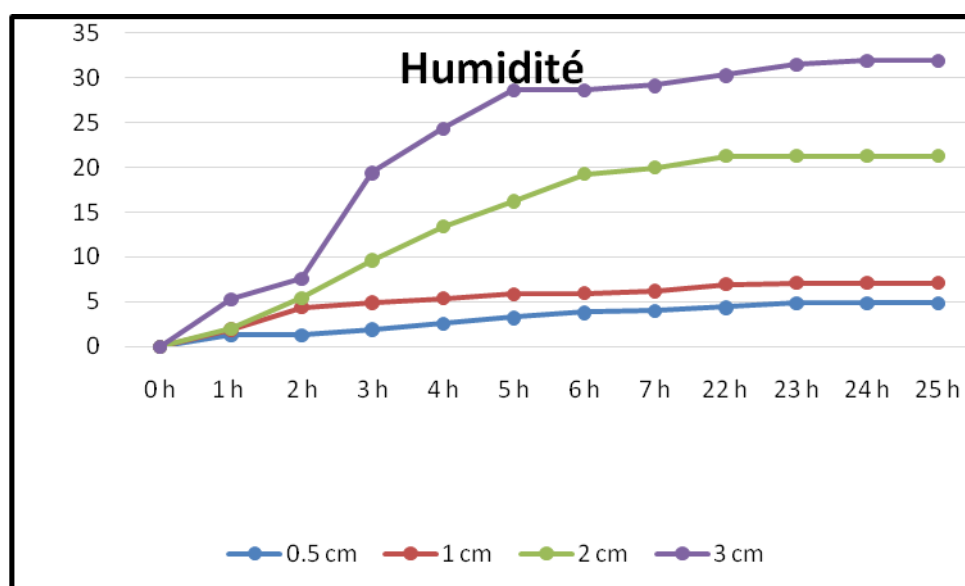


Figure 31 : Étude des variations d'absorbance en fonction de la surface d'un échantillon plastique

Les données des tests d'absorption d'humidité pour les bioplastiques à base d'amidon de patate douce ont montré une nette variation du comportement des échantillons en fonction de leur surface. Les taux d'absorption d'humidité ont varié au fil du temps. L'échantillon de 0,5 cm² a progressivement augmenté de 1,28 % après une heure à 4,85 % après 23 heures, où il s'est stabilisé. L'échantillon de 1 cm² est passé de 1,91 % après une heure à 7,1 % après 23 heures. L'échantillon de 2 cm² a augmenté son absorption de 1,96 % à 21,27 % en 22 heures. L'échantillon de 3 cm² a montré les taux d'absorption les plus élevés, passant de 5,29 % après une heure à 31,91 % après 24 heures. Il est à noter que les échantillons plus petits (0,5 et 1 cm²) ont atteint un état stable après environ 7 heures, tandis que les échantillons plus grands (2 et 3 cm²) ont continué à absorber l'humidité même après 20 heures.

1-6-2- Réponse de l'absorption d'eau

ANOVA pour le modèle quadratique

Tableau 16 : Réponse ANOVA d'absorption de l'eau

Source	Somme des carrés	Df	Moyenne quadratique	Valeur F	Valeur p	
Modèle	33197.19	20	1659.86	15.59	< 0.0001	Significative
A-Quantité d'amidon	3530.74	1	3530.74	33.17	< 0.0001	
B-Quantité de plastifiant	13977.15	1	13977.15	131.32	< 0.0001	
C-HCl	548.96	1	548.96	5.16	0.0320	
D-Temps de chauffage	48.62	1	48.62	0.4567	0.5054	
E-Temps de séchage	104.70	1	104.70	0.9837	0.3308	
AB	455.18	1	455.18	4.28	0.0491	
AC	0.7656	1	0.7656	0.0072	0.9331	
AD	275.89	1	275.89	2.59	0.1200	
AE	2424.58	1	2424.58	22.78	< 0.0001	
BC	172.13	1	172.13	1.62	0.2152	
BD	29.70	1	29.70	0.2791	0.6020	

BE	12.64	1	12.64	0.1187	0.7333	
CD	716.63	1	716.63	6.73	0.0156	
CE	572.41	1	572.41	5.38	0.0289	
DE	52.06	1	52.06	0.4891	0.4908	
A²	1877.17	1	1877.17	17.64	0.0003	
B²	7636.70	1	7636.70	71.75	< 0.0001	
C²	1359.14	1	1359.14	12.77	0.0015	
D²	92.10	1	92.10	0.8653	0.3612	
E²	4093.27	1	4093.27	38.46	< 0.0001	
Résiduel	2660.98	25	106.44			
Manque d'ajustement	2660.98	20	133.05			
Erreur pure	0.0000	5	0.0000			
Cor Total	35858.17	45				

Source : résultats du traitement des données

La valeur F-value du modèle de 15,59 implique que le modèle est significatif. La probabilité qu'une valeur F aussi élevée soit obtenue en raison du bruit est de seulement 0,01 %.

Les valeurs p-value inférieures à 0,0500 indiquent que les termes du modèle sont significatifs. Dans ce cas, A, B, C, AB, AE, CD, CE, A², B², C² et E² sont des termes significatifs. Les valeurs supérieures à 0,1000 indiquent que les termes du modèle ne sont pas significatifs. Si le nombre de termes du modèle non significatifs est élevé (sans compter ceux nécessaires à la hiérarchisation), une réduction du modèle peut améliorer notre modèle.

2- Statistiques d'ajustement

Tableau 17 : Statistiques d'ajustement du modèle mathématique pour la réponse d'absorption de l'eau

Ecart-type	10.32	R²	0.9258
Signifier	35.91	R²ajusté	0.8664
C.V. %	28.73	R² prédit	0.7032
		Adeq Précision	13.7662

Selon le tableau 17, Le R² prédit de 0,7032 est en accord raisonnable avec le R² ajusté de 0,8664 ; autrement dit, la différence est inférieure à 0,2.

Adeq Précision mesure le rapport signal/bruit. Un rapport supérieur à 4 est souhaitable. Votre rapport de 13,766 indique un signal adéquat. Ce modèle peut être utilisé pour explorer l'espace de conception.

Équation finale en termes de facteurs codés

Absorption de l'eau =	+7.52
+14.85	A
-29.56	B
+5.86	C
-1.74	D
-2.56	E
+10.67	AB
+0.4375	AC
-8.30	AD
+24.62	AE
-6.56	BC
+2.72	BD
+1.78	BE
-13.38	CD
-11.96	CE
+3.61	DE
+14.67	A ²
+29.58	B ²
+12.48	C ²
+3.25	D ²
+21.66	E ²

L'équation en termes de facteurs codés permet de prédire la réponse pour des niveaux donnés de chaque facteur. Par défaut, les niveaux élevés des facteurs sont codés +1 et les niveaux faibles -1. L'équation codée permet d'identifier l'impact relatif des facteurs en comparant leurs coefficients.

Équation finale en termes de facteurs réels

Absorption de l'eau=	+368.50853
-25.62028	Quantité d'amidon
-42.92283	Volume de plastifiant
+13.80967	HCl
+0.116477	Temps de chauffage
-13.69124	Temps de séchage
+1.06675	quantité d'amidon * Volume de plastifiant
+0.036458	quantité d'amidon * HCl
-0.166100	quantité d'amidon * Temps de chauffage
+0.512917	quantité d'amidon * Temps de séchage
-0.874667	Volume de plastifiant * HCl
+0.087200	Volume de plastifiant * Temps de chauffage
+0.059250	Volume de plastifiant * Temps de séchage
-0.356933	HCl * Temps de chauffage
-0.332292	HCl * Temps de séchage
+0.024050	Temps de chauffage * Temps de séchage
+0.916628	quantité d'amidon ²
+4.73297	Volume de plastifiant ²
+1.38660	HCl ²
+0.020791	Temps de chauffage ²
+0.150395	Temps de séchage ²

L'équation en termes de facteurs réels peut être utilisée pour prédire la réponse pour des niveaux donnés de chaque facteur. Ici, les niveaux doivent être spécifiés dans les unités d'origine de chaque facteur. Cette équation ne doit pas être utilisée pour déterminer l'impact relatif de chaque facteur, car les coefficients sont mis à l'échelle pour tenir compte des unités de chaque facteur et l'ordonnée à l'origine n'est pas au centre de l'espace de conception.

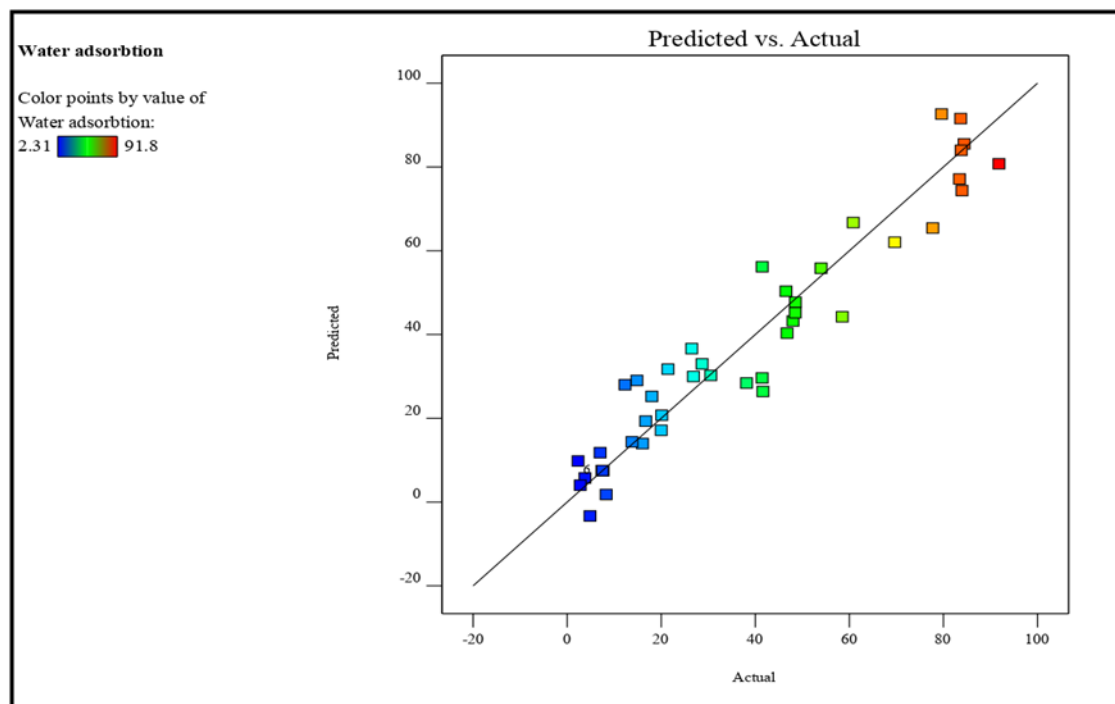


Figure 32 : Courbe des valeurs attendues et expérimentales de l'absorption de l'eau

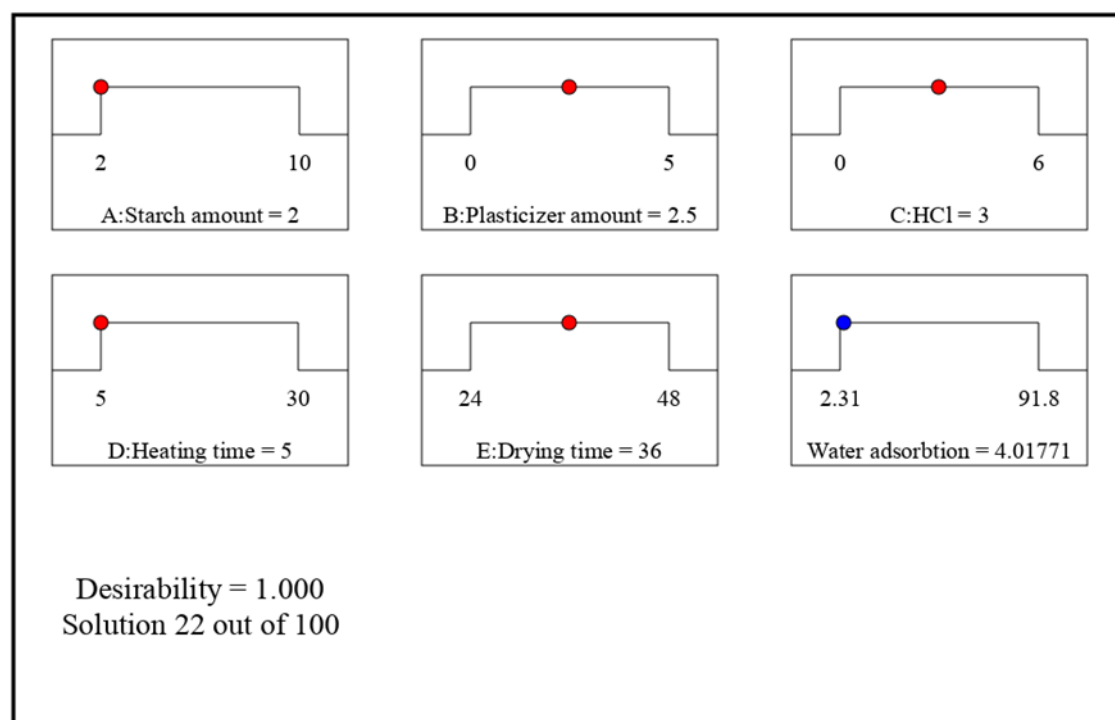


Figure 33 : Optimisation à l'aide de la fonction de désirabilité

1-6-3 Réponse de la solubilité dans l'eau

ANOVA pour le modèle quadratique

Tableau 18 : Réponse ANOVA de la solubilité dans l'eau

Source	Somme des carrés	Df	Moyenne quadratique	Valeur F	Valeur p	
Modèle	12897.91	20	644.90	13.13	< 0.0001	Significative
A-Quantité d'amidon	4374.50	1	4374.50	89.07	< 0.0001	
B-Quantité de plastifiant	5916.30	1	5916.30	120.47	< 0.0001	
C-HCl	11.07	1	11.07	0.2255	0.6390	
D-Temps de chauffage	12.91	1	12.91	0.2628	0.6127	
E-Temps de séchage	70.18	1	70.18	1.43	0.2431	
AB	21.95	1	21.95	0.4469	0.5099	
AC	27.30	1	27.30	0.5559	0.4629	
AD	3.55	1	3.55	0.0724	0.7902	
AE	7.87	1	7.87	0.1602	0.6924	
BC	1.38	1	1.38	0.0281	0.8682	
BD	0.8742	1	0.8742	0.0178	0.8949	
BE	189.89	1	189.89	3.87	0.0605	
CD	162.05	1	162.05	3.30	0.0813	
CE	404.61	1	404.61	8.24	0.0082	
DE	99.90	1	99.90	2.03	0.1662	
A²	335.75	1	335.75	6.84	0.0149	
B²	217.89	1	217.89	4.44	0.0454	
C²	8.41	1	8.41	0.1712	0.6825	
D²	113.84	1	113.84	2.32	0.1404	
E²	529.15	1	529.15	10.77	0.0030	
Résiduel	1227.79	25	49.11			
Manque d'ajustement	1227.79	20	61.39			
Erreur pure	0.0000	5	0.0000			
Cor Total	14125.70	45				

Source : résultats du traitement des données

Une valeur F-value du modèle de 13,13 implique que le modèle est significatif. La probabilité qu'une valeur F aussi élevée soit obtenue en raison du bruit est de seulement 0,01 %.

Une valeur p-value inférieure à 0,0500 indique que les termes du modèle sont significatifs. Dans ce cas, A, B, CE, A², B² et E² sont des termes significatifs. Une valeur supérieure à 0,1000 indique que les termes du modèle ne sont pas significatifs. Si le nombre de termes du modèle non significatifs est élevé (sans compter ceux nécessaires à la hiérarchisation), une réduction du modèle peut améliorer votre modèle.

Statistiques d'ajustement

Tableau 19 : Statistiques d'ajustement du modèle mathématique pour la réponse de la solubilité dans l'eau

Ecart-type	7.01	R²	0.9131
Signifier	42.32	R²ajusté	0.8435
C.V. %	16.56	R² prédit	0.6523
		Adeq Précision	15.1063

Selon le tableau 19, le R² prédit de 0,6523 est en accord raisonnable avec le R² ajusté de 0,8435 ; autrement dit, la différence est inférieure à 0,2.

Adeq Précision mesure le rapport signal/bruit. Un rapport supérieur à 4 est souhaitable. Votre rapport de 15,106 indique un signal adéquat. Ce modèle peut être utilisé pour explorer l'espace de conception.

Équation finale en termes de facteurs codés

Solubilité dans l'eau =	+40.11
-16.54	A
+19.23	B
-0.8319	C
-0.8981	D
+2.09	E
+2.34	AB
+2.61	AC
-0.9425	AD
-1.40	AE
+0.5875	BC

-0.4675	BD
+6.89	BE
+6.36	CD
-10.06	CE
+5.00	DE
+6.20	A ²
-5.00	B ²
+0.9817	C ²
-3.61	D ²
+7.79	E ²

L'équation en termes de facteurs codés permet de prédire la réponse pour des niveaux donnés de chaque facteur. Par défaut, les niveaux élevés des facteurs sont codés +1 et les niveaux faibles -1. L'équation codée permet d'identifier l'impact relatif des facteurs en comparant leurs coefficients.

Équation finale en termes de facteurs réels

Solubilité dans l'eau =	+133.90401
-8.64263	Quantité d'amidon
+2.04238	Volume de plastifiant
+4.65335	Volume de HCl
-0.820937	Temps de chauffage
-3.86257	Temps de séchage
+0.234250	Quantité d'amidon * Volume de plastifiant
+0.217708	Quantité d'amidon * Volume de HCl
-0.018850	Quantité d'amidon * Temps de chauffage
-0.029219	Quantité d'amidon * Temps de séchage
+0.078333	Volume de plastifiant * Volume de HCl
-0.014960	Volume de plastifiant * Temps de chauffage
+0.229667	Volume de plastifiant * Temps de séchage
+0.169733	Volume de HCl * Temps de chauffage
-0.279375	Volume de HCl * Temps de séchage
+0.033317	Temps de chauffage * Temps de séchage
+0.387656	Quantité d'amidon ²
-0.799467	Volume de plastifiant ²
+0.109074	Volume de HCl ²
-0.023115	Temps de chauffage ²
+0.054074	Temps de séchage ²

L'équation en termes de facteurs réels peut être utilisée pour prédire la réponse pour des niveaux donnés de chaque facteur. Ici, les niveaux doivent être spécifiés dans les unités d'origine de chaque facteur. Cette équation ne doit pas être utilisée pour déterminer l'impact relatif de chaque facteur, car les coefficients sont mis à l'échelle pour tenir compte des unités de chaque facteur et l'ordonnée à l'origine n'est pas au centre de l'espace de conception.

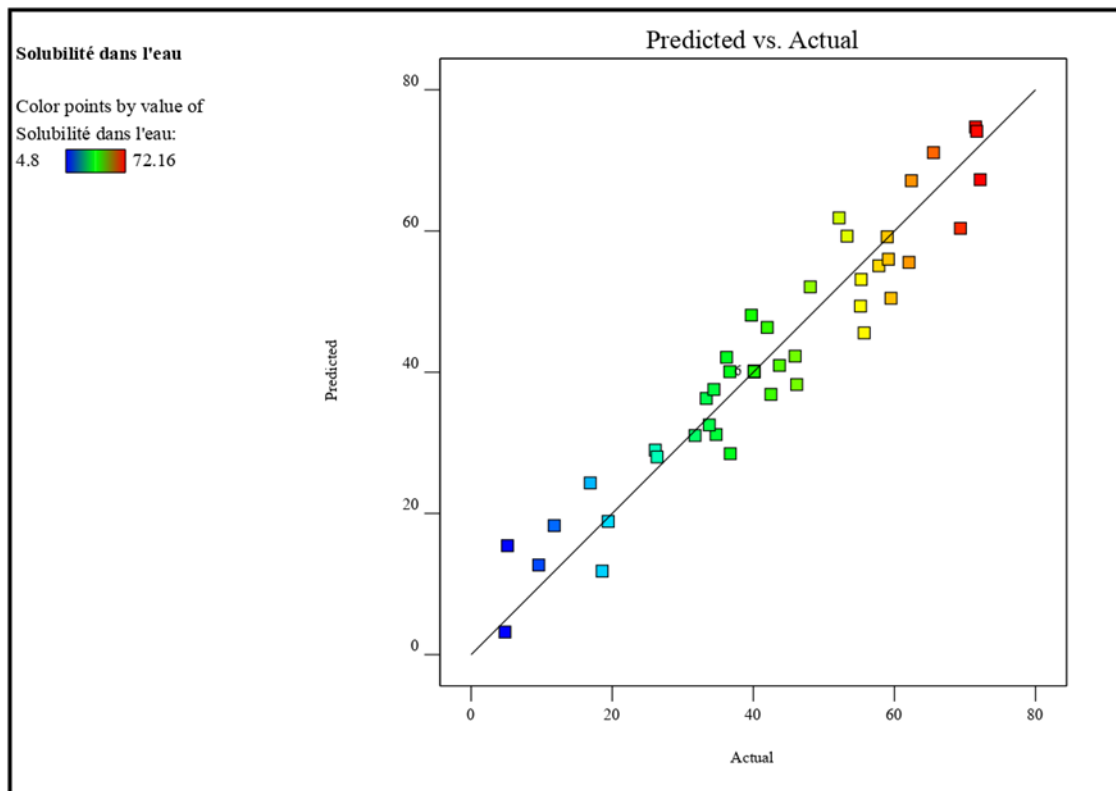


Figure 34 : Courbe des valeurs attendues et expérimentales du la solubilité dans l'eau

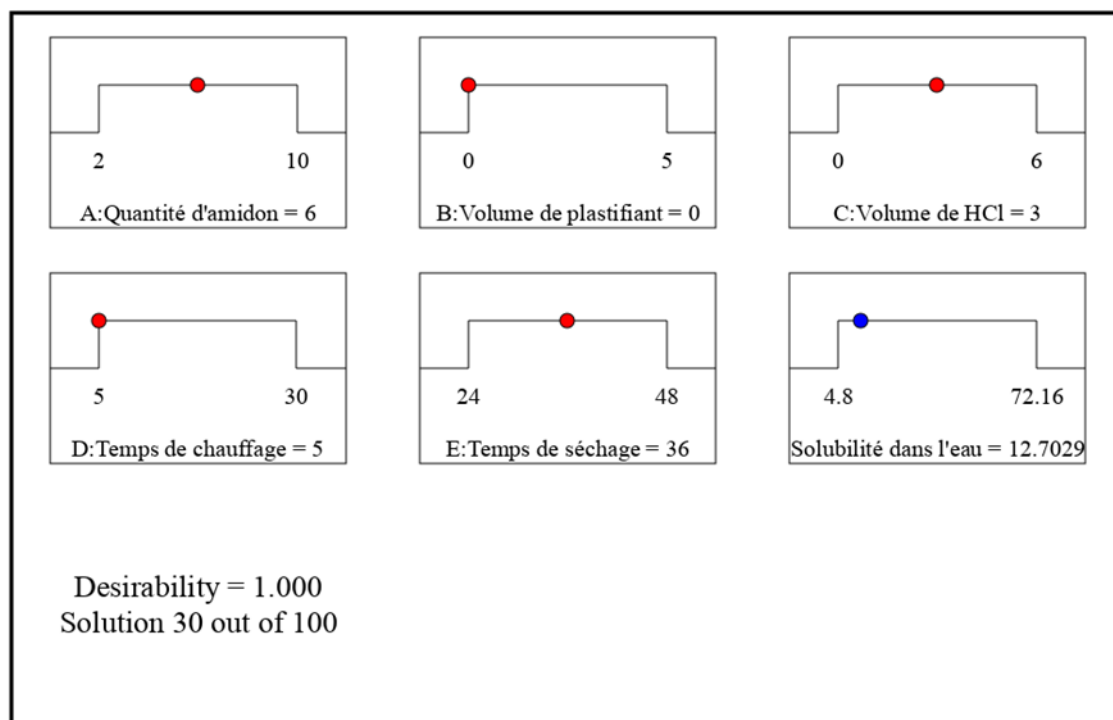


Figure 35 : Optimisation à l'aide de la fonction de désirabilité

1-6-4- Réponse de la solubilité dans l'alcool

ANOVA pour le modèle quadratique

Tableau 20 : Réponse ANOVA de la solubilité dans l'alcool

Source	Somme des carrés	Df	Moyenne quadratique	Valeur F	Valeur p	
Modèle	16390.13	20	819.51	18.23	< 0.0001	Significative
A-Quantité d'amidon	7420.53	1	7420.53	165.10	< 0.0001	
B-Volume du plastifiant	6299.60	1	6299.60	140.16	< 0.0001	
C-HCl	116.53	1	116.53	2.59	0.1199	
D-Temps de chauffage	54.98	1	54.98	1.22	0.2792	
E-Temps de séchage	15.23	1	15.23	0.3388	0.5657	
AB	203.78	1	203.78	4.53	0.0433	
AC	23.47	1	23.47	0.5223	0.4766	
AD	1.97	1	1.97	0.0439	0.8357	
AE	390.06	1	390.06	8.68	0.0069	
BC	104.45	1	104.45	2.32	0.1400	

BD	38.88	1	38.88	0.8649	0.3613	
BE	468.72	1	468.72	10.43	0.0035	
CD	84.27	1	84.27	1.87	0.1831	
CE	13.29	1	13.29	0.2956	0.5915	
DE	51.12	1	51.12	1.14	0.2964	
A²	572.68	1	572.68	12.74	0.0015	
B²	21.05	1	21.05	0.4684	0.5000	
C²	41.17	1	41.17	0.9159	0.3477	
D²	76.65	1	76.65	1.71	0.2035	
E²	92.62	1	92.62	2.06	0.1635	
Résidual	1123.63	25	44.95			
Manque d'ajustement	1123.63	20	56.18			
Erreur pure	0.0000	5	0.0000			
Cor Total	17513.77	45				

Source : Résultats du traitement des données

La valeur F-value du modèle de 18,23 implique que le modèle est significatif. La probabilité qu'une valeur F aussi élevée soit obtenue en raison du bruit est de seulement 0,01 %.

Les valeurs p-value inférieures à 0,0500 indiquent que les termes du modèle sont significatifs. Dans ce cas, A, B, AB, AE, BE et A² sont des termes significatifs. Les valeurs supérieures à 0,1000 indiquent que les termes du modèle ne sont pas significatifs. Si le nombre de termes du modèle non significatifs est élevé (sans compter ceux nécessaires à la hiérarchisation), une réduction du modèle peut améliorer notre modèle.

Statistiques d'ajustement

Tableau 21 : Statistiques d'ajustement du modèle mathématique pour la réponse de la solubilité dans l'alcool

Ecart-type	6.70	R²	0.9358
signifier	25.85	R²ajusté	0.8845
C.V. %	25.94	R²prédit	0.7434
		Adeq Précision	20.2036

Selon le tableau 21, le R² prédit de 0,7434 est en accord raisonnable avec le R² ajusté de 0,8845 ; autrement dit, la différence est inférieure à 0,2.

Adeq Précision mesure le rapport signal/bruit. Un rapport supérieur à 4 est souhaitable. Votre rapport de 20,204 indique un signal adéquat. Ce modèle peut être utilisé pour explorer l'espace de conception

Equation finale en termes des facteurs codés

Solubility on alcohol=	+25.41
-21.54	A
+19.84	B
-2.70	C
-1.85	D
-0.9756	E
-7.14	AB
-2.42	AC
+0.7025	AD
-9.88	AE
-5.11	BC
+3.12	BD
+10.83	BE
+4.59	CD
-1.82	CE
+3.57	DE
+8.10	A ²
+1.55	B ²
-2.17	C ²
-2.96	D ²
-3.26	E ²

L'équation en termes de facteurs codés permet de prédire la réponse pour des niveaux donnés de chaque facteur. Par défaut, les niveaux élevés des facteurs sont codés +1 et les niveaux faibles -1. L'équation codée permet d'identifier l'impact relatif des facteurs en comparant leurs coefficients.

Equation final en termes des facteurs actuels

Solubilité dans l'alcool=	+18.97230
-1.90900	Quantité d'amidon
-1.71480	Volume de plastifiant
+3.14342	Volume de HCl

-1.04337	Temps de chauffage
+1.61464	Temps de séchage
-0.713750	Quantité d'amidon * Volume de plastifiant
-0.201875	Quantité d'amidon * Volume de HCl
+0.014050	Quantité d'amidon * Temps de chauffage
-0.205729	Quantité d'amidon * Temps de séchage
-0.681333	Volume de plastifiant * Volume de HCl
+0.099760	Volume de plastifiant * Temps de chauffage
+0.360833	Volume de plastifiant * Temps de séchage
+0.122400	Volume de HCl * Temps de chauffage
-0.050625	Volume de HCl * Temps de séchage
+0.023833	Temps de chauffage * Temps de séchage
+0.506289	Quantité d'amidon ²
+0.248500	Volume de plastifiant ²
-0.241319	Volume de HCl ²
-0.018967	Temps de chauffage ²
-0.022623	Temps de séchage ²

L'équation en termes de facteurs réels peut être utilisée pour prédire la réponse pour des niveaux donnés de chaque facteur. Ici, les niveaux doivent être spécifiés dans les unités d'origine de chaque facteur. Cette équation ne doit pas être utilisée pour déterminer l'impact relatif de chaque facteur, car les coefficients sont mis à l'échelle pour tenir compte des unités de chaque facteur et l'ordonnée à l'origine n'est pas au centre de l'espace de conception.

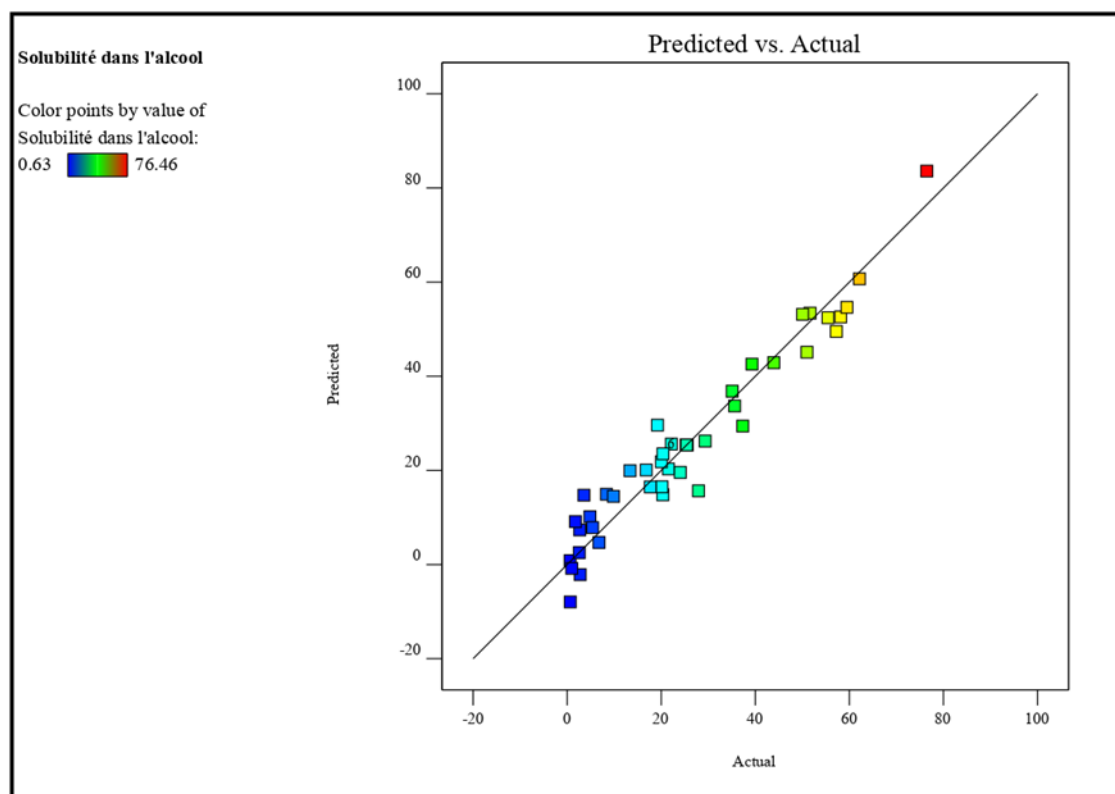


Figure 36 : Courbe des valeurs attendues et expérimentales du la solubilité dans l'alcool

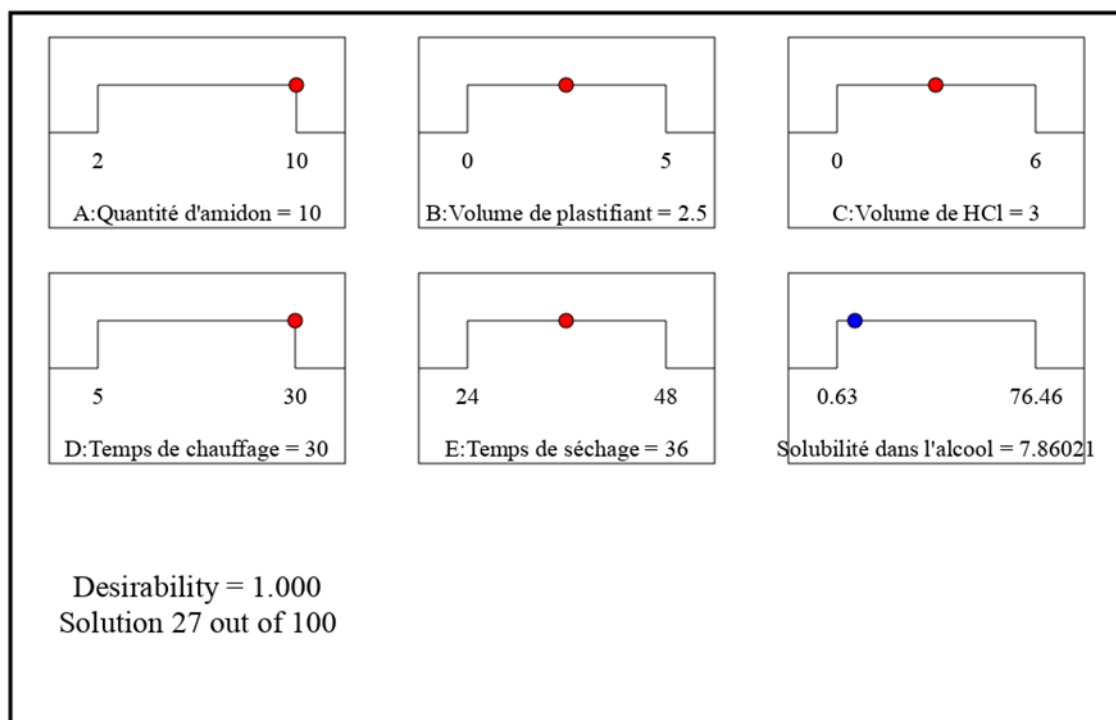


Figure 37 : Optimisation à l'aide de la fonction de désirabilité

1-6-5- Réponse de la masse totale

ANOVA pour le modèle quadratique

Tableau 22 : Réponse ANOVA de la masse totale

Source	Somme des carrés	Df	Moyenne quadratique	Valeur F	Valeur p	
Modèle	95.02	20	4.75	14.97	< 0.0001	Significative
A-Quantité d'amidon	55.43	1	55.43	174.67	< 0.0001	
B-Volume de plastifiant	24.80	1	24.80	78.14	< 0.0001	
C-Volume de HCl	0.0150	1	0.0150	0.0473	0.8296	
D-Temps de chauffage	4.76	1	4.76	15.01	0.0007	
E-Temps de séchage	0.8742	1	0.8742	2.75	0.1095	
AB	0.6652	1	0.6652	2.10	0.1601	
AC	0.9312	1	0.9312	2.93	0.0991	
AD	0.0812	1	0.0812	0.2559	0.6174	

AE	0.4032	1	0.4032	1.27	0.2704	
BC	0.0676	1	0.0676	0.2130	0.6484	
BD	0.0132	1	0.0132	0.0417	0.8399	
BE	0.0324	1	0.0324	0.1021	0.7520	
CD	0.1444	1	0.1444	0.4550	0.5062	
CE	0.1600	1	0.1600	0.5042	0.4842	
DE	0.0240	1	0.0240	0.0757	0.7855	
A²	0.7176	1	0.7176	2.26	0.1452	
B²	1.77	1	1.77	5.57	0.0264	
C²	0.7553	1	0.7553	2.38	0.1355	
D²	0.0256	1	0.0256	0.0808	0.7786	
E²	1.55	1	1.55	4.89	0.0364	
Résiduel	7.93	25	0.3174			
Manque d'ajustement	7.93	20	0.3967			
Erreur pure	0.0000	5	0.0000			
Cor Total	102.95	45				

Source : résultats du traitement des données

La valeur F-value du modèle de 14,97 implique que le modèle est significatif. La probabilité qu'une valeur F aussi élevée soit obtenue en raison du bruit est de seulement 0,01 %.

Les valeurs p-value inférieures à 0,0500 indiquent que les termes du modèle sont significatifs. Dans ce cas, A, B, D, B² et E² sont des termes significatifs. Les valeurs supérieures à 0,1000 indiquent que les termes du modèle ne sont pas significatifs. Si le nombre de termes du modèle non significatifs est élevé (sans compter ceux nécessaires à la hiérarchisation), une réduction du modèle peut améliorer votre modèle.

Statistique d'ajustement

Tableau 23 : Statistiques d'ajustement du modèle mathématique pour la réponse de la masse totale

Ecart-type	5.63	R²	0.9229
signifier	3.26	Ajusté R²	0.8613
C.V. %	17.27	Prédit R²	0.6917
		Adeq Précision	17.8602

Chapitre II : Résultats et Discussion

Selon le tableau 23, le R^2 prédit de 0,6917 est en accord raisonnable avec le R^2 ajusté de 0,8613 ; autrement dit, la différence est inférieure à 0,2.

Adeq Précision mesure le rapport signal/bruit. Un rapport supérieur à 4 est souhaitable. Votre rapport de 17,86 indique un signal adéquat. Ce modèle peut être utilisé pour explorer l'espace de conception.

Equation finale en termes des facteurs codés

Masse totale=	+3.23
+1.86	A
+1.24	B
+0.0306	C
-0.5456	D
-0.2338	E
+0.4078	AB
+0.4825	AC
-0.1425	AD
+0.3175	AE
-0.1300	BC
-0.0575	BD
+0.0900	BE
+0.1900	CD
-0.2000	CE
-0.0775	DE
-0.2867	A ²
+0.4499	B ²
+0.2942	C ²
+0.0542	D ²
-0.4216	E ²

L'équation en termes de facteurs codés permet de prédire la réponse pour des niveaux donnés de chaque facteur. Par défaut, les niveaux élevés des facteurs sont codés +1 et les niveaux faibles -1. L'équation codée permet d'identifier l'impact relatif des facteurs en comparant leurs coefficients.

Equation finale en termes des facteurs actuels

Masse totale=	-1.09707
+0.269563	Quantité d'amidon

-0.130450	Volume de plastifiant
-0.272503	Volume de HCl
-0.030689	Temps de chauffage
+0.169862	Temps de séchage
+0.040780	Quantité d'amidon * Volume de plastifiant
+0.040208	Quantité d'amidon * Volume de HCl
-0.002850	Quantité d'amidon * Temps de chauffage
+0.006615	Quantité d'amidon * Temps de séchage
-0.017333	Volume de plastifiant * Volume de HCl
-0.001840	Volume de plastifiant * Temps de chauffage
+0.003000	Volume de plastifiant * Temps de séchage
+0.005067	Volume de HCl * Temps de chauffage
-0.005556	Volume de HCl * Temps de séchage
-0.000517	Temps de chauffage * Temps de séchage
-0.017921	Quantité d'amidon ²
+0.071988	Volume de plastifiant ²
+0.032688	Volume de HCl ²
+0.000347	Temps de chauffage ²
-0.002928	Temps de séchage ²

L'équation en termes de facteurs réels peut être utilisée pour prédire la réponse pour des niveaux donnés de chaque facteur. Ici, les niveaux doivent être spécifiés dans les unités d'origine de chaque facteur. Cette équation ne doit pas être utilisée pour déterminer l'impact relatif de chaque facteur, car les coefficients sont mis à l'échelle pour tenir compte des unités de chaque facteur et l'ordonnée à l'origine n'est pas au centre de l'espace de conception.

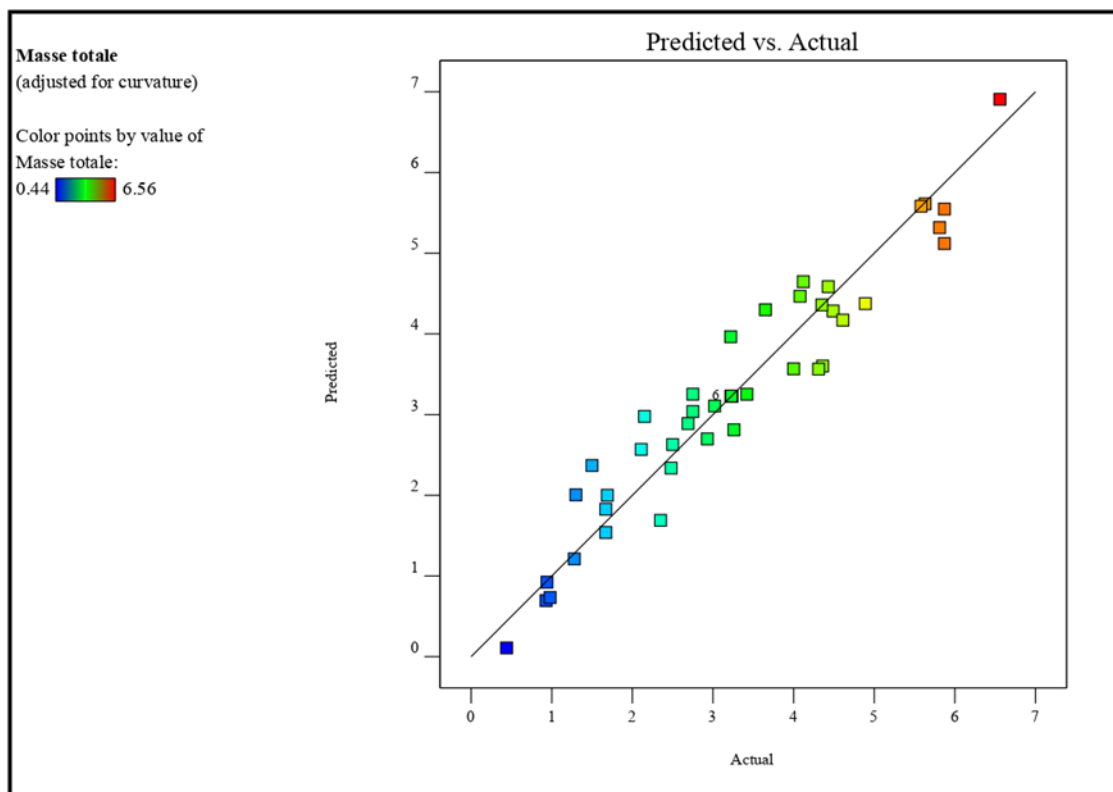


Figure 38 : Courbes des valeurs attendues et expérimentales du masse totale

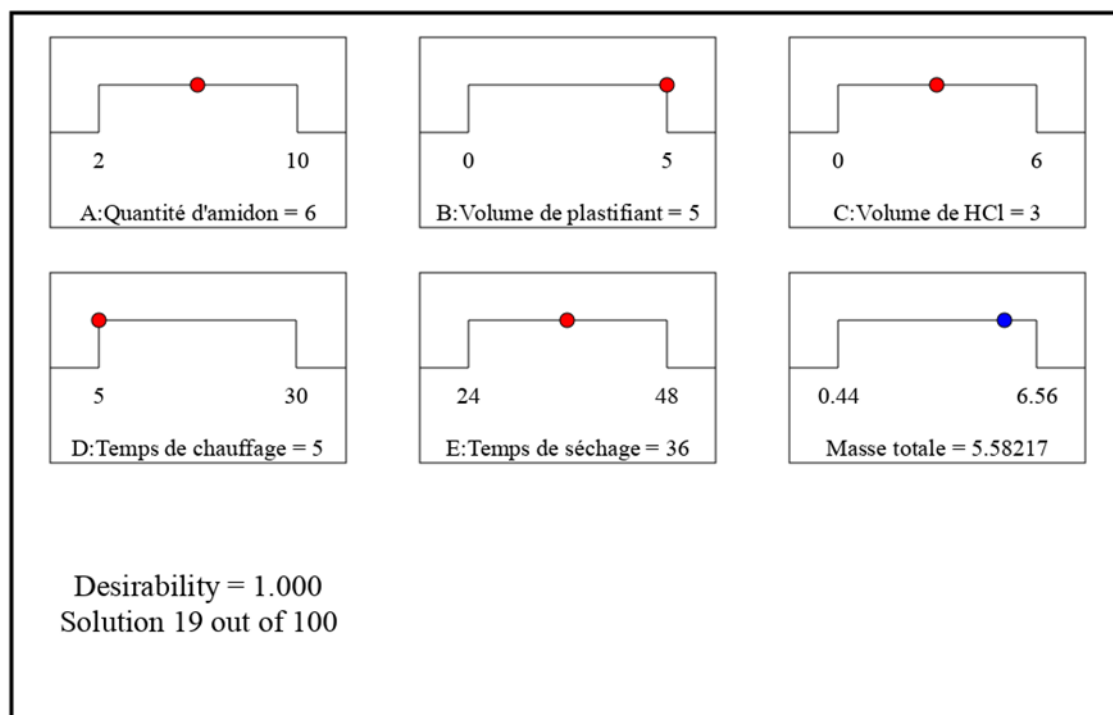


Figure 39 : Optimisation à l'aide du fonction de désirabilité

1-6-6- Réponse du rendement

ANOVA pour le modèle quadratique

Tableau 24 : Réponse ANOVA du rendement

Source	Somme des carrés	Df	Moyenne quadratique	Valeur F	Valeur p	
Modèle	11241.80	15	749.45	19.10	< 0.0001	Significative
A-Quantité d'amidon	1249.62	1	1249.62	31.85	< 0.0001	
B-Quantité de plastifiant	5886.73	1	5886.73	150.06	< 0.0001	
C-HCl	507.81	1	507.81	12.94	0.0011	
D-Temps de chauffage	1840.60	1	1840.60	46.92	< 0.0001	
E-Temps de séchage	38.14	1	38.14	0.9723	0.3320	
AB	265.69	1	265.69	6.77	0.0142	
AC	588.06	1	588.06	14.99	0.0005	
AD	119.90	1	119.90	3.06	0.0906	
AE	36.00	1	36.00	0.9177	0.3457	
BC	413.44	1	413.44	10.54	0.0029	
BD	43.34	1	43.34	1.10	0.3016	
BE	9.00	1	9.00	0.2294	0.6354	
CD	10.56	1	10.56	0.2693	0.6076	
CE	197.95	1	197.95	5.05	0.0322	
DE	34.95	1	34.95	0.8910	0.3527	
A²	1176.87	30	39.23			
B²	1176.87	25	47.07			
C²	0.0000	5	0.0000			
D²	12418.68	45				

Source : Résultats du traitement des données

La valeur F-value du modèle de 19,10 implique que le modèle est significatif. La probabilité qu'une valeur F aussi élevée soit obtenue en raison du bruit est de seulement 0,01 %.

Les valeurs p-value inférieures à 0,0500 indiquent que les termes du modèle sont significatifs. Dans ce cas, A, B, C, D, AB, AC, BC et CE sont des termes significatifs. Les valeurs supérieures à 0,1000 indiquent que les termes du modèle ne sont pas significatifs. Si le modèle comporte de nombreux termes non significatifs (sans compter

ceux nécessaires à la hiérarchisation), une réduction du modèle peut améliorer notre modèle

Statistique d'ajustement

Tableau 25 : Statistiques d'ajustement du modèle mathématique pour la réponse du rendement

Ecart-type	6.26	R²	0.9052
signifier	43.60	R² ajusté	0.8579
C.V. %	14.36	R² Prédit	0.7450
		Adeq Précision	16.9966

Selon le tableau 25, le R² prédit de 0,7450 concorde raisonnablement avec le R² ajusté de 0,8579 ; autrement dit, la différence est inférieure à 0,2.

Adeq Précision mesure le rapport signal/bruit. Un rapport supérieur à 4 est souhaitable. Un rapport de 16,997 indique un signal adéquat. Ce modèle peut être utilisé pour explorer l'espace de conception

Equation finale en termes des facteurs codés

Rendement=	+43.60
+8.84	A
-19.18	B
+5.63	C
+10.73	D
+1.54	E
+8.15	AB
-12.13	AC
-5.47	AD
+3.00	AE
+10.17	BC
+3.29	BD
-1.50	BE
+1.63	CD
+7.03	CE
-2.96	DE

L'équation en termes de facteurs codés permet de prédire la réponse pour des niveaux donnés de chaque facteur. Par défaut, les niveaux élevés des facteurs sont codés +1 et les niveaux faibles -1. L'équation codée permet d'identifier l'impact relatif des facteurs en comparant leurs coefficients

Equation finales en termes des facteurs actuels

Rendement=	+41.52568
+2.86937	Quantité d'amidon
-16.67250	Volume de plastifiant
-3.24151	Volume de HCl
+1.83118	Temps de chauffage
-0.362679	Temps de séchage
+0.815000	Quantité d'amidon * Volume de plastifiant
-1.01042	Quantité d'amidon * Volume de HCl
-0.109500	Quantité d'amidon * Temps de chauffage
+0.062500	Quantité d'amidon * Temps de séchage
+1.35556	Volume de plastifiant * Volume de HCl
+0.105333	Volume de plastifiant * Temps de chauffage
-0.050000	Volume de plastifiant * Temps de séchage
+0.043333	Volume de HCl * Temps de chauffage
+0.195408	Volume de HCl * Temps de séchage
-0.019707	Temps de chauffage * Temps de séchage

L'équation en termes de facteurs réels peut être utilisée pour prédire la réponse pour des niveaux donnés de chaque facteur. Ici, les niveaux doivent être spécifiés dans les unités d'origine de chaque facteur. Cette équation ne doit pas être utilisée pour déterminer l'impact relatif de chaque facteur, car les coefficients sont mis à l'échelle pour tenir compte des unités de chaque facteur et l'ordonnée à l'origine n'est pas au centre de l'espace de conception.

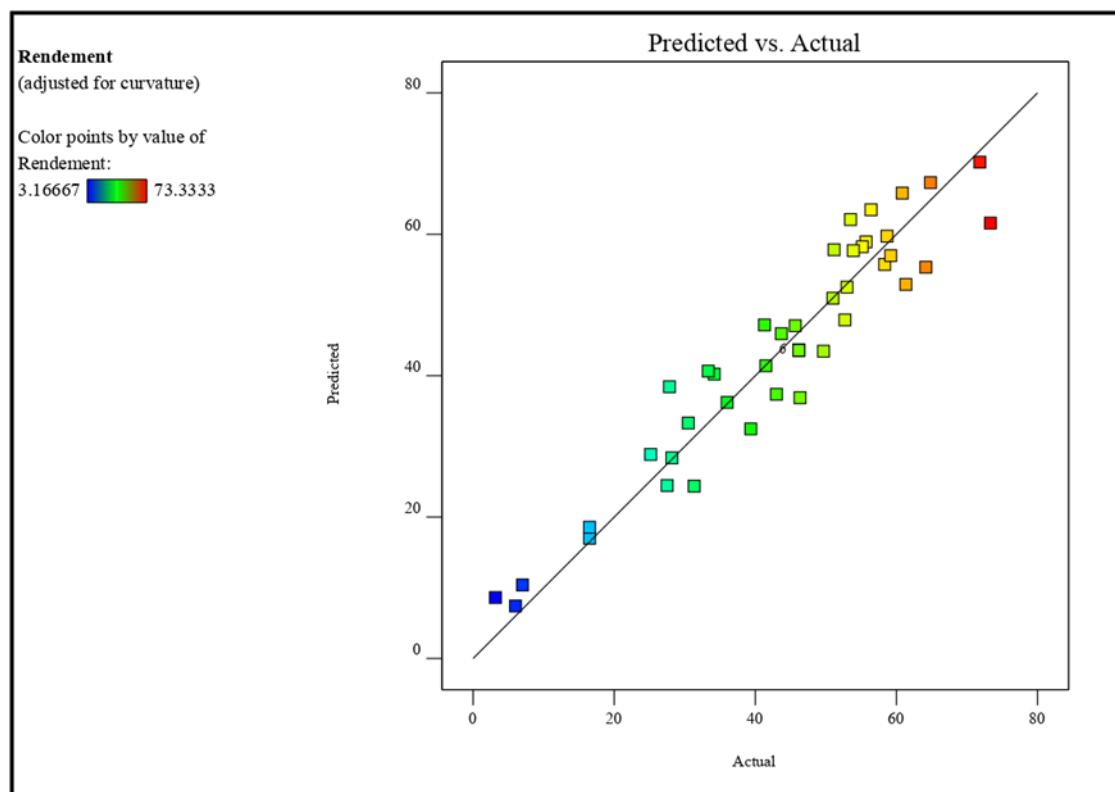


Figure 40 : Courbe des valeurs attendues et expérimentales du rendement

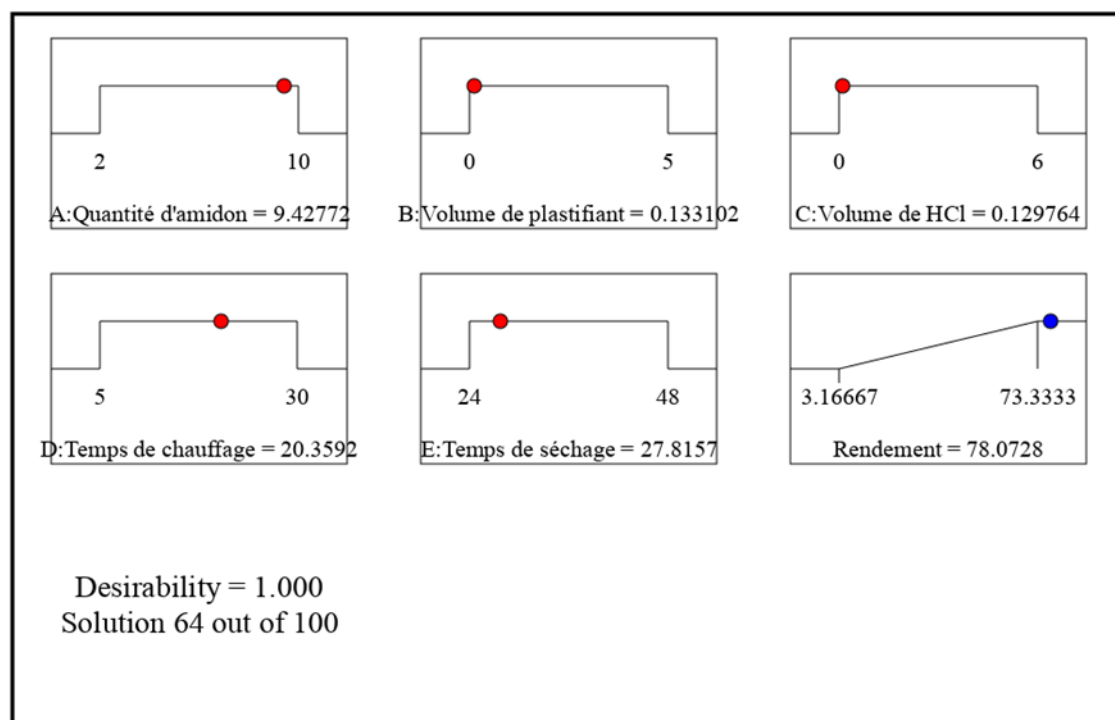


Figure 41 : Optimisation à l'aide de la fonction de désirabilité

1-7- Analyse biologique de bioplastique

Test de la biodégradation

Les bioplastiques à base d'amidon de patate douce, une catégorie de biopolymères, sont capables de se dégrader dans les sols ou les milieux naturels sous l'action de micro-organismes. Ce mécanisme transforme les polysaccharides en monomères plus simples. Les recherches actuelles visent à optimiser la biodégradabilité de ces bioplastiques, afin qu'ils se décomposent efficacement et en toute sécurité dans divers environnements, réduisant ainsi leur empreinte écologique.

Dans cette étude, nous avons appliqué le test de biodégradation à l'échantillon d'application d'humidité d'emballage alimentaire sélectionné (gel de silice) en utilisant le programme d'optimisation RSM dans les trois milieux de sol mentionnés précédemment.

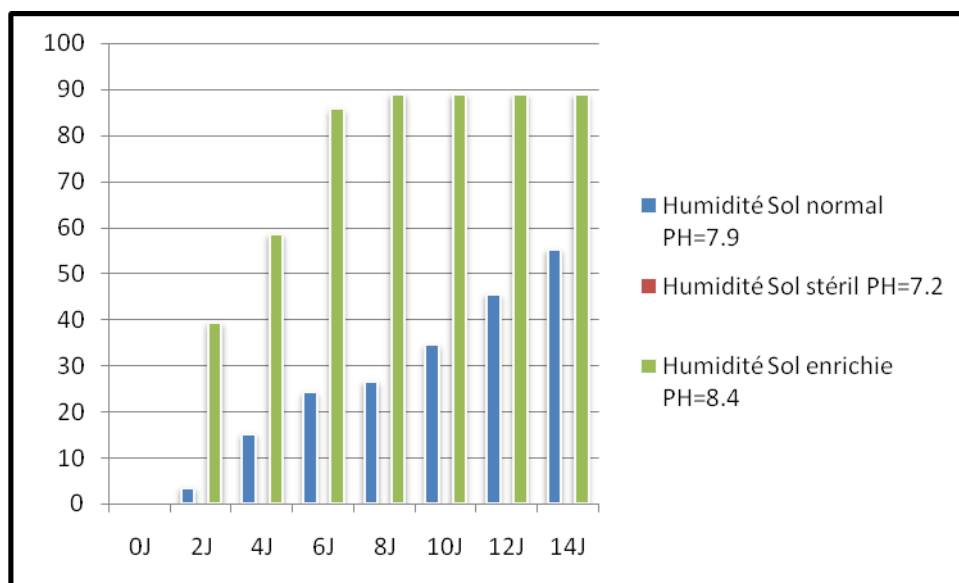


Figure 42 : Biodégradation d'échantillon d'application dans les trois types de sol

Le test de biodégradabilité sur plastique simple a été réalisé pendant 14 jours, avec enfouissement dans un sol naturel, un sol enrichi et un sol stérile (utilisé comme témoin)(Zounguran et al., 2020)." Les résultats de ces tests sont présentés dans la figure 42.

L'étude de la biodégradation du bioplastique à base d'amidon de patate douce révèle trois profils distincts selon le type de sol. Le sol stérilisé (pH 7,2) n'a montré aucune biodégradation, confirmant le rôle essentiel des micro-organismes. Le sol normal (pH 7,9) a montré une dégradation lente mais régulière, atteignant 55,17 % après 14 jours, ce qui suggère une activité microbienne naturelle mais limitée. En revanche, le sol enrichi (pH 8,4) a démontré une efficacité remarquable avec une dégradation très élevée dès le 2^e jour (39,29 %) et une biodégradation atteignant 89 % en seulement 8 jours, soulignant l'impact positif de l'enrichissement et d'un pH légèrement alcalin sur l'activité microbienne.

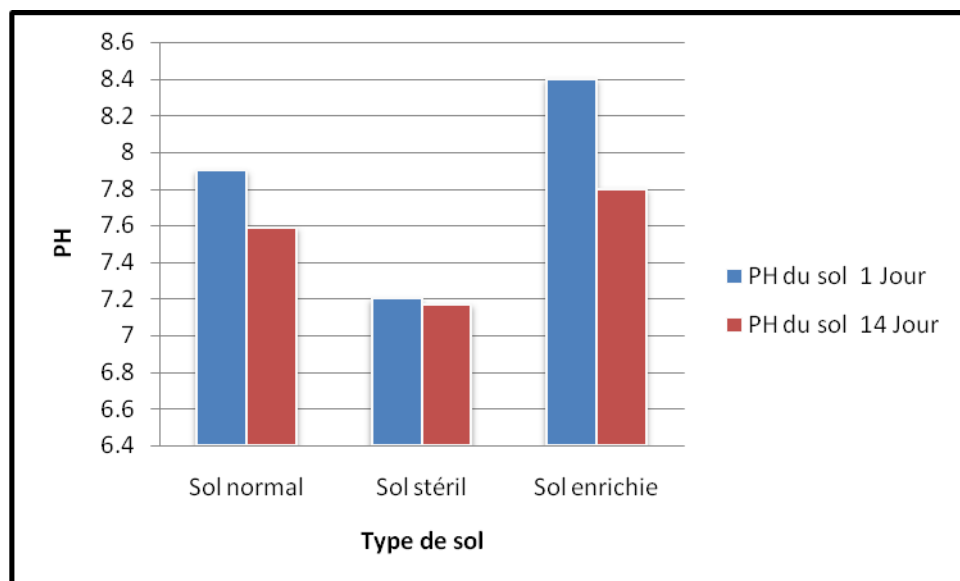


Figure 43 : Evolution du pH dans les trois types de sol lors de l'enfouissement de bioplastique

L'évolution du pH sur 14 jours montre des variations différenciées selon les types de sol. Le sol normal présente une diminution modérée de 7,9 à 7,59, tandis que le sol stérilisé conserve une stabilité remarquable de 7,2 à 7,17. Le sol enrichi enregistre la diminution la plus marquée, de 8,4 à 7,8. Ces mesures révèlent une acidification relative dans tous les systèmes, plus prononcée dans le sol enrichi, tout en préservant la hiérarchie initiale des valeurs de pH entre les différents environnements. L'ampleur des variations semble proportionnelle à l'activité biologique initiale de chaque type de sol.

1-8- Caractérisations physico-chimiques

1-8-1- Analyse de Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier FRIT

Afin d'évaluer les principaux groupes et types spécifiques de composés qui ont évolué au cours de la préparation de plastique, une analyse d'échantillon FTIR a été réalisée.

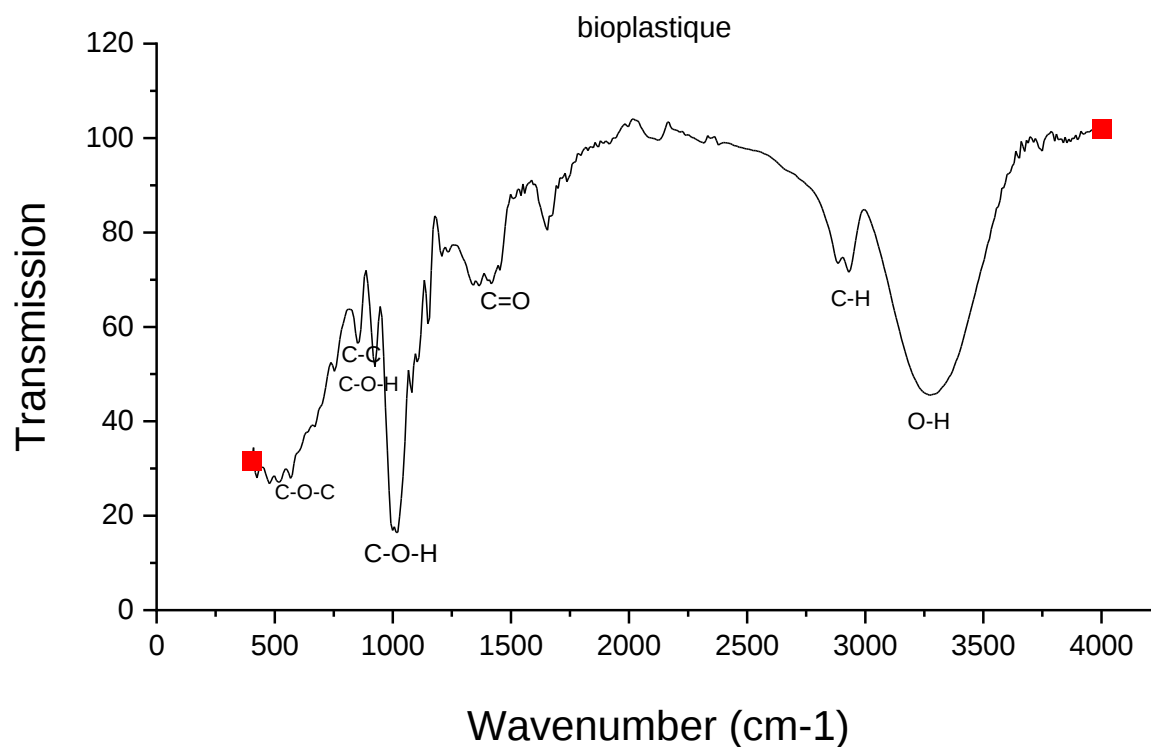


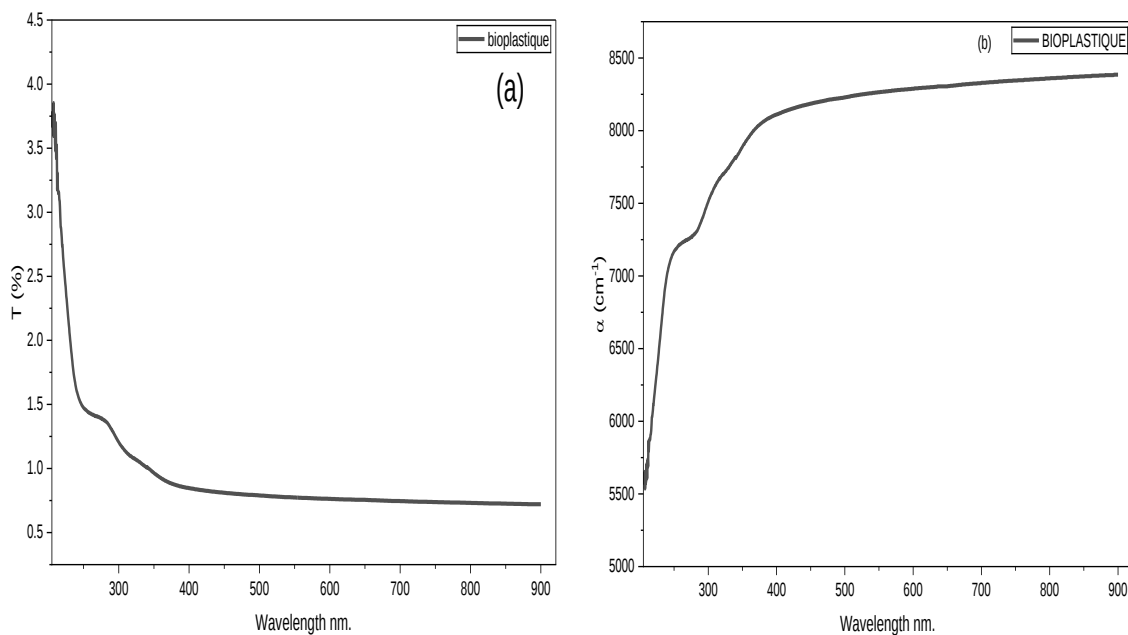
Figure 44 : Spectre FTIR du bioplastique

1-8-2- L'analyse d'UV-visible (Propriétés optiques)

L'analyse spectrophotométrique UV-Vis du bioplastique fabriqué à partir d'amidon de patate douce est présentée au moyen de trois graphiques détaillés (Figure 45). Le graphique (a) présente les spectres de réflectance et de transmission UV-visible, avec une forte baisse de la transmittance en dessous de 300 nm, indiquant une absorption UV effective du bioplastique dans les basses longueurs d'onde. La transmittance augmente ensuite progressivement aux longueurs d'onde plus élevées, notamment dans le visible, ce qui implique que le bioplastique laisse passer davantage de lumière visible. Le graphique (b) illustre la variation du coefficient d'absorption (α) avec la longueur d'onde, avec une forte augmentation en dessous de 400 nm, confirmant une forte absorption UV. À mesure que la longueur d'onde augmente, l'absorption se stabilise, indiquant une absorption moindre dans le visible. Le graphique (c) présente le tracé de

Tauc utilisé pour estimer la bande interdite optique (E_g) du bioplastique, qui est estimée à 1,91 eV (Figure 45). Cela suggère que le bioplastique présente des propriétés similaires à celles d'un semi-conducteur avec une absorption optique modérée. L'absorption UV prononcée et la bande interdite de 1,91 eV soulignent son potentiel pour des applications telles que le blindage UV, l'emballage ou d'autres utilisations où une protection UV ou une transmission sélective de la lumière est nécessaire.

L'absorption des UV est un facteur clé de la photodégradation. Toutefois, le bioplastique étudié y résiste justement parce qu'il n'absorbe pas ces rayonnements, ce qui le rend stable sous l'effet de la lumière, l'utilisation de bioplastiques en tant que barrière aux UV offre un avantage significatif pour l'emballage alimentaire, en protégeant le contenu des rayonnements nocifs (Princey, Nandhini, & Abinaya, 2020). La Figure 42 montre la spectrogramme UV de bioplastique.



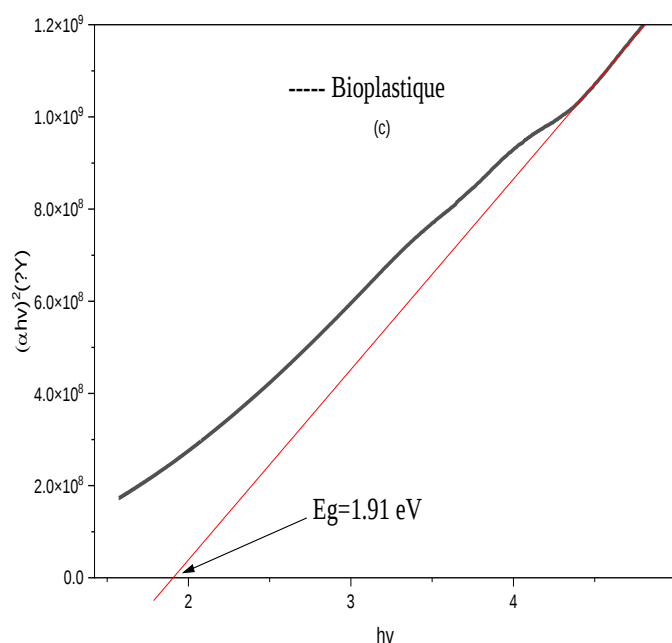


Figure 45 : Caractérisation spectrophotométrique UV-Vis bioplastique synthétisé, (a) Spectres de réflectance et de transmittance UV-visible du bioplastique, (b) Évolution du coefficient d'absorption (α) du bioplastique obtenu par l'amidon de patate douce, (c) Graphique « Tauc ».

Plusieurs conclusions clés peuvent être tirées de la caractérisation spectrophotométrique UV-Vis du bioplastique fabriqué à partir d'amidon de patate douce.

1. Forte absorption UV : Le bioplastique présente une baisse significative de sa transmittance en dessous de 300 nm, ce qui signifie qu'il absorbe efficacement les rayons UV dans les gammes UV-B et UV-C. Cela indique que le bioplastique pourrait servir de matériau protecteur pour la protection UV, contribuant ainsi à prévenir les dommages causés par les UV ou à protéger les surfaces et matériaux sensibles.
2. Transparence dans le visible : Au-delà de 300 nm, la transmittance augmente progressivement, indiquant que le bioplastique laisse passer la lumière visible. Cette caractéristique pourrait le rendre adapté aux applications nécessitant de la transparence, telles que les films d'emballage ou les revêtements, tout en offrant une certaine protection UV.

3. L'analyse du tracé de Tauc indique une bande interdite optique de 1,91 eV, classant le bioplastique comme semi-conducteur. Cette bande interdite modérée implique que le bioplastique possède certaines caractéristiques électroniques et optiques qui pourraient être avantageuses pour des applications telles que l'énergie solaire ou les dispositifs de modulation de la lumière, qui nécessitent un équilibre entre absorption et transmission lumineuses.

4. Potentiel d'utilisations multifonctionnelles : Grâce à ses propriétés d'absorption des UV et à sa bande interdite modérée, ce bioplastique pourrait être utilisé dans diverses applications. Il pourrait être utilisé pour les revêtements de protection UV, les emballages biodégradables ou d'autres applications nécessitant une combinaison de transparence, d'absorption de la lumière et de protection UV.

II- Discussion

1- Rendements d'extraction d'amidon

Chimiquement parlant, l'amidon est un polysaccharide H. Il est constitué de chaînes de molécules de monosaccharide (sucre) (glucose) reliées par des liaisons $\alpha 1-4$ et/ou $\alpha 1-6$ (Bojarczuk, Skapska, Khaneghah, & Marszałek, 2022; DeMartino & Cockburn, 2020). Les patates douces sont une culture vivrière riche en nutriments, avec une forte teneur en amidon dans les premières pousses et les plus grandes, ce qui en fait une source potentielle d'éthanol (K. Zhang et al., 2016).

Les résultats obtenus avec les trois milieux (neutre, alcalin et acide) de tubercule de patate douce cultivés au Souf ont montré des différences significatives entre les milieux alcalins non biaisés et les milieux alcalins-acides. Il existe une différence notable entre les milieux neutres et acides ; les patates douces nécessitent un pH de 5,5 à 6,5 (sols neutres), mais les rendements sont acceptables dans les sols plus alcalins (jusqu'à pH 7,5) ou acides (jusqu'à pH 4,5) (Adabe et al., 2019; Morim de Lima, 2023).

Une étude de 19 variétés de patates douces menée par (Vithu, Dash, Rayaguru, Panda, & Nedunchezhiyan, 2020), ont constaté que le rendement en amidon variait entre 12,9 % et

22,8 % pendant la saison sèche et entre 10,3 % et 21,3 % pendant la saison des pluies. De plus, une autre étude portant sur certaines variétés de patates douces a révélé une teneur en amidon de 17 % (Ho & Noomhorm, 2011).

La stabilité de l'amidon natif varie défavorablement avec le pH et la température. Par exemple, les granules d'amidon natif sont insolubles dans l'eau à température ambiante et très résistants à l'hydrolyse par les amylases, Cela conduit à une fonctionnalité limitée (Egharevba, 2020). La structure des chaînes d'amidon en milieu aqueux est influencée par le pH du milieu. Les acides et les bases, notamment ceux à pH 5 et 10, peuvent également endommager les chaînes d'amidon. L'amylose est plus sensible à la dégradation des chaînes que l'amylopectine, notamment en milieu alcalin (pH 9, par exemple), ce qui favorise la dissociation des chaînes en solution, notamment pour l'amylose (Lee, Han, & Lim, 2009).

2- Performance de bioplastique

L'amidon gélatinisé perd sa structure cristalline. Après refroidissement, il forme un gel opaque, initialement souple, puis solide (bioplastique). Cette étape finale de production de bioplastique concorde avec d'autres résultats de recherche sur la polymérisation de l'amidon (Agarwal, Singhal, Godiya, & Kumar, 2023). Dans cette étude, les rendements en bioplastique des trois milieux ont montré une différence très significative. Nous avons constaté que la composition chimique de l'amidon n'était pas identique dans les trois milieux. Toutes les études que nous avons consultées ciblaient principalement des procédés biochimiques et non industriels pour calculer les rendements et les propriétés physiques et chimiques des bioplastiques (Alia et al., 2019; Gamage et al., 2022).

3- Etude d'humidité

3-1- Effet des facteurs indépendants sur l'absorption d'humidité

a- Effet de l'amidon

Selon (Ghasemlou et al., 2013), pour les emballages en bioplastique, une barrière efficace à la vapeur d'eau est essentielle. Elle permet de minimiser les transferts d'humidité et de

préserver la fraîcheur des aliments le plus longtemps possible. La capacité d'un emballage à bloquer l'humidité est essentielle pour prolonger la durée de conservation des aliments(Dehghani, Hosseini, & Regenstein, 2018).

Cela est dû au fait que les produits frais nécessitent une perméabilité à la vapeur d'eau optimisée, permettant les échanges gazeux essentiels à leur respiration tout en limitant la déshydratation(H. Zhou, 2016).

D'après (López & García, 2012), le glycérol perturbe la liaison des chaînes polymères, ce qui réduit la rigidité du réseau. Par conséquent, une structure de film moins structurée et dense se forme, diminuant ainsi la WVP. Ce qui a été confirmé par des études de (Santana et al., 2018).

b- Effet de plastifiant

(Ballesteros-Mártinez, Pérez-Cervera, & Andrade-Pizarro, 2020; Geleta, Habtegebreil, & Tolesa, 2020; Sanyang, Sapuan, Jawaid, Ishak, & Sahari, 2016a)On a tous observé une augmentation similaire du taux de diffusion de la vapeur d'eau à mesure que la teneur en plastifiant s'accroissait dans les bioplastiques produits à partir d'amidon d'ensète, d'amidon de patate douce et d'amidon de palmier à sucre, respectivement. Cette constatation pourrait être due au fait que l'accroissement de la concentration du plastifiant rendait les chaînes de polymères d'amidon plus mobiles et flexibles, ce qui conduisait à une structure plus relâchée et une interaction moléculaire amidon-amidon réduite. Selon (Bilck et al., 2015), qui ont analysé la quantité de plastifiant glycérol dans les films fabriqués à partir d'amidon de manioc. Ils ont constaté qu'une augmentation de la quantité de glycérol intégrée au film a conduit à un taux plus élevé de transmission de vapeur d'eau. Les chercheurs ont indiqué que le glycérol changeait la configuration du polymère et amplifiait sa mobilité moléculaire, ce qui favorisait la diffusion de l'eau.

Les bioplastiques plastifiés ont démontré une supérieure capacité à transmettre de la vapeur d'eau comparée au film d'amidon pur, ce qui peut être dû aux caractéristiques hygroscopiques des plastifiants(Lau, Kiew, Tan, Lam, & Yeoh, 2023). D'après (Isotton, Bernardo, Baldasso, Rosa, & Zeni, 2015), L'inclusion de groupes hydroxyles dans les

plastifiants a favorisé une meilleure solubilité et des caractéristiques hygroscopiques des films, associées à leur affinité pour l'eau. Cela a conduit à une augmentation de la perméabilité à l'eau dans les films bioplastiques.

c- Effet d'acide

Selon (Pooja & Shashank, 2024), Les films traités à l'acide citrique avaient le niveau d'humidité le plus bas comparé aux différents films modifiés. La présence d'acide citrique dans la structure de l'amidon pourrait diminuer la disponibilité des groupes hydroxyles, qui sont à l'origine de l'absorption de l'humidité. Cette faible teneur en humidité est avantageuse pour les bioplastiques puisqu'elle peut renforcer leur stabilité dimensionnelle et diminuer le risque de développement microbien. Ces constatations sont en accord avec des recherches précédentes qui ont signalé des tendances comparables pour les films d'amidon modifiés chimiquement(Chakraborty et al., 2022).

4- Effet de la surface sur l'absorption d'humidité

L'augmentation de la surface du bioplastique signifie une augmentation du volume de matières premières utilisées dans sa préparation, et d'après (Santana et al., 2018)La perméabilité à la vapeur d'eau (WVP) des films a augmenté proportionnellement aux concentrations d'amidon et de glycérol.

La microstructure du film, elle-même dictée par sa composition chimique, son degré de cristallinité et la nature du plastifiant, est le facteur clé influençant les mécanismes d'adsorption, de diffusion et de désorption de l'eau(Garcia-Hernandez, Vernon-Carter, & Alvarez-Ramirez, 2017). Par conséquent, la hausse de la PVE mesurée est une conséquence directe de l'hydrophile des constituants du film. De plus, l'interaction du plastifiant avec les chaînes d'amidon produit une matrice polymère plus mobile, conduisant à une augmentation de la perméabilité à l'eau(Santana et al., 2018).

2- Analyse biologique de bioplastique

L'enfouissement en sol normal et en sol enrichie (Fig. 16) a mis en évidence le rôle prédominant des micro-organismes dans le processus de dégradation. En effet, une

diminution du pH du sol normal après enfouissement a été observée pendant la période d'enfouissement (14 jours)(Zoungranan et al., 2020).

Le processus de biodégradation que subissent les bioplastiques est démontré par cette diminution du pH pendant la période d'enfouissement. En effet, les micro-organismes consomment le plastique pour produire ses principaux sous-produits de dégradation : du dioxyde de carbone (CO_2) et de l'eau (H_2O)(Lucas et al., 2008).

Les résultats indiquent que la biodégradation est favorisée par l'enrichissement du sol en micro-organismes, avec un rendement maximal de 89 % pour le bioplastique à base d'amidon de patate douce. La diminution au-delà de ce seuil, pour s'établir à 87,8 %, trouve une explication plausible dans l'augmentation de la densité de population microbienne. Une concentration trop élevée de micro-organismes est susceptible d'affecter leur mobilité et d'engendrer des interactions mutuelles compétitives, restreignant leur capacité à coloniser la surface des bioplastiques(Zoungranan et al., 2020).

Contrairement aux observations (Emadian et al., 2017), qui ont démontré qu'une augmentation de la diversité microbienne améliorerait la biodégradabilité, cette étude suggère qu'un enrichissement quantitatif sans diversification qualitative pourrait être à l'origine des taux limites observés.

3- Caractérisation physicochimiques

3-6- Analyse de FTIR

Les bandes de transmission en spectroscopie IR sont illustrées dans le figure, Le pic observé à $3272,60\text{ cm}^{-1}$ correspond à la vibration d'étirement O-H de l'amidon(Ismail et al., 2016; Safwani & Riza, 2018; Wu, 2011), Un pic caractéristique de la vibration d'étirement C-H est détecté à $2929,68\text{ cm}^{-1}$ (Ding, Zhu, & Gao, 2012; Diyana et al., 2021; Ismail et al., 2016),L'absorption à $1654,93\text{ cm}^{-1}$ révèle la présence d'eau adsorbée dans la phase amorphe de l'amidon(Kizil, Irudayaraj, & Seetharaman, 2002).

Le pic à $1416,38\text{ cm}^{-1}$ confirme la présence du groupe C=O par vibration d'étirement, alors que le signal à $1013,83\text{ cm}^{-1}$ caractérise le groupe C-O-H(Ashok, Abhijith, & Rejeesh, 2018; Chang et al., 2010), Les pics à $924,37$, $857,28$ et $566,55\text{ cm}^{-1}$ caractérisent les

vibrations du cycle pyranose des unités glucose de l'amidon(Cui, Phillips, Blackwell, & Nikiforuk, 2007; Jeddou et al., 2016).

3-7- Spectre UV-visible

Les résultats du spectre UV-visible montrent une augmentation de la transparence du bioplastique dans la gamme de longueurs d'onde de 250 à 400 nm, tandis que la transmittance reste stable sur le reste du spectre. Ce comportement est attribuable à la dégradation photo-oxydative du bioplastique à base d'amidon de patate douce, le rendant ainsi adapté aux applications d'emballage et de protection alimentaires. Ce résultat est cohérent avec les travaux de (Yang et al., 2023) qui a préparé un bioplastique à partir d'amidon de manioc.

Conclusion et Perspectives

Conclusion

Le présent travail de recherche doctoral a été consacré à l'élaboration et à l'étude systématique d'un film de bioplastique biodégradable. Le matériau de base est un biopolymère naturel, l'amidon, isolé à partir de tubercules de patate douce (*Ipomoea batatas* Lam, 1793) cultivés selon des pratiques biologiques dans la région d'El Oued (Algérie). La stratégie expérimentale a reposé sur une approche intégrée, maîtrisant l'ensemble de la chaîne de valeur, depuis l'extraction et la sélection de la matière première amyliacée jusqu'à la caractérisation multi-échelle du matériau fini, en passant par l'optimisation raisonnée de sa formulation.

La démarche expérimentale a débuté par la phase fondamentale d'extraction de l'amidon, où l'influence du pH du milieu d'extraction a été systématiquement évaluée. Les résultats quantitatifs ont révélé des rendements d'extraction significativement distincts selon le pH : le milieu neutre a présenté le rendement le plus élevé avec une moyenne de 7,67 g d'amidon pour 50 g de tubercule, surpassant nettement les rendements obtenus en milieu basique (6,57 g) et acide (5,83 g). Cette disparité s'explique par des considérations structurales fondamentales : le pH neutre préserve l'intégrité physico-chimique des granules d'amidon, limitant leur hydrolyse et leur solubilisation. À l'inverse, les milieux acide et basique induisent une dépolymérisation partielle des chaînes polysaccharidiques (amylose et amylopectine), conduisant à une fragmentation des granules et, par conséquent, à des pertes accrues lors des étapes de purification et de centrifugation. Sur la base de ces résultats concluants, l'amidon extrait en milieu neutre, optimal tant en termes de rendement que de préservation structurale, a donc été retenu comme matière première de référence.

Dans une seconde phase cruciale, l'optimisation systématique des propriétés du bioplastique a été entreprise grâce à l'implémentation rigoureuse d'une Méthodologie de Surface de Réponse (RSM), suivant un plan expérimental de Box-Behnken. Cette approche a permis d'étudier simultanément l'influence de cinq facteurs indépendants critiques - la concentration d'amidon, la teneur en plastifiant (glycérol), le volume d'acide chlorhydrique, la durée de chauffage et le temps de séchage - sur les réponses cibles que sont l'absorption d'eau, la solubilité aqueuse, la solubilité alcoolique, l'humidité et le

rendement. L'analyse statistique (ANOVA) des modèles polynomiaux du second degré générés a révélé une adéquation hautement significative, comme en attestent les coefficients de détermination (R^2) systématiquement supérieurs à 0,90. Ces valeurs démontrent non seulement la robustesse des modèles, mais aussi leur capacité prédictive exceptionnelle, expliquant plus de 90% de la variabilité des réponses. Le recours à l'optimisation multi-objectifs par la fonction de désirabilité a permis de résoudre les antagonismes entre les différentes propriétés et d'identifier des conditions opératoires optimales spécifiques. Particulièrement remarquable fut l'optimisation de l'absorption d'humidité, où le modèle a prédit un taux de 82,51%.

L'évaluation du comportement environnemental du bioplastique par des tests de biodégradation en conditions contrôlées a livré des résultats particulièrement probants, permettant d'établir son profil éco-compatible. Le protocole expérimental, basé sur l'enfouissement dans trois matrices pédologiques distinctes, a révélé des cinétiques de dégradation contrastées. De manière significative, l'absence totale de dégradation observée dans le sol stérilisé a fourni la preuve incontestable du caractère biotique du processus, confirmant le rôle essentiel des micro-organismes comme acteurs principaux de la décomposition.

Les résultats quantitatifs ont démontré une efficacité de biodégradation exceptionnelle en sol enrichi en compost, avec un taux record de 89% atteint après seulement 8 jours d'incubation. Cette performance remarquable contraste fortement avec la cinétique plus modérée observée en sol standard, qui n'a atteint que 55% de dégradation après 14 jours. La corrélation établie entre cette biodégradation accélérée et l'acidification significative du milieu enrichi - matérialisée par une baisse du pH de 8,4 à 7,8 - fournit un indicateur métabolique robuste. Cette acidification témoigne d'une activité métabolique microbienne intense, avec production d'acides organiques comme sous-produits de la dépolymérisation enzymatique de la matrice amylacée.

La caractérisation approfondie des films optimisés a mis en évidence des propriétés structurales et fonctionnelles remarquables, confirmant la qualité du matériau développé. L'analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) a validé la structure chimique du bioplastique grâce à l'identification des pics vibrationnels

caractéristiques : la bande large à 3272 cm^{-1} attribuée aux liaisons hydroxyle (O-H) indique la présence de groupements hydroxyles libres, essentiels pour les propriétés hydrophiles. Le pic à 2929 cm^{-1} correspond aux vibrations d'élongation des liaisons C-H des groupements méthylène, tandis que le signal à 1013 cm^{-1} caractérise les liaisons C-O-C du squelette glycosidique de l'amidon. Ces signatures spectrales confirment non seulement la présence de l'amidon mais aussi son interaction avec le plastifiant, formant une matrice polymère cohérente.

En synthèse, cette thèse a démontré de manière convaincante la faisabilité de produire un bioplastique aux propriétés contrôlées à partir d'une ressource agricole locale et renouvelable. La méthodologie rigoureuse employée, alliant l'optimisation systématique par la Méthodologie de Surface de Réponse et une caractérisation multidisciplinaire approfondie, a permis d'élucider les relations structure-propriétés du matériau développé. Les performances environnementales exceptionnelles, notamment une biodégradabilité avérée atteignant 89% en seulement 8 jours en conditions favorables, confèrent à ce bioplastique un profil écologique vertueux et une réelle alternative aux plastiques conventionnels.

Perspective futures

Les résultats prometteurs obtenus dans cette thèse ouvrent plusieurs voies de recherche futures pour approfondir et valoriser ces travaux.

- ✓ Une validation complète du potentiel applicatif des produits via une caractérisation systématique de leurs propriétés physico-chimiques (ex: DRX), morphologiques (ex: MEB) et mécaniques, permettant d'étudier tous les côtés des échantillons
- ✓ Développement des propriétés mécaniques et barrières du bioplastique :
 - Investigation de nouveaux additifs naturels (nanocellulose, charges minérales) pour améliorer la résistance mécanique et les propriétés barrières
 - Développement de traitements de surface pour réduire l'hydrophilie du matériau

- ✓ Études environnementales approfondies :
 - Tests de biodégradation dans des conditions réelles (milieux marins, sols agricoles, compost industriel)
 - Étude de l'impact écologique des produits de dégradation sur les écosystèmes
- ✓ Développement applicatif et industrialisation
 - Diversification des applications : Exploiter les données concernant la solubilité aqueuse, la solubilité alcoolique et la cinétique d'absorption d'eau pour proposer de nouveaux débouchés. Ces applications seront définies en fonction de l'adéquation entre les propriétés mesurées et les contraintes imposées par le milieu d'utilisation (Emballages alimentaires, agriculture, dispositifs médicaux)
 - Étude de faisabilité technico-économique pour une production à plus grande échelle
- ✓ Valorisation de la ressource :
 - Exploration des déchets d'autres variétés de patate douce ou d'autres ressources amylacées locales
 - Optimisation de la chaîne de valeur depuis la culture jusqu'au produit fini

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abdul-Latif, A., Menouer, A., Baleh, R., & Deiab, I. (2021). Plastic response of open cell aluminum foams of highly uniform architecture under different quasi-static combined biaxial compression-torsion loading paths. *Materials Science and Engineering: B*, 266, 115051.
- Accinelli, C., Saccà, M. L., Mencarelli, M., & Vicari, A. (2012). Deterioration of bioplastic carrier bags in the environment and assessment of a new recycling alternative. *Chemosphere*, 89(2), 136-143.
- Adabe, K. E., Maïga, A., & Diendere, J. (2019). *Production et transformation de la patate douce*: ISF Cameroun.
- Afuape, S., Nwankwo, I., Omodamiro, R., Echendu, T., & Toure, A. (2014). Studies on some important consumer and processing traits for breeding sweet potato for varied end-uses. *American Journal of Experimental Agriculture*, 4(1), 114-124.
- Agarwal, S., Singhal, S., Godiya, C. B., & Kumar, S. (2023). Prospects and applications of starch based biopolymers. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 103(18), 6907-6926.
- Ahmed, F., Hossain, S., Hossain, S., Fakhruddin, A. N. M., Abdullah, A. T. M., Chowdhury, M. A. Z., & Gan, S. H. (2019). Impact of household air pollution on human health: source identification and systematic management approach. *SN Applied Sciences*, 1, 1-19.
- Ahmed, T., Shahid, M., Azeem, F., Rasul, I., Shah, A. A., Noman, M., . . . Muhammad, S. (2018). Biodegradation of plastics: current scenario and future prospects for environmental safety. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 7287-7298.
- Al-Salem, S., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste management*, 29(10), 2625-2643.
- Alabi, O. A., Ologbonjaye, K. I., Awosolu, O., & Alalade, O. E. (2019). Public and environmental health effects of plastic wastes disposal: a review. *J Toxicol Risk Assess*, 5(021), 1-13.

- Alcázar-Alay, S. C., & Meireles, M. A. A. (2015). Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources. *Food Science and Technology*, 35, 215-236.
- Ali, S. S., Elsamahy, T., Koutra, E., Kornaros, M., El-Sheekh, M., Abdelkarim, E. A., . . . Sun, J. (2021). Degradation of conventional plastic wastes in the environment: A review on current status of knowledge and future perspectives of disposal. *Science of the Total Environment*, 771, 144719.
- Alia, Z., Khachekhouche, E., Djilani, G., Oucif Alouane, A., Kharraz, K., Sekour, M., & Hacene, L. (2019). Recycling of potato waste in the production of the bioplastic in the Souf Region (Algeria). *International Journal of Biosciences*, 15(6), 1-7.
- Araújo, M. A., Cunha, A. M., & Mota, M. (2004). Enzymatic degradation of starch-based thermoplastic compounds used in prostheses: identification of the degradation products in solution. *Biomaterials*, 25(13), 2687-2693.
- Araujo, P. H. H. d., Sayer, C., Giudici, R., & Poco, J. G. (2002). Techniques for reducing residual monomer content in polymers: a review. *Polymer Engineering & Science*, 42(7), 1442-1468.
- Asgher, U., Khalil, K., Ayaz, Y., Ahmad, R., & Khan, M. J. (2020). *Classification of mental workload (MWL) using support vector machines (SVM) and convolutional neural networks (CNN)*. Paper presented at the 2020 3rd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET).
- Ashok, A., Abhijith, R., & Rejeesh, C. (2018). Material characterization of starch derived bio degradable plastics and its mechanical property estimation. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 2163-2170.
- Asrofi, M., Abral, H., Kasim, A., Pratoto, A., Mahardika, M., & Hafizulhaq, F. (2018). Characterization of the sonicated yam bean starch bionanocomposites reinforced by nanocellulose water hyacinth fiber (WHF): the effect of various fiber loading. *J. Eng. Sci. Technol*, 13(9), 2700-2715.
- Auras, R., Harte, B., & Selke, S. (2004). An overview of polylactides as packaging materials. *Macromolecular bioscience*, 4(9), 835-864.

- Babayemi, J. O., Nnorom, I. C., Osibanjo, O., & Weber, R. (2019). Ensuring sustainability in plastics use in Africa: consumption, waste generation, and projections. *Environmental Sciences Europe*, 31(1), 1-20.
- Ballesteros-Mártinez, L., Pérez-Cervera, C., & Andrade-Pizarro, R. (2020). Effect of glycerol and sorbitol concentrations on mechanical, optical, and barrier properties of sweet potato starch film. *NFS journal*, 20, 1-9.
- Banyay, M., Sarkar, M., & Gräslund, A. (2003). A library of IR bands of nucleic acids in solution. *Biophysical chemistry*, 104(2), 477-488.
- Beevi, K. R., Fathima, A. S., Fathima, A. T., Thameemunisa, N., Noorjahan, C., & Deepika, T. (2020). Bioplastic synthesis using banana peels and potato starch and characterization. *International journal of scientific & technology research*, 9(1), 1809-1814.
- Behera, L., Mohanta, M., & Thirugnanam, A. (2022). Intensification of yam-starch based biodegradable bioplastic film with bentonite for food packaging application. *Environmental Technology & Innovation*, 25, 102180.
- Bell, A., Mück, O., & Schuler, B. (2000). Les plantes à racines et tubercules en Afrique: une contribution au développement des technologies de récolte et d'après-récolte. *Les richesses du sol. Deutsche Stiftung für Internationale Entwicklung (DSE), Feldafing, Germany*.
- Bezirhan, A., & Ozsoy, H. (2014). *Bio-plastics as a Green Material In: Proc.* Paper presented at the International Conference on Green Infrastructure and Sustainable Societies/Cities 'GreInSus'-14.
- Bhattacharya, M. (1998). Stress relaxation of starch/synthetic polymer blends. *Journal of Materials Science*, 33(16), 4131-4139.
- Bilal, M., Mehmood, S., & Iqbal, H. M. (2020). The beast of beauty: environmental and health concerns of toxic components in cosmetics. *Cosmetics*, 7(1), 13.
- Bilck, A. P., Müller, C. M. O., Olivato, J. B., Mali, S., Grossmann, M. V. E., & Yamashita, F. (2015). Using glycerol produced from biodiesel as a plasticiser in extruded biodegradable films. *Polímeros*, 25, 331-335.

- Bojarczuk, A., Skapska, S., Khaneghah, A. M., & Marszałek, K. (2022). Health benefits of resistant starch: A review of the literature. *Journal of functional foods*, 93, 105094.
- Bouhassan, A. (1984). *Analyse du polymorphisme des néoformations obtenues in vitro à partir de divers tissus de patate douce (Ipomoea batatas (L.) Lam., Convolvulacée)*. éditeur inconnu.
- Bouwkamp, J. C. (2018). *Sweet potato products: a natural resource for the tropics* (Vol. 293): CRC Press.
- Brandenburg, K., & Seydel, U. (1998). Infrared spectroscopy of glycolipids. *Chemistry and physics of lipids*, 96(1-2), 23-40.
- Browning, S., Beymer-Farris, B., & Seay, J. R. (2021). Addressing the challenges associated with plastic waste disposal and management in developing countries. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 32, 100682.
- Buleon, A., Colonna, P., Planchot, V., & Ball, S. (1998). Starch granules: structure and biosynthesis. *International journal of biological macromolecules*, 23(2), 85-112.
- Byrne, H. J., Bonnier, F., McIntyre, J., & Parachalil, D. R. (2020). Quantitative analysis of human blood serum using vibrational spectroscopy. *Clinical Spectroscopy*, 2, 100004.
- Campinas, N. d. E. e. P. e. A. U. E. d. (2004). *Tabela brasileira de composição de alimentos*: Nepa-Unicamp.
- Chakraborty, I., N, P., Banik, S., Govindaraju, I., Das, K., Mal, S. S., . . . Neog, A. (2022). Synthesis and detailed characterization of sustainable starch-based bioplastic. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(39), e52924.
- Chandran, M., Tamilkolundu, S., & Murugesan, C. (2020). Conversion of plastic waste to fuel *Plastic waste and recycling* (pp. 385-399): Elsevier.
- Chang, P. R., Jian, R., Zheng, P., Yu, J., & Ma, X. (2010). Preparation and properties of glycerol plasticized-starch (GPS)/cellulose nanoparticle (CN) composites. *Carbohydrate polymers*, 79(2), 301-305.

- Chauhan, K., Kaur, R., & Chauhan, I. (2024). Sustainable bioplastic: a comprehensive review on sources, methods, advantages, and applications of bioplastics. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 63(8), 913-938.
- Chen, L., Lo, H., Chen, T. H., & Lee, L. (1992). Peroxidase zymograms of sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam) grown under hydroponic culture. *Botanical Bulletin of Academia Sinica*, 33(1), 247-252.
- Chen, R., Li, Q., Xu, X., & Zhang, D. (2019). Comparative pyrolysis characteristics of representative commercial thermosetting plastic waste in inert and oxygenous atmosphere. *Fuel*, 246, 212-221.
- Cheng, C.-Y., Haque, A., Hsieh, M.-F., Imran Hassan, S., Faizi, M. S. H., Dege, N., & Khan, M. S. (2020). 1, 4-Disubstituted 1 H-1, 2, 3-triazoles for renal diseases: Studies of viability, anti-inflammatory, and antioxidant activities. *International journal of molecular sciences*, 21(11), 3823.
- Cheng, H., Chen, L., McClements, D. J., Yang, T., Zhang, Z., Ren, F., . . . Jin, Z. (2021). Starch-based biodegradable packaging materials: A review of their preparation, characterization and diverse applications in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 70-82.
- Chu, J., Liu, H., & Salvo, A. (2021). Air pollution as a determinant of food delivery and related plastic waste. *Nature Human Behaviour*, 5(2), 212-220.
- COlognesi, D., & FLorence, C. (2003). Hydrogen chloride.
- Cooper, E., & Knutson, K. (1995). Fourier transform infrared spectroscopy investigations of protein structure. *Physical methods to characterize pharmaceutical proteins*, 101-143.
- Costa, A., Encarnação, T., Tavares, R., Todo Bom, T., & Mateus, A. (2023). Bioplastics: innovation for green transition. *Polymers*, 15(3), 517.
- Cui, S. W., Phillips, G. O., Blackwell, B., & Nikiforuk, J. (2007). Characterisation and properties of *Acacia senegal* (L.) Willd. var. *senegal* with enhanced properties (*Acacia* (sen) SUPERGUM™): Part 4. Spectroscopic characterisation of *Acacia senegal* var. *senegal* and *Acacia* (sen) SUPERGUM™ arabic. *Food Hydrocolloids*, 21(3), 347-352.

- da Rosa Zavareze, E., Pinto, V. Z., Klein, B., El Halal, S. L. M., Elias, M. C., Prentice-Hernández, C., & Dias, A. R. G. (2012). Development of oxidised and heat-moisture treated potato starch film. *Food chemistry*, 132(1), 344-350.
- da Silva, L. L., da Silveira, M. A., Fidelis, R. R., de Castro Tavares, R., Momenté, V. G., & do Nascimento, I. R. (2013). Seleção de genótipos de batata-doce quanto à eficiência ao uso do fósforo em solos da região de cerrado. *Journal of Biotechnology and Biodiversity*, 4(4), 356-364.
- Dai, L., Zhang, J., & Cheng, F. (2019). Effects of starches from different botanical sources and modification methods on physicochemical properties of starch-based edible films. *International journal of biological macromolecules*, 132, 897-905.
- Dehghani, S., Hosseini, S. V., & Regenstein, J. M. (2018). Edible films and coatings in seafood preservation: A review. *Food chemistry*, 240, 505-513.
- DeMartino, P., & Cockburn, D. W. (2020). Resistant starch: impact on the gut microbiome and health. *Current opinion in biotechnology*, 61, 66-71.
- Demirbas, A. (2007). Biodegradable plastics from renewable resources. *Energy Sources, Part A*, 29(5), 419-424.
- Derringer, G., & Suich, R. (1980). Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of quality technology*, 12(4), 214-219.
- des Déchets, A. N. (2020). Les déchets plastiques en Algérie: regard croisé sur les plastiques à usage unique., 1-23.
- Dey, T. K., Uddin, M. E., & Jamal, M. (2021). Detection and removal of microplastics in wastewater: evolution and impact. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 16925-16947.
- Dibi, K. E., Essis, B., & Nzue, B. (2015). Techniques culturelles de la patate douce. *Manuel de formation des agents de développement et des producteurs*.
- Diem, M., Chiriboga, L., Lasch, P., & Pacifico, A. (2002). IR spectra and IR spectral maps of individual normal and cancerous cells. *Biopolymers: Original Research on Biomolecules*, 67(4-5), 349-353.

- Ding, X., Zhu, F., & Gao, S. (2012). Purification, antitumour and immunomodulatory activity of water-extractable and alkali-extractable polysaccharides from *Solanum nigrum* L. *Food chemistry*, 131(2), 677-684.
- Diyana, Z., Jumaidin, R., Selamat, M. Z., Ghazali, I., Julmohammad, N., Huda, N., & Ilyas, R. (2021). Physical properties of thermoplastic starch derived from natural resources and its blends: A review. *Polymers*, 13(9), 1396.
- Egharevba, H. O. (2020). Chemical Properties of Starch and Its Application in the Food. *Chemical properties of starch*, 63.
- Ehisiyanya, C., Lale, N., Umeozor, O., Amadi, C., & Zakka, U. (2011). Evaluation of Effectiveness of Variety, Tillage Method and Time of Harvest on sweetpotato yield and the population of sweetpotato weevil, *Cylaspuncicollis* (Boheman)(Coleoptera: Brentidae). *International journal of Advanced Scientific and technical Research*, 1(2), 165-183.
- El-Kadi, S. (2010). *Bioplastic production from inexpensive sources: bacterial biosynthesis, cultivation system, production and biodegradability*: VDM Publishing.
- Emadian, S. M., Onay, T. T., & Demirel, B. (2017). Biodegradation of bioplastics in natural environments. *Waste management*, 59, 526-536.
- Fakhouri, F. M., Martelli, S. M., Bertan, L. C., Yamashita, F., Mei, L. H. I., & Queiroz, F. P. C. (2012). Edible films made from blends of manioc starch and gelatin– Influence of different types of plasticizer and different levels of macromolecules on their properties. *Lwt*, 49(1), 149-154.
- Florido-Moreno, P., Benítez, J. J., González-Buesa, J., Porras-Vázquez, J. M., Hierrezuelo, J., Grifé-Ruiz, M., . . . Guzmán-Puyol, S. (2025). Plasticized cellulose bioplastics with beeswax for the fabrication of multifunctional, biodegradable active food packaging. *Food Hydrocolloids*, 162, 110933.
- Forster, J. (1995). Soil sampling, handling, storage and analysis *Methods in applied soil microbiology and biochemistry* (pp. 49-121): Elsevier.
- FURLANETO, F., FIRETTI, R., & MONTES, S. (2012). Comercialização, custos e indicadores de rentabilidade da batata-doce. *Pesquisa & Tecnologia*, 9(2).

- Gadhve, R. V., Das, A., Mahanwar, P. A., & Gadekar, P. T. (2018). Starch based bioplastics: the future of sustainable packaging.
- Galloway, T. S. (2015). Micro-and nano-plastics and human health. *Marine anthropogenic litter*, 343-366.
- Galus, S., Turska, A., & Lenart, A. (2012). Sorption and wetting properties of pectin edible films. *Czech Journal of Food Sciences*, 30(5), 446.
- Gamage, A., Liyanapathirana, A., Manamperi, A., Gunathilake, C., Mani, S., Merah, O., & Madhujith, T. (2022). Applications of starch biopolymers for a sustainable modern agriculture. *Sustainability*, 14(10), 6085.
- Gao, J., Vasanthan, T., & Hoover, R. (2009). Isolation and characterization of high-purity starch isolates from regular, waxy, and high-amylose hulless barley grains. *Cereal Chemistry*, 86(2), 157-163.
- García-Depaet, O., Bordel, S., Lebrero, R., Santos-Beneit, F., Börner, R. A., Börner, T., & Muñoz, R. (2021). Inspired by nature: Microbial production, degradation and valorization of biodegradable bioplastics for life-cycle-engineered products. *Biotechnology Advances*, 53, 107772.
- Garcia-Hernandez, A., Vernon-Carter, E. J., & Alvarez-Ramirez, J. (2017). Impact of ghosts on the mechanical, optical, and barrier properties of corn starch films. *Starch-Stärke*, 69(1-2), 1600308.
- Geleta, T. T., Habtegebrel, S. A., & Tolesa, G. N. (2020). Physical, mechanical, and optical properties of enset starch from bulla films influenced by different glycerol concentrations and temperatures. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(8), e14586.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci Adv* 3: e1700782.
- Ghasemi, M. H., Neekzad, N., Ajdari, F. B., Kowsari, E., & Ramakrishna, S. (2021). Mechanistic aspects of poly (ethylene terephthalate) recycling—toward enabling high quality sustainability decisions in waste management. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(32), 43074-43101.

- Ghasemlou, M., Aliheidari, N., Fahmi, R., Shojaee-Aliabadi, S., Keshavarz, B., Cran, M. J., & Khaksar, R. (2013). Physical, mechanical and barrier properties of corn starch films incorporated with plant essential oils. *Carbohydrate polymers*, 98(1), 1117-1126.
- Gilbert, J., Ricci, M., & Tang, J. (2015). Biodegradable plastics, an overview of the compostability of biodegradable plastics and its implications for the collection and treatment of organic wastes. *The International Solid Waste Association, Vienna*.
- Glaser, J. A. (2017). New plastic recycling technology. *Clean technologies and environmental policy*, 19(3), 627-636.
- Gregory, M. R. (2009). Environmental implications of plastic debris in marine settings—entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions. *Philosophical transactions of the royal society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2013-2025.
- Gremlich, H.-U., & Yan, B. (2000). *Infrared and Raman spectroscopy of biological materials*: CRC press.
- Gross, R. A., & Kalra, B. (2002). Biodegradable polymers for the environment. *Science*, 297(5582), 803-807.
- Gu, J.-D. (2021). Biodegradability of plastics: the issues, recent advances, and future perspectives. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(2), 1278-1282.
- Hadar, Y., & Sivan, A. (2004). Colonization, biofilm formation and biodegradation of polyethylene by a strain of *Rhodococcus ruber*. *Applied microbiology and biotechnology*, 65, 97-104.
- Hammer, J., Kraak, M. H., & Parsons, J. R. (2012). Plastics in the marine environment: the dark side of a modern gift. *Reviews of environmental contamination and toxicology*, 1-44.
- Hatti-Kaul, R., Nilsson, L. J., Zhang, B., Rehnberg, N., & Lundmark, S. (2020). Designing biobased recyclable polymers for plastics. *Trends in biotechnology*, 38(1), 50-67.
- Henson, R. (2015). Analysis of variance (ANOVA). *Brain Mapping: an encyclopedic reference*. Elsevier, 477-481.

- Hesam, F., TAHERI, T. R., & Balali, G. (2015). Evaluation of β -amylase activity of sweet potato (*Ipomoea batatas*) cultivated in Iran.
- Hizukuri, S., Takeda, Y., Yasuda, M., & Suzuki, A. (1981). Multi-branched nature of amylose and the action of debranching enzymes. *Carbohydrate Research*, 94(2), 205-213.
- Ho, T. M., & Noomhorm, A. (2011). Physiochemical properties of sweet potato and mung bean starch and their blends for noodle production. *Journal of food processing & technology*, 2(2), 105-114.
- Hossain, K. B., Chen, K., Chen, P., Wang, C., & Cai, M. (2021). Socioeconomic relation with plastic consumption on 61 countries classified by continent, income status and coastal regions. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 107, 786-792.
- Ismail, N. A., Mohd Tahir, S., Yahya, N., Abdul Wahid, M. F., Khairuddin, N. E., Hashim, I., . . . Abdullah, M. A. (2016). *Synthesis and characterization of biodegradable starch-based bioplastics*. Paper presented at the Materials Science Forum.
- Isotton, F., Bernardo, G., Baldasso, C., Rosa, L., & Zeni, M. (2015). The plasticizer effect on preparation and properties of etherified corn starches films. *Industrial Crops and Products*, 76, 717-724.
- Jane, J., Maningat, C. C., & Wongsagonsup, R. (2010). Starch characterization, variety and application *Industrial crops and uses* (pp. 207-235): CABI Wallingford UK.
- Jane, J. L., Kasemsuwan, T., Leas, S., Zobel, H., & Robyt, J. F. (1994). Anthology of starch granule morphology by scanning electron microscopy. *Starch-Stärke*, 46(4), 121-129.
- Jawad, A. H., Abdulhameed, A. S., Hanafiah, M. M., ALothman, Z. A., Khan, M. R., & Surip, S. (2021). Numerical desirability function for adsorption of methylene blue dye by sulfonated pomegranate peel biochar: modeling, kinetic, isotherm, thermodynamic, and mechanism study. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 38(7), 1499-1509.

- Jayakumar, A., Radoor, S., Siengchin, S., Shin, G. H., & Kim, J. T. (2023). Recent progress of bioplastics in their properties, standards, certifications and regulations: A review. *Science of the Total Environment*, 878, 163156.
- Jeddou, K. B., Chaari, F., Maktouf, S., Nouri-Ellouz, O., Helbert, C. B., & Ghorbel, R. E. (2016). Structural, functional, and antioxidant properties of water-soluble polysaccharides from potatoes peels. *Food chemistry*, 205, 97-105.
- Jones, A. (1965). Cytological observations and fertility measurements of sweetpotato (*Ipomoea batatas* (L.)(Lam.)).
- Kansız, S., Azam, M., Basılı, T., Meral, S., Aktaş, F. A., Yeşilbağ, S., . . . Dege, N. (2022). Synthesis, structural studies, Hirshfeld surface analysis, and molecular docking studies of a thiophene-based Schiff base compound. *Journal of Molecular Structure*, 1265, 133477.
- Karakelle, B., Kian-Pour, N., Toker, O. S., & Palabiyik, I. (2020). Effect of process conditions and amylose/amylopectin ratio on the pasting behavior of maize starch: A modeling approach. *Journal of Cereal Science*, 94, 102998.
- Karan, H., Funk, C., Grabert, M., Oey, M., & Hankamer, B. (2019). Green bioplastics as part of a circular bioeconomy. *Trends in plant science*, 24(3), 237-249.
- Karleskint, G., Turner, R. K., & Small, J. (2009). Intertidal communities. *Introduction to marine biology (3rd ed.)*. Cengage Learning, 356-411.
- Karyeija, R., Gibson, R., & Valkonen, J. (1998). The significance of sweet potato feathery mottle virus in subsistence sweet potato production in Africa. *Plant disease*, 82(1), 4-15.
- Kawai, F., Watanabe, M., Shibata, M., Yokoyama, S., Sudate, Y., & Hayashi, S. (2004). Comparative study on biodegradability of polyethylene wax by bacteria and fungi. *Polymer degradation and stability*, 86(1), 105-114.
- Kelly, J. J., London, M. G., McCormick, A. R., Rojas, M., Scott, J. W., & Hoellein, T. J. (2021). Wastewater treatment alters microbial colonization of microplastics. *PloS one*, 16(1), e0244443.
- Kershaw, P. J. (2015). *Biodegradable plastics & marine litter: misconceptions, concerns and impacts on marine environments*: UNEP GPA.

- Khan, F., Ahmed, W., & Najmi, A. (2019). Understanding consumers' behavior intentions towards dealing with the plastic waste: Perspective of a developing country. *Resources, Conservation and Recycling*, 142, 49-58.
- Kijchavengkul, T., & Auras, R. (2008). Compostability of polymers. *Polymer International*, 57(6), 793-804.
- Kim, Y.-N., Yoon, J.-H., & Kim, K.-H. J. (2021). Microplastic contamination in soil environment—a review. *Soil Science Annual*, 71(4), 300-308.
- Kizil, R., Irudayaraj, J., & Seetharaman, K. (2002). Characterization of irradiated starches by using FT-Raman and FTIR spectroscopy. *Journal of agricultural and food chemistry*, 50(14), 3912-3918.
- Kowser, M. A., Mahmud, H., Chowdhury, M. A., Hossain, N., Mim, J. J., & Islam, S. (2025). Fabrication and Characterization of Corn Starch Based Bioplastic for Packaging Applications. *Results in Materials*, 100662.
- Kuddus, M. (2021). *Bioplastics for sustainable development*: Springer.
- Kumaravel, S., Hema, R., & Lakshmi, R. (2010). Production of polyhydroxybutyrate (bioplastic) and its biodegradation by *Pseudomonas lemoignei* and *Aspergillus niger*. *Journal of Chemistry*, 7, S536-S542.
- Kurbanova, M., Ashfaq, M., Tahir, M., Maharramov, A., Dege, N., & Koroglu, A. (2023). Synthesis, crystal structure, supramolecular assembly exploration by Hirshfeld surface analysis and computational study of 6-bromo-2-oxo-2H-chromene-3-carbonitrile (BOCC). *Journal of Structural Chemistry*, 64(2), 302-313.
- Kurbanova, M., Ashfaq, M., Tahir, M., Maharramov, A., Dege, N., Ramazanzade, N., & Cinar, E. (2023). Synthesis, Crystal Structure, Supramolecular Assembly Inspection by Hirshfeld Surface Analysis and Computational Exploration of 4-Phenyl-6-(p-Tolyl) Pyrimidin-2 (1 H)-One (PPTP). *Journal of Structural Chemistry*, 64(3), 437-449.
- Kusuma, I. C., Setiani, O., Umaroh, U., Pramono, N., Widyawati, M. N., & Kumorowulan, S. (2017). Sweet Potato (*Ipomoea Batatas* L.) Leaf: Its Effect on

- Prolactin and Production of Breast Milk in Postpartum Mothers. *Belitung Nursing Journal*, 3(2), 95-101.
- Lau, H., Kiew, P., Tan, L., Lam, M., & Yeoh, W. (2023). Deciphering the effects of plasticizers in potato-based bioplastic for food and fresh produce packaging. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(12), 13703-13716.
- Lebot, V. (2010). Sweet potato. *Root and tuber crops*, 97-125.
- Lebreton, L., & Andrady, A. (2019). Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. *Palgrave Communications*, 5(1), 1-11.
- Lee, J. H., Han, J.-A., & Lim, S.-T. (2009). Effect of pH on aqueous structure of maize starches analyzed by HPSEC-MALLS-RI system. *Food Hydrocolloids*, 23(7), 1935-1939.
- Liquier, J. (1996). Infrared spectroscopy of nucleic acids. *Infrared spectroscopy of biomolecules*.
- López, O. V., & García, M. A. (2012). Starch films from a novel (*Pachyrhizus ahipa*) and conventional sources: Development and characterization. *Materials Science and Engineering: C*, 32(7), 1931-1940.
- Lucas, N., Bienaime, C., Belloy, C., Queneudec, M., Silvestre, F., & Nava-Saucedo, J.-E. (2008). Polymer biodegradation: Mechanisms and estimation techniques—A review. *Chemosphere*, 73(4), 429-442.
- Mano, H., Ogasawara, F., Sato, K., Higo, H., & Minobe, Y. (2007). Isolation of a regulatory gene of anthocyanin biosynthesis in tuberous roots of purple-fleshed sweet potato. *Plant physiology*, 143(3), 1252-1268.
- Mantsch, H. H., & Chapman, D. (1996). Infrared spectroscopy of biomolecules. (*No Title*).
- Marichelvam, M., Manimaran, P., Sanjay, M., Siengchin, S., Geetha, M., Kandakodeeswaran, K., . . . Gorbatyuk, S. (2022). Extraction and development of starch-based bioplastics from *Prosopis Juliflora* Plant: Eco-friendly and sustainability aspects. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 5, 100296.

- Marta, H., Cahyana, Y., Bintang, S., Soeherman, G. P., & Djali, M. (2022). Physicochemical and pasting properties of corn starch as affected by hydrothermal modification by various methods. *International Journal of Food Properties*, 25(1), 792-812.
- Massaroto, J., Maluf, W., Gomes, L., Franco, H., & Gasparino, C. (2014). Behavior of roots of sweet potato clones.
- McGain, F., McAlister, S., McGavin, A., & Story, D. (2010). The financial and environmental costs of reusable and single-use plastic anaesthetic drug trays. *Anaesthesia and intensive care*, 38(3), 538-544.
- MILIEN, J.-F., & FONDWA, L.-H. SETOR DE ENGENHARIAS, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA-MESTRADO.
- Molenveld, K., Van den Oever, M., & Bos, H. t. L. (2015). *Biobased packaging catalogue*: Wageningen UR-Food & Biobased Research.
- Monteiro, A. B. (2007). Silagens de cultivares e clones de batata doce para alimentação animal visando sustentabilidade da produção agrícola familiar. *Revista Brasileira de Agroecologia*, 2(2).
- Morim de Lima, A. G. (2023). La culture de la patate douce et du maïs chez les Krahô. Sur les cycles de vie et la parenté végétale. *Revue d'ethnoécologie*(23).
- Mostaco-Guidolin, L. B., Murakami, L. S., Nomizo, A., & Bachmann, L. (2009). Fourier transform infrared spectroscopy of skin cancer cells and tissues. *Applied Spectroscopy Reviews*, 44(5), 438-455.
- Mounir, R. (2023). Solution to plastic waste in Algeria.
- Mourabet, M., El Rhilassi, A., El Boujaady, H., Bennani-Ziatni, M., El Hamri, R., & Taitai, A. (2012). Removal of fluoride from aqueous solution by adsorption on Apatitic tricalcium phosphate using Box–Behnken design and desirability function. *Applied Surface Science*, 258(10), 4402-4410.
- Mousavi-Avval, S. H., Sahoo, K., Nepal, P., Runge, T., & Bergman, R. (2023). Environmental impacts and techno-economic assessments of biobased products: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 180, 113302.

- Muthusamy, M. S., & Pramasivam, S. (2019). Bioplastics—an eco-friendly alternative to petrochemical plastics. *Current world environment*, 14(1), 49.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*: John Wiley & Sons.
- Napper, I. E., & Thompson, R. C. (2020). Plastic debris in the marine environment: history and future challenges. *Global Challenges*, 4(6), 1900081.
- Ndangui, C. B. (2015). Production et caractérisation de farine de patate douce (*Ipomoea batatas* Lam): optimisation de la technologie de panification. *Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires, Laboratoire d'Ingénierie des Biomolécules*, 151p.
- Netz, B., Davidson, O., Bosch, P., Dave, R., & Meyer, L. (2007). Climate change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers.
- Ouendeno, M. L. (2019). l'agriculture irriguée au souf-El oued: acteur et facteur de développement. *Journal Algérien des Régions Arides*, 13(2), 114-128.
- Özdamar, E. G., Ateş, M., Bal, A., & Şentürk, Ş. (2017). BİYOPLASTİK: MİMARLIKTA DENEYSEL BİR BİYOMORFOLOJİ.
- Padmaja, G., Sheriff, J. T., & Sajeew, M. S. (2012). Food uses and nutritional benefits of sweet potato. *Fruit, Vegetable and Cereal Science and Biotechnology*, 6(1), 115-123.
- Pan, D., Su, F., Liu, C., & Guo, Z. (2020). Research progress for plastic waste management and manufacture of value-added products. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 3, 443-461.
- Pannetier, P., Morin, B., Clérandeau, C., Laurent, J., Chapelle, C., & Cachot, J. (2019). Toxicity assessment of pollutants sorbed on environmental microplastics collected on beaches: Part II-adverse effects on Japanese medaka early life stages. *Environmental Pollution*, 248, 1098-1107.
- Philp, J. C., Ritchie, R. J., & Guy, K. (2013). Biobased plastics in a bioeconomy. *Trends in biotechnology*, 31(2), 65-67.

- Pilapitiya, P. N. T., & Ratnayake, A. S. (2024). The world of plastic waste: a review. *Cleaner Materials*, 11, 100220.
- Pooja, N., & Shashank, S. (2024). Advancing sustainable bioplastics: chemical and physical modification of starch films for enhanced thermal and barrier properties. *RSC advances*, 14(33), 23943-23951.
- Princey, J. M., Nandhini, A., & Abinaya, E. (2020). Preparation and characterization studies of amorphophalluspaeonifolius and manihotesculenta as a bio-plastic using glycerol and agar-agar as plasticizer. *Oriental Journal of Chemistry*, 36(6), 1205.
- Qamar, S. A., Ashiq, M., Jahangeer, M., Riasat, A., & Bilal, M. (2020). Chitosan-based hybrid materials as adsorbents for textile dyes—A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2, 100021.
- Ramkumar, M., Balasubramani, K., Santosh, M., & Nagarajan, R. (2022). The plastisphere: A morphometric genetic classification of plastic pollutants in the natural environment. *Gondwana Research*, 108, 4-12.
- Raza, M. A., Farwa, U., Danish, M., Ozturk, S., Aagar, A. A., Dege, N., . . . Al-Sehemi, A. G. (2023). Computational modeling of imines based anti-oxidant and anti-esterases compounds: synthesis, single crystal and in-vitro assessment. *Computational Biology and Chemistry*, 104, 107880.
- Richardson, K. V. (2011). Optimal harvest time for two late-maturing Heirloom varieties of sweet potato. *Crop Research Report*(6), 8.
- Ruiz, F. S. (1984). *Estudo das variaveis envolvidas no processo de obtenção de farinhas pregelatinizadas, de batata doce, por desidratação com rolos aquecidos (Double Drum-Dryer)*. [sn].
- Ruiz, M., Lozano, E., & Ruiz, A. (1981). Utilization of sweet potatoes (*Ipomoea batata* (L.) Lam) in animal feeding. III. Addition of various levels of roots and urea to sweet potato forage silages. *Tropical animal production*.
- Safwani, S., & Riza, M. (2018). *Synthesis of biodegradable plastic from tapioca with N-Isopropylacrylamid and chitosan using glycerol as plasticizer*. Paper presented at the IOP conference series: Materials science and engineering.

- Sander, M. (2019). Biodegradation of polymeric mulch films in agricultural soils: concepts, knowledge gaps, and future research directions. *Environmental science & technology*, 53(5), 2304-2315.
- Santana, R. F., Bonomo, R. C. F., Gandolfi, O. R. R., Rodrigues, L. B., Santos, L. S., dos Santos Pires, A. C., . . . Veloso, C. M. (2018). Characterization of starch-based bioplastics from jackfruit seed plasticized with glycerol. *Journal of food science and technology*, 55(1), 278-286.
- Sanyang, M. L., Sapuan, S. M., Jawaid, M., Ishak, M. R., & Sahari, J. (2016a). Effect of plasticizer type and concentration on physical properties of biodegradable films based on sugar palm (*Arenga pinnata*) starch for food packaging. *Journal of food science and technology*, 53(1), 326-336.
- Sanyang, M. L., Sapuan, S. M., Jawaid, M., Ishak, M. R., & Sahari, J. (2016b). Effect of plasticizer type and concentration on physical properties of biodegradable films based on sugar palm (*Arenga pinnata*) starch for food packaging. *Journal of food science and technology*, 53, 326-336.
- Sasaki, T., & Matsuki, J. (1998). Effect of wheat starch structure on swelling power. *Cereal Chemistry*, 75(4), 525-529.
- Schillaci, C., Jones, A., Vieira, D., Munafò, M., & Montanarella, L. (2023). Evaluation of the United Nations Sustainable Development Goal 15.3. 1 indicator of land degradation in the European Union. *Land Degradation & Development*, 34(1), 250-268.
- Shafqat, A., Al-Zaqri, N., Tahir, A., & Alsalmeh, A. (2021). Synthesis and characterization of starch based bioplastics using varying plant-based ingredients, plasticizers and natural fillers. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(3), 1739-1749.
- Shamsuddin, I. M., Jafar, J. A., Shawai, A. S. A., Yusuf, S., Lateefah, M., & Aminu, I. (2017). Bioplastics as better alternative to petroplastics and their role in national sustainability: a review. *Adv. Biosci. Bioeng*, 5(4), 63.
- Shengli, S., Junping, L., Qi, L., Fangru, N., Jia, F., & Shulian, X. (2018). Optimized preparation of *Phragmites australis* activated carbon using the Box-Behnken

- method and desirability function to remove hydroquinone. *Ecotoxicology and environmental safety*, 165, 411-422.
- Shruti, V., & Kutralam-Muniasamy, G. (2019). Bioplastics: Missing link in the era of Microplastics. *Science of the Total Environment*, 697, 134139.
- Sihachakr, D., & Ducreux, G. (1987). Isolement et culture de protoplastes à partir de petioles et de tiges de deux variétés de patate douce (*Ipomoea batatas*). *Canadian journal of botany*, 65(1), 192-197.
- Singh, A. K., Sharma, P., Shrivastav, M., Chaudhary, R., Chauhan, P., & Banerjee, A. (2025). PRODUCTION OF BIODEGRADABLE PLASTIC FILM FROM POTATO AND SAGO STARCH. *Journal of microbiology, biotechnology and food sciences*, 14(4), e11143-e11143.
- Sintim, H. Y., Bandopadhyay, S., English, M. E., Bary, A. I., DeBruyn, J. M., Schaeffer, S. M., . . . Flury, M. (2019). Impacts of biodegradable plastic mulches on soil health. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 273, 36-49.
- Stanojlovic-Davidovic, A. (2006). *Matériaux biodégradables à base d'amidon expansé renforcé de fibres naturelles-Application à l'emballage alimentaire*. Doctoral dissertation. Université du Sud Toulon-Var.
- Stevens, E. S. (2002). *Green plastics: an introduction to the new science of biodegradable plastics*: Princeton University Press.
- Strafella, P., López Correa, M., Pyko, I., Teichert, S., & Gomiero, A. (2022). Distribution of microplastics in the marine environment *Handbook of microplastics in the environment* (pp. 813-847): Springer.
- Sun, H., Mu, T., Xi, L., Zhang, M., & Chen, J. (2014). Sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) leaves as nutritional and functional foods. *Food chemistry*, 156, 380-389.
- Tester, R. F., & Morrison, W. R. (1990). Swelling and gelatinization of cereal starches. I. Effects of amylopectin, amylose, and lipids. *Cereal chem*, 67(6), 551-557.
- Thielen, M. (2014). Bioplastics MAGAZINE In: Bioplastics—Plants and crops, raw materials. Published in Berlin: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe eV (FNR). *Order*, 237.

- Tokiwa, Y., & Calabia, B. P. (2004). Review degradation of microbial polyesters. *Biotechnology letters*, 26, 1181-1189.
- Tokiwa, Y., Calabia, B. P., Ugwu, C. U., & Aiba, S. (2009). Biodegradability of plastics. *International journal of molecular sciences*, 10(9), 3722-3742.
- Tsakama, M., Mwangwela, A., Manani, T., & Mahungu, N. (2010). Physicochemical and pasting properties of starch extracted from eleven sweet potato varieties. *African Journal of Food Science and Technology*, 1(4), 090-098.
- Tsou, C.-H., Suen, M.-C., Yao, W.-H., Yeh, J.-T., Wu, C.-S., Tsou, C.-Y., . . . Lin, S.-M. (2014). Preparation and characterization of bioplastic-based green renewable composites from tapioca with acetyl tributyl citrate as a plasticizer. *Materials*, 7(8), 5617-5632.
- Vamadevan, V., Hoover, R., Bertoft, E., & Seetharaman, K. (2014). Hydrothermal treatment and iodine binding provide insights into the organization of glucan chains within the semi-crystalline lamellae of corn starch granules. *Biopolymers*, 101(8), 871-885.
- Van den Oever, M., Molenveld, K., van der Zee, M., & Bos, H. (2017). *Bio-based and biodegradable plastics: facts and figures: focus on food packaging in the Netherlands*: Wageningen Food & Biobased Research.
- Van Eygen, E., Feketitsch, J., Laner, D., Rechberger, H., & Fellner, J. (2017). Comprehensive analysis and quantification of national plastic flows: The case of Austria. *Resources, Conservation and Recycling*, 117, 183-194.
- Vanapalli, K. R., Sharma, H. B., Ranjan, V. P., Samal, B., Bhattacharya, J., Dubey, B. K., & Goel, S. (2021). Challenges and strategies for effective plastic waste management during and post COVID-19 pandemic. *Science of the Total Environment*, 750, 141514.
- Vandeputte, G., Derycke, V., Geeroms, J., & Delcour, J. (2003). Rice starches. II. Structural aspects provide insight into swelling and pasting properties. *Journal of Cereal Science*, 38(1), 53-59.
- Vasanthan, T. (1996). Physicochemical properties of small-and large-granule starches of waxy, regular, and high-amylose barleys. *Cereal Chem.*, 73, 199-207.

- Venkatachalam, H., & Palaniswamy, R. (2020). Bioplastic world: A review. *Journal of Advanced Scientific Research*, 11(03), 43-53.
- Vernier, P., & Varin, D. (1994). La culture de la patate douce.
- Veza, I., Spraggon, M., Fattah, I. R., & Idris, M. (2023). Response surface methodology (RSM) for optimizing engine performance and emissions fueled with biofuel: Review of RSM for sustainability energy transition. *Results in Engineering*, 18, 101213.
- Visser, R. G., Suurs, L. C., Steeneken, P., & Jacobsen, E. (1997). Some physicochemical properties of amylose-free potato starch. *Starch-Stärke*, 49(11), 443-448.
- Vithu, P., Dash, S. K., Rayaguru, K., Panda, M. K., & Nedunchezhiyan, M. (2020). Optimization of starch isolation process for sweet potato and characterization of the prepared starch. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14(3), 1520-1532.
- Waters, C. N., Zalasiewicz, J., Summerhayes, C., Barnosky, A. D., Poirier, C., Gałuszka, A., . . . Ellis, M. (2016). The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. *Science*, 351(6269), aad2622.
- Winer, B. J., Brown, D. R., & Michels, K. M. (1971). *Statistical principles in experimental design* (Vol. 2): McGraw-hill New York.
- Wu, X. S. (2011). Effect of glycerin and starch crosslinking on molecular compatibility of biodegradable poly (lactic acid)-starch composites. *Journal of Polymers and the Environment*, 19, 912-917.
- XIAODING, G. (1995). Evaluation of sweetpotato tips as green vegetables. *ARC Training*.
- Yang, J., Xu, S., Wang, W., Ran, X., Ching, Y. C., Sui, X., . . . Al-Hada, N. M. (2023). Preparation and characterization of bioplastics from silylated cassava starch and epoxidized soybean oils. *Carbohydrate polymers*, 300, 120253.
- Yu, J., & Chen, L. X. (2008). The greenhouse gas emissions and fossil energy requirement of bioplastics from cradle to gate of a biomass refinery. *Environmental science & technology*, 42(18), 6961-6966.

- Zabawinski, C. (1999). *L'ADP-glucose pyrophosphorylase de chlamydomonas reinhardtii: constitution, fonction et régulation*. Lille 1.
- Zhang, D., Rossel, G., Kriegner, A., & Hijmans, R. (2004). AFLP assessment of diversity in sweetpotato from Latin America and the Pacific region: Its implications on the dispersal of the crop. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 51(2), 115-120.
- Zhang, J.-F., & Sun, X. (2004). Mechanical properties of poly (lactic acid)/starch composites compatibilized by maleic anhydride. *Biomacromolecules*, 5(4), 1446-1451.
- Zhang, K., Wu, Z., Tang, D., Lv, C., Luo, K., Zhao, Y., . . . Wang, J. (2016). Development and identification of SSR markers associated with starch properties and β -carotene content in the storage root of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.). *Frontiers in plant science*, 7, 223.
- Zhao, L., Rong, L., Zhao, L., Yang, J., Wang, L., & Sun, H. (2020). Plastics of the future? The impact of biodegradable polymers on the environment. *Microplastics in Terrestrial Environments: Emerging Contaminants and Major Challenges*, 423-445.
- Zhou, H. (2016). Physico-chemical properties of bioplastics and its application for fresh-cut fruits packaging. *Theses. Hokkaido University. Japan* LAMPIRAN Botol minuman sekali pakai Botol susu, shampoo, galon air minum Kantung plastik, plastik pengemas makanan Kemasan makanan ringan. Tutup botol, sedotan.
- Zhou, M., Wang, R., Cheng, S., Xu, Y., Luo, S., Zhang, Y., & Kong, L. (2021). Bibliometrics and visualization analysis regarding research on the development of microplastics. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 8953-8967.
- Zoungranan, Y., Lynda, E., Dobi-Brice, K. K., Tchirioua, E., Bakary, C., & Yannick, D. D. (2020). Influence of natural factors on the biodegradation of simple and composite bioplastics based on cassava starch and corn starch. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104396.