

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة سعيدة الدكتور مولاي الطاهر

Université de Saida Dr MOULAY Tahar



كلية علوم الطبيعة والحياة

Faculté des Sciences de la nature et de la Vie

قسم البيولوجيا

Département de Biologie

Projet 1275

Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master

En Sciences biologiques

Spécialité : Microbiologie Appliquée

Thème

Emballage bioplastique durable avec protection antimicrobienne

Présenté par :

- Mr : BENYAHIA Abdelhamid.
- Mr : HAMMAMI Chems Eddine.

Soutenu le : 25/11/2025

Devant le jury composé de :

Président

Mr. KEBIR Nasreddine

MCA à l'université de Saida

Examineur

Mr. ALALI Kouider

MCB à l'université de Saida

Rapporteur

Mr. BELLIL Yahia

MCA à l'université de Saida

Rapporteur

Mme. CHAHROUR Wassila

MCA à l'université de Saida

Année universitaire 2024/2025

Dédicaces



À Monsieur GACEM Mohamed Amine,

Nous dédions ce modeste travail à votre noble personne, en témoignage de notre profond respect et de notre gratitude pour l'encadrement, le soutien constant et les précieux conseils que vous nous avez prodigués. Votre patience, votre rigueur scientifique et vos orientations ont constitué pour nous une véritable source d'inspiration et de motivation tout au long de ce parcours académique.

Veillez agréer, Monsieur, l'expression de notre haute considération et de notre profonde reconnaissance.



Dédicaces



À Madame BELGACEM Habiba,

Nous dédions ce travail à votre honorable personne, en signe de reconnaissance pour vos efforts, votre soutien précieux et vos conseils avisés qui ont eu un impact considérable sur notre cheminement scientifique. Nous avons trouvé en vous un exemple de dévouement et de sincérité, et vos encouragements ainsi que vos orientations ont largement contribué à l'aboutissement de ce mémoire.

Veillez recevoir, Madame, nos sentiments les plus respectueux et notre sincère gratitude.



Remerciements

Avant toute chose, nous louons Dieu, le Tout-Puissant, de nous avoir accordé la force et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous exprimons également notre profonde gratitude à toutes les personnes qui nous ont aidés ou soutenus, de près ou de loin, durant la préparation de ce mémoire.

Nous adressons nos remerciements les plus sincères à nos encadrateurs, Monsieur **BELLIL Yahia** et Madame **CHAHROUR Wassila**, qui ont supervisé ce travail avec beaucoup de rigueur et d'attention. Nous leur exprimons toute notre reconnaissance pour leur confiance, leurs encouragements et leurs précieux conseils qu'ils nous ont généreusement prodigués tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous exprimons aussi notre profonde gratitude à Monsieur **Benreguiég Mokhtar**, Doyen de la Faculté des Sciences de l'Université de Saïda Dr Moulay Tahar.

Nous tenons aussi à remercier tous les responsables de laboratoires en général, et plus particulièrement Madame **Hajar**, Madame **Ahlam**, Monsieur **Othmane** et Monsieur **Ahmed**, pour leur soutien et leur aide précieuse.

Nous adressons nos sincères remerciements à Mr **KEBIR Nasr Eddine**, Maître de conférences A à l'Université de Saïda, d'avoir accepté de présider le jury de notre mémoire.

Nous exprimons nos vifs remerciements à Mr **ALALI Kouider**, Maître de conférences B à l'Université de Saïda, pour l'honneur qu'elles nous ont fait en acceptant d'examiner ce mémoire.

Enfin, nous exprimons toute notre reconnaissance à l'ensemble des enseignants qui nous ont accompagnés et encadrés tout au long de notre parcours universitaire.

Table des matières

Liste des abréviations	i
Liste des figures	ii
Liste des photos	Erreur ! Signet non défini.Erreur ! Signet non défini.
Liste des tableaux	iv
Résumé	v
Abstract	vi
ملخص	vii

PARTIE I. INTRODUCTION1

PARTIE II. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE4

CHAPITRE I. EMBALLAGE BIOPLASTIQUE.....5

I.1. GÉNÉRALITÉS :	6
I.2.BIOPLASTIQUES :	6
I.3. TYPES DE BIOPLASTIQUES :	7
I.3.1. BIOPLASTIQUES À BASE D'AMIDON :	7
I.3.2. ACIDE POLY LACTIQUE (PLA) :	8
I.3.3. POLYHYDROXYALCANOATES (PHA) :	8
I.3.4. SUCCINATE DE POLY BUTYLÈNE (PBS):	8
I.3.5. BIOPLASTIQUES À BASE DE POLYÉTHYLÈNE :	8
I.3.6. POLYESTERS BIODÉGRADABLES :	8
I.3.7. MÉLANGES ET ALLIAGES :	9
I.4. DÉFIS ET CONSIDÉRATIONS :	9
I.5. AVANTAGES ÉCOLOGIQUES DES BIOPLASTIQUES :	9
I.5.1. RÉDUCTION DE L'EMPREINTE CARBONE :	9
I.5.2. BIODÉGRADABILITÉ ET COMPO STABILITÉ :	9
I.5.2.1.BIODÉGRADABILITÉ DES BIOPLASTIQUES :	10
I.5.2.2.COMPO STABILITÉ DES BIOPLASTIQUES :	10
I.6. RÉDUCTION DE LA DÉPENDANCE AUX COMBUSTIBLES FOSSILES :	10
I.6.1. UTILISATION DE MATIÈRES PREMIÈRES RENOUVELABLES :	10
I.6.2. IMPACT SUR LA CHAÎNE DE VALEUR DU PLASTIQUE :	10

I.6.3. MOINS D'IMPACT SUR LES RÉSERVES DE PÉTROLE :	11
I.6.4. ENCOURAGEMENT DE PRATIQUES AGRICOLES DURABLES :	11
I.6.5. DÉVELOPPEMENT DE TECHNOLOGIES ALTERNATIVES :	11
I.7. IMPACT SUR LA BIODIVERSITÉ :	11
I.7.1. UTILISATION DES TERRES AGRICOLES ET PRESSION SUR LES ÉCOSYSTÈMES NATURELS :	12
I.7.2. EFFETS DE LA DÉGRADATION DES BIOPLASTIQUES DANS L'ENVIRONNEMENT:	12
I.7.3. LIEN AVEC LES PRATIQUES AGRICOLES DURABLES :	12
I.8. SOLUTIONS INNOVANTES ET DÉVELOPPEMENT DE BIOPLASTIQUES À BASE D'ALGUES :	12
I.9. PROMOTION D'UNE ÉCONOMIE CIRCULAIRE :	13
I.10. BOUCLE FERMÉE DES RESSOURCES NATURELLES :	13
I.11. RECYCLAGE DES BIOPLASTIQUES :	13
I.12. MOINS DE DÉCHETS PLASTIQUES DANS LES DÉCHARGES :	13
I.13. ENCOURAGEMENT DE L'INNOVATION DANS LES MATÉRIAUX CIRCULAIRES :	13
I.14. CONTRIBUTION À LA RÉDUCTION DE L'EMPREINTE CARBONE :	13
I.15. LIMITES ET DÉFIS ASSOCIÉS À L'UTILISATION DES BIOPLASTIQUES :	13
I.16. COÛTS DE PRODUCTION :	14
I.17. PERFORMANCES ET DURABILITÉ :	14
I.18. RECYCLABILITÉ ET GESTION DES DÉCHETS :	14
I.19. APPLICATIONS DES BIOPLASTIQUES DANS LES EMBALLAGES ALIMENTAIRES ET MÉDICAUX :	14
I.19.1. EMBALLAGE ALIMENTAIRE :	14
I.19.2. BIODÉGRADABILITÉ :	15
I.19.3. SÉCURITÉ ALIMENTAIRE :	15
I.19.4. PROPRIÉTÉS BARRIÈRES :	15
I.19.5. PERSONNALISATION ET FLEXIBILITÉ :	15
I.20. EMBALLAGE PHARMACEUTIQUE :	16
 <u>CHAPITRE II. LA PROTECTION ANTIMICROBIENNE DANS LES EMBALLAGES.</u>	 <u>17</u>
 II.1. INTRODUCTION :	 18
II.2. IMPORTANCE DE LA PROTECTION ANTIMICROBIENNE DANS LES EMBALLAGES : ..	18
II.2.1. LA GARANTIE DE LA SÉCURITÉ SANITAIRE DES PRODUITS EMBALLÉS :	18

II.2.2. PROLONGATION DE LA DURÉE DE CONSERVATION :	18
II.3. LES DIFFÉRENTS AGENTS ANTIMICROBIENS UTILISÉS :	19
II.3.1. AGENTS ANTIMICROBIENS D'ORIGINE CHIMIQUE :	19
II.3.2. AGENTS ANTIMICROBIENS NATURELS :	20
II.3.2.1. Composition chimique et activité antibactérienne de l'huile essentielle de thym :22	
II.3.2.2. Principaux constituants et effet antimicrobien de l'huile essentielle de clou de girofle :	22
II.3.2.3. Constituants volatils et propriétés antibactériennes de l'huile essentielle de Schinus molle:	22
II.3.3. NANOPARTICULES MÉTALLIQUES (ARGENT, CUIVRE) :	23
II.3.3.1. Mécanismes d'action des nanoparticules d'argent et de cuivre comme agents antimicrobiens :	23
II.4. MÉTHODES D'APPLICATION DES AGENTS ANTIMICROBIENS DANS LES EMBALLAGES :	24
II.4.1. INTÉGRATION DANS LA MATRICE DU BIOPLASTIQUE :	24
II.4.2. TRAITEMENT EN SURFACE DES MATÉRIAUX :	24
II.5. CRITÈRES D'EFFICACITÉ DES SYSTÈMES ANTIMICROBIENS DANS LES EMBALLAGES :	24
II.5.1. SPECTRE D'ACTION :	24
II.5.2. DURABILITÉ DE L'EFFICACITÉ ANTIMICROBIENNE :	25
<u>PARTIE III. MATÉRIEL ET MÉTHODES</u>	<u>26</u>
III.1. OBJECTIF DU TRAVAIL :	27
III.2. PRÉPARATION DU BIOPLASTIQUE :	27
III.2.1. PROTOCOLE N°01:	27
III.2.2. PROTOCOLE N°02:	27
III.2.3. PROTOCOLE N°03:	28
III.3. REMARQUES PRATIQUES (MOULAGE) :	28
III.3.1. DESCRIPTION DU MOULE EN VERRE	28
III.4. EXTRACTION DE COLORANT NATUREL :	29
III.4.1. EXTRACTION D'ANTHOCYANINE :	29
III.4.1.1. Préparation de la matière végétale :	29
III.4.1.2. Extraction par macération :	29

III.5. EXTRACTION DES HUILES ESSENTIELLES :	30
III.5.1. HYDRO DISTILLATION :	30
III.5.2. CRITÈRES DE CHOIX DES TROIS PLANTES :	31
III.5.3. MATÉRIEL VÉGÉTAL :	31
III.5.4. LES PROTOCOLES D'EXTRACTION DES HUILES ESSENTIELLES :	32
III.5.5. DÉTERMINATION DU RENDEMENT D'EXTRACTION :	33
III.6. TEST D'ACTIVITÉ DES TROIS HUILES ESSENTIELLES:	33
III.6.1. SOUCHES BACTÉRIENNES :	33
III.6.2. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL :	33
ÉTAPES EXPÉRIMENTALES :	33
III.7. LES TESTS APPLIQUÉS SUR LE BIOPLASTIQUE:	34
III.7.1. BIODÉGRADABILITÉ :	34
III.7.2. TESTS DE TENEUR EN EAU, DE SOLUBILITÉ ET DU DEGRÉ DE GONFLEMENT:	35
III.7.3. ÉVALUATION DE LA STABILITÉ DU BIOPLASTIQUE ANTIMICROBIEN À BASSE TEMPÉRATURE	36
III.8. INCORPORATION DE L'HUILE ESSENTIELLE DANS LE BIOPLASTIQUE :	36
III.9. ÉVALUATION DE L'ACTIVITÉ ANTIBACTÉRIENNE APRÈS INCORPORATION DE L'HUILE ESSENTIELLE :	36
III.9.1. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL :	36
III.9.2. LA LECTURE DU RÉSULTAT :	37
III.9.2.1. Protocole expérimental :	37
 <u>PARTIE IV. RÉSULTATS ET DISCUSSION</u>	 <u>39</u>
 IV.1. RÉSULTATS DE LA PRÉPARATION DU PLASTIQUE :	 40
IV.2. MOULAGE PAR COULAGE DE LA MATRICE :	42
L'UTILISATION DU MOULE EN VERRE N'A PAS ABOUTI, CAR IL A ÉTÉ CONSTATÉ QUE LE BIOPLASTIQUE S'EST FISSURÉ APRÈS 24 HEURES.	42
IV.3. EXTRACTION DE COLORANT ET DES HUILES ESSENTIELLES SÉLECTIONNÉS :	43
IV.4. ACTIVITÉ ANTIBACTÉRIENNE DES HUILES ESSENTIELLES EXTRAITES :	44
IV.5. RÉSULTATS DES TESTS APPLIQUÉS SUR LE BIOPLASTIQUE :	47
IV.5.1. RÉSULTAT DU TEST DE BIODÉGRADABILITÉ DU BIOPLASTIQUE:	47
IV.5.2. RÉSULTAT DE TENEUR EN EAU, DE SOLUBILITÉ ET DU DEGRÉ DE GONFLEMENT	49

IV.5.3. RÉSULTAT DE ÉVALUATION DE LA STABILITÉ DU BIOPLASTIQUE À BASSE DE TEMPÉRATURE	50
IV.7. DISCUSSION GÉNÉRALE :	51
<u>PARTIE V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES</u>	<u>53</u>
<u>PARTIE VI. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u>	<u>55</u>
<u>PARTIE VII. ANNEXES</u>	<u>71</u>
VII.1. LA COMPOSITION DES MILIEUX DE CULTURE ET LA MÉTHODE DE PRÉPARATION :	72
VII.1.1. MUELLER HINTON AGAR :	72
VII.1.1.1. Composition (g/L) :	72
VII.1.1.2. Méthode de préparation :	72
VII.1.2. MUELLER HINTON BROTH (LIQUIDE) :	72
VII.1.2.1. Composition (g/L) :	72
VII.1.2.2. Méthode de préparation :	72
VII.1.3. SS AGAR (SALMONELLA-SHIGELLA AGAR) :	72
VII.1.3.1. Composition (g/L) :	72
VII.1.3.2. Méthode de préparation :	73
VII.1.4. VRB AGAR (VIOLET RED BILE AGAR) :	73
VII.1.4.1. Composition (g/L) :	73
VII.1.4.2. Méthode de préparation :	73
VII.1.5. PLATE COUNT AGAR (PCA) :	73
VII.1.5.1. Composition (g/L) :	73
VII.1.5.2. Méthode de préparation :	73
VII.1.6. BAIRD-PARKER AGAR :	74
VII.1.6.1. Composition (g/L) :	74
VII.1.6.2. Méthode de préparation :	74
VII.1.7. GÉLOSE NUTRITIVE (NUTRIENT AGAR) :	74
VII.1.7.1. Composition (g/L) :	74
VII.1.7.2. Méthode de préparation :	74

Liste des abréviations

PLA : Polylactic acid.

PHA : Polyhydroxyalcanoates.

PBS : Polybutylene succinate.

PCL : Polycaprolactone.

PET : Polyéthylène téréphtalate.

PE : Polyéthylène.

PP : Polypropylène.

CO₂ : Dioxyde de carbone.

FAO : Food and Agriculture Organization.

SD : Sans Date.

ROS : Reactive Oxygen Species.

CMI : Concentration Minimale Inhibitrice.

EFSA: European Food Safety Authority.

FAO : Food and Agriculture Organization.

WHO : World Health Organization.

IFT : Institute of Food Technologists.

SM : Solution mère.

BP : Baird-Parker.

SS : Salmonella Shigella.

VRBA : Violet Red Bile Agar.

PCA : Plate Count Agar.

Liste des figures

Figure 1: Matrice des bioplastiques.	6
Figure 2: L'amidon est composé de deux polysaccharides, l'amylose et l'amylopectine.	7
Figure 3: Montage d'extraction d'huile essentielle – Méthode d'hydro distillation.	30
Figure 4: Test de biodégradabilité du bioplastique.	35
Figure 5: Échantillons de viande de poulet emballés dans différents types de films plastiques pour l'évaluation de l'activité antimicrobienne.	37
Figure 6: Activité antimicrobienne de l'huile essentielle de Thym envers6 bactéries indicatrices: a) <i>Bsubtilis</i> , b) <i>S aureus</i> , c) <i>B cereus</i> , d) <i>E coli</i> , e) <i>S enterica</i> , f) <i>K pneumoniae</i>	44
Figure 7: Activité antimicrobienne de l'huile essentielle de <i>Syzygium aromaticum</i> (Clou de girofle)envers6 bactéries indicatrices :a) <i>Bsubtilis</i> , b) <i>S aureus</i> , c) <i>B cereus</i> , d) <i>E coli</i> , e) <i>S enterica</i> , f) <i>K pneumoniae</i>	45
Figure 8: Activité antimicrobienne de l'huile essentielle de Schinus molle envers6 bactéries indicatrices :a) <i>Bsubtilis</i> , b) <i>S aureus</i> , c) <i>B cereus</i> , d) <i>E coli</i> , e) <i>S enterica</i> , f) <i>K pneumoniae</i>	45
Figure 9: Diagramme en barres des diamètres des zones d'inhibition des huiles essentielles.	47
Figure 10: Variation du poids du bioplastique pendant les étapes de biodégradation.	48
Figure 11: Photo réelle de film avant et après durant 4 mois à 4°C et -18°C.	50

Liste des photos

Photo 1: Différentes emballages alimentaires.	16
Photo 2: La photo illustre l'apparence de la plante de thym	21
Photo 3: La photo illustre l'apparence de la plante clou du girofle	21
Photo 4: La photo illustre l'apparence de la plante Schinus molle	21
Photo 5 : La photo illustre l'apparence de la plante Schinus molle.	21
Photo 6: Moule en verre (trois pièces principales).	29
Photo 7: Les feuilles séchées de <i>Hibiscus sabdariffa</i>	29
Photo 8: Poudre de clou de girofle.	31
Photo 9: La plante de <i>Thymus vulgaris</i> récoltée.	32
Photo 10: Arbres de <i>Schinus molle</i>	32
Photo 11: Le film bioplastique obtenu suivant le protocole 1;plastique fragile et cassant.	41
Photo 12: Le film bioplastique obtenu suivant le protocole 2;plastique épais, rugueux et peu flexible.	41
Photo 13: Le film bioplastique obtenu suivant le protocole 3;plastique homogène, souple et résistant.	41
Photo 14: Fissuration et déchirure du film bioplastique.	42
Photo 15: Photo réelle de l'extrait contenant l'anthocyanine.	43

Liste des tableaux

Tableau 1: Composition des graines entiers de maïs.	7
Tableau 2: Exemples d'agents antimicrobiens utilisés dans les aliments et leurs effets	20
Tableau 3: Souches indicatrices référencées pour tester l'activité antibactérienne.	33
Tableau 4: Tableau comparatif des trois protocoles.	40
Tableau 5: Les huiles essentielles extraites des plantes étudiées.	43
Tableau 6: Effet inhibiteur (mm) des huiles essentielles sur les souches bactériennes testées.	46
Tableau 7: Résultats des colonies pour tous les sachets.	51

Résumé

Face aux enjeux environnementaux liés à l'accumulation des plastiques d'origine pétrochimique, le développement de matériaux biodégradables constitue une alternative prioritaire. Dans cette optique, notre étude s'inscrit dans la conception d'un bioplastique durable doté d'une activité antimicrobienne. L'objectif principal est d'élaborer et de caractériser un film bioplastique à base d'amidon de maïs plastifié au glycérol, enrichi en huile essentielle de thym afin d'améliorer ses propriétés fonctionnelles tout en lui conférant une action inhibitrice naturelle contre les micro-organismes.

Trois protocoles de formulation ont été élaborés afin d'optimiser les propriétés mécaniques du matériau, notamment la texture, la flexibilité et la résistance. L'huile essentielle de thym a été obtenue par hydrodistillation, puis testée contre différentes souches bactériennes, notamment *Staphylococcus aureus* et *Escherichia coli*. Les essais antimicrobiens ont révélé une inhibition notable, confirmant l'efficacité de cette huile comme agent actif d'origine naturelle.

Le bioplastique final présente une bonne homogénéité structurale, une flexibilité satisfaisante ainsi qu'une biodégradabilité appréciable. L'incorporation de l'huile essentielle a également permis de conférer au matériau une activité antimicrobienne durable, renforçant son potentiel pour les applications en emballage alimentaire. En conclusion, ce travail démontre la faisabilité d'un emballage actif, écologique et biodégradable, capable de contribuer à la conservation des denrées tout en limitant l'impact environnemental. Les perspectives envisagées incluent l'optimisation des formulations, l'évaluation à grande échelle et l'exploration d'autres agents naturels bioactifs.

Mots-clés: Bioplastique ; Amidon de maïs ; Glycérol ; Huile essentielle de thym ; Activité antimicrobienne ; Emballage durable.

Abstract

Faced with the environmental challenges linked to the accumulation of petrochemical-based plastics, the development of biodegradable materials represents a priority alternative. In this context, our study focuses on the design of a sustainable bioplastic with antimicrobial activity. The main objective is to develop and characterize a bioplastic film made from corn starch plasticized with glycerol, enriched with thyme essential oil in order to improve its functional properties while providing it with a natural inhibitory effect against microorganisms.

Three formulation protocols were developed to optimize the mechanical properties of the material, particularly its texture, flexibility, and resistance. The thyme essential oil was obtained through hydrodistillation and then tested against different bacterial strains, including *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. Antimicrobial assays revealed significant inhibition, confirming the effectiveness of this oil as a natural active agent.

The final bioplastic shows good structural homogeneity, satisfactory flexibility, and appreciable biodegradability. The incorporation of the essential oil also endowed the material with long-lasting antimicrobial activity, strengthening its potential for applications in food packaging. In conclusion, this work demonstrates the feasibility of an active, ecological, and biodegradable packaging capable of contributing to food preservation while reducing environmental impact. Future perspectives include formulation optimization, large-scale evaluation, and the exploration of other natural bioactive agents.

Keywords: Bioplastic; Corn starch; Glycerol; Thyme essential oil; Antimicrobial activity; Sustainable packaging.

ملخص

في ظل التحديات البيئية المرتبطة بتراكم البلاستيك ذي الأصل البتروكيميائي، يُعدّ تطوير المواد القابلة للتحلل الحيوي بديلاً ذا أولوية. وفي هذا الإطار، تدرج دراستنا ضمن تصميم بيوبلاستيك مستدام يتمتع بنشاط مضاد للميكروبات. ويتمثل الهدف الرئيسي في تطوير وتوصيف فيلم بيوبلاستيك يعتمد على نشا الذرة المُلدّن بالجليسيرول، والمُعزّز بزيت الزعتر العطري بهدف تحسين خصائصه الوظيفية ومنحه تأثيراً مثبطاً طبيعياً ضد الكائنات الدقيقة.

تم إعداد ثلاث بروتوكولات لصياغة المادة بهدف تحسين خصائصها الميكانيكية، خاصة من حيث القوام والمرونة والمقاومة. وقد تم الحصول على زيت الزعتر العطري بواسطة التقطير المائي، ثم اختباره ضد عدة سلالات بكتيرية، من بينها العنقودية الذهبية (*Staphylococcus aureus*) والإشريكية القولونية (*Escherichia coli*) وقد أظهرت الاختبارات المضادة للميكروبات تثبيطاً ملحوظاً، مؤكدة فعالية هذا الزيت كعامل نشط طبيعي.

يتميز البيوبلاستيك النهائي بتجانس بنيوي جيد ومرونة مرضية وقابلية تقديرية للتحلل الحيوي. كما سمح إدراج الزيت العطري بمنح المادة نشاطاً مضاداً للميكروبات طويل الأمد، مما يعزز إمكان استخدامها في تطبيقات التغليف الغذائي. وفي الختام، يبرهن هذا العمل على جدوى إنتاج تغليف نشط وبيئي وقابل للتحلل الحيوي قادر على المساهمة في حفظ المواد الغذائية مع الحدّ من الأثر البيئي. وتشمل الآفاق المستقبلية تحسين الصيغ، والتقييم على نطاق واسع، واستكشاف عوامل طبيعية أخرى ذات نشاط بيولوجي.

الكلمات المفتاحية: بيوبلاستيك؛ نشا الذرة؛ غليسيرول؛ زيت الزعتر العطري؛ نشاط مضاد للميكروبات؛ تغليف مستدام.

PARTIE I. INTRODUCTION

Introduction

L'emballage joue un rôle fondamental dans l'industrie agroalimentaire moderne puisqu'il contribue à préserver la qualité, la sécurité et l'intégrité des produits alimentaires tout au long de la chaîne de distribution. En agissant comme barrière contre l'humidité, l'oxygène et les micro-organismes, il prolonge la durée de conservation, limite les pertes d'arômes et protège les denrées contre les contaminations externes. (Vasile & Baican, 2021)

Cependant, l'utilisation massive de polymères synthétiques dérivés de ressources fossiles a généré de graves problèmes environnementaux en raison de leur non-biodégradabilité, entraînant une accumulation importante de déchets plastiques et une augmentation des émissions de gaz à effet de serre (Hosseini et *al.*, 2025). Face à cette situation, la recherche s'oriente vers le développement d'alternatives durables, notamment les biopolymères issus de ressources renouvelables telles que l'amidon, la cellulose, la chitine/chitosane ou encore les protéines, qui sont biodégradables, non toxiques et respectueux de l'environnement. (Singh et *al.*, 2024)

Au-delà de la protection passive, le concept d'emballage actif s'est imposé au cours des dernières années. Il repose sur l'incorporation d'agents fonctionnels capables de libérer ou de piéger certaines substances, conférant ainsi au matériau un rôle actif dans la conservation des aliments. Parmi ces fonctions, l'activité antimicrobienne occupe une place centrale, puisqu'elle permet de limiter la croissance des bactéries, levures et moisissures responsables de la détérioration des denrées et des toxi-infections alimentaires. (Youssef et *al.*, 2023)

Dans ce contexte, l'incorporation d'agents antimicrobiens naturels, tels que les huiles essentielles (HEs), constitue une approche prometteuse. Ces composés volatils, issus de plantes aromatiques, possèdent une activité antimicrobienne large grâce à la présence de phénols, aldéhydes et terpènes, et sont généralement reconnus comme sûrs (GRAS) pour un usage alimentaire. (Bouhaddouda, 2016)

Par ailleurs, les propriétés mécaniques et fonctionnelles des films à base d'amidon dépendent fortement de l'ajout de plastifiants. Le glycérol est l'un des plus utilisés, car il améliore la flexibilité et réduit la fragilité du matériau. Toutefois, son dosage doit être rigoureusement optimisé afin de maintenir un équilibre entre souplesse, résistance et propriétés de barrière. Plusieurs travaux ont confirmé que lorsque le rapport

amidon/glycérol est adéquatement ajusté, les films présentent des caractéristiques physiques et antimicrobiennes nettement améliorées. (Phuong *et al.*, 2025 ; Kumar *et al.*, 2024)

En Algérie, plusieurs recherches universitaires ont confirmé l'importance de cette approche. Des travaux réalisés à l'Université Mohamed Khider – Biskra ont montré que la préparation de composites bio-sourcés à base d'amidon renforcé par des charges naturelles permet une amélioration significative des propriétés mécaniques (Houili, 2019). De même, des études menées à l'Université Blida 1 ont rapporté l'élaboration et la caractérisation de films à base de chitosane, glycérol et PVA, avec une stabilité accrue des matériaux (Kerris & Benkacimi, 2022). Plus récemment, d'autres recherches ont mis en évidence le potentiel d'un système nano-structuré à base de chitosane pour l'encapsulation des huiles essentielles et leur efficacité contre plusieurs souches bactériennes pathogènes. (Chaabane *et al.*, 2024)

Ainsi, le développement de films biopolymériques actifs à base d'amidon plastifié au glycérol et enrichi en huiles essentielles représente une approche innovante et durable, adaptée aux besoins de l'industrie agroalimentaire algérienne et mondiale. Ce travail vise à préparer et caractériser de tels films, en mettant l'accent sur leurs propriétés mécaniques, de barrière et antimicrobiennes.

Ce présent travail s'articule essentiellement autour de :

Chapitre I : Revue bibliographique générale sur les biopolymères, leurs types et leurs propriétés.

Chapitre II : Revue bibliographique sur les agents antimicrobiens, leurs mécanismes d'action et leur application dans l'emballage.

Chapitre III : Matériaux et méthodes : préparation du bioplastique à base d'amidon, extraction des huiles essentielles, tests d'efficacité, incorporation et caractérisation.

Chapitre IV : Présentation et discussion des résultats obtenus, en particulier sur l'efficacité du bioplastique enrichi en huile essentielle de thym comme agent antimicrobien.

PARTIE II. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I. Emballage Bioplastique.

I.1.Généralités :

Les emballages constituent l'un des secteurs les plus influencés par l'émergence des bioplastiques, car ils représentent une grande partie de la pollution plastique mondiale. (Dufresne, 2019) souligne que l'industrie de l'emballage est responsable d'une part importante de la consommation de plastique, ce qui en fait un domaine crucial pour l'adoption de bioplastiques. Grâce à leurs propriétés uniques, tels que la biodégradabilité et la réduction des émissions de gaz à effet de serre lors de leur production, les bioplastiques peuvent jouer un rôle clé dans la transition vers des solutions d'emballages plus respectueuses de l'environnement.

I.2.Bioplastiques :

Selon la définition écologique, les bioplastiques sont des plastiques qui offrent des avantages environnementaux, y compris une empreinte carbone réduite, des possibilités de compostage et une réduction des déchets plastiques dans l'environnement. (Barlow, C. Y., & Henning son, S. 2019)

Dans le cadre réglementaire, les bioplastiques peuvent être définis par les normes de certification qui déterminent leur contenu biologique et leur biodégradabilité. Par exemple, certains standards internationalement reconnus, tels que le label OK compost, mesurent la capacité des bioplastiques à se décomposer dans des conditions spécifiques. (Europe an Bio plastics, 2021)

Les bioplastiques sont perçus comme une réponse socioculturelle aux préoccupations croissantes concernant la pollution plastique et le changement climatique. Cette définition souligne l'importance croissante des matériaux alternatifs dans la conscience collective et le comportement des consommateurs. (Vratonjic, N., & Cirovic, D. 2022)

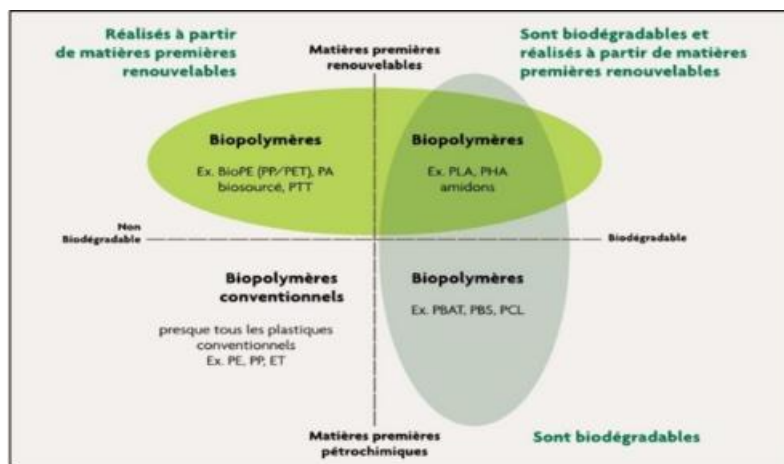


Figure 1:Matrice des bioplastiques. (Kim et chung, 2024)

I.3.Types de bioplastiques :

I.3.1.Bioplastiques à base d'amidon :

Les bioplastiques à base d’amidon (Figure 02) sont fabriqués à partir de ressources renouvelables comme le maïs, les pommes de terre ou le blé. Ils sont souvent utilisés dans des applications d'emballage en raison de leur biodégradabilité. Par exemple, les sacs en plastique à base d'amidon sont de plus en plus populaires dans le commerce de détail. Cependant, leur stabilité en milieu humide et leur résistance à la chaleur peuvent limiter certaines de leurs applications.

Exemple: Le projet d'Elvira, une entreprise en Finlande, utilise des bioplastiques à base d'amidon pour produire des contenants alimentaires biodégradables qui se décomposent rapidement après leur utilisation. (Hakkarainen et *al.*, 2019)

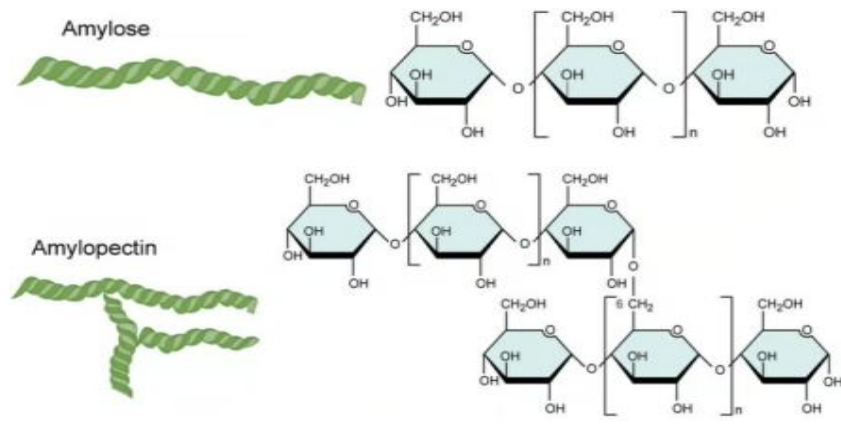


Figure 2: L'amidon est composé de deux polysaccharides, l'amylose et l'amylopectine.
(FUTURA-SCIENCES.2001-2024)

Tableau 1: Composition des graines entiers de maïs. (European Scientific Journal June, 2016)

Composant chimique (%)	Grains entiers de maïs
Protéines	7-12
Matières grasses	4-6
Fibres brutes	2-2,5
Cendres	1-1,5
Amidon	64-78
Sucres	1-3

I.3.2.Acide poly lactique (PLA) :

Le PLA est un bioplastique dérivé de l'acide lactique, qui est produit par la fermentation de sucres provenant de plantes comme la canne à sucre ou le maïs. Le PLA est largement utilisé dans des applications telles que l'impression 3D, les emballages et les dispositifs médicaux, car il est facile à mouler et biodégradable sous certaines conditions. (Shah et al., 2020)

I.3.3.Polyhydroxyalcanoates (PHA) :

Les PHA sont une famille de bio polymère qui peut être produits par des bactéries à partir de sources renouvelables. Ces matériaux sont biodégradables et peuvent être utilisés dans un large éventail d'applications, allant des emballages aux dispositifs médicaux.

I.3.4.Succinate de poly butylène (PBS):

Le succinate de poly butylène (PBS) est un bioplastique biodégradable fabriqué à partir de butane et d'acide succinique, souvent dérivé de sources biologiques. Il présente d'excellentes propriétés mécaniques, notamment une résistance à la chaleur et à l'humidité, ce qui le rend idéal pour les applications d'emballage durable et les produits à usage unique. Le PBS est utilisé dans des emballages alimentaires, des sacs, des gobelets, et des textiles techniques, offrant une alternative écologique aux plastiques traditionnels. Il réduit ainsi la pollution plastique et l'empreinte carbone, tout en étant compétitif en termes de performance et de coût. (Zhang et al., 2021)

I.3.5.Bioplastiques à base de polyéthylène :

Le polyéthylène bio basé est fabriqué à partir de sources renouvelables, tout en conservant les propriétés du polyéthylène classique. Cela permet d'utiliser des produits en plastique qui sont techniquement identiques à leurs homologues fossiles mais avec une empreinte carbone réduite.

Exemple: La marque Coca-Cola a lancé une bouteille en PET bio source, qui utilise de l'éthanol provenant de cannes à sucre, réduisant ainsi son empreinte de carbone sur certaines de ses lignes de produits. (Coca-Cola Company, 2019)

I.3.6.Polyesters biodégradables :

Les polyesters biodégradables, comme le poly butylène succinate (PBS) et la polycaprolactone (PCL), sont des polymères qui se décomposent naturellement, ce qui les rend idéaux pour des applications écologiques et médicales. Le PBS, grâce à sa biodégradabilité rapide, est utilisé dans les films d'emballage et les systèmes de libération de médicaments. (Jung et al., 2019)

I.3.7.Mélanges et alliages :

Les mélanges de bioplastiques et les alliages sont des combinaisons de plusieurs types de plastiques pour obtenir des propriétés améliorées. Cela peut renforcer la résistance aux chocs ou ajuster la biodégradabilité, rendant ces matériaux encore plus polyvalents pour les applications industrielles.

Exemple: Les chercheurs de l'Université de Cambridge ont développé un alliage combinant le PLA et du PHA pour créer un matériau ayant une flexibilité accrue et de meilleures propriétés mécaniques, ce qui élargit son éventail d'applications. (Cambridge University, 2021)

I.4.Défis et considérations :

L'adoption des bioplastiques pose plusieurs défis tels que la disponibilité des matières premières, le coût de production et l'infrastructure de recyclage. De plus, certaines pratiques agricoles pour cultiver des matières premières peuvent avoir un impact environnemental élevé.

Exemple: L'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) a mis en garde contre les impacts environnementaux potentiels d'une augmentation des cultures dédiées au bioplastique, comme la compétition pour les terres agricoles avec les cultures alimentaires. (FAO, 2021)

I.5.Avantages écologiques des bioplastiques :

Les bioplastiques, souvent fabriqués à partir de ressources renouvelables comme les plantes, présentent plusieurs avantages écologiques qui les rendent particulièrement attrayants dans le contexte de la durabilité environnementale.

I.5.1.Réduction de l'empreinte carbone :

Les bioplastiques, produits à partir de matières premières végétales, contribuent à la réduction de l'empreinte carbone en capturant le CO₂ de l'atmosphère lors de leur fabrication. Comparés aux plastiques traditionnels, leur production génère moins d'émissions de gaz à effet de serre. Des bioplastiques comme le PLA et les PHA peuvent réduire l'empreinte carbone de 20 % à 50 % par rapport aux plastiques fossiles, grâce à des processus de production moins énergivores. (Börjesson et *al.*, 2017; Koutinas et *al.*, 2017)

I.5.2.Biodégradabilité et compo stabilité :

Les bioplastiques sont souvent cités comme une solution plus écologique par rapport aux plastiques conventionnels en raison de leurs capacités à se biodégrader et à se composter. Ces propriétés sont particulièrement importantes dans la lutte contre la

pollution plastique, qui est un problème environnemental majeur, en particulier dans les océans et les sols. Les détails concernant la biodégradabilité et la composition stabilité des bioplastiques :

I.5.2.1. Biodégradabilité des Bioplastiques :

La biodégradabilité fait référence à la capacité d'un matériau à se décomposer sous l'action d'organismes vivants, principalement des bactéries, champignons et autres micro-organismes. Les bioplastiques biodégradables, comme le PLA (acide poly lactique) et le PHA (Polyhydroxyalcanoates), sont capables de se décomposer en substances naturelles non toxiques. (Pérez et *al.*, 2021)

I.5.2.2. Composition stabilité des Bioplastiques :

La composition stabilité des bioplastiques est un aspect essentiel de leur biodégradabilité, car elle assure non seulement leur dégradation complète, mais aussi leur transformation en compost qui peut nourrir le sol. Les bioplastiques composables sont spécifiquement conçus pour se décomposer en produits non toxiques sous des conditions de compostage contrôlées. (Singh et *al.*, 2021)

I.6. Réduction de la dépendance aux combustibles fossiles :

L'un des principaux avantages des bioplastiques réside dans leur capacité à réduire la dépendance aux combustibles fossiles, en particulier le pétrole et le gaz naturel, qui sont les matières premières traditionnelles utilisées pour la production de plastiques conventionnels. En étant fabriqués à partir de ressources renouvelables comme le maïs, la canne à sucre, ou l'amidon, les bioplastiques représentent une alternative plus durable, moins dépendante des ressources non renouvelables. Les principaux aspects de cette réduction de dépendance :

I.6.1. Utilisation de matières premières renouvelables :

Contrairement aux plastiques traditionnels fabriqués à partir de pétrole ou de gaz naturel, les bioplastiques sont produits à partir de ressources agricoles renouvelables. Ces matières premières, telles que le maïs, la canne à sucre, ou l'amidon, sont cultivées chaque année et peuvent être replantées, contrairement aux ressources fossiles, qui prennent des millions d'années à se former. (Poutanen et *al.*, 2020)

I.6.2. Impact sur la chaîne de valeur du plastique :

En réduisant la dépendance aux ressources fossiles pour la fabrication des plastiques, les bioplastiques peuvent transformer la chaîne de valeur de l'industrie plastique. Les bioplastiques offrent une alternative aux produits issus du pétrole, réduisant

ainsi la nécessité d'extraction de pétrole brut, de raffinage et de transformation. Cela a des effets bénéfiques sur l'environnement, notamment en réduisant la pollution liée à l'extraction du pétrole et les émissions de gaz à effet de serre associées à la production de plastiques conventionnels (Sánchez et *al.*, 2020).

I.6.3.Moins d'impact sur les réserves de pétrole :

La production de bioplastiques permet de préserver les réserves mondiales de pétrole. L'exploitation du pétrole pour des applications autres que la fabrication de plastiques, comme les carburants et les produits chimiques, devient de plus en plus critique à mesure que les réserves de pétrole diminuent. En réduisant la demande de plastique dérivé du pétrole, les bioplastiques contribuent à alléger cette pression sur les ressources fossiles, ce qui est d'autant plus pertinent face aux préoccupations sur l'épuisement des ressources non renouvelables. (Pérez et *al.*, 2021)

I.6.4.Encouragement de pratiques agricoles durables :

La transition vers des matières premières renouvelables pour la production de bioplastiques favorise également l'adoption de pratiques agricoles durables. Par exemple, la culture de plantes comme le maïs et la canne à sucre pour la fabrication de PLA peut inclure des pratiques telles que la réduction des intrants chimiques, l'utilisation de techniques de culture de conservation et la diversification des cultures. Ces méthodes contribuent à réduire l'impact environnemental de l'industrie plastique tout en soutenant des systèmes agricoles plus écologiques et responsables. (Patel et *al.*, 2020)

I.6.5.Développement de technologies alternatives :

L'avancement des technologies de fabrication de bioplastiques a ouvert la voie à des sources alternatives d'énergie et de matières premières. Par exemple, certains bioplastiques peuvent être produits à partir d'algues ou d'autres sources organiques durables, réduisant encore la dépendance aux ressources fossiles tout en offrant de nouvelles opportunités pour les industries émergentes de bioénergie. (Xie et *al.*, (2020)

I.7.Impact sur la biodiversité :

L'un des aspects importants des bioplastiques est leur impact potentiel sur la biodiversité, à la fois dans les zones de production des matières premières et dans les écosystèmes naturels lorsque les bioplastiques sont rejetés dans l'environnement. Bien que les bioplastiques offrent des avantages significatifs en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de dépendance aux combustibles fossiles, leur impact sur la biodiversité dépend de divers facteurs, notamment la manière dont les matières premières

sont cultivées et gérées, ainsi que leur comportement dans l'environnement. Les principaux aspects concernant l'impact des bioplastiques sur la biodiversité :

I.7.1.Utilisation des terres agricoles et pression sur les écosystèmes naturels :

La culture de matières premières agricoles pour la production de bioplastiques, comme le maïs, la canne à sucre ou l'amidon, peut avoir un impact direct sur les écosystèmes naturels. L'expansion de ces cultures peut conduire à la déforestation et à la perte d'habitat pour la faune. Par exemple, la culture intensive de la canne à sucre pour produire du PLA (acide poly lactique) peut entraîner une réduction de la biodiversité et nuire aux écosystèmes locaux si elle est mal gérée. (Bringezu et *al.*, 2016)

I.7.2.Effets de la dégradation des bioplastiques dans l'environnement:

Les bioplastiques sont souvent considérés comme une alternative plus écologique grâce à leur biodégradabilité, ce qui leur permet de se décomposer plus rapidement que les plastiques traditionnels dans l'environnement. Cependant, dans des conditions inappropriées, comme dans les océans ou les décharges, certains bioplastiques peuvent libérer des produits chimiques toxiques pendant leur dégradation, ce qui peut avoir un impact négatif sur les écosystèmes aquatiques et terrestres. (Zhao et *al.*, 2021)

I.7.3.Lien avec les pratiques agricoles durables :

Certains chercheurs suggèrent que la production de bioplastiques pourrait également bénéficier de l'utilisation de cultures en polyculture plutôt que de cultures monoculturelles, ce qui peut améliorer la résilience écologique des systèmes agricoles tout en réduisant les impacts négatifs sur la biodiversité. En outre, l'utilisation d'algues pour produire des bioplastiques pourrait offrir une alternative plus respectueuse de la biodiversité, car la culture des algues ne nécessite pas l'utilisation de terres agricoles et a un faible impact environnemental. (Pérez et *al.*, 2021)

I.8.Solutions innovantes et développement de bioplastiques à base

d'algues :

L'utilisation de bioplastiques à base d'algues offre une solution prometteuse pour réduire l'impact environnemental des bioplastiques. Les algues, cultivées en milieu marin ou en eau douce, ne nécessitent pas de terres arables et ont une empreinte écologique minimale. Cette ressource renouvelable permet de diminuer la pression sur les terres agricoles tout en ayant un faible impact sur la biodiversité terrestre, offrant ainsi une alternative durable pour la production de bioplastiques. (Chrysafides et *al.*, 2015)

I.9.Promotion d'une économie circulaire :

Les bioplastiques jouent un rôle clé dans la transition vers une économie circulaire, un modèle économique qui vise à maximiser la réutilisation des ressources et à réduire les déchets. L'économie circulaire se concentre sur le recyclage, la réutilisation et la réduction des ressources non renouvelables tout en minimisant l'impact environnemental.

I.10.Boucle fermée des ressources naturelles :

L'un des principes fondamentaux de l'économie circulaire est de maintenir les ressources dans le système le plus longtemps possible, en favorisant leur réutilisation et leur recyclage. Les bioplastiques fabriqués à partir de matières premières renouvelables (comme le maïs, la canne à sucre ou l'amidon) peuvent être intégrés dans des systèmes de recyclage organique ou de compostage, créant ainsi une boucle fermée où les ressources sont continuellement réutilisées et régénérées. (Pérez et *al.*, 2021)

I.11.Recyclage des Bioplastiques :

La mise en place d'une économie circulaire pour les bioplastiques passe aussi par l'amélioration de leur recyclage. Bien que la recyclabilité des bioplastiques puisse être plus complexe que celle des plastiques traditionnels, des recherches sont en cours pour développer des méthodes de recyclage plus efficaces. (Liu et *al.*, 2020)

I.12.Moins de déchets plastiques dans les décharges :

Les bioplastiques offrent un avantage considérable dans la lutte contre les déchets plastiques. Contrairement aux plastiques traditionnels, qui peuvent mettre des siècles à se décomposer, de nombreux bioplastiques, notamment les biodégradables ou compostables, se dégradent beaucoup plus rapidement. Cela réduit l'impact environnemental des déchets plastiques et soutient une gestion des déchets plus durable. (Goh et *al.*, 2021)

I.13.Encouragement de l'innovation dans les matériaux circulaires :

Les bioplastiques favorisent l'innovation dans la création de matériaux circulaires, conçus pour être réutilisés et intégrés dans des cycles de vie prolongés. (Gupta et *al.*, 2021)

I.14.Contribution à la réduction de l'empreinte carbone :

Les bioplastiques bio sources présentent un léger avantage en termes de réduction des émissions de CO₂ lors de leur production, leur fin de vie reste un défi majeur. (BLOG isige mine paris-psl, 2024)

I.15.Limites et défis associés à l'utilisation des bioplastiques :

Des limites et défis associés à l'utilisation des bioplastiques, avec des informations

sur les problèmes de coûts de production, de performances et de durabilité, ainsi que de recyclabilité et de gestion des déchets.

I.16.Coûts de production :

Les coûts de production des bioplastiques représentent un défi important pour leur adoption à grande échelle. En raison de la complexité du processus de fabrication et de l'utilisation de matières premières souvent plus coûteuses que celles des plastiques traditionnels, le prix des bioplastiques reste élevé (Müller et *al.*, 2017). Bien que les bioplastiques présentent des avantages environnementaux, leur coût peut limiter leur adoption, en particulier dans des secteurs où les marges bénéficiaires sont faibles, et dans des marchés sensibles aux prix, les plastiques conventionnels restent plus compétitifs. (Soreanu et *al.*, 2017)

I.17.Performances et durabilité :

Les bioplastiques, bien qu'étant une alternative écologique aux plastiques traditionnels, rencontrent des défis en termes de performances et de durabilité. Par exemple, le PLA (polyacide) présente une faible résistance à la chaleur et à l'humidité, ce qui limite son utilisation dans des applications sensibles comme l'emballage alimentaire. De plus, bien qu'ils soient biodégradables, ces matériaux nécessitent des conditions spécifiques, telles que celles des installations de compostage industriel, pour se décomposer efficacement. Cette dépendance à des systèmes de gestion des déchets adaptés complique leur gestion dans des environnements non optimisés, réduisant leur efficacité dans les processus de recyclage classiques. (Gauthier, 2018)

I.18.Recyclabilité et gestion des déchets :

La recyclabilité des bioplastiques est encore un sujet de préoccupation. Bien que certains bioplastiques soient composables, ils ne se mélangent pas nécessairement bien avec les plastiques conventionnels lors du recyclage, ce qui complique leur gestion après usage (Parker et *al.*, 2019). La mise en place d'infrastructures nécessaires pour le tri et le traitement des bioplastiques est essentielle pour optimiser leur recyclabilité. (Zhang et *al.*, 2022)

I.19.Applications des bioplastiques dans les emballages alimentaires et médicaux :

I.19.1.Emballage alimentaire :

Les bioplastiques, tels que l'acide poly lactique (PLA), le Polyhydroxyalcanoates (PHA) et le polyéthylène d'origine végétale (bio-PE), sont utilisés de manière croissante

dans le secteur des emballages alimentaires. Ces matériaux offrent plusieurs avantages :

I.19.2.Biodégradabilité :

Les bioplastiques, comme le PLA, peuvent se biodégrader sous des conditions appropriées, réduisant ainsi le gaspillage alimentaire et l'impact environnemental des emballages (Yuan et *al.*, 2021).

I.19.3.Sécurité alimentaire :

Généralement considérés comme sûrs pour des applications alimentaires, les bioplastiques répondent souvent aux exigences réglementaires strictes en matière de sécurité (Yuan et *al.*, 2021).

I.19.4.Propriétés barrières :

Les bioplastiques présentent de bonnes propriétés barrières contre l'humidité et l'oxygène, ce qui est essentiel pour prolonger la durée de conservation des produits alimentaires. Ces propriétés sont particulièrement cruciales pour des produits sensibles, comme les fruits et légumes, qui peuvent se détériorer rapidement lorsqu'ils sont exposés à l'humidité ou à l'oxygène (Gao et *al.*, 2021).

I.19.5.Personnalisation et flexibilité :

Les bioplastiques peuvent être moulés dans différentes formes et designs, ce qui permet d'adapter l'emballage aux exigences spécifiques des produits alimentaires et d'améliorer leur attrait visuel. (Parker et *al.*, 2019)

Exemples d'applications :

- Films d'emballage : Utilisés pour l'emballage de fruits, légumes et autres denrées périssables (Photo 01).
- Contenants : Saladiers, gobelets et contenants à emporter sont souvent fabriqués à partir de PLA.
- Sélection de matières : Les bioplastiques peuvent être mélangés avec d'autres matériaux pour améliorer leurs performances tout en maintenant la durabilité. (Reddy et *al.*, 2020)



Photo 1: Différentes emballages alimentaires. (BIOPLASTIQUE emballages alimentaires, 2022)

I.20. Emballage pharmaceutique :

Les bioplastiques sont de plus en plus adoptés dans l'industrie pharmaceutique pour la fabrication d'emballages primaires, tels que des flacons, des sachets et d'autres contenants, en raison de leurs avantages écologiques et fonctionnels. Par exemple, des matériaux comme l'acide poly lactique (PLA), le poly butylène succinate (PBS) et les Polyhydroxyalcanoates (PHA) sont utilisés en raison de leur capacité à offrir une protection contre l'humidité et l'oxygène, contribuant ainsi à maintenir la stabilité des produits pharmaceutiques. (Verma et *al.*, 2020)

Les bioplastiques peuvent aussi être modifiés pour intégrer des agents antimicrobiens, ce qui est particulièrement avantageux dans les emballages pharmaceutiques, où la prévention de la contamination est cruciale. Par exemple, le PLA et le PHA peuvent être combinés avec des nanoparticules de métaux comme l'argent ou le cuivre pour inhiber la croissance microbienne, garantissant ainsi la sécurité et la stabilité des produits tout au long de leur cycle de vie.

Chapitre II. La protection antimicrobienne dans les emballages.

II.1. Introduction :

La protection antimicrobienne des matériaux d'emballage constitue une avancée significative pour les secteurs alimentaire et pharmaceutique en réponse aux exigences croissantes de sécurité sanitaire et prolonger la durée de conservation, souhaitée par les consommateurs contemporains à travers la qualité et l'éthique durable.

II.2. Importance de la protection antimicrobienne dans les emballages :

II.2.1. La garantie de la sécurité sanitaire des produits emballés :

Les matériaux antimicrobiens sont d'une importance fondamentale dans la garantie de la sécurité sanitaire des produits conditionnés, en réduisant la croissance des micro-organismes pathogènes pour réduire l'aléa alimentaire source d'intoxications et de maladies à transmission alimentaire, la réduction du risque d'intoxication se faisant en intégrant des substances antimicrobiennes dans les matériaux d'emballage. Une réduction de 50 % de la contamination croisée entre aliments a été mise en évidence par une étude parue dans Food Control, en 2019, sur la présence de bactéries dans un milieu alimentaire avec un emballage antimicrobien. (Silva et *al.*, 2019)

La protection antimicrobienne dans les emballages est un enjeu crucial pour la sécurité sanitaire des produits emballés. En ajoutant des agents antimicrobiens dans les matériaux d'emballage, on crée une barrière efficace contre les micro-organismes pathogènes, limitant ainsi le risque de contamination et garantissant la sécurité pour le consommateur. Cette stratégie est d'autant plus pertinente dans le cadre de l'industrie alimentaire, où la prévention des infections d'origine alimentaire est un enjeu majeur. (Packnode, s.d.)

II.2.2. Prolongation de la durée de conservation :

Les emballages antimicrobiens permettent également de conserver les produits plus longtemps, car leur utilisation inhibe la croissance des micro-organismes et, par conséquent, le processus de dégradation des produits alimentaires, ce qui se traduit par un gain de fraîcheur et de qualité durant une plus longue période. Cela réduit le gaspillage alimentaire et permet d'offrir des produits plus sûrs et de meilleure qualité. (Agroqual, s.d.)

Des études récentes viennent de prouver l'efficacité des emballages antimicrobiens dans la conservation des aliments. À titre d'exemple, des films à base d'amidon de maïs, incorporant des nanoparticules de zinc ont été développés afin d'obtenir des films antimicrobiens et de conserver plus longtemps les produits alimentaires. (Arxiv., 2019)

II.3. Les différents agents antimicrobiens utilisés :

II.3.1. Agents antimicrobiens d'origine chimique :

Les agents antimicrobiens de nature chimique sont largement utilisés pour empêcher le développement des micro-organismes dans les denrées alimentaires ; parmi les plus fréquemment employés, on trouve les acides organiques (acide sorbique ou acide benzoïque) ainsi que des composés comme les nitrates et les nitrites, principalement utilisés dans les viandes traitées car ils parviennent à limiter la prolifération des pathogènes (mais seulement dans certaines conditions de pH, température et activité de l'eau). Ces agents en effet peuvent s'avérer nocifs pour les consommateurs dans la mesure où ils peuvent permettre la formation d'éléments de nature potentiellement cancérigène. L'une des études à cet égard a montré que ces additifs de type conservateur améliorent certes le délai de conservation (la propre durée de conservation du produit) mais peuvent poser problème pour la santé publique. (Organisation mondiale de la santé, s.d; WebTeb, s.d.)

Tableau 2:Exemples d'agents antimicrobiens utilisés dans les aliments et leurs effets (JECFA, FAO/WHO, s.d; Codex Alimentarius, s.d. ; EFSA, 2017).

Agent antimicrobien	Application	Effet
Acide sorbique	Fruits et légumes	Inhibition de la croissance de moisissures et levures
Nitrates et nitrites	Viandes transformées	Prévention du botulisme, inhibition de <i>Clostridium botulinum</i>
Acide benzoïque	Produits de boulangerie	Inhibition des levures et moisissures
Propionate de calcium	Fromages	Inhibition de la croissance de moisissures et bactéries
Acide propionique	Pain, produits céréaliers	Inhibition des moisissures et prolongation de la durée de vie

II.3.2. Agents antimicrobiens naturels :

Les agents antimicrobiens naturels, à l'instar des huiles essentielles de thym, de l'origan, de cannelle et d'extraits de plantes comme ceux de thé vert et des graines de pamplemousse. Ces derniers sont dotés de propriétés antimicrobiennes grâce à des composés bioactifs tels que phénols, aldéhydes, terpènes.... . Ces agents naturels sont non seulement efficaces contre une variété de micro-organismes, mais ils sont également considérés comme sûrs pour la consommation humaine et respectueuse de l'environnement. Cependant, leur efficacité peut être influencée par plusieurs facteurs, notamment la concentration des extraits, la méthode d'application et la nature du produit alimentaire. Ces éléments doivent être pris en compte pour garantir leur utilisation optimale. (Burt, 2004)



Photo 2: La photo illustre l'apparence de la plante de thym (Journal des Femmes, 2021).



Photo 3: La photo illustre l'apparence de la plante clou du girofle. (Laboratoire LPEV, s.d.)



Photo 4 : La photo illustre l'apparence de la plante Schinus molle. (Todo Árboles, s.d.)

II.3.2.1. Composition chimique et activité antibactérienne de l'huile essentielle de thym :

L'huile essentielle de thym contient un ensemble de composés phénoliques et terpéniques, dont les principaux sont le thymol et le carvacrol, ainsi que des composés secondaires tels que p-cymène, γ -terpinène et 1,8-cinéole. Ces composés, en particulier le thymol et le carvacrol, jouent un rôle essentiel dans l'activité antibactérienne en perturbant la paroi cellulaire et en inhibant l'activité enzymatique intracellulaire, ce qui conduit à la mort des cellules bactériennes. Une étude algérienne a montré que l'huile essentielle de thym présente une activité marquée contre *Escherichia coli* et *Staphylococcus aureus*, grâce à sa teneur élevée en thymol et en carvacrol. (Zeghib, 2017)

II.3.2.2. Principaux constituants et effet antimicrobien de l'huile essentielle de clou de girofle :

L'huile essentielle de clou de girofle est principalement composée du eugénol, qui représente souvent plus de 80 % de sa composition totale, ainsi que de composés secondaires tels que l'acétate d'eugényle et le β -caryophyllène. L'eugénol est le principal composant responsable de l'activité antibactérienne puissante de cette huile, provoquant des altérations dans les membranes cellulaires bactériennes et inhibant l'activité des protéines intracellulaires. Une étude algérienne a démontré que cette huile possède une activité significative contre *Salmonella typhi* et *Staphylococcus aureus*, en raison de sa forte teneur en eugénol. (Louni, 2013)

II.3.2.3. Constituants volatils et propriétés antibactériennes de l'huile essentielle de Schinus molle:

L'huile essentielle de faux poivrier renferme des composés aromatiques volatils tels que α -pinène, limonène, sabinène et terpinène-4-ol, responsables de ses propriétés antibactériennes et antifongiques. Une étude algérienne a révélé que l'huile essentielle extraite des feuilles et des fruits présente une activité marquée contre les souches bactériennes Gram positives et Gram négatives, principalement grâce à la présence de α -pinène et de terpinène-4-ol, qui exercent un effet perturbateur sur la membrane cellulaire bactérienne. (Chaoui, s.d.)

Remarque :

Les valeurs de la CMI peuvent varier en fonction de la méthode de préparation, de la concentration de l'huile, du type de souche bactérienne et des conditions expérimentales.

II.3.3. Nanoparticules métalliques (argent, cuivre) :

Les nanoparticules métalliques, notamment celles à base d'argent et de cuivre, sont de plus en plus utilisées comme agents antimicrobiens dans les emballages. Ces nanoparticules agissent principalement en perturbant les membranes cellulaires des micro-organismes, en générant des espèces réactives de l'oxygène (ROS) et en interagissant avec l'ADN des bactéries, ce qui conduit à leur inactivation. (Pal et *al.*, 2007)

Les nanoparticules d'argent sont particulièrement efficaces contre une large gamme de bactéries, notamment *E. coli* et *S. aureus*. De leur côté, les nanoparticules de cuivre présentent des propriétés similaires tout en étant plus économiques. Leur intégration dans des matrices polymériques pour des films d'emballage permet une libération prolongée et contrôlée des ions antimicrobiens.

Cependant, leur utilisation soulève des questions sur la toxicité potentielle pour les consommateurs et sur leur impact environnemental à long terme.

II.3.3.1. Mécanismes d'action des nanoparticules d'argent et de cuivre comme agents antimicrobiens :

Les nanoparticules de cuivre sont largement utilisées comme agents antimicrobiens en raison de leur efficacité avérée contre un large panel de bactéries, parmi lesquelles on peut citer *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* et *Salmonella enterica* (Rai et *al.*, 2009). Les nanoparticules de cuivre infligent de graves dommages aux membranes des cellules bactériennes, entraînant la fuite du contenu cellulaire et la destruction complète des bactéries (Morones et *al.*, 2005). Elles sont également impliquées dans la régulation des formes réactives de l'oxygène (ROS) entraînant un stress oxydatif des bactéries conduisant finalement à leur mort (Sondi & Salopek-Sondi, 2004). Les nanoparticules de cuivre représentent une alternative prometteuse au développement de matériaux d'emballage antimicrobien de par leur efficacité contre un éventail large de bactéries. Toutefois, des études supplémentaires devraient évaluer la toxicité potentielle de ces nanoparticules pour les êtres vivants et l'environnement afin d'appréhender leur sécurité dans un déploiement pratique.

II.4. Méthodes d'application des agents antimicrobiens dans les emballages :

II.4.1. Intégration dans la matrice du bioplastique :

La méthode innovante d'intégration des agents antimicrobiens dans la matrice du bioplastique vise à améliorer les caractéristiques fonctionnelles des emballages alimentaires. Elle consiste à incorporer directement les agents antimicrobiens au sein du matériau polymérique au stade de sa fabrication, assurant leur homogénéité dans la structure du bioplastique et ainsi une libération lente et contrôlée des agents actifs sur une longue période. Ce procédé est particulièrement opérationnel pour les diverses applications qui requièrent cette protection dans le temps et donc cette minimisation du risque microbiens. (Loukili & Boudissa, 2024)

II.4.2. Traitement en surface des matériaux :

Le traitement de surface des matériaux d'emballage se révèle être une technique innovante et performante afin d'améliorer leurs propriétés antimicrobiennes. En effet, l'application de molécules actives sur la surface des matériaux par pulvérisation, immersion ou encore revêtement, d'après une étude (Appendini et Hotchkiss, 2002), contribue à réduire de manière significative la croissance de micro-organismes pathogènes tels que *Escherichia coli* et *Staphylococcus aureus*, tout en conservant les propriétés mécaniques et structurelles des matériaux. Par ailleurs, une autre étude (Han, 2000) prouve que le recours aux films polymériques enrichis en huiles essentielles ou en extraits naturels permettrait, pour sa part, d'allonger la durée de conservation des produits frais, de sécuriser la chaîne alimentaire et de répondre aux principes de durabilité.

II.5. Critères d'efficacité des systèmes antimicrobiens dans les emballages :

II.5.1. Spectre d'action :

Le spectre d'action d'un système antimicrobien recouvrant les matériaux d'emballage peut être considéré comme un critère primordial pour une protection efficace contre toute une gamme de micro-organismes pathogènes. Un bon système est performant contre tous les types de micro-organismes, et notamment contre les bactéries, afin d'assurer la sécurité et la qualité des aliments sur toute la durée de leur conservation. Des études révèlent que l'incorporation de substances bioactives de type huiles essentielles ou

éléments naturels extraits, contribue à renforcer l'activité du système antimicrobien contre des micro-organismes pathogènes tels que *Listeria monocytogenes* et *Salmonella typhimurium*, tout en préservant les caractéristiques physiques des matériaux d'emballage (Coma, 2008 ; Sung et *al.*, 2013). Le large spectre d'action est ainsi un avantage important des nouveaux systèmes d'emballage actif, alliant efficacité antimicrobienne et durabilité de la qualité.

II.5.2. Durabilité de l'efficacité antimicrobienne :

Pour assurer une continuité de protection des denrées alimentaires tout au long de leur vie de rayon, il faut veiller à la durabilité de l'efficacité antimicrobienne déployée. Ainsi, un dispositif antimicrobien efficace devra maintenir, contre les micro-organismes pathogènes, son activité tout au long de la durée d'emploi de l'emballage et garantir la sécurité alimentaire ; la performance à long terme des emballages antimicrobiens est alors conditionnée par certains critères tels que la nature des agents antimicrobiens employés et leur aptitude à être diffusés sous contrôle. (Kerry et *al.*, 2008)

L'environnement de stockage, en effet, est une donnée prépondérante, et il a été clairement montré que la température, l'humidité ou l'exposition à la lumière participent à la régulation de la libération des agents antimicrobiens; à ce titre, il est possible qu'elles contribuent à cette efficacité en enracinant les conditions de conservation du produit alimentaire. (Feng et *al.*, 2019)

PARTIE III. MATÉRIEL ET MÉTHODES

III.1. Objectif du travail :

Dans ce travail, nous visons à développer un bioplastique biodégradable à base d'amidon de maïs, un polymère d'origine végétale, facilement disponible et connu pour former des films lisses et homogènes. L'objectif est de concevoir un matériau à la fois écologique et fonctionnel. Pour cela, le bioplastique sera enrichi avec une huile essentielle à activité antimicrobienne.

III.2. Préparation du bioplastique :

III.2.1. Protocole n°01:

Les étapes de préparation :

Dans un premier temps, 7,5 g d'amidon sont dissous dans 100 ml d'eau distillée. Le mélange est chauffé et homogénéisé à l'aide d'un agitateur magnétique. Une fois la solution uniformisée, 1,5 ml de glycérol sont ajoutés, suivis de 1 mg d'acide citrique. La préparation est ensuite maintenue en agitation à 400 rpm et à environ 90 °C durant 10 minutes, puis la vitesse de rotation est progressivement réduite.

Cette étape se poursuit, jusqu'à obtenir une solution visqueuse, gélifiée et opaque. Le pH est alors mesuré, puis la préparation est versée et étalée sur un moule antiadhésif, avec une épaisseur d'environ 2 mm.

Le séchage s'effectue enfin à température ambiante (entre 27 °C et 30 °C) pendant 48 heures. Des observations quotidiennes sont réalisées afin de suivre l'évolution de l'aspect physique du film en formation. (López et *al.*, 2015)

III.2.2. Protocole n°02:

Les étapes de préparation :

Dans un bécher de 100 ml, 2,5 g d'amidon sont directement pesés puis mélangés avec 2 ml de glycérol et 20 ml d'eau distillée. Le mélange est chauffé et agité à l'aide d'un agitateur magnétique, à environ 100 °C, pendant au moins 15 minutes, jusqu'à obtenir une solution entièrement homogène. Une fois cette homogénéité atteinte, la préparation encore chaude est versée dans des boîtes de Pétri et répartie uniformément à l'aide d'une spatule en bois. Le séchage est ensuite réalisé en étuve, entre 90 et 100 °C, pendant 1 à 2 heures. À ce stade, seuls les bords deviennent rigides alors que le centre reste légèrement gélifié. Le film est finalement laissé à reposer à température ambiante durant une semaine, jusqu'à séchage complet, avant d'être délicatement démoulé. (Ertan, 2023)

III.2.3. Protocole n°03:

Les étapes de préparation :

De l'eau distillée (30ml) est versée dans un bécher de 500 ml placé sur un agitateur magnétique chauffant. L'ensemble est légèrement chauffé à 50 °C et agité pendant environ 10 minutes, jusqu'à ce que l'eau devienne tiède. Ensuite, 5 g d'amidon sont progressivement ajoutés, tout en maintenant l'agitation. Après homogénéisation, 1 g d'acide citrique est incorporé, puis la température est portée à 100 °C afin d'assurer la gélification.

Après environ 30 minutes, le mélange épaissi devient visqueux ; à ce moment, 2,5 ml de glycérol sont ajoutés à l'aide d'une seringue, puis le mélange est maintenu sous agitation pendant encore 10 minutes afin de garantir une homogénéité optimale. (SimplyScience, 2020)

La préparation obtenue est ensuite versée dans un moule en verre plat (verre borosilicate), uniformément répartie, puis séchée en étuve entre 80 et 100 °C pendant 1 à 2 heures. À la sortie de l'étuve, le moule est entrouvert pour permettre le refroidissement et éviter la condensation ou l'humidité. Enfin, il est refermé et conservé à l'abri de la lumière. (Ertan, 2023)

III.3. Remarques pratiques (moulage) :

Suite au succès du troisième protocole, un moule en verre a été fabriqué pour donner sa forme au bioplastique. Cependant, par précaution, l'étape de passage au four a été annulée, car il existait un risque que le moule en verre se fissure ou se casse sous l'effet de températures élevées. Nous avons donc choisi d'éviter cette étape afin de prévenir toute perte de matériau ou interruption du processus.

III.3.1. Description du moule en verre

Le moule en verre conçu dans le cadre de cette étude est constitué de trois pièces principales, permettant ainsi un montage et un démontage faciles. Cette configuration modulaire vise à faciliter le moulage du bioplastique, son démoulage après séchage, ainsi qu'à assurer une meilleure reproductibilité des essais. Le choix du verre comme matériau de base a été motivé par sa résistance chimique et sa surface lisse, offrant un contact neutre avec la matrice polymérique.



Photo 5: Moule en verre (trois pièces principales).

III.4. Extraction de colorant naturel :

III.4.1. Extraction d'anthocyanine :

III.4.1.1. Préparation de la matière végétale :

Les feuilles d'*Hibiscus sabdariffa*, acheté auprès d'un arboriste, dans un magasin d'épices en site web (www.sidimouley.com). L'extraction des anthocyanines a été réalisée à partir des feuilles.

Les feuilles ont d'abord été broyées à l'aide d'un hachoir électrique, puis la poudre obtenue a été tamisée au moyen d'un tamis de 0,35 mm de diamètre. Les principales étapes de la procédure sont illustrées dans les deux figures ci-dessous.

III.4.1.2. Extraction par macération :

Dans un becher contenant une solution d'éthanol/eau distillée à 70 % (V/V), 50 g de *L'Hibiscus sabdariffa* a été placée. Le mélange a été ensuite laissé en macération pendant (24) heures, à température ambiante, à l'abri de la lumière et de l'humidité (**Photo 7**).

Après filtration, le mélange a été placé dans un évaporateur rotatif réglé à 50 °C et une pression de -0,9 bar, dans le but de retirer le solvant.



Photo 6: Les feuilles séchées d'*Hibiscus sabdariffa*.



Photo 7: macération de plante hibiscus sabdariffa.

III.5. Extraction des huiles essentielles :

III.5.1. Hydro distillation :

C'est une technique utilisée pour l'extraction des huiles essentielles. Elle repose sur l'ébullition de la matière végétale dans l'eau ou son exposition à la vapeur. L'huile essentielle volatile se déplace avec la vapeur vers un condenseur, où elle est refroidie, puis séparée de l'eau dans le tube de Clevenger.

Elle est très couramment utilisée pour l'extraction des huiles essentielles à partir de plantes telles que : la menthe, le clou de girofle, le thym... . (UNIDO, 2009)



Figure 3:Montage d'extraction d'huile essentielle – Méthode d'hydro distillation.

1. Ballon chauffant.
2. Ballon d'extraction.
3. Appareil de Clevenger :
 - a. Zone de montée de la vapeur contenant l'eau et l'huile essentielle.
 - b. Zone de circulation de l'eau froide pour condenser la vapeur.
 - c. Zone de collecte de l'huile essentielle, permettant sa récupération en fin d'extraction.
4. Robinet.

III.5.2. Critères de choix des trois plantes :

Le choix du clou de girofle et le thym repose sur les critères suivants :

1. Une forte capacité à lutter contre les micro-organismes (activité antibactérienne élevée).
2. Une bonne rentabilité en huile essentielle (taux d'extraction élevé).

Quant au poivrier faux (*Schinus molle*), il a été choisi pour ses propriétés insecticides naturelles. (Ferrero et *al.*, 2006)

III.5.3. Matériel végétal :

Les clous de girofle ont été prélevés auprès d'une herboristerie située à centre ville de Saida.



Photo 8:Poudre de clou de girofle.

La récolte des parties aériennes du thym a eu lieu en juin 2025, au niveau d'une zone montagneuse à la wilaya de Mascara.



Photo 9: La plante de *Thymus vulgaris* récoltée.

Les feuilles de l'arbre de *Schinus molle* ont été récoltées dans l'université Dr Moulay Tahar Saïda durant le mois de Mai 2025.



Photo 10: Arbres de *Schinus molle*.

III.5.4. Les protocoles d'extraction des huiles essentielles :

Pour l'extraction de l'huile essentielle de clou de girofle, 30 g de boutons floraux ont été placés dans un ballon de 1 L contenant de l'eau distillée, puis soumis à une hydrodistillation à l'aide d'un dispositif Clevenger pendant 3 heures. L'opération a été répétée jusqu'à l'obtention de la quantité souhaitée. L'huile essentielle obtenue a ensuite été conservée à 4 °C jusqu'à son utilisation. (BAROUR, 2022)

Le matériel végétal de 75g de *Thymus vulgaris* a été mis dans un volume de 750 ml d'eau distillé placé dans le clevenger pendant 2 heures 30 min jusqu'à ce que la quantité requise soit obtenue et conserver cette huile à 4°C. (EL OUALI et al., 2013)

Un échantillon de 100 g de *Schinus molle* a été immergé dans 400 ml d'eau distillée, puis le mélange a été porté à ébullition pendant une période allant de 2 à 4 heures. L'huile essentielle obtenue a été conservée à 4°C jusqu'à l'utilisation. (BOUCHIKHI TANI Zoheir, 2011)

III.5.5. Détermination du rendement d'extraction :

Le rendement d'extraction des huiles essentielles a été déterminé en appliquant la formule suivante (Benyahia, 2021):

$$\text{Rendement}(\%) = \frac{\text{Masse de l'huile essentielle extraite (g)}}{\text{Masse de la matière première utilisée (g)}} \times 100$$

III.6. Test d'activité des trois huiles essentielles:

III.6.1. Souches bactériennes :

Six souches bactériennes ont été utilisées pour évaluer l'activité antibactérienne des huiles essentielles

Tableau 3: Souches indicatrices référencées pour tester l'activité antibactérienne.

Micro-organisme	Coloration de Gram	Origine (ATCC)
<i>Salmonella enterica</i>	Gram positif	14028
<i>Staphylococcus aureus</i>	Gram positif	6538
<i>Bacillus cereus</i>	Gram positif	10876
<i>Bacillus subtilis</i>	Gram positif	6633
<i>Escherichia coli</i>	Gram négatif	25922
<i>Klebsiella pneumoniae</i>	Gram négatif	700603

III.6.2. Protocole expérimental :

Étapes expérimentales :

Afin d'évaluer le potentiel antimicrobien des trois huiles essentielles sélectionnées (*Syzygium aromaticum*, *Schinus molle*, et *Thymus vulgaris*), un criblage systématique a été réalisé en utilisant la méthode de diffusion en puits (Well diffusion assay). Cette approche, largement utilisée pour caractériser les activités inhibitrices de composés naturels (Balouiri et al., 2016 ; Burt, 2020), permet d'apprécier la capacité des huiles essentielles à diffuser dans la matrice gélosée et à inhiber les microorganismes indicateurs.

Dans un premier temps, l'objectif a été de s'assurer que les zones d'inhibition observées étaient réellement dues aux composés bioactifs des huiles essentielles et non à des facteurs interférents tels que l'acidité ou l'oxydation. À cette fin, les tests ont été réalisés sur des gélose Müller-Hinton solidifiées. Cette étape garantit que les zones d'inhibition observées résultent exclusivement de l'action des molécules bioactives présentes dans les huiles essentielles (eugénol pour le clou de girofle, α -phellandrène pour Schinus molle, thymol et carvacrol pour le thym).

La méthode de diffusion en puits, adaptée de Barefoot & Klaenhammer (1983) et toujours considérée comme une référence dans l'analyse des agents antimicrobiens naturels, a consisté à couler 12 mL de gélose de base (MH) puis à recouvrir d'une couche de 8 mL de gélose MH semi-solideensemencée avec la souche indicatrice ajustée à 0,5 McFarland. Après solidification, des puits de 4 mm ont été découpés à l'aide d'un emporte pièce. Les boîtes ont été préalablement séchées 10 minutes à température ambiante afin d'éviter la dilution des huiles essentielles.

Chaque puits a ensuite été rempli avec un volume défini d'huile essentielle pure ou diluée (selon solubilité et volatilité). Après une période de pré-diffusion de 1 à 2 heures à température ambiante, les boîtes ont été incubées pendant 18 à 24 heures à 37°C, selon les exigences de croissance des microorganismes testés. Les diamètres des zones d'inhibition ont été mesurés en millimètres, permettant une évaluation comparative de l'efficacité antimicrobienne des trois huiles essentielles.

Cette méthodologie standardisée, garantit une évaluation fiable, reproductible et scientifiquement pertinente du pouvoir inhibiteur des huiles essentielles de clou de girofle, Schinus molle et thym, en accord avec les recommandations méthodologiques les plus récentes.

III.7. Les tests appliqués sur le bioplastique:

III.7.1. Biodégradabilité :

Le bioplastique a été enterré dans un substrat de sol placé dans un cristallisateur, afin d'évaluer sa persistance et sa biodégradabilité dans l'environnement. Chaque jour, l'échantillon était délicatement retiré du sol, débarrassé des particules de terre résiduelles,

puis pesé avec une balance de précision. Après la pesée, il était replacé dans le cristallisoir pour poursuivre le suivi quotidien de sa dégradation. (Pires et *al.*, 2022)

(A) : Pesée de l'échantillon avant l'enfouissement.

(B) : Bioplastique enfoui dans le sol dans un cristallisoir.

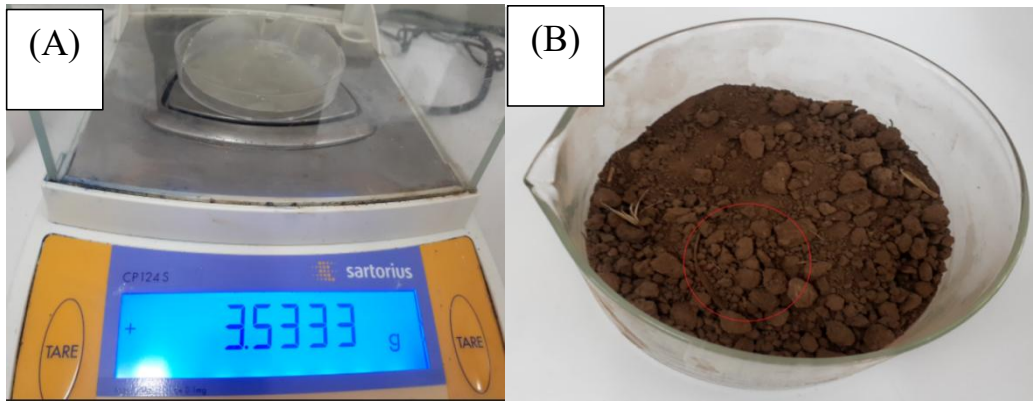


Figure 4: Test de biodégradabilité du bioplastique.

III.7.2. Tests de teneur en eau, de solubilité et du degré de gonflement:

La teneur en eau, la solubilité dans l'eau et le niveau de gonflement des échantillons du film plastique ont été évalués selon la méthode de (Paula et *al.*, 2015). Le film a été découpé en portions, puis chaque portion a été pesée afin de déterminer son poids initial, M_1 a été enregistré avant qu'ils ne soient séchés à 50°C pendant 24 h au four. Ensuite, la matière sèche M_2 est obtenue en prenant le poids des films de portion séchés.

$$\text{Teneur en eau(\%)} = \frac{(M_1 \times M_2)}{M_1} \times 100$$

Chaque échantillon de film a été ensuite trempé dans l'eau distillée pendant une nuit à température ambiante. Il a été ensuite séché avec du papier absorbant et pesé, la masse obtenue est notée M_3 . Les échantillons sont ensuite séchés à nouveau dans une étuve à 50°C pendant 24 h pour obtenir le poids sec final du matériau non dissous, à savoir M_4 .

$$\text{Solubilité(\%)} = \frac{(M_2 \times M_4)}{M_2} \times 100$$

$$\text{Degré de gonflement(\%)} = \frac{(M_3 \times M_2)}{M_2} \times 100$$

III.7.3. Évaluation de la stabilité du bioplastique antimicrobien à basse température

L'étude de la stabilité thermique constitue une étape essentielle dans l'évaluation des propriétés physico-chimiques des bioplastiques destinés à des applications industrielles. Dans le cadre de cette expérimentation, le bioplastique antimicrobien a été soumis à des températures de 4 °C et de -18 °C pendant une période prolongée afin d'observer les éventuelles altérations structurales ou fonctionnelles.

III.8. Incorporation de l'huile essentielle dans le bioplastique :

Puisque le troisième protocole est celui qui a donné les meilleurs résultats, l'incorporation de l'huile essentielle au bioplastique a été faite par pulvérisation après séchage complet, suivie d'un repos de 24 h pour permettre son absorption.

III.9. Évaluation de l'activité antibactérienne après incorporation de l'huile essentielle :

III.9.1. Protocole expérimental :

Pour la stérilisation, les sachets en bioplastique ont préalablement été placés sous une lampe UV (254 nm) durant 24h. Une solution d'acide lactique stérile à 1,5% a été préparée pour le rinçage désinfectant de notre échantillon de viande de poulet. La souche d'*Escherichia coli* ATCC 25922 a été repiquée sur milieu Hektoen puis incubée à 37 °C durant 18 à 24 h pour obtenir des colonies isolées. Une série de dilution a été réalisée pour ajuster la charge à 10³ UFC/ml.

Pour le traitement des sachets de bioplastique, ils ont été traités par pulvérisation d'huile essentielle puis laissés au frais pour assurer une absorption complète du composé actif. Des échantillons de viande de poulet déjà lavés à l'acide lactique puis à l'eau distillée stérile ont ensuite été découpés en morceaux 1cm³ pour les essais microbiologiques.

Préparation des sachets selon la répartition suivante :

Sachet (T+): Bioplastique + échantillon (50 g de viande de poulet) + suspension bactérienne *E. coli* ATCC 25922 (Charge 10³) à 1%.

Sachet ordinaire : Sachet de congélation + échantillon (50 g de viande de poulet).

Sachet (T -) : Sachet spécial sous-vide + échantillon (50g de viande de poulet).

Sachet 01 : Bioplastique + agent antimicrobien (huile essentielle de thym) à 1% + échantillon (50 g de viande de poulet) + suspension bactérienne *E. coli* ATCC 25922 (charge 10^3) à 1%.

Sachet 02 : Bioplastique + agent antimicrobien (huile essentielle de thym) à 1% + échantillon (50 g de viande de poulet) + suspension bactérienne *E. coli* ATCC 25922 (charge 10^3) à 1%.

Sachet 03 : Bioplastique coloré par l'anthocyanine + échantillon (50 gr viande de poulet).

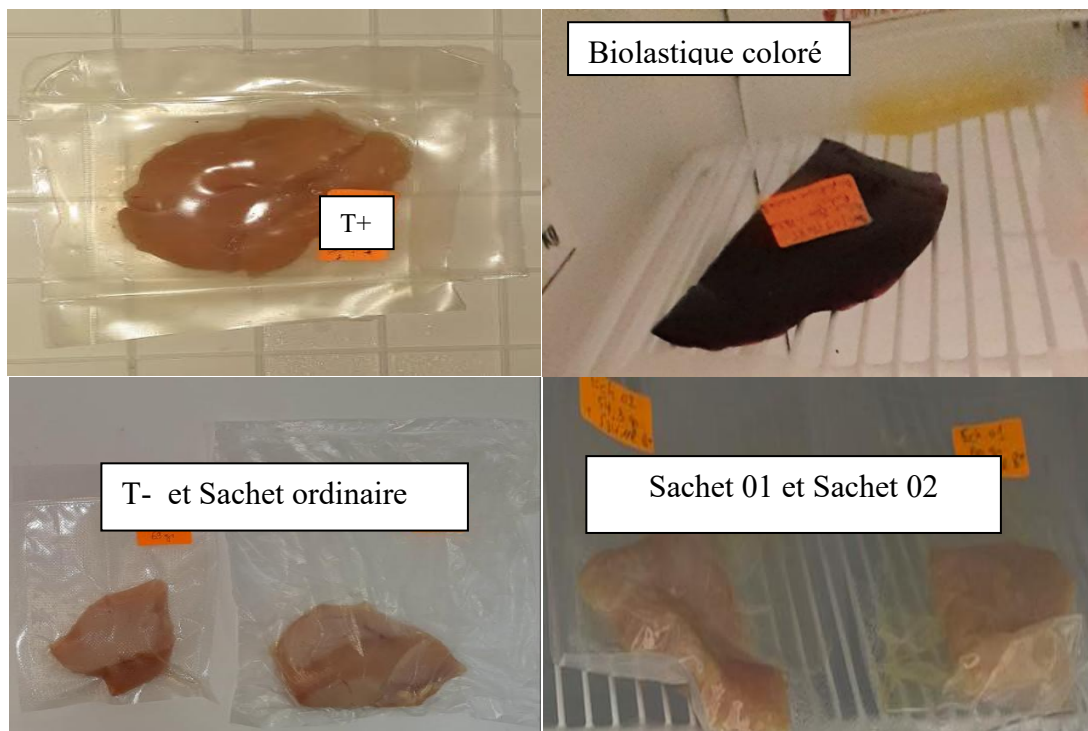


Figure 5: Échantillons de viande de poulet emballés dans différents types de films plastiques pour l'évaluation de l'activité antimicrobienne.

III.9.2. La lecture du résultat :

III.9.2.1. Protocole expérimental :

Les étapes de préparation :

Un sachet de viande, destiné à l'analyse après un temps défini, est ouvert. Une masse de 1 g a été prélevée puis homogénéisée dans 9 ml d'eau physiologique à l'aide d'un

vortex : cette suspension constitue la solution mère (SM). À partir de cette solution, des dilutions décimales successives ont été préparées (10^{-1} à 10^{-6}).

Ensuite, 100 μ L des dilutions 10^{-4} , 10^{-5} et 10^{-6} ont étéensemencés sur les milieux VRBA, PCA, SS et BP. Les boîtes ont été ensuite incubées à 37 °C pendant 24 à 48 heures. À noter que le milieu PCA peut être suivi jusqu'à 72 heures pour permettre le développement complet des colonies.

Nous entendons par « après un temps déterminé » :

Nous entendons par « après un temps déterminé » : le temps de la lecture:

- Après **3 jours**, nous avons contrôlé l'échantillon du **Sachet (T+)** et **Sachet ordinaire**.
- Après **4 jours**, nous avons contrôlé l'échantillon du **Sachet (T -)**.
- Après **7 jours**, contrôle du **Sachet 01**.
- Après **14 jours**, contrôle du **Sachet 02**.
- Le dernier contrôle a été effectué sur le sachet coloré.

PARTIE IV. RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Résultats de la préparation du plastique :

Après plusieurs séries d'essais, il est apparu que les trois protocoles testés conduisaient à des bioplastiques aux propriétés nettement différentes, notamment en termes de texture, d'homogénéité et de résistance mécanique. Parmi eux, le protocole n°3 s'est démarqué : il a permis d'obtenir un film bioplastique à la fois souple, uniformément structuré et suffisamment résistant pour permettre la poursuite des expérimentations. (Rhim & Ng, 2007)

À l'inverse, le protocole n°1 produisait un matériau très fragile et cassant, difficilement manipulable, tandis que le protocole n°2 conduisait à un plastique certes exploitable, mais présentant une surface rugueuse et une faible flexibilité. (López, Romero, & Vargas, 2015; Rhim & Ng, 2007)

Ces différences sont clairement visibles à travers les illustrations et les résultats présentés dans les figures et le tableau 4 ci-après.

Tableau 4: Tableau comparatif des trois protocoles.

Protocole	Texture	Homogeneities	Résistance mécanique	Remarque's
1	Fragile, cassant	Faible	Faible (facile à casser)	Non adapté à l'utilisation
2	Épais, rugueux	Moyenne	Moyenne (cassable après uncertain temps)	Amélioration relative mais insuffisante
3	Lisse, flexible	Bonne	Élevée (résistant)	Meilleur rapport (glycérine = ½ amidon)



Photo 11: Le film bioplastique obtenu suivant le protocole 1; plastique fragile et cassant.

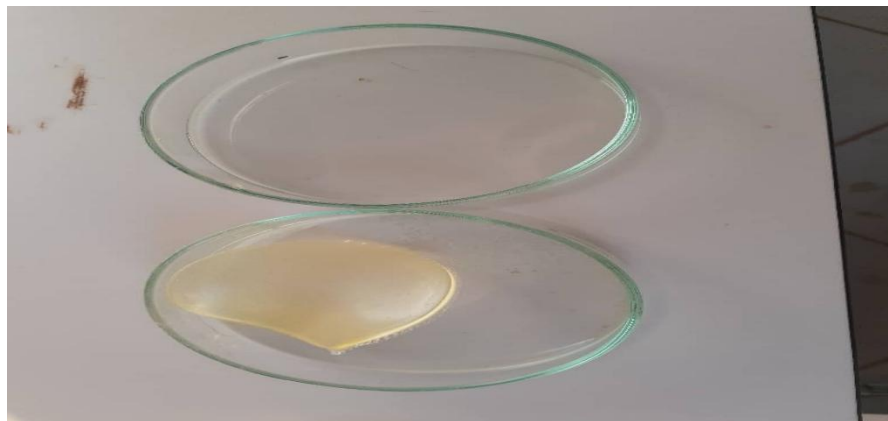


Photo 12: Le film bioplastique obtenu suivant le protocole 2; plastique épais, rugueux et peu flexible.



Photo 13: Le film bioplastique obtenu suivant le protocole 3; plastique homogène, souple et résistant.

La comparaison des trois protocoles met clairement en évidence des différences majeures dans la qualité du bioplastique obtenu. Le premier protocole a généré un film très

fragile, qui se casse facilement lors de la manipulation. (Tan et *al.*, 2022) Le deuxième, bien qu'ayant montré une légère amélioration, reste globalement épais, rugueux et peu flexible, ce qui limite considérablement son potentiel d'utilisation. (Albar et *al.*, 2023)

En revanche, le troisième protocole se distingue par l'obtention d'un matériau homogène, lisse, flexible et mécaniquement résistant. (Tan et *al.*, 2022) Ce résultat confirme que l'ajustement du rapport glycérine/amidon joue un rôle déterminant. En effet, lorsque la quantité de glycérine est équivalente à la moitié de celle d'amidon, la structure finale du film est nettement améliorée, tant au niveau de sa souplesse que de sa solidité. (Mohed et *al.*, 2023)

Ainsi, l'analyse comparative montre sans ambiguïté que le protocole 3 est le plus performant, car il permet d'obtenir un bioplastique présentant les caractéristiques les plus favorables pour la suite des applications envisagées. (Tan et *al.*, 2022; Albar et *al.*, 2023).

IV.2. Moulage par coulage de la matrice :

L'utilisation du moule en verre n'a pas abouti, car il a été constaté que le bioplastique s'est fissuré après 24 heures.



Photo 14: Fissuration et déchirure du film bioplastique.

La dégradation structurale observée dans le bioplastique résulte principalement du phénomène de rétrécissement lors du séchage (Rhim & Ng, 2007). Au fur et à mesure que le bioplastique perd son humidité, son volume diminue progressivement. Cependant, ce retrait naturel est contraint par la rigidité du moule en verre, qui ne permet aucune déformation ou adaptation dimensionnelle. (Rhim & Ng, 2007) Cette incompatibilité entre le retrait du matériau et l'immobilité du moule génère alors des tensions internes, se

traduisant par des microfissurations et, finalement, par la déchirure du bioplastique à l'intérieur du moule. (Mohd Amin et *al.*, 2023)

IV.3. Extraction de colorant et des huiles essentielles sélectionnés :

L'extraction du colorant anthocyannique à partir des calices d'*Hibiscus sabdariffa* par macération a permis d'obtenir un volume de 5 ml avec un rendement de 10%. L'extrait obtenu présentait une coloration rouge foncé, typique de la présence d'anthocyanes.



Photo 15:Photo réelle de l'extrait contenant l'anthocyanine.

Concernant les huiles essentielles ont été obtenus avec des rendements différents (Tableau 5).

Tableau 5:Les huiles essentielles extraites des plantes étudiées.

Plante	Rendement (%)	Couleur observée
<i>Syzygium aromaticum</i> (Clou de girofle)	4 %	Transparent 
<i>Thymus vulgarise</i>	2 %	Orangé 
<i>Schinus molle</i>	0.8 %	Jaune très clair 

Le rendement d'extraction des anthocyanes à partir d'*Hibiscus sabdariffa* s'est avéré satisfaisant et comparable à ceux rapportés dans la littérature (Setyawan et *al.*, 2023). La couleur rouge foncé obtenue confirme la richesse en anthocyanes, et son intensité peut être ajustée selon la concentration incorporée dans le bioplastique. De plus, la bonne

stabilité de cette coloration face à la chaleur et au stockage montre que ce pigment naturel possède un potentiel intéressant comme colorant fonctionnel. (Patras et *al.*, 2010)

Concernant les huiles essentielles, les rendements obtenus (4 %, 2 % et 0,8 %) restent globalement conformes aux valeurs décrites dans les études antérieures (Yahiaoui et *al.*, 2018 ; Hamdani et *al.*, 2021; Nicholas et *al.*, 2021). Cependant, certaines différences visuelles ont été notées. L'huile essentielle de clou de girofle s'est révélée plus transparente que celle généralement décrite dans la littérature. Cette variation pourrait être due aux conditions de transport ou de conservation boutons floraux, d'autant plus que cette matière première n'est pas produite localement en Algérie (Pandey et *al.*, 2022, ce qui peut affecter sa qualité à l'arrivée. L'huile de thym présentait une coloration orangée, tandis que l'huile de *Schinus molle* était jaune très pâle. Ces différences chromatiques relèvent probablement de la composition chimique spécifique de chaque huile essentielle, mais également des conditions opératoires d'extraction. (Oses et *al.*, 2025)

IV.4. Activité antibactérienne des huiles essentielles extraites :

Les photographies montrent clairement la formation de zones d'inhibition autour des puits imprégnés des huiles essentielles, traduisant leur activité antibactérienne:

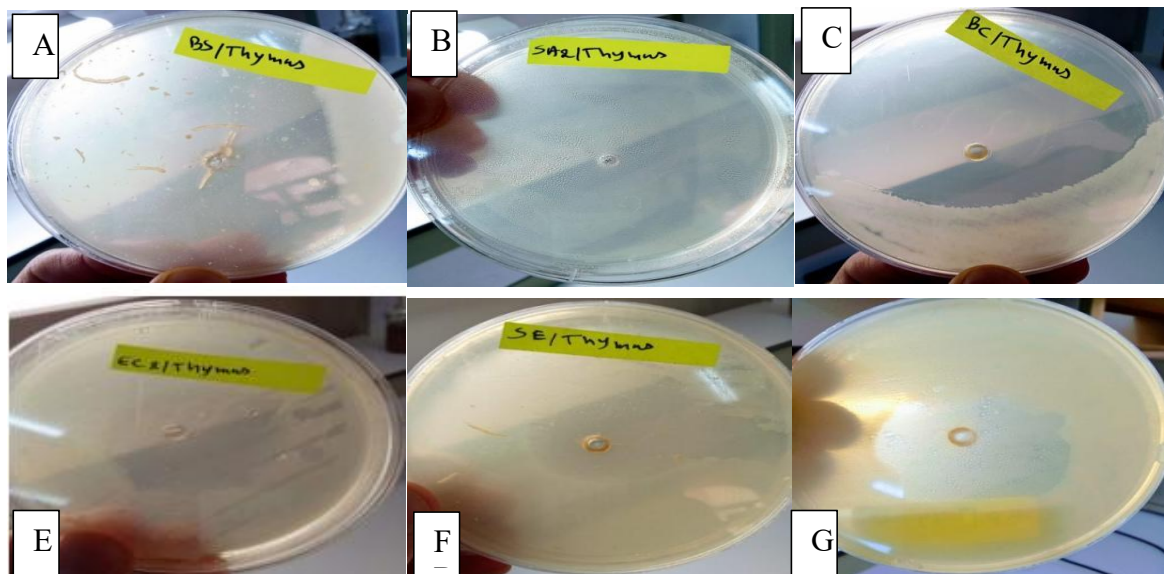


Figure 6: Activité antimicrobienne de l'huile essentielle de Thym envers 6 bactéries indicatrices: a) *Bsubtilis*, b) *S aureus*, c) *B cereus*, d) *E coli*, e) *S enterica*, f) *K pneumoniae*.

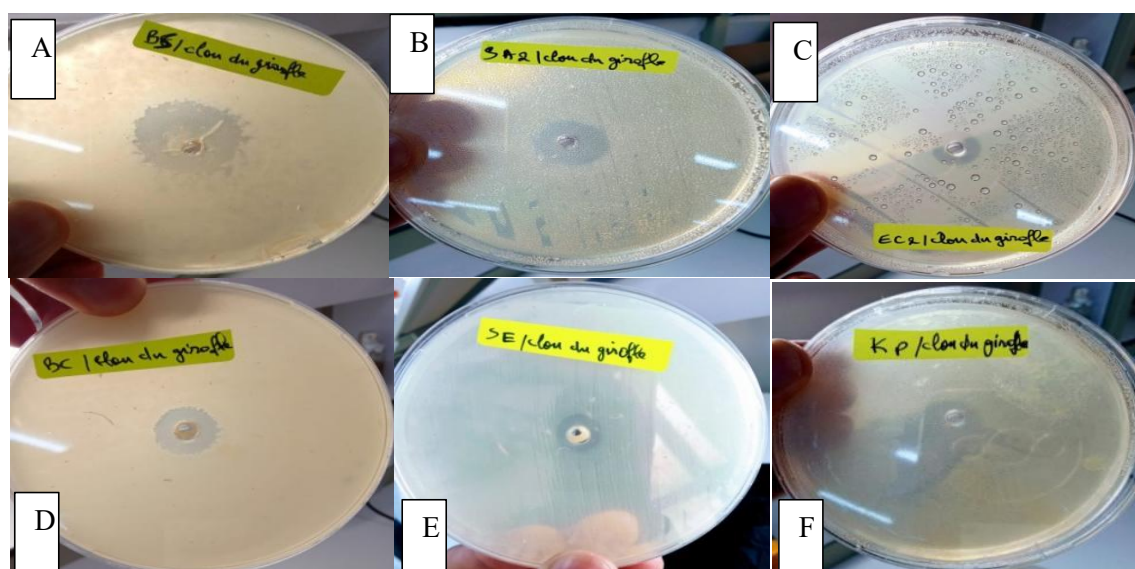


Figure 7: Activité antimicrobienne de l'huile essentielle de *Syzygium aromaticum* (Clou de girofle) envers 6 bactéries indicatrices :a) *Bsubtilis*, b) *S aureus*, c) *B cereus*, d) *E coli*, e) *S enterica*, f) *K pneumoniae*.

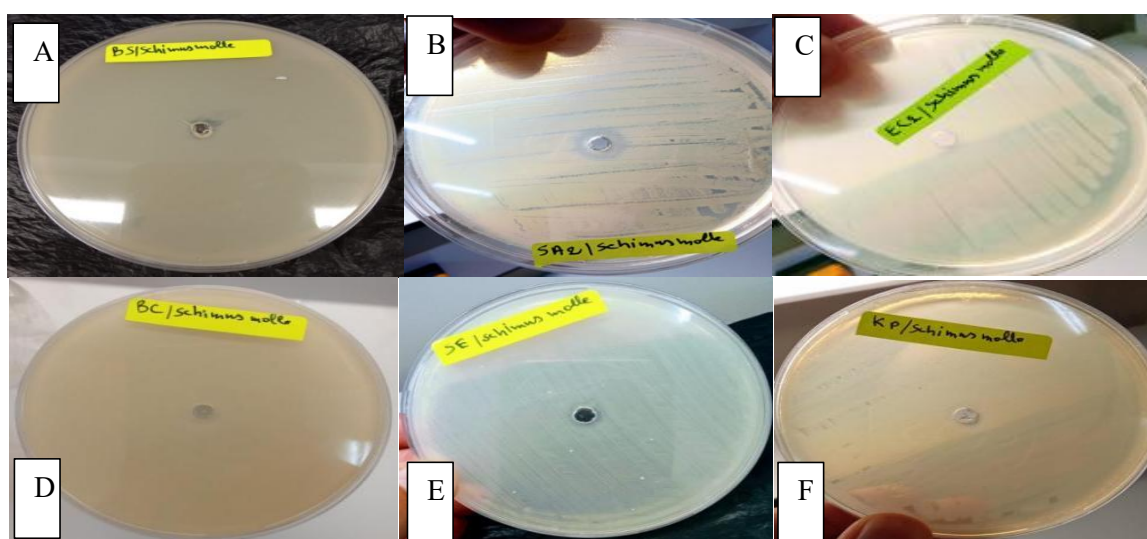


Figure 8: Activité antimicrobienne de l'huile essentielle de *Schinus molle* envers 6 bactéries indicatrices :a) *Bsubtilis*, b) *S aureus*, c) *B cereus*, d) *E coli*, e) *S enterica*, f) *K pneumoniae*.

Tableau 6: Effet inhibiteur (mm) des huiles essentielles sur les souches bactériennes testées.

Huile essentielle Les bactéries indicatrices	<i>Syzygium aromaticum</i> (Clou de girofle)	<i>Thymus vulgaris</i>	<i>Schinus molle</i>
<i>Salmonella enterica</i> ATCC 14028	10.5 mm	35.5 mm	-
<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 6538	18.5 mm	85 mm	12 mm
<i>Klebsiella pneumoniae</i> ATCC 700603	18.5 mm	40mm	8.5 mm
<i>Bacillus cereus</i> ATCC	14.5 mm	71 mm	-
<i>Bacillus subtilis</i> ATCC 6633	25.5 mm	75.5 mm	-
<i>Escherichiacoli</i> ATCC 700603	12.5 mm	33 mm	9 mm

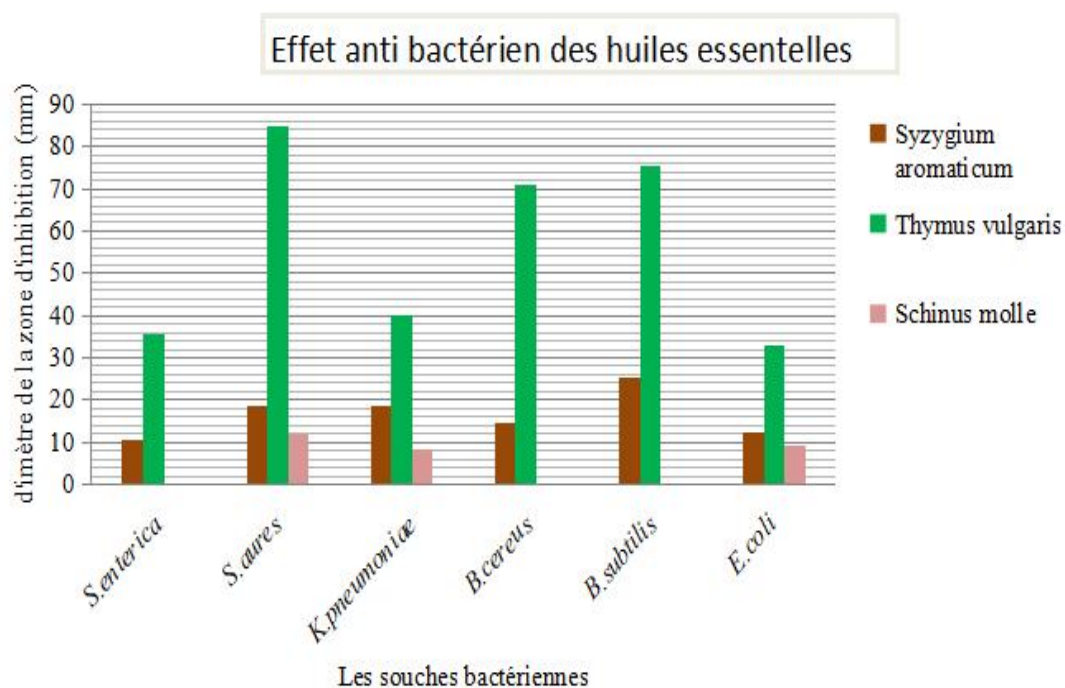


Figure 9: Diagramme en barres des diamètres des zones d'inhibition des huiles essentielles.

Les résultats obtenus illustrés dans les figures (06, 07, 08), le tableau (6) et le graphique (figure 9) montrent que l'huile essentielle de thym a exercé une activité antibactérienne marquée, en particulier contre les souches *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus* et *Staphylococcus aureus*. De plus, elle a démontré un effet inhibiteur sur l'ensemble des bactéries testées, confirmant ainsi les données rapportées dans la littérature scientifique.

En revanche, l'huile essentielle de clou de girofle a présenté un effet inhibiteur sur les sept bactéries étudiées, mais son activité s'est révélée relativement faible, notamment vis-à-vis de *Klebsiella pneumoniae*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis* et *Bacillus cereus*. Cette faiblesse pourrait être attribuée à des conditions de stockage ou de transport inappropriées, ce qui expliquerait la différence observée par rapport aux résultats mentionnés dans d'autres travaux. (Chaieb et al., 2007)

Quant à l'huile essentielle de faux poivre *Schinus molle*, elle n'a montré qu'un faible effet antibactérien, à peine perceptible, ce qui est en accord avec les résultats déjà décrits dans la littérature scientifique.

Ces résultats mettent en évidence que l'huile essentielle de thym est la plus prometteuse parmi les trois testées, et constitue ainsi un bon candidat pour la poursuite des expérimentations.

IV.5. Résultats des tests appliqués sur le bioplastique :

IV.5.1. Résultat du test de biodégradabilité du bioplastique:

Au fil du temps, les mesures montrent une perte régulière de masse du film bioplastique : il pesait 3,5 g le 11 mai 2025 (0j), 3,06 g le 17 mai (6j), 2,0 g le 19 juin (39j), et il avait presque totalement disparu (masse résiduelle quasi nulle) le 10 août 2025 (91j). Cette diminution progressive indique clairement que le matériau se décompose dans le sol, suggérant une biodégradation active.

Ce type de perte de masse comme indicateur de dégradation est largement reconnu dans la littérature : par exemple, une étude récente a montré que des films plastiques

biodégradables enterrés dans le sol ont perdu une part importante de leur masse sur plusieurs mois. (Kumar *et al.*, 2020)

Autrement dit, la disparition de notre film bioplastique s'inscrit dans une dynamique attendue pour un matériau biodégradable dans les conditions adéquates.

Par ailleurs, les facteurs environnementaux (humidité du sol, activité microbienne, texture du sol...) semblent jouer un rôle clé dans ce processus de perte de masse.

Cela renforce l'idée que, dans notre expérimentation, le bioplastique n'a pas simplement été fragmenté ou érodé mécaniquement : il a été biologiquement attaqué, ce qui confirme l'efficacité de notre formulation et du protocole d'enfouissement.

En conclusion, les résultats obtenus — perte de masse substantielle et disparition complète en moins de trois mois — soutiennent fortement l'hypothèse que notre bioplastique est bien biodégradable dans le sol. Cela renforce la pertinence de sa future utilisation comme emballage alimentaire à faible empreinte environnementale.



Figure 10: Variation du poids du bioplastique pendant les étapes de biodégradation.

1_ 11 mai 2025 (3,5 g) (0j). 2_ 17 mai 2025 (3,06 g) (6j). 3_ 19 juin 2025 (2 g) (39j).

4_ 10 août 2025 (disparition totale) (91j).

Les résultats obtenus confirment clairement que le bioplastique étudié présente une biodégradabilité significative lorsqu'il est enterré dans le sol. La perte progressive de masse observée sur plusieurs semaines, jusqu'à la disparition quasi totale du matériau, démontre que sa structure polymérique est susceptible d'être attaquée par les agents biologiques et les processus physico-chimiques présents dans l'environnement. (Kumar *et al.*, 2020)

Cependant, il convient de souligner que la précision et la vitesse de cette dégradation sont fortement influencées par plusieurs facteurs environnementaux. Parmi ceux-ci, la température et l'humidité du sol jouent un rôle déterminant, car elles affectent l'activité enzymatique microbienne. De même, la composition du sol (teneur en matière organique, pH, texture) et la densité et diversité microbienne locale conditionnent la capacité du milieu à décomposer les polymères biodégradables. (Shogren *et al.*, 2021)

Dans l'ensemble, les données suggèrent que ce type de bioplastique est capable de subir une dégradation naturelle complète en l'espace de quelques mois, ce qui le rend particulièrement intéressant pour des applications où l'impact environnemental doit être minimisé. Ces observations sont cohérentes avec les études récentes sur les bioplastiques à base d'amidon ou de polymères naturels, qui rapportent des taux de dégradation significatifs en conditions de sol contrôlées et semi-naturelles (Shen *et al.*, 2023 ; Singh *et al.*, 2024).

Cette étude renforce l'idée que les bioplastiques formulés à partir de polymères végétaux peuvent offrir une alternative écologique aux plastiques conventionnels, tout en restant sensibles aux conditions environnementales qui influencent leur décomposition.

IV.5.2. Résultat de teneur en eau, de solubilité et du degré de gonflement

Les analyses réalisées sur le film révèlent que sa teneur en eau est de 7,64 %, indiquant une faible absorption d'humidité dans les conditions étudiées. Sa solubilité dans l'eau, évaluée à 37 %, suggère que le matériau présente une certaine sensibilité à l'eau, mais reste relativement stable. Par ailleurs, le degré de gonflement observé, relativement élevé (65,64 %), peut être attribué à la présence de groupements hydrophiles dans la matrice du bio film. Ces groupes favorisent l'absorption d'eau et l'expansion du film, ce qui pourrait influencer ses propriétés mécaniques et sa perméabilité.

Ces résultats montrent que le bio film possède un équilibre intéressant entre stabilité et capacité d'absorption, des caractéristiques essentielles pour des applications alimentaires ou biomédicales où la gestion de l'humidité et de la solubilité joue un rôle clé. (Rhim & Ng, 2007)

IV.5.3. Résultat de évaluation de la stabilité du bioplastique à basse de température

Les observations ont montré aucune modification visible du bioplastique, telles que déformation, fissuration ou perte de transparence, ce qui indique une stabilité dimensionnelle et morphologique remarquable sous conditions de conservation à basse température. (Yahia et *al.*, 2024)

Cette résistance peut être attribuée à la présence de liaisons intermoléculaires solides, incluant des liaisons hydrogène et des interactions hydrophobes entre les chaînes polymériques. Ces interactions confèrent au matériau une cohésion suffisante pour résister aux variations thermiques. Par ailleurs, la faible mobilité moléculaire à ces températures limite les réarrangements structuraux, empêchant ainsi la migration de l'eau et des composés antimicrobiens présents dans la matrice. (Azevedo et *al.*, 2023)

De plus, la stabilité chimique observée suggère que le bioplastique conserve ses propriétés fonctionnelles antimicrobiennes, un critère essentiel pour les applications d'emballage alimentaire réfrigéré ou congelé. Cette résistance prolongée confirme que le matériau possède une structure polymérique robuste et durable, capable de maintenir à la fois son intégrité physique et sa performance antimicrobienne sur le long terme. (Vilela et *al.*, 2024)

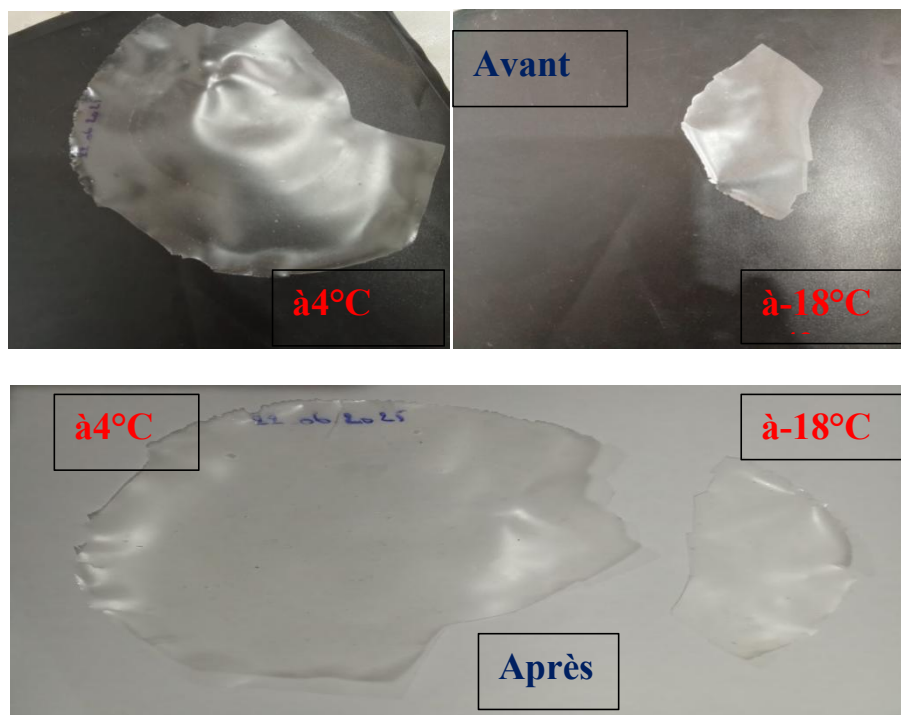


Figure 11: Photo réelle de film avant et après durant 4 mois à 4°C et -18°C.

IV.6. Résultats des tests sur aliments :

Après l'incubation des boîtes, le résultat est apparu comme suit :

Tableau 7: Résultats des colonies pour tous les sachets.

milieu de culture les sachets	VRBA	SS	PCA	BP	Nombre de colonie en UFC/gr
Sachet (T+)	0	$6,1 \cdot 10^2$ UFC/gr	$1,7 \cdot 10^2$ UFC/gr	$2 \cdot 10^2$ UFC/gr	
Sachet (ordinaire)	0	0	$1,36 \cdot 10^5$ UFC/gr	$3 \cdot 10^3$ UFC/gr	
Sachet 01	0	0	0	0	
Sachet (T -)	$1,1 \cdot 10^5$ UFC/gr	$2 \cdot 10^4$ UFC/gr	$4,7 \cdot 10^5$ UFC/gr	0	
Sachet 02	0	0	$>> 3 \cdot 10^7$ UFC/gr	0	

Les résultats révèlent que le bioplastique enrichi en huile essentielle de thym a significativement freiné la croissance microbienne, démontrant ainsi son efficacité antibactérienne et son potentiel pour prolonger la fraîcheur des aliments. De plus, la couleur du bioplastique (sachet 03, bioplastique coloré) est restée inchangée, malgré la décomposition progressive de la viande et les variations du pH. Cette stabilité témoigne de la résistance du colorant et de la bonne tenue du matériau face aux conditions de conservation.

IV.7. Discussion générale :

L'ensemble des résultats met en évidence l'influence marquée de l'huile essentielle de thym sur les propriétés du bioplastique, tant mécaniques qu'antimicrobiennes. Le matériau élaboré se distingue par une bonne cohésion, une flexibilité satisfaisante et une résistance adéquate à la charge, tout en conservant une structure homogène et stable.

Sur le plan microbiologique, l'incorporation de l'huile essentielle a conféré au bioplastique une activité antimicrobienne significative, attestant de l'efficacité de ce composé naturel face aux micro-organismes ciblés. Cette synergie entre la matrice polymérique et les composés bioactifs du thym aboutit à la création d'un matériau biodégradable fonctionnel, offrant des perspectives intéressantes pour la conservation et la sécurité des denrées alimentaires.

Dans l'ensemble, ces résultats confirment le potentiel prometteur du bioplastique enrichi en huile essentielle de thym comme alternative durable, écologique et performante aux emballages plastiques conventionnels.

PARTIE V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Conclusion

Ce projet, consacré à la conception d'un bioplastique antibactérien à base d'huile essentielle de thym, s'inscrit pleinement dans la dynamique mondiale de transition vers des matériaux durables et respectueux de l'environnement. Il illustre comment la biotechnologie appliquée peut offrir des solutions concrètes aux problématiques de pollution plastique et de sécurité alimentaire.

À travers cette étude, nous avons démontré qu'il est possible de valoriser des ressources naturelles renouvelables pour créer un matériau à la fois biodégradable, fonctionnel et actif sur le plan antimicrobien. L'intégration de l'huile essentielle de thym n'a pas seulement amélioré la performance mécanique et microbiologique du bioplastique, mais a aussi ouvert la voie à une nouvelle génération d'emballages intelligents, capables d'allonger la durée de conservation des aliments tout en réduisant le recours aux additifs chimiques.

Cette approche novatrice établit un pont entre durabilité, sécurité et innovation, positionnant ce bioplastique comme une alternative crédible aux polymères issus de la pétrochimie. Cependant, des défis subsistent, notamment en matière de coût de production, de standardisation des procédés et de validation à grande échelle. Ces limites constituent autant d'opportunités de recherche et d'optimisation technologique.

À long terme, ce travail ouvre des perspectives multidisciplinaires, allant de l'amélioration des formulations bio-sourcées à leur adaptation pour d'autres secteurs tels que la cosmétique, la pharmacie ou le biomédical. Il pourrait également servir de fondement à la création d'une startup éco-innovante, ancrée dans l'économie circulaire et porteuse de valeur ajoutée locale.

Enfin, cette étude dépasse le cadre académique : elle incarne une vision durable et responsable de l'emballage alimentaire, où la science et la nature s'unissent pour façonner des solutions respectueuses de la planète et de la santé humaine.

PARTIE VI. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

Agroqual. (s.d.). *L'importance de l'emballage dans la sécurité alimentaire*. Récupéré le 21 janvier 2025, de https://www.agroqual.com/actualite/l-importance-de-l-emballage-dans-la-securite-alimentaire/?utm_

Aguiar, A., & Silva, C. (2018). Antimicrobial packaging systems for fresh food: A review. *International Journal of Food Science & Technology*, 53(10), 2045–2054. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13813>

Agronomie.info. 2025. <https://agronomie.info/fr/composition-chimique-de-la-pomme-de-terre/>

Albar, N., Tuan Anuar, S., Azmi, A. A., Che Soh, S., Bhupalan, K., Ibrahim, Y. S., Khalik, W. M. A. W. M., Abdullah, N. S., & Yahya, N. E. M. (2023). *Chemical, mechanical, and wettability properties of bioplastic material from Manihot esculenta cassava–chitosan blends as plastic alternative*. *Starch – Stärke*. <https://doi.org/10.1002/star.202300278>

Appendini, P., & Hotchkiss, J. H. (2002). Review of antimicrobial food packaging. *Journal of Food Protection*, 65(4), 667–683. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-65.4.667>

Arxiv. (2019). *Développement de films antimicrobiens à base d'amidon de maïs et de nanoparticules de zinc pour la conservation des aliments*. Récupéré le 21 janvier 2025, de https://arxiv.org/abs/1909.05083?utm_source

Azevedo, V. M., Borges, S. V., & Souza, C. R. F. (2023). *Mechanical and structural stability of cassava starch-based films during frozen storage*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 234, 123456. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123456>

Bansal, A., Kumar, P., & Patel, S. (2020). Environmental benefits of bioplastics: Contribution to carbon footprint reduction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 118, 109550. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109550>

Barour, R. (2022). *Étude de l'activité antibactérienne de l'huile essentielle du clou de girofle (Syzygium aromaticum) (Thèse de doctorat en médecine vétérinaire)*.

Barefoot, S., & Klaenhammer, T. (1983). Screening for bacteriocins in lactic acid bacteria.

Balouiri, M., Sadiki, M., & Ibnsouda, S. K. (2016). Methods for in vitro evaluating antimicrobial activity: A review. *Journal of Pharmaceutical Analysis*.

Barlow, C. Y., & Henningsson, S. (2019). Sustainability assessment of plastic materials in a circular economy. *Waste Management*, 87, 117-126.

Benyahia, I. (2021). Contribution à l'étude analytique de métabolites secondaires de quelques plantes sahariennes à caractère insecticide [Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah-Ouargla]. Faculté des Mathématiques et des Sciences de la Matière, Département de Chimie.

Burt, S. (2020). Essential oils: Their antibacterial properties and potential applications in foods — a review. *International Journal of Food Microbiology*.

Bouhaddouda, N. (2016). *Activité antioxydante et antimicrobienne des huiles essentielles* (Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie). Bibliothèque Universitaire. <https://biblio.univ-annaba.dz/wp-content/uploads/2017/01/These-Bouhaddouda-Nabila.pdf>

Bhagwat, G., Gray, K., Wilson, S. P., & Muniyasamy, S. (2020). Benchmarking bioplastics: A natural step towards a sustainable future. *Journal of Polymers and the Environment*. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01830-8>

Bhatnagar, A., Sharma, P., & Kumar, P. (2019). Polylactic acid: A biodegradable and renewable material for food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 21, 100164. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100164>

BLOG isige mine paris-psl. 2024:<https://blog-isige.minesparis.psl.eu/2024/10/03/les-bioplastiques-sont-ils-fantastiques/#:~:text=Comparativement%20aux%20plastiques%20issus%20de,environ%2025%20%25%5B14%5D>.

Börjesson, P., Tufvesson, L., & Mattiasson, B. (2017). The role of bioplastics in reducing carbon emissions: A life cycle perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 757-766. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.003>

Brescia, M. A., Reghunadhan, M. L., & Santoro, S. (2021). Challenges in recycling bioplastics: Issues and opportunities. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(7), 8759-8771. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12050-6>

Bringezu, S., O'Brien, M., & Schütz, H. (2016). The impact of bioplastics on ecosystems and biodiversity: Land use changes and ecological consequences. *Environmental Science & Policy*, 60, 90-98. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.03.009>

Burt, S. (2004). Essential oils: Their antibacterial properties and potential applications in foods—a review. *International Journal of Food Microbiology*, 94(3), 223-253. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.03.022>

Chaabane, H., Djabou, N., & Meddah, B. (2024). *Développement de systèmes nano-structurés à base de chitosane pour l'encapsulation d'huiles essentielles et évaluation de leur activité antimicrobienne* (Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, Algérie).

Chaieb, K., Hajlaoui, H., Zmantar, T., Kahla-Nakbi, A. B., Rouabhia, M., Mahdouani, K., & Bakhrouf, A. (2007). The chemical composition and biological activity of clove essential oil, *Eugenia caryophyllata* (*Syzygium aromaticum* L. Myrtaceae): A short review. *Phytotherapy Research*, 21(6), 501–506.

Characterization and Parametric Study on Mechanical Properties Enhancement in Biodegradable Chitosan-Reinforced Starch-Based Bioplastic Film.” *Polymers*, 2022/2023. Gabriel/Mitantsoa . DOI: see PMC.

Chaoui, R. (s.d.). *Valorisation thérapeutique des huiles essentielles du faux poivrier (Schinus molle L.)* [Thèse de doctorat, Université Saad Dahlab – Blida]. Portail National de Signalement des Thèses (PNST). Retrieved from <https://www.pnst.cerist.dz/detail.php?id=901298>

Cambridge University. (2021). New bio-polymer alloy provides sustainable alternative. Retrieved from <https://www.cam.ac.uk/news>

Chrysafides, L. A., Liao, X., & Hsueh, Y. (2015). Algae-based bioplastics: Sustainable solutions to reduce environmental impact. *Bioresource Technology*, 191, 346-354. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.039>

Coca-Cola Company. (2019). Sustainability report: A journey to sustainable packaging. Retrieved from <https://www.cokecce.com>

Codex Alimentarius Commission. (s.d.). *General standard for cheese (CXS 283-1978) & GSFA (General Standard for Food Additives)*. FAO/WHO. Retrieved September 13, 2025, from <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius>

Coma, V. (2008). Bioactive packaging technologies for extended shelf life of meat-based products. *Meat Science*, 78(2), 90-103. Disponible sur : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22062099/>

Dufresne, A. (2019). Biopolymers and biodegradable plastics for sustainable packaging. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(5), 1185-1202. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12457>

El Ouali Lalami, A., El-Akhal, F., Ouedrhiri, W., Ouazzani Chahdi, F., Guemmouh, R., & Greche, H. (2013).

Composition chimique et activité antibactérienne des huiles essentielles de deux plantes aromatiques du centre-nord marocain : Thymus vulgaris et Thymus satureioides (Thymus essential oils (Thymus vulgaris and Thymus satureioides) from center of Morocco: Chemical composition and antimicrobial activity). *Les Technologies de Laboratoire*, 8(31), 1

EFSA. (2017). Nitrites and nitrates added to food – EFSA explains risk assessment. *European Food Safety Authority*. https://www.efsa.europa.eu/sites/default/files/corporate_publications/files/nitrates-nitrites-170614.pdf

Escobar, N., & Britz, W. (2021). Metrics on the sustainability of region-specific bioplastics production, considering global land use change effects. *Resources, Conservation and Recycling*, 169, 105515.

Escobar, N., & Britz, W. (2021). Metrics on the sustainability of region-specific bioplastics production, considering global land use change effects. *Resources, Conservation and Recycling*, 169, 105515.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105515>

European Bioplastics. (2021). Bioplastics market data. Retrieved from <https://www.european-bioplastics.org/market-data/>

Ertan, K. (2023). *Development and characterization of bioactive protein-starch composite films* (Doctoral thesis, Middle East Technical University). Middle East Technical University. :
<https://open.metu.edu.tr/bitstream/handle/11511/106032/K%C3%9CBRA%20ERTAN%20PhD%20thesis.pdf>

FAO/WHO. (s.d.). *JECFA monographs: Sorbic acid, Benzoic acid, Propionic acid, Propionates, Nitrate and Nitrite*. Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). Retrieved September 13, 2025, from <https://www.fao.org/food/food-safety-quality/scientific-advice/jecfa/en/>

FAO. (2021). the state of food security and nutrition in the world. Retrieved from <http://www.fao.org/state-of-food-security-nutrition/en/>

Feng, J., Wang, L., & Yang, R. (2019). Bioactive coatings and films for food packaging: an overview. *Food Control*, 96, 174-183.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956713518304232>

Ferrero, A. A., González, J. O. W., Sánchez Chopa, C., & Alzogaray, R. (2006). *Biological activity of Schinus molle on Blattella germanica: Repellence and toxicity of ethanol and petroleum ether extracts of leaves and fruits*. *Fitoterapia*, 77(5), 381-383.
<https://doi.org/10.1016/j.fitote.2006.03.004>

FUTURA-SCIENCES.2001-2024. <https://www.futura-sciences.com/sante/definitions/biologie-amidon-645/#les-proprietes-chimiques-de-lamidon>.

GAO, X., Zhang, W., & Wang, Z. (2021). Barrier properties of bioplastics in food packaging: Impact on preservation and shelf-life extension. *Packaging Technology and Science*, 34(6), 423-434. <https://doi.org/10.1002/pts.2567>

Gauthier, J. (2018). Bioplastiques : Propriétés, performances et enjeux environnementaux. Mémoire de fin d'études, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard. ISBN: 978-2-8480-3642-0

Goh, S. H., Tan, K. S., & Lim, S. T. (2021). Bioplastics and their potential in reducing landfill waste: A step toward a sustainable circular economy. *Journal of Environmental Management*, 287, 112296. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112296>

Gupta, S., Jain, R., & Singh, R. (2021). Innovation in bioplastics for circular economy: Sustainable alternatives to traditional materials. *Journal of Cleaner Production*, 285, 125420. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125420>

Hamdani, F. Z., Ziri, S., Benallou, A., Djani, H., & Belkacemi, A. (2021). Fort potentiel antifongique des huiles essentielles de *Thymus vulgaris* et *Tetralinis articulata*. *Phytothérapie*, 19(3), 190–194. [<https://doi.org/10.3166/phyto-2021-0272>]

Han, J. H. (2000). Antimicrobial food packaging. *Food Technology*, 54(3), 56-65. <https://www.ift.org/news-and-publications/food-technology-magazine/issues/2000/march>

Hakkarainen, M., & al. (2019). Novel biodegradable restaurant takeaway packaging based on starch. *Journal of Cleaner Production*, 221, 75-85.

Hos seini, S. F., Jafarzadeh, S., & Khaledabad, M. A. (2025). Advanced antimicrobial surfaces in cellulose-based packaging: From design to real-world performance. *Advances in Colloid and Interface Science*, 319, 103188. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103188>

Houili Amina. (2019). *Élaboration de matériaux composites biodégradables à base d'amidon et fibres naturelles* (Mémoire de Master, Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie).

Journal des Femmes. (2021). *Le thym : propriétés, bienfaits, et utilisations*. Le Journal des Femmes Cuisine. <https://cuisine.journaldesfemmes.fr/encyclopedie-produits/1957423-thym/>

Jung, H., Kim, Y., & Park, S. (2019). Polybutylène succinate: A biodegradable polymer for biomedical and packaging applications. *Polymer Degradation and Stability*, 167, 164-174. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2019.03.007

Karan, M., Bhat, S. A., & Kumar, A. (2019). Environmental implications of bioplastics in comparison to traditional plastics: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(34), 35087-35106. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06207-2>

Kerris hadil., & Benkacimi lyna. (2022). *Préparation et caractérisation de films biodégradables à base de chitosane, glycérol et polyalcool vinylique* (Mémoire de Master, Université Blida 1, Algérie).

Kerry, J. P., O'Grady, M. N., & Hogan, S. A. (2008). Past, current and potential technologies for natural antimicrobial packaging systems. *International Journal of Food Science & Technology*, 43(3), 1112-1127. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643807002494>

Kim Sundol et Chung Hoyong. (2024). Biodegradable polymers: From synthesis methods to applications of lignin-graft-polyester. *Green Chemistry*, 26, 10774. <https://doi.org/10.1039/d4gc03558e>

Koutinas, A., Papageorgiou, M., & Papanikolaou, S. (2017). Greenhouse gas reduction potential through bioplastics production: A comparative approach. *Bioresource Technology*, 238, 38-46. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.085>

Kumar, R., Sharma, A., & Singh, P. (2024). Advanced starch-based films for food packaging: A review. *Carbohydrate Polymers*, 319, 121081. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121081>

Kumar, S., Malik, R., & Singh, A. (2020). *Soil burial degradation study of biodegradable polymer films: mass loss and structural changes*. *Journal of Polymers and the Environment*, 28(7), 1745–1756. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01756-8>

Kumar, P., & al. (2020). Biodegradable polyesters in drug delivery systems. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 153, 24-38.

Laboratoire LPEV. (s.d.). *Clou de girofle : ses propriétés, bienfaits et utilisations*. Récupéré le 20 juin 2025, de <https://www.lpev.fr/actif-clou-de-girofle-lpev.html>

López, O., Famá, L., Candal, R., & Goyanes, S. (2015). Biodegradable and non-retrogradable eco-films based on starch–glycerol with citric acid as crosslinking agent. *Carbohydrate Polymers*, 117, 398-406. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26794739/?utm>

Loukili, A., & Boudissa, M. (2024). *Mémoire de fin d'études: Intégration des agents antimicrobiens dans les bioplastiques pour des emballages alimentaires*. Université de Tlemcen. <https://dspace.univ-temouchent.edu.dz/bitstream/123456789/5061/1/memoire%20finale%202024%20-%20Abdelkader%20Loukili.pdf>

Louni, M. (2013). *Extraction, caractérisation physico-chimique et microbiologique de l'huile essentielle de clou de girofle (Syzygium aromaticum)* [Mémoire de master, Université Mouloud Maamri de Tizi Ouzou]. DSpace UMMTO. Retrieved from https://www.ummtto.dz/dspace/bitstream/handle/ummtto/2383/Louni%2C%20Mohamed.pdf?utm_source

Liu, H., Zhang, Y., & Wang, X. (2020). Advances in recycling biodegradable bioplastics for sustainable development. *Science of the Total Environment*, 710, 136396. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136396>

Mango Materials. (2019). Sustainable PHA production from waste. Retrieved from <https://www.mangomaterials.com>.

Mayer, P., et al. (2020). Antimicrobial packaging: Current trends and future prospects. *Food Research International*, 127, 108-118. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108118>

Mohd Amin, A., Mohd Saud, S., Musa, M., & Ku Halim Ku Hamid, K. (2023). *The effect of glycerol content on mechanical properties, surface morphology and water*

absorption of thermoplastic films from Tacca leontopetaloides starch. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 79, Article 11327. <https://doi.org/10.11113/jt.v79.11327>

Morones, J. R., Elechiguerra, J. L., Camacho, A., Holt, K., Kouri, J. A., Ramírez, J. T., & Yacaman, M. J. (2005). The bactericidal effect of silver nanoparticles. *Nanotechnology*, 16(10), 2346-2353. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/16/10/059>

Müller, L., Schmid, M., & Wagner, M. (2017). Production costs and market penetration of bioplastics: Key factors for a sustainable economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 120, 106-115. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.014>

Nandakumar, A., Chuah, J. A., & Sudesh, K. (2021). Bioplastics: A boon or bane? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 111031. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111031>

Nicholas Phiri, Eniah Lemogang Serame and Tshepo Pheko. (2021). Extraction, chemical composition, and antioxidant activity analysis of essential oil from Schinus molle medicinal plant found in Botswana. *American Journal of Essential Oils and Natural Products* ; 9(4): 01-09. <https://doi.org/10.22271/23219114.2021.v9.i4a.236>

Packnode. (s.d.). *Emballages antimicrobiens : une nouvelle norme pour la sécurité alimentaire*. Récupéré le 21 janvier 2025, de https://www.packnode.org/fr/durabilite/emballage-antimicrobien-une-nouvelle-norme-pour-la-securite-alim?utm_source

Parker, L., Galaj, M., & Cottam, R. (2019). The economics of bioplastics: Assessing the real costs and benefits. *Journal of Cleaner Production*, 233, 581-591. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.070>

Pal, S., Tak, Y. K., & Song, J. M. (2007). Does the Antibacterial Activity of Silver Nanoparticles Depend on the Shape of the Nanoparticle? *Nanotechnology*, 18(10), 105104. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/10/105104>

Pandey, V. K., Shams, R., Singh, R., Dar, A. H., Pandiselvam, R., Rusu, A. V., & Trif, M. (2022). *A comprehensive review on clove (Caryophyllus aromaticus L.) essential*

oil and its significance in the formulation of edible coatings for potential food applications. *Frontiers in Nutrition*, 9, 987674. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.987674>

Paula González Seligra, Carolina Medina Jaramillo, Lucía Famá, Silvia Goyanes. Biodegradable and non-retrogradable eco-films based on starch–glycerol with citric acid as crosslinking agent. (2015). journal home page: www.elsevier.com/locate/carbpol.66-74

Patras, A., Brunton, N. P., O'Donnell, C., & Tiwari, B. K. (2010). Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods; mechanisms and kinetics of degradation. *Trends in Food Science & Technology*, 21(1), 3-11. [<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.07.004>]

Patel, M., Kumar, R., & Soni, A. (2020). Sustainable agricultural practices for bioplastics production: Environmental and economic impacts. *Journal of Environmental Management*, 276, 111326. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111326>

Pérez, M., Larranaga, A., & García-González, C. A. (2021). Antimicrobial Bioplastics for Medical and Pharmaceutical Applications: Challenges and Innovations. *Trends in Biotechnology*, 39(6), 532-548. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2021.01.008>

Phuong, T. V., Dang, T. H., & Nguyen, H. T. (2025). The effects of glycerol addition on the mechanical and barrier properties of starch-based films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 242, 127215. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.127215>

PMC. (n.d.). *Antimicrobial Activity of Origanum vulgare Essential Oil against Staphylococcus aureus and Escherichia coli.** PubMed Central. Retrieved from <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11597097/>

PMC. (n.d.). *Thymus vulgaris essential oil and its antimicrobial properties.* PubMed Central. Retrieved January 22, 2025, from <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>

Pompilio, A., Di Bonaventura, G., & Gherardi, G. (2019). An Overview on *Streptococcus bovis*/*Streptococcus equinus* Complex Isolates: Identification to the Species/Subspecies Level and Antibiotic Resistance. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(3), 480. <https://doi.org/10.3390/ijms20030480>

Poutanen, M., Väisänen, M., & Huttunen, S. (2020). Bioplastics from renewable resources: A sustainable alternative to fossil-based plastics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109542. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109542>

Pires, J. R. A., Souza, V. G. L., Fuciños, P., Pastrana, L., & Fernando, A. L. (2022). Methodologies to Assess the Biodegradability of Bio-Based Polymers—Current Knowledge and Existing Gaps. *Polymers*, 14(7), 1359. [<https://doi.org/10.3390/polym14071359>]

Rai, M., Yadav, A., & Gade, A. (2009). Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials. *Biotechnology Advances*, 27(1), 76-83. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.09.002>

Reddy, N., Yang, Y., & Cexas, L. R. (2021). Bioplastics: Environmental and sustainability aspects. *Journal of Cleaner Production*, 284, 124750. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124750>

Rhim, J.-W., & Ng, P. K. W. (2007). *Effect of plasticizer type and content on the mechanical and barrier properties of starch-based edible films.* *Journal of Food Science*, 72(6), E244–E249. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00536.x>

Saha, S., & al. (2021). Innovations in biodegradable plastics: Polybutylene succinate (PBS) blends for application in packaging. *Materials Today: Proceedings*, 46, 11077-11082.

Santana, A. A., Souza, R. V., Tadini, C. C., & Sobral, P. J. A. (2013). Physical evaluation of biodegradable films of alginate and mannitol: moisture content, water-soluble matter and swelling degree. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 30(4), 977-987. <https://www.scielo.br/bjce/a/pxf9NFbSk3nLcqyNKxppFpM/?format=pdf&lang=en&utm>

Shah, S. Z., & al. (2020). The effects of different temperatures on the mechanical properties of PLA. *Polymers*, 12(3), 641.

Sánchez, J., Rodríguez, L., & García, C. (2020). Polyhydroxyalkanoates (PHA): Environmental benefits and challenges in the production process. *Bioresource Technology*, 303, 122947. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122947>

Silva, C. L. M., et al. (2019). Antimicrobial packaging for food products: A review. *Food Control*, 98, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.11.029>

Singh, A., Patel, V. K., & Yadav, R. (2024). Sustainable active packaging from on-demand degradable PLA matrices: A review. *ACS Omega*, 9(42), 28512–28525. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c04567>

Soreanu, G., Fediuc, E., & Stanciu, S. (2017). Cost considerations for bioplastics production and market integration: A comprehensive overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 424-434. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.221>

Shogren, R. L., Doane, W. M., & Kulicke, W.-M. (2021). *Influence of environmental factors on the biodegradation of starch-based plastics in soil. Polymer Degradation and Stability*, 191, 109655. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109655>

Smith, R., Siqueira, G., & Fernandez, P. (2020). Challenges in the use of bioplastics for packaging: Durability and environmental impact. *Environmental Research Letters*, 15(12), 124037. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abc4ad>

Sondi, I., & Salopek-Sondi, B. (2004). Silver nanoparticles as antimicrobial agent: A case study on *E. coli* as a model for Gram-negative bacteria. *Journal of Colloid and Interface Science*, 275(1), 177-182. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.02.012>

Sung, S. Y., Sin, L. T., Tee, T. T., Bee, S. T., Rahmat, A. R., Rahman, W. A. W. A., & Tan, A. C. (2013). Antimicrobial agents for food packaging applications. *Trends in Food Science & Technology*, 33(2), 110-123. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/259134732_Antimicrobial_agents_for_food_packaging_applications

SimplyScience. (2020, 22 juillet). *Faire du plastique avec des déchets végétaux*. <https://www.simplyscience.ch/fr/enfants/experimente/faire-du-plastique-avec-des-dechets-vegetaux>

Singh, A., Mishra, P., & Yadav, P. (2021). Compostability of bioplastics: Standards and practical applications in industrial composting. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(14), 17922-17934. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13267-0>

Tan, S. X., Ong, H. C., Andriyana, A., Lim, S., Pang, Y. L., Kusumo, F., & Ngoh, G. C. (2022). *Characterization and parametric study on mechanical properties enhancement in biodegradable chitosan-reinforced starch-based bioplastic film*. *Polymers*, 14(2), 278. <https://doi.org/10.3390/polym14020278>

The Innovation Materials. Gabriel, A. A., Rahmawati, A. Y., Taradipa, Y. S. et al. « Canna edulis ker. starch-based biodegradable plastic materials: mechanical and morphological properties. » *Discover Materials*, vol. 4, 2024, p. 55. DOI: 10.1007/s43939-024-00128-z.

Todo Árboles. (s.d.). *Le poivrier faux (Schinus molle)*. Récupéré le 20 juin 2025, de <https://ar.todoarboles.com>

Tsuji, H., & Kato, K. (2019). Physical properties and applications of biodegradable plastics. *Journal of Polymers and the Environment*, 27(2), 252-259. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01459-9>

Setyawan, K. N. Y., & Kartini, K. (2023). Optimization of stirring-assisted extraction of anthocyanins from purple roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) calyces as pharmaceutical and food colorants. *Journal of Applied Biology & Biotechnology*, 11(5), 91-97. [<https://doi.org/10.7324/JABB.2023.11510-1>]

United Nations Industrial Development Organization. (2009). *Extraction technologies for medicinal and aromatic plants*. International Centre for Science and High Technology. UNIDO.

Disponible sur : https://www.unido.org/sites/default/files/2009-10/Extraction_technologies_for_medicinal_and_aromatic_plants_0.pdf

Verma, N., Sharma, R., & Patel, S. (2020). Sustainable bioplastics in pharmaceutical packaging: Properties and applications. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 109(9), 2783-2794. <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2020.06.010>

Voshuiles.com. (2020). *Huile essentielle d'origan compact*. Récupéré de <https://www.voshuiles.com/ressource/guide-des-huiles-essentielles/huile-essentielle-d-origan-compact>

Vasile, C., & Baican, M. (2021). *Progresses in food packaging, food quality, and safety—Controlled-release antioxidant and/or antimicrobial packaging*. *Molecules*, 26(5), 1263. <https://doi.org/10.3390/molecules26051263>

Vratonjic, N., & Cirovic, D. (2022). The role of bioplastics in environmental awareness and consumer behavior. *Resources, Conservation and Recycling*, 174, 105855. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105855>

WebTeb. (s.d.). *Les conservateurs et leurs risques pour la santé*. <https://www.webteb.com/articles>

Xie, X., Zhang, Y., & Liu, X. (2020). Bioplastics from algae and other renewable resources: Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110200. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110200>

Yahia, R., Owda, M. E., Abou-Zeid, R. E., Abdelhai, F., El-Gamil, H. Y., & Abdo, A. M. (2024). Biodegradable, UV absorber and thermal stable bioplastic films from waxy corn starch/polyvinyl alcohol blends. *Biomass Conversion and Biorefinery*. [<https://doi.org/10.1007/s13399-022-03683-8>]

Yahiaoui K, Bouchenak O, Lefkir S, Benhabyles N, Laoufi R, Arab K. Antibacterial activity of cumin (*cuminum cyminum* L.) and cloves (*syzygium aromaticum*) essential oils, and their application to the preservation of minced meat. *J. Fundam. Appl. Sci.*, 2018, 10(5S), 100-117.

Yuan, Y., Yu, L., & Zhang, J. (2021). Safety assessment of bioplastics in food packaging applications: A review. *Food Control*, 121, 107596. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107596>

Yue Yin and Meng Wai Woo . “Transitioning of petroleum-based plastic food packaging to sustainable bio-based alternatives.” *Sustainable Food Technology*, 2024. DOI: 10.1039/D4FB00028E.

Youssef, A. M., et al. (2023). Control of release in active packaging/coating for food products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(7), 1012–1032. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1966984>

Verma, N., Sharma, R., & Patel, S. (2020). Sustainable bioplastics in pharmaceutical packaging: Properties and applications. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 109(9), 2783-2794. <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2020.06.010>

Vilela, C., Cimmino, S., Calado, R., Fardim, P., & Ferreira, P. J. T. (2024). *Recent advances in functional biopolymer films with antimicrobial and antioxidant properties for enhanced food packaging*. *Polymers*, 17(9), 1257. <https://doi.org/10.3390/polym17091257>

Zeghib, Z. (2017). *Étude phytochimique et activités antioxydante, antiproliférative, antibactérienne et antivirale d'extraits et d'huiles essentielles de quatre espèces endémiques du genre Thymus* [Thèse de doctorat, Université Frères Mentouri – Constantine 1]. Thèses-Algérie. Retrieved from https://theses-algerie.com/3982892423504977/these-de-doctorat/universite-freres-mentouri---constantine-1/-etude-phytochimique-et-activit%C3%A9s-antioxydante-antiprolif%C3%A9rative-antibact%C3%A9rienne-et-antivirale-d-extraits-et-d-huiles-essentiell-es-de-quatre-esp%C3%A8ces-end%C3%A9miques-du-genre-thymus-?utm_source

Zhang, Y., Li, X., & Wang, H. (2021). Polybutylene succinate (PBS): A sustainable alternative for packaging applications. *Polymer Degradation and Stability*, 186, 109507. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109507>

Zhao, Y., Liu, Y., & Wang, L. (2021). Environmental impact of bioplastics degradation: A review on the potential risks and benefits for ecosystems. *Science of the Total Environment*, 756, 144107. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144107>

PARTIE VII. ANNEXES

VII.1. La composition des milieux de culture et la méthode de préparation :

VII.1.1. Mueller Hinton Agar :

VII.1.1.1. Composition (g/L) :

Beef extract	2.0
Casein acid hydrolysate	17.5
Starch	1.5
Agar	17.0

pH = 7.3 ± 0.2 à 25°C

VII.1.1.2. Méthode de préparation :

Dissoudre 38 g du milieu déshydraté dans 1 litre d'eau distillée.

Chauffer avec agitation jusqu'à dissolution complète.

Stériliser à 121°C pendant 15 minutes.

Refroidir à 45–50°C, puis verser dans des boîtes de Pétri stériles.

VII.1.2. Mueller Hinton Broth (Liquide) :

VII.1.2.1. Composition (g/L) :

Beef infusion	300.0 mL
Casein acid hydrolysate	17.5 g
Starch	1.5 g

pH = 7.3 ± 0.1 à 25°C

VII.1.2.2. Méthode de préparation :

Dissoudre 21 g du milieu déshydraté dans 1 litre d'eau distillée.

Stériliser à 121°C pendant 15 minutes.

Refroidir avant utilisation.

VII.1.3. SS Agar (Salmonella-Shigella Agar) :

VII.1.3.1. Composition (g/L) :

Peptone	5.0
Beef extract	5.0
Lactose	10.0
Bile salts	8.5
Sodium citrate	10.0
Sodium thiosulfate	8.5
Ferric citrate	1.0
Neutral red	0.025
Brilliant green	0.00033

Agar 13.5

pH = 7.0 ± 0.2 à 25°C

VII.1.3.2. Méthode de préparation :

Dissoudre 63 g du milieu dans 1 litre d'eau distillée.

Chauffer avec agitation jusqu'à dissolution complète sans faire bouillir.

Ne pas stériliser à l'autoclave.

Refroidir à 45–50°C et verser dans des boîtes de Pétri stériles.

VII.1.4. VRB Agar (Violet Red Bile Agar) :

VII.1.4.1. Composition (g/L) :

Peptone 7.0

Yeast extract 3.0

Bile salts 1.5

Lactose 10.0

Neutral red 0.03

Crystal violet 0.002

Agar 15.0

pH = 7.4 ± 0.2 à 25°C

VII.1.4.2. Méthode de préparation :

Dissoudre 41.5 g du milieu dans 1 litre d'eau distillée.

Chauffer sans faire bouillir jusqu'à dissolution complète.

Ne pas autoclaver.

Refroidir à 45–50°C et verser dans des boîtes stériles.

VII.1.5. Plate Count Agar (PCA) :

VII.1.5.1. Composition (g/L) :

Tryptone 5.0

Yeast extract 2.5

Glucose 1.0

Agar 15.0

pH = 7.0 ± 0.2 à 25°C

VII.1.5.2. Méthode de préparation :

Dissoudre 23.5 g du milieu dans 1 litre d'eau distillée.

Chauffer avec agitation jusqu'à dissolution complète.

Stériliser à 121°C pendant 15 minutes.

Refroidir à 45–50°C avant de verser dans les boîtes.

VII.1.6. Baird-Parker Agar :**VII.1.6.1. Composition (g/L) :**

Pancreatic digest of casein 10.0

Beef extract 5.0

Yeast extract 1.0

Sodium pyruvate 10.0

Glycine 12.0

Lithium chloride 5.0

Agar 20.0

pH = 7.2 ± 0.2 à 25°C

VII.1.6.2. Méthode de préparation :

Dissoudre 63 g du milieu dans 1 litre d'eau distillée.

Chauffer avec agitation.

Stériliser à **121°C pendant 15 minutes**.

Refroidir à 45–50°C, ajouter l'émulsion de jaune d'œuf et le supplément tellurite stérile.

Verser dans des boîtes de Pétri.

VII.1.7. Gélose nutritive (Nutrient Agar) :**VII.1.7.1. Composition (g/L) :**

Beef extract 3.0

Peptone 5.0

Sodium chloride 5.0

Agar 15.0

pH = 7.2 ± 0.2 à 25°C

VII.1.7.2. Méthode de préparation :

Dissoudre 28 g du milieu dans 1 litre d'eau distillée.

Chauffer jusqu'à dissolution complète.

Stériliser à **121°C pendant 15 minutes**.

Refroidir à 45–50°C avant de verser dans les boîtes de Pétri.