

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

جامعة 20 أوت 1955 - سكيكدة-

UNIVERSITE 20 AOUT 1955- SKIKDA



Faculté des Sciences

Département Ecologie et Environnement

Mémoire Présenté en Vue de l'Obtention du Diplôme de Master

Filière : Ecologie et Environnement

Spécialité : Protection des écosystèmes

Intitulé :

**Elaboration et caractérisation de nouvelle
formulation améliorée d'un bioemballage à base
de polymères**

Présenté par :

Chaib Rim el hasna

Bouchebcheb Fadia

Benreddjem Darine

Membre de Jury:

Président : Boukahla Amel MCA Université1955. Skikda

Promoteur : Laib Imen MCA Université1955. Skikda

Examineur : Mohamed Ben ali Rim MAA Université1955. Skikda

Année universitaire 2023-2024



Remerciement

Tout d'abord, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné le courage, la force et la patience pour accomplir ce travail. Nous exprimons notre profonde gratitude à Mme Laïb Iman, docteure à l'Université du 20 Août 1955.

Tout d'abord pour sa gentillesse en nous offrant l'opportunité d'être notre superviseure, et ensuite pour la confiance et la liberté qu'elle nous a accordées. Nous la remercions également pour ses soins particuliers, son attention, ses conseils précieux et son engagement à nous suivre tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Madame Rime ben ali et à Madame Boukahla Amel pour avoir accepté de présider le jury et d'évaluer ce travail. Leur contribution est grandement appréciée.

Nous désirons également remercier très sincèrement tout le personnel du laboratoire de l'université "Laboratoire de Biochimie" ainsi que toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, directement ou indirectement, à la réalisation de ce travail.

Nous exprimons notre plus profonde gratitude à nos familles, et plus particulièrement à nos parents, qui nous ont soutenus de manière inconditionnelle tout au long de nos études.

Leur soutien moral et matériel a été indispensable à notre réussite.

Nous espérons de tout cœur avoir pu leur rendre fier de nous. Leur amour et leur confiance nous ont permis de surmonter les défis et de persévérer dans les moments difficiles.

Enfin, nous remercions tous nos amis et collègues pour leur soutien et leurs Encouragements constants. Leur présence à nos côtés a été une source de réconfort et de Motivation tout au long de cette aventure académique.





Dédicace

Tout d'abord nous tenons à remercier ALLAH le tout puissant de nous avoir donné la santé, la volonté, le courage et la patience pour mener à terme notre formation et pouvoir réaliser ce travail de recherche.

À mon père et à ma mère, qui me sont si chers : Aucune dévotion ne peut exprimer mes sentiments sincères pour votre patience infinie, votre encouragement constant et votre aide. Ceci témoigne de mon profond amour et respect pour vos immenses sacrifices.

Que Dieu vous garde toujours comme une couronne sur ma tête et vous protège de tout mal.

À mes sœurs : Iman, Yasmine, Lina, merci pour tout votre soutien. Merci d'être mes sœurs, les personnes les plus chères à mon cœur.

À mes frères Djamal et Alaa et leurs épouses Wasilah et Nadia : Merci pour votre soutien constant.

À ma nièce bien-aimée Sidra, j'espère te voir toujours parmi les personnes les plus réussies et les plus aimantes, que Dieu le veuille.

À mes grands-parents décédés : Ahmed, Mokhtar, et Fatima Zahra, que Dieu ait leurs âmes. J'aurais souhaité que vous soyez avec moi aujourd'hui et que vous soyez fiers de ma réussite.

À ma grand-mère bien-aimée, Mama Tima, que Dieu prolonge sa vie et lui accorde santé et bien-être.

À ma tante Nadia et ma tante Rachida et leurs maris Abdelhaq Mattour et Fateh Chelia : Merci beaucoup pour votre soutien et votre appui constant.

À mes chères tantes : Ratiba, Nadira, Amal, vous avez toujours été comme une seconde mère pour moi. Merci pour votre patience et votre soutien constants depuis ma naissance jusqu'à ce jour de ma graduation. Les mots manquent pour exprimer l'étendue de mon amour pour vous. Aucune parole ne suffira jamais à comparer à tout ce que vous m'avez donné. Merci d'être dans ma vie.

À mon oncle Mohamed et sa femme chafia : Merci beaucoup pour votre soutien continu.

À mes cousins et cousines : Salma, Marwa, Raghad, Maram, Razan, Youssef, Radi, Bassem.

À ma chère amie : Takoua Kahit, merci pour ton soutien constant, tu es une amie précieuse.

À la personne qui m'a soutenu en toutes circonstances et a été un pilier par ses conseils et ses actions, Monsieur Djamel Hadji, merci beaucoup pour ton soutien continu et tes conseils qui m'ont beaucoup aidée dans ma vie.

À ma fidèle amie : Darine Berredjem, merci pour ta présence dans ma vie. À mes chères amies : Lamis, Rounaq Zahaf « Moka », Roumaissa. Merci beaucoup à vous.

. Je remercie également la doctorante madame " Iman Laib " pour son soutien tout au long de la préparation de mon mémoire de fin d'études. Elle a été une merveilleuse doctorante de recherche.

À toutes les personnes qui m'ont aimée, qui m'ont souhaité du bien et qui m'ont soutenue de près ou de loin, merci infiniment. Si j'ai réussi aujourd'hui, c'est grâce à votre amour et votre soutien. .

Bouchebcheb Fadia





Dédicace

Louange à Dieu pour Son amour, Sa reconnaissance et Sa gratitude pour le début et la fin.

À mon ordinateur portable, qui a supporté mes cris de désespoir et mes larmes tout au long de ce mémoire.

À mon sac à dos qui ma' accompagné tout au long de mes voyages et qui a enduré toutes les épreuves avec moi.

À moi-même du future, qui regardera en arrière sur ce mémoire et se demandera pourquoi j'ai pris tout cela trop au sérieux. Mais pour l'instant, je suis fière de moi.

Je dédie ce travail à celle que j'ai visitée ce matin, la main invisible qui a enlevé les épines de mon chemin, celle qui m'a soutenu dans mes moments de faiblesse. Combien de fois ai-je souhaité ta présence ! À toi, la dame de mon cœur, ma deuxième maman à celle qui m'a appris que la vie est une combat. Je te dédie mon succès, enveloppé de prières. Aujourd'hui, je porte ma tenue de soutenance que tu imaginais depuis longtemps. Nous attendons ce bonheur ensemble, et aujourd'hui, alors que je me diplôme et que tu es auprès de Dieu, je prie pour que Dieu nous réunisse dans les jardins du bonheur, où il n'y a ni séparation ni douleur.

À celui dont je porte le nom avec fierté, l'arme qui m'a protégé pendant des années, à la lumière qui a éclairé mon chemin et qui a travaillé dur pendant des années pour que je grimpe les échelons du succès, "mon cher père, je t'aime." Tu as toujours été mon guide et mon modèle de travail acharné et de dévouement.

À celle qui m'a enseigné la moralité avant les lettres, au pont qui me mène au paradis, à celle qui a supporté chaque moment douloureux que j'ai traversé et qui m'a soutenu en tout temps. Je suis ici aujourd'hui parce que c'est ce que tu as semé, c'est ta récolte. Ma chère mère, ma q je t'aime. Tu es ma source de force et d'inspiration, et grâce à tes prières et à tes sacrifices, j'ai atteint ce que je suis aujourd'hui.

À mes yeux, "Miryam Nihel" et "Yahya Rami", vous êtes mon soutien dans cette vie. Je suis le début de vos succès et je vous dédie ce succès. Vous êtes l'espoir qui illumine mon chemin, et j'attends avec impatience de voir vos grandes réalisations à l'avenir. Vous êtes mes compagnons de vie et ma source d'inspiration, et j'espère que mes premiers pas seront un moteur pour vous permettre de continuer sur le chemin du succès et de l'excellence.

À notre chère doctoresse "Iman Al-Saib", je vous suis reconnaissant de m'avoir donné l'opportunité d'être supervisée lors de ma cérémonie de remise des diplômes. Vous avez été un soutien et un guide, et vous m'avez donné la confiance nécessaire pour atteindre ce succès. Merci pour votre temps et votre dévouement à me soutenir tout au long de ce parcours.

Chaïb rim al hasna





Dédicace

Je dédie sincèrement ce modeste travail à la mémoire de mes très chers parents, Mohamed Fouzi et Fadila, qui m'ont soutenue moralement, financièrement et avec tendresse. Qu'Allah les garde tout au long de ma vie.

À mes très chers frères et sœurs : Abdo mon homme, Loudjina my twin, et Alaa my princesse.

À mes chers amis, en particulier Safssaf, ma personne préférée.
et Fadia, ma merveilleuse amie.

À mes chères tantes : Razika, Houda, Salima, Samia, Rafika, Samia.

À mes oncles : Khilou, Djamel, Ahcene, Hocine, Riyad, Mohamed, Ayache et Salim.

À mes cousins et cousines : Bismoula, Kouka, Rahma, Yasmine, Zina, Soumia, Nasiha, Yakine, Aya, Nousseiba, Selsabil, Hamid, Raouf, Islam, Ahmed, Housseem, Ilyes, Anes, Jalil, Zaki, Hilel, Wail, Cisseem, Imad, Halima, Nada, Mohamed.

À toutes les personnes qui m'aiment et qui m'ont soutenu dans les différentes étapes de ma vie, ainsi qu'à tous ceux qui ont cru en moi

Berredjem Darine



Résumé

Dans le cadre de cette étude, deux types de biofilms alimentaires ont été développés. Le premier est constitué de pectine, de gélatine, de glycérine végétale, de cire d'abeille et de certaines huiles essentielles. Le second est composé de pectine, de gélatine, de chitosane, de glycérine, de cire d'abeille et d'autres huiles essentielles. Ces biofilms alimentaires ont été préparés par une méthode de chauffage et de moulage. Nous avons évalué les propriétés de biodégradation des biofilms, leur solubilité dans l'eau, leur transparence, ainsi que leur caractérisation de surface par Microscopie Électronique à Balayage (MEB) et leur analyse par Transformée de Fourier Infrarouge (FTIR). Les deux biofilms ont également été testés pour leur efficacité en tant qu'emballages pour les fraises. Les résultats indiquent que les biofilms présentent des propriétés physiques satisfaisantes, témoignant du succès de la préparation de biofilms alimentaires hydrophiles et biodégradables sous certaines conditions. Les deux types de bioemballages ont également prolongé la durée de conservation des fraises, qui ont été préservées pendant 11 jours pour l'emballage à base de gélatine pectine et 10 jours pour l'emballage à base de chitosane-gélatine-pectine. En termes de qualité sensorielle, les fraises emballées avec le biofilm à base de gélatine et de pectine ont été préférées par le panel par rapport à celles emballées avec le biofilm à base de chitosane, de gélatine et de pectine.

Mots clés : Biofilm alimentaire ,emballage,Pectine ,Gélatine, Cire d'abeille ,Huiles essentielle ,Chitosane

Abstract

In this study, two types of food biofilms were developed. The first one consists of pectin, gelatin, vegetable glycerin, beeswax, and certain essential oils. The second one is composed of pectin, gelatin, chitosan, glycerin, beeswax, and other essential oils. These food biofilms were prepared using a heating and molding method. We evaluated the biodegradation properties of the biofilms, their solubility in water, transparency, and surface characterization by Scanning Electron Microscopy (SEM) and analysis by Fourier Transform Infrared (FTIR). Both biofilms were also tested for their effectiveness as strawberry packaging. The results indicate that the biofilms exhibit satisfactory physical properties, demonstrating the successful preparation of hydrophilic and biodegradable food biofilms under certain conditions. Both types of bio-packaging also extended the shelf life of strawberries, which were preserved for 11 days with the pectin-gelatin-based packaging and 10 days with the chitosan-gelatin-pectin-based packaging. In terms of sensory quality, the strawberries packaged with the pectin and gelatin-based biofilm were preferred by the panel compared to those packaged with the chitosan, gelatin, and pectin-based biofilm.

Keywords : Food biofilm, packaging, Pectin, Gelatin, Beeswax, Essential oils, Chitosan

الملخص

في إطار هذه الدراسة، تم تطوير نوعين من الأفلام الحيوية الغذائية. يتكون الأول من البكتين، الجيلاتين، الجلسرين النباتي، شمع العسل وبعض الزيوت الأساسية. أما الثاني فيتكون من البكتين، الجيلاتين، الكيتوزان، الجلسرين، شمع العسل وزيوت أساسية أخرى. تم تحضير هذه الأفلام الحيوية الغذائية بواسطة طريقة التسخين والتشكيل. قمنا بتقييم خصائص التحلل الحيوي للأفلام الحيوية، قابلية ذوبانها في الماء، شفافيتها، وكذلك وصف سطحها بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) وتحليلها بواسطة تحويل فورييه بالأشعة تحت الحمراء (FTIR). تم اختبار نوعي للأفلام الحيوية أيضًا لفعاليتها كمواد تغليف للفراولة. تشير النتائج إلى أن الأفلام الحيوية تتمتع بخصائص فيزيائية مرضية، مما يدل على نجاح تحضير الأفلام الحيوية الغذائية المحبة للماء والقابلة للتحلل البيولوجي تحت ظروف معينة. كما أن نوعي الأفلام الحيوية قد أطالتا فترة حفظ الفراولة، التي تم حفظها لمدة 11 يومًا باستخدام التغليف القائم على البكتين والجيلاتين و10 أيام باستخدام التغليف القائم على الكيتوزان-الجيلاتين-البكتين. من حيث الجودة الحسية، فضل الفريق الفراولة المغلفة بالفيلم الحيوي القائم على الجيلاتين والبكتين مقارنةً بتلك المغلفة بالفيلم الحيوي القائم على الكيتوزان والجيلاتين والبكتين.

الكلمات الرئيسية: غشاء حيوي للأغذية، تغليف، بكتين، جيلاتين، شمع النحل، الزيوت الأساسية، كيتوزان

Figure	Liste des figure	Page
1	Différentes méthodes utilisées pour la préparation de films et de revêtements comestibles	15
2	Technique de pulvérisation utilisant un pistolet pulvérisateur pour applique un revêtement comestible sur un fruit d'orange.	18
3	Méthode de panage utilisant la circulation d'air pour former un revêtement Comestible .	19
4	Variété des barrières offertes par les revêtements comestibles des produits alimentaires	21
5	Types d'agents antimicrobiens utilisés dans les emballages alimentaires comestibles	22
6	Valeur nutritionnelle post-consommation de l'emballage alimentaire à base de lait	25
7	Test de solubilité des deux biofilms	32
8	Le test de la biodégradabilité des deux biofilms	33
9	L'appareil utilisé pour mesurer la couleur	34
10	Des fraises emballées avec des bioemballages,	37
11	Évaluation de la Solubilité des Bioplastiques	39
12	Les résultats de soubilité de chaque bioplastique après 24h dans l'eau	40
13	Cinétique de biodégradabilité D(%) des deux bioplastiques	41
14	La biodégradation des deux bioplastiques dans le sol GP	43
15	Les observations obtenues à partir du Microscope Électronique à Balayage (MEB) pour les deux types de bioemballages	45
16	16.Présente les résultats Spectroscopie infrarouge de transformations de Fourier (FTIR) obtenu	46
17	Cinétique de perte de poids des fraises emballées et témoins	49
18	Analyse sensorielle des fraises témoins et emballées	51

Liste des tableaux

Tableau 1. polysaccharides comme films comestibles et revêtements.....	6
Tableau 2. films comestibles à base de protéines:diversité et aplications.....	9
Tableau 3. cires comestibles:applications et effects.....	13
Tableau 4. Analyse de la couleur des bioplastiques.....	43
Tableau 5. Transmittance de biofilms.....	44
Tableau 6. valeurs d'IC50 et A0.5 des deux bioplastique.....	48
Tableau 7. Aspect des fraises témoins et emballées durant la période de stockage.....	52

Liste des abréviations

A : Absorbance

A600 : Absorbance à 600

AA : Activité Antioxydante

AVG : *Aloé vera* gel « Gel d'*Aloe vera* »

BECHGP : Bioemballages de chitosane, gélatine , pectine

BEGP : Bioemballages de gélatine , pectine

C° : Degré Celsius

Ch : Chitosane

CH-CS : Chitosane- coating of mais « chitosane- revêtement du mais »

CS : Coating of mais « revêtement du mais »

Cu²⁺ (Nc2-Cu²⁺) : Complexe néocuproïne-cuivre

D : Dégradabilité biologique

ECFs : Edible coatings and films « revêtement et film comestible »

FRC : Films revêtements comestibles

FTIR : Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

G : Gélatine

GRAS : Generally Recognized As Safe « généralement reconnues comme sûres »

H : Hydrogène

HE : Huile essentielle

HR : Humidité relative

K₂S₂O₈ : persulfate de potassium ou peroxydisulfate de potassium

MEB : Microscope électronique à balayage

Nm : Nanomètre

P : Pectine

pH : Potentiel hydrogène

SEM : Scanning electron microscope

T : Témoin

V : Volume

WI : L'indice de blancheur

WS : Water solibility « Solubilité dans l'eau »

YI : L'indice de jaunissement

Table des matières

Résumés	
Liste des abréviations.	
Liste des figures.	
Liste des tableaux.	
Introduction	
Résumés	
Liste des abréviations.	
Introduction.....	01

Synthèse bibliographique

1.	Généralités sur les bioplastiques.....	03
2	Matériaux utilisés pour produire des bioemballages.....	03
2.1.	Polysaccharides.....	04
2.2.	Protéines.....	08
2.3.	Lipides.....	11
2.4.	Les matériaux composites.....	14
3.	Les méthodes de préparation des films et revêtements comestibles.....	15
3.1.	Méthodes de fabrication des films comestibles.....	16
3.2	Méthode de coulée en solution.....	16
3.3	Méthode d'extrusion à chaud.....	16
3.4	Les méthodes d'application de revêtement comestible.....	17
3.4.1.	Méthode de trempage.....	17
3.4.2.	Méthode de pulvérisation.....	18
3.4.3	Le procédé de balayage.....	19
3.4.4.	Méthode de traitement en lit fluidisé.....	19
4.	Les avantages des emballages comestibles pour la durabilité et la conservation des aliments.....	20
5.	Rôles des emballages comestibles dans la préservation alimentaire.....	20
6.	Les propriétés antimicrobiennes des bioemballages.....	21
7.	Les antioxydants.....	23

8.	Prolongation de la durée de conservation par l'utilisation de bioemballages"	24
9.	Intégration de nutraceutiques dans les revêtements alimentaires comestible.....	25
10.	Propriétés physiques et mécaniques.....	26
11.	Applications alimentaires.....	27
11.1.	Viande, volaille et fruits de mer.....	27
11.2.	Les produits laitiers.....	28
11.3.	Les fruits et légumes.....	30

Matériels et méthodes

1.	Formulation.....	31
2	Caractérisation des bioemballages.....	31
2.1	Solubilité.....	31
2.2	Biodégradabilité	32
2.3	Analyse de la couleur des bio-emballages.....	33
2.4	Évaluation de la Transmittance Lumineuse.....	34
2.5.	Microscopie électronique à balayage (MEB).....	34
2.6	Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR).....	34
2.7	Évaluation de l'Activité Antioxydante (AA) des bioemballages.....	35
2.7.1	Méthode DPPH.....	35
2.7.2	Méthode ABTS.....	35
2.7.3.	Méthode CUPRAC.....	36
3.	Emballage des fraises par les biofilms conçus.....	36
3.1.	Echantillonnage.....	36
3.2.	Emballages des fraises.....	36
3.3.	Effet de l'emballage sur la qualité des fraises.....	37
3.3.1	Taux de détérioration des fraises.....	37
3.3.2.	Effet de l'emballage sur le poids des fraises.....	37
3.3.3.	Analyse sensorielle.....	38
3.3.4.	Analyse de la couleur.....	38
4.	Analyse statistique.....	38

Résultats et discussion

1.	Caractérisation des biofilm.....	39
1.1.	La solubilité dans l'eau.....	39
1.2.	La biodégradabilité dans le sol.....	41

1.3.	La couleur des biofilm.....	43
1.4.	Taux de transmission de la lumière et transparence du film.....	44
1.5.	Microscope Électronique à Balayage (MEB).....	45
1.6.	Spectroscopie infrarouge de transformations de Fourier (FTIR).....	46
1.7.	Activité antioxydante.....	48
1.8.	Perte du poids des fraises emballées.....	49
1.9.	Analyse sensorielle.....	50
	Conclusion.....	55
	Références bibliographiques.....	56

INTRODUCTION

L'emballage alimentaire joue un rôle crucial dans la chaîne d'approvisionnement en assurant la protection des produits tout au long de leur transformation, de leur manipulation et de leur transport (Singh *et al.*, 2021; Kumar *et al.*, 2021). Cependant, les matériaux d'emballage conventionnels présentent des limitations significatives pour l'emballage des aliments. Les polymères couramment utilisés, tels que le polyéthylène, le polypropylène et le polyéthylène téréphtalate, sont dérivés du pétrole et souvent à usage unique, ce qui entraîne leur accumulation dans les océans et les décharges après utilisation. De plus, l'incinération de ces matériaux libère du dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre, posant une menace pour la couche d'ozone et contribuant au réchauffement climatique (Ramakanth *et al.*, 2021; Meys *et al.*, 2020).

À l'ère moderne, les préoccupations environnementales et la demande croissante des consommateurs pour des emballages alimentaires de qualité et durables incitent les chercheurs et les fabricants à adopter des matériaux d'emballage biologiques et des processus économiques circulaires. Les emballages comestibles, dérivés de plantes, d'animaux ou de polymères alimentaires naturels tels que les polysaccharides, les protéines et les lipides, offrent une alternative écologique prometteuse pour l'avenir (Mohamed *et al.*, 2020; De *et al.*, 2021; Oloye *et al.*, 2021; Kurt et Cekmecelioglu, 2021). Ces matériaux maintiennent la qualité des aliments, prolongent leur durée de conservation et réduisent les déchets.

Grâce aux avancées technologiques, les matériaux comestibles peuvent être transformés en films et en revêtements, utilisables sous forme d'enveloppes et de sachets, ou appliqués directement sur les produits alimentaires, intégrant ainsi l'emballage au produit même (Saklani *et al.*, 2019). Bien que les biopolymères présentent des avantages tels que la biodégradabilité, la recyclabilité et la durabilité, leurs faibles propriétés mécaniques et barrières demeurent une limitation (Singh *et al.*, 2021a). Des additifs, comme les plastifiants (glycérol, sorbitol), peuvent améliorer la flexibilité et les propriétés barrières des matériaux d'emballage (Abdollahzadeh *et al.*, 2021).

Les techniques d'emballage comestible actif, intégrant des agents antimicrobiens comme les huiles essentielles, peuvent inhiber la croissance microbienne et prolonger la durée de conservation des aliments (Singh *et al.*, 2021c, 2018; Campos *et al.*, 2010). Les antioxydants, également utilisés, réduisent le taux d'oxydation des aliments, contrôlant ainsi le goût et prolongeant la durée de conservation (Gaikwad *et al.*, 2016; Singh *et al.*, 2018; Ribeiro *et al.*, 2020; Chawla *et al.*, 2021; Massoud *et al.*, 2021; Asada *et al.*, 2021; Hossain et Hossain, 2021).

Ces matériaux sont adaptés à l'emballage de fruits, légumes, produits laitiers et produits carnés, bien qu'ils soient encore en développement. Le choix du matériau dépend du type

d'aliment et des conditions de stockage (JeyaJeevahan *et al.*, 2020 ;TrajkovskaPetkoska *et al.*, 2021 ; Cerqueira *et al.*, 2017).

Dans ce contexte, le but de cette étude est de développer et d'analyser un bioplastique fabriqué à partir de polymères comestibles et biodégradables. Ce bioplastique pourrait servir d'alternative aux sacs en plastique traditionnels. Une partie de ce travail comprend également un test d'emballage de fraises et une évaluation de la qualité des fraises emballées pendant leur stockage.

Synthèse bibliographique

1. Généralités sur les bioplastiques

L'emballage alimentaire à base de produits biologiques a acquis une grande importance ces dernières années (Chakravartula *et al.*, 2019). Les films comestibles, fabriqués à partir de matériaux écologiques et sûrs, sont des feuilles appliquées sur les produits alimentaires (Bizymis *et al.*, 2022). Les revêtements comestibles, produits par diverses techniques, jouent un rôle significatif dans la préservation des éléments nutritifs tels que les agents aromatisants, les antioxydants et les agents antimicrobiens (Bizymis *et al.*, 2022).

La fonctionnalité de ces revêtements dépend largement de leur perméabilité, de leur solubilité et de leurs propriétés mécaniques. L'utilisation de revêtements et de films comestibles (FRC) n'est pas une technique récente ; elle remonte à des temps préhistoriques (Tonyali *et al.*, 2018). Les FRC constituent une méthode efficace pour conserver la qualité des aliments, offrant une barrière partielle contre la perte d'humidité (Jongsri *et al.*, 2016).

Les FRC sont fabriqués à partir de matériaux entièrement durables et sûrs (Hassan *et al.*, 2018). Le choix de matériaux durables pour les FRC a un impact significatif sur leur efficacité et leur adéquation pour l'utilisateur (Maringgal *et al.*, 2020). Les protéines, les polysaccharides et les lipides sont les principaux ingrédients utilisés dans la synthèse des FRC (Díaz-Montes *et al.*, 2021). L'ajout de plastifiants, d'émulsifiants et d'ingrédients actifs, notamment les agents antimicrobiens et les antioxydants, peut améliorer leur efficacité (Díaz-Montes *et al.*, 2021).

Le traitement des produits après récolte inclut l'emballage, une étape cruciale pour maintenir les paramètres de qualité des produits en termes de propriétés organoleptiques, physico-chimiques et sensorielles (Díaz-Montes *et al.*, 2021). L'emballage contribue également à améliorer la distribution et le transport des produits (Díaz-Montes *et al.*, 2021). Il protège les aliments des dommages externes sans interférer avec l'environnement interne du produit. Ces dommages externes peuvent être de nature physique (chocs), chimique (température, pH) ou biologique (dommages causés par les micro-organismes, les insectes et les animaux) (Díaz-Montes *et al.*, 2021)

2. Matériaux utilisés pour produire des bioemballages

Les matériaux pour les films et revêtements comestibles sont employés comme alternatives aux emballages conventionnels non biodégradables afin de réduire leur impact environnemental. La demande des consommateurs montre également une tendance croissante vers des matériaux d'emballage renouvelables et écologiques. Les films comestibles sont fabriqués par coulée, tandis que l'extrusion et le revêtement par la solution comestible se font

par trempage et pulvérisation. La principale différence réside dans le fait que les films comestibles enveloppent les produits alimentaires avec une pellicule solide, tandis que les solutions de revêtement comestible sont appliquées directement sur les produits alimentaires. Ces matériaux doivent être comestibles et capables de former des films et des revêtements continus. Les polysaccharides, les protéines et les lipides sont des exemples de tels matériaux (Saklani *et al.*, 2019).

Dans le processus de coulée, les composants formant le film comestible sont dissous dans un solvant tel que l'eau ou l'éthanol. Des plastifiants peuvent être ajoutés pour améliorer la flexibilité du film. La combinaison de polysaccharides et de protéines, connue sous le nom d'hydrocolloïdes, est hydrophile et composée de polymères à longue chaîne. Lorsqu'ils sont mélangés avec de l'eau, ils peuvent former une structure semblable à un gel. Ces films et revêtements sont transparents, tandis que ceux à base de lipides sont opaques. Les polysaccharides peuvent former de fortes liaisons hydrogène avec d'autres additifs actifs tels que des colorants ou des agents aromatisants. Les films et revêtements d'hydrocolloïdes offrent une bonne barrière à l'oxygène, mais une faible barrière à la vapeur d'eau en raison de leur nature hydrophile. En revanche, les lipides, de nature hydrophobe, présentent de bonnes propriétés de barrière à l'eau (Mohamed *et al.*, 2020).

2.1. Polysaccharides

Les polysaccharides sont non toxiques, comestibles et abondants dans la nature. Les groupes hydroxyles libres présents dans les polysaccharides initient la formation de liaisons hydrogène avec les agents actifs ajoutés. Ce type de revêtement offre une bonne barrière à l'oxygène et d'excellentes propriétés mécaniques, en partie grâce à leur structure très compacte. Cependant, en raison de leur hydrophilicité, l'intégrité de ces emballages peut se réduire dans des conditions très humides. Cette hydrophilicité peut être atténuée par l'ajout de substances lipophiles, telles que la cire et l'huile. L'incorporation d'agents antimicrobiens et d'antioxydants dans les matériaux d'emballage peut ralentir le processus de maturation des produits alimentaires et prolonger leur durée de conservation. Selon leur origine, les polysaccharides peuvent être divisés en catégories végétales, animales, marines et microbiennes (Saklani *et al.*, 2019).

Les polysaccharides d'origine végétale : incluent la cellulose, l'amidon, la pectine et la gomme arabique. La cellulose, un biopolymère très abondant sur Terre, se forme lorsque des

monomères de D-glucose se lient entre eux par des liaisons glycosidiques 1-4. Les polysaccharides d'amidon, disponibles sous forme de granules, sont hydrophiles et gonflent pour former une structure gélifiée lorsqu'ils sont ajoutés à l'eau. La pectine, un polysaccharide ionique extrait de pommes et d'agrumes, voit ses propriétés mécaniques renforcées par la réticulation avec des ions calcium, ce qui la rend idéale pour emballer des aliments à faible teneur en humidité comme les noix et les châtaignes. La gomme arabique, extraite de la tige de l'arbre, possède une excellente capacité de formation de film, réduisant le taux de respiration et contrôlant la production d'éthylène, améliorant ainsi la durée de conservation des produits alimentaires (Mohamed *et al.*, 2020).

Les polysaccharides marins : incluent l'alginate, l'agar et la carraghénane. L'alginate, extrait des algues marines brunes, présente une faible barrière à l'eau, mais ses propriétés barrières sont améliorées avec l'ajout d'ions calcium, le rendant insoluble dans l'eau (Cazón *et al.*, 2017). L'agar, extrait des algues rouges, ne se dissout que dans de l'eau chaude, limitant son utilisation dans des conditions chaudes et humides. La carraghénane, également extraite des algues rouges, peut être utilisée dans l'emballage de la viande, de la volaille et du poisson.

Les polysaccharides d'origine animale : incluent la chitine et le chitosane. La chitine, extraite de l'exosquelette des champignons, se transforme en chitosane par désacétylation. Le chitosane, un polysaccharide cationique, présente de bonnes propriétés de formation de film ainsi que des propriétés antimicrobiennes et antifongiques, et peut être utilisé comme agent antimicrobien dans d'autres biopolymères formant des films (Kadam *et al.*, 2021; Cazón *et al.*, 2017).

Les polysaccharides d'origine microbienne : tels que le pullulan, le gellan et le xanthane, sont produits par des bactéries spécifiques. Ces films et revêtements d'emballage contribuent également à prolonger la durée de conservation des produits alimentaires (Mohamed *et al.*, 2020).

Tableau 1 . Polysaccharides comme films comestibles et revêtements

Sources des matériaux alimentaires	additifs	Application alimentaire	résultats	Références
Amidon de manioc	Nanocristaux d'amidon	Effet des Revêtements sur le Stockage des Poires Huangguan à 20 °C	Après 4 semaines, la réticulation dans le bioemballage à base d'amidon améliore la durée de conservation des poires..	Dai <i>et al.</i> , (2020).
Amidon de riz	Ester de saccharose	Revêtement pour Prolonger la Durée de Stockage Post-Récolte des Bananes Cavendish à 20 °C	Le revêtement a retardé la synthèse de l'éthylène, réduit la perte de poids, diminué le taux de respiration et retardé la dégradation de la chlorophylle. Les fruits revêtus ont une durée de conservation prolongée de 12 jours..	Thakur <i>et al.</i> , (2019).
-Amidon de pomme de terre	-Huile essentielle de thym	Emballage des Crevettes en Conditions Réfrigérées	L'huile de thym à une concentration de 4 g/100 g dans un revêtement à base d'amidon de pomme de terre prolonge la durée de conservation des crevettes.	Alotaibi <i>et Tahergorabi</i> (2018)

Chitosane et <i>Aloé vera</i>	-Glycérol	Impact du Revêtement sur la Qualité Post-Récolte des Fruits de Myrtille (<i>Vaccinium corymbosum</i>) lors du Stockage à 5 °C	Après 25 jours, la croissance microbienne a été réduite de 50 % et la perte d'eau a été réduite de 42 % par rapport aux fruits de myrtille non revêtus.	Vieira <i>et al.</i> , (2016).
-Chitosane en nanoémulsion	-Huile essentielle de thym	Bioemballage pour la viande Réfrigérée Stocké à 4 °C	Le revêtement a efficacement amélioré la durée de conservation de la viande de plus de 6 jours et a fortement inhibé <i>Staphylococcus aureus</i> et <i>Escherichia coli</i> .	-Liu <i>et</i> Liu (2020) .
- <i>Aloe vera</i>	-Huile essentielle citron	Revêtement pour les Kiwis Hayward	-Il maintient la fermeté des fruits, la charge microbienne, la perte de poids et la couleur même après 10 jours.	-Passafiume <i>et al.</i> , (2020)
<i>Aloe vera</i>	/	Revêtement pour les Framboises, Conditions de Stockage à 4 °C	- Après 8 jours, le gel d' <i>Aloe vera</i> maintient des niveaux plus élevés de capacité antioxydante, de phénols totaux et d'enzymes antioxydantes dans les fruits	-Hassanpour (2015).

Nanoémulsion de resvératrol Enrichie en pectine	-Huile essentielle d'origan	Revêtement appliqué sur des filets de viande fraîche, sous atmosphère modifiée à haute teneur en oxygène, stockés à 4 °C	Le nanorevêtement a prolongé la durée de conservation de la viande en minimisant les variations de pH et de couleur, en retardant l'oxydation des lipides et des protéines, en maintenant la tendreté de la viande et en inhibant la croissance microbienne.	-(Xiong <i>et al.</i> ,2020).
-Alginate	- Glycérol	- Revêtement appliqué sur du cantaloup frais coupé	- Le revêtement a réduit la perte d'eau des morceaux de cantaloup, ainsi que la perte de poids	(Parreidt <i>et al.</i> , 2019).

2.2. Protéines

Les protéines sont des polymères constitués d'acides aminés. Ces acides aminés forment des liaisons peptidiques entre les chaînes, assurant leur polymérisation pour former des protéines. Chaque acide aminé possède un groupe carboxyle (–COOH), un groupe amino (–NH₂) et un groupe alkyle (–R). Les protéines naturelles peuvent adopter deux principales structures : fibreuse et globulaire. Les protéines fibreuses, telles que le gluten de maïs, la protéine de soja et la caséine, présentent une structure polypeptidique parallèle. En revanche, les protéines globulaires, comme le collagène, adoptent une forme hautement repliée en sphère. Le collagène, le gluten de maïs, le soja et la caséine sont connus pour leurs excellentes propriétés en tant que matériaux de film et de revêtement. Les films à base de protéines sont hydrophiles, offrant des barrières à l'eau. Ils fournissent une excellente barrière contre les composés hydrophobes tels que les huiles et les arômes. De plus, les films comestibles à base de protéines peuvent intégrer des agents actifs antimicrobiens et antioxydants (Saklani *et al.*, 2019).

Tableau 2 . Films comestibles à base de protéines : diversité et applications

Source des matériaux comestibles	structure	additifs	Application alimentaire	résultats	références
-Film comestible isolé de protéine de lactosérum	-protéine animale globulaire	Huile d'origan, huile d'ail, nisine, natamycine	L'impact d'un film comestible contenant de l'huile essentielle sur l'inactivation microbienne pour prévenir la détérioration du fromage Kasar.	- Le film comestible contenant de la nisine a montré la plus forte inactivation de <i>Listeria monocytogenes</i> . Le film contenant de la natamycine a eu la plus forte inactivation de <i>Penicillium spp.</i> Le film avec de l'huile d'origan est efficace contre <i>Staphylococcus aureus</i> et <i>Escherichia coli</i> .	- Seydim <i>et al.</i> , (2020).
-Film comestible isolé de protéine de lactosérum	- protéine animale globulaire	- Extrait de thé blanc	-Film comestible pour fromage à pâte molle tranché	Le biofilm a amélioré la résistance à la perforation, la stabilité thermique et la perméabilité à la vapeur d'eau. Le nombre de bactéries coliformes a diminué lorsque le fromage était emballé dans ce film.	- Pluta-Kubica <i>et al.</i> , (2020).
Collagène de carpe herbivore et chitosane	-protéine animale	-Huile essentielle de citron	Film comestible pour la viande stockée à 4 °C	Le film comestible inhibe l'oxydation des lipides, prévient la prolifération microbienne et retarde la détérioration pendant 21 jours	Jiang <i>et al.</i> , (2020).

Zein/gélatine	Protéine végétale et animale	Polyphénol de thé	Film comestible multicouche pour fruits et légumes	- La couche externe est hydrophobe de zein et la couche interne est hydrophile de gélatine. Le polyphénol de thé ajouté au film comestible multicouche permet de contrôler la perte de poids, d'inhiber la croissance microbienne et de prévenir le brunissement des aliments.	-Xia <i>et al.</i> , (2019).
Isolat de protéines de soja et nanocristaux de cellulose	Protéine végétale globulaire	Nanocapsules de curcumine	-Film comestible pour maintenir la fraîcheur des crevettes	Les nanocristaux de cellulose ont amélioré la résistance à la traction et la stabilité thermique du film, tout en réduisant sa solubilité dans l'eau. Ce film a permis de réduire les niveaux d'azote total volatil des crevettes stockées, maintenant ainsi leur fraîcheur."	- Xiao <i>et al.</i> , (2021).

Les films élaborés à partir de protéines du lait sont naturellement flexibles et transparents. Ils intègrent également des agents antimicrobiens et antioxydants actifs pour améliorer la qualité des aliments. Les protéines du lait se composent principalement de deux éléments : la caséine et la protéine de lactosérum. La caséine prédomine dans la composition des protéines du lait, tandis que la protéine de lactosérum peut être obtenue après la précipitation de la caséine.

Pour produire ces films, la protéine de caséine est dissoute dans un solvant aqueux, suivi de l'ajout d'une solution alcaline contenant des agents comme les ions calcium ou sodium. Ces agents se lient aux acides aminés des protéines pour former respectivement le caséinate de calcium ou le caséinate de sodium. Cette réaction favorise la réticulation des protéines, renforçant ainsi les propriétés barrières et la résistance mécanique du film.

Selon Mohamed *et al.* (2020), les films à base de protéines de lactosérum présentent de bonnes propriétés de barrière contre le gaz oxygène comparativement aux films à base de caséinate. Le collagène est une protéine présente dans les muscles et les tissus des animaux. Son hydrolyse avec de l'eau produit de la gélatine, qui est sèche, transparente et insipide. La gélatine est dissoute dans de l'eau chaude pour former une solution utilisée pour la formation de films, réalisée par coulée suivie de séchage au four. De même, la protéine de maïs zéine, extraite du maïs, est hydrophobe et peut former des films insolubles dans l'eau. En raison de ses propriétés antimicrobiennes et antioxydantes naturelles, elle peut être utilisée comme matériau d'emballage actif pour préserver la qualité et prolonger la durée de conservation des produits alimentaires.

Les fèves de soja sont une source importante de protéines végétales. Selon Hassan *et al.* (2018), l'ébullition du lait de soja élimine l'eau disponible, facilitant ainsi la formation d'un film à base de protéines de soja, suivi d'un processus de séchage à l'air. Les films à base de protéines de soja présentent de bonnes propriétés de barrière contre les gaz par rapport aux films constitués de lipides et de polysaccharides.

2.3. Lipides

Les lipides sont naturellement hydrophobes, ce qui leur confère d'excellentes propriétés de barrière contre l'eau par rapport aux films à base de polysaccharides et de protéines. Parmi les emballages lipidiques, les films de cire sont réputés pour offrir les meilleures propriétés de barrière à l'humidité. Les résines telles que la résine de terpène et la résine de bois sont connues pour leur brillance et leurs caractéristiques distinctives.

Les lipides étant non polaires, ils peuvent être incorporés dans des films composites pour améliorer globalement la barrière à l'humidité. De plus, les lipides possèdent des surfaces grasses et des saveurs uniques. Les cires comestibles, constituées de longues chaînes d'alcools et d'esters, peuvent être extraites de plantes et d'animaux. En raison de leur hydrophobicité, ces revêtements réduisent la perméabilité à la vapeur d'eau. Le gel extrait de l'aloès peut être appliqué sur des fruits fraîchement coupés. Des études ont montré que ce

revêtement à l'aloès crée une barrière efficace contre l'humidité, réduisant la perte de poids des fruits et maintenant leur fermeté.

La cire est également ajoutée aux films à base d'amidon pour améliorer leur barrière à l'eau. Ces revêtements sont généralement de couleur jaune à brune et semi-solides. Par exemple, un revêtement à base de résine a été appliqué sur des piments verts et des tomates pour leur conférer brillance, transparence, ainsi qu'une protection efficace contre l'eau et l'oxygène (tableau3) (Cheng *et al.*, 2021).

Les graisses et les huiles, extraites de plantes et de graines, sont principalement constituées de triglycérides. Un film fabriqué à partir d'huile de palmiste présente de bonnes propriétés de résistance à l'eau et d'élongation. De même, un revêtement à base d'huile de tournesol a été utilisé pour envelopper de la viande en raison de ses bonnes propriétés de barrière contre l'oxygène et la vapeur d'eau.

Les huiles essentielles possèdent des propriétés antimicrobiennes et sont volatiles ainsi qu'hydrophobes. Par exemple, l'huile essentielle de thym, de clou de girofle et de zeste de citron est souvent ajoutée à des matrices de biopolymères pour améliorer les propriétés antimicrobiennes globales des films d'emballage (Hassan *et al.*, 2018).

Les plastifiants tels que la glycérine et le polysorbate sont ajoutés à la matrice de biopolymère pour améliorer la flexibilité du film d'emballage. Les plastifiants réduisent les forces intermoléculaires dans la matrice polymère et la rendent flexible. L'ajout de plastifiant entraînera une augmentation de la perméabilité à l'eau et à l'oxygène.

Les émulsifiants sont utilisés pour réduire la tension superficielle entre les composés hydrophiles et lipophiles. Lorsque des lipides et des hydrocolloïdes sont utilisés ensemble pour former un emballage comestible, ils montrent une séparation des phases. Les émulsifiants réduisent la séparation des phases entre eux. Les émulsifiants sont extraits des plantes et des animaux sous forme de phospholipides (Liu *et al.*, 2020).

Tableau 3 . Cires comestibles : applications et effets

Source de matériel comestible	additifs	Application alimentaire	résultat	références
:Nanorevêtement à la cire de <i>Candelilla</i>	Phyto-molécules de l'arbuste de tarbouche	-un revêtement pour la pomme visant à améliorer sa durée de conservation lorsqu'elle est stockée dans des conditions de marché à 22 °C et en réfrigération à 5 °C, avec un taux d'humidité relative de 90 %.	Le revêtement a atténué les changements physico-chimiques de la pomme observés sur une période de 8 semaines. Il prolonge la durée de conservation de la pomme lorsqu'elle est stockée dans des conditions de marché et en réfrigération.	(De León-Zapata <i>et al.</i> , 2018).
Bioemballage de cire de <i>Candelilla</i>	- Sorbate de potassium	Le revêtement appliqué sur les poires pour prévenir les infections fongiques.	:Le revêtement contrôle efficacement la croissance fongique, notamment contre <i>Botrytis cinerea</i> et <i>Monilinia fructigena</i> . De plus, il retarde le processus de maturation des poires.	- (Kowalczyk <i>et al.</i> , 2017).
Revêtement de cire de <i>Carnauba</i>	Huile d'orange	- Le revêtement sur le fruit de salak pour maintenir sa qualité	-Le revêtement améliore les qualités physiques telles que la perte de poids, la couleur, la fermeté après un stockage de 9 jours.	(Phothisuwan <i>et al.</i> , 2021).

Revêtement de cire de <i>Carnauba</i>	monolaurate de glycérol	Revêtement appliqué sur le jujube indien stocké à 20 °C.	Le revêtement a réduit la perte de poids, la production d'éthylène et le taux de respiration pendant 12 jours. De plus, il retarde le changement de couleur de la peau.	(Chen <i>et al.</i> , 2019).
Revêtement de cire d'abeille	Huile de noix de coco	Le revêtement appliqué sur les citrons lorsqu'ils sont stockés à 21 °C et 50 % d'humidité relative	-Le revêtement conserve la couleur verte, la fermeté, la teneur en humidité, réduit la respiration, la production d'éthylène et la perte de poids tout au long du stockage.	(Nasrin <i>et al.</i> , 2020).
Cire d'abeille avec hydroxy-propylméthyl cellulose	/	Le revêtement sur les mangues palme lorsqu'elles sont stockées à 21 °C.	Le revêtement a préservé la couleur de la peau et de la pulpe, ainsi que la fermeté et les niveaux de solides solubles. Il a également régulé la maturation et réduit la perte de poids. En conséquence, il prolonge la durée de conservation des mangues de 6 jours.	(Souza <i>et al.</i> , 2021).

2.4. Les matériaux composites

Le conditionnement par les matériaux composites consiste à combiner plusieurs matériaux d'emballage comestibles afin d'améliorer les propriétés globales de l'emballage. Les films à base de polysaccharides et de protéines présentent de bonnes propriétés de barrière aux gaz, mais ils montrent une barrière insuffisante à la vapeur d'eau. En revanche, les lipides offrent une bonne barrière à l'eau mais une mauvaise barrière aux gaz. Pour pallier ces limitations, des films composites sont créés en intégrant des matériaux lipidiques dans une matrice polymère à base de polysaccharides ou de protéines. Cette combinaison permet d'améliorer les propriétés de barrière à la vapeur d'eau et à l'oxygène des films composites.

La méthode du bilayer permet de former un film composite où une couche est constituée de lipides et l'autre est basée sur des hydrocolloïdes. Dans la méthode de revêtement en bilayer, le revêtement lipidique est appliqué sur un film d'hydrocolloïdes séché. Dans la méthode d'émulsion en bilayer, les lipides sont dissous dans la solution de formation du film et des émulsifiants sont ajoutés. Le film est ensuite formé par coulée, intégrant à la fois des parties lipidiques et des parties d'hydrocolloïdes. Pendant le processus de séchage, la phase lipidique se sépare de la phase des polysaccharides ou des protéines, créant ainsi un bilayer avec des propriétés améliorées (Janjarasskul et Krochta, 2010 ; Hassan *et al.*, 2018).

3. Les méthodes de préparation des films et revêtements comestibles

Les films et revêtements comestibles sont deux formes d'emballage critiques. Le revêtement comestible est directement appliqué à la surface du produit alimentaire. Les revêtements comestibles sont fabriqués à partir de matériaux biodégradables tels que les polysaccharides, les protéines ou les lipides (figure 1) (Saklani *et al.*, 2019).

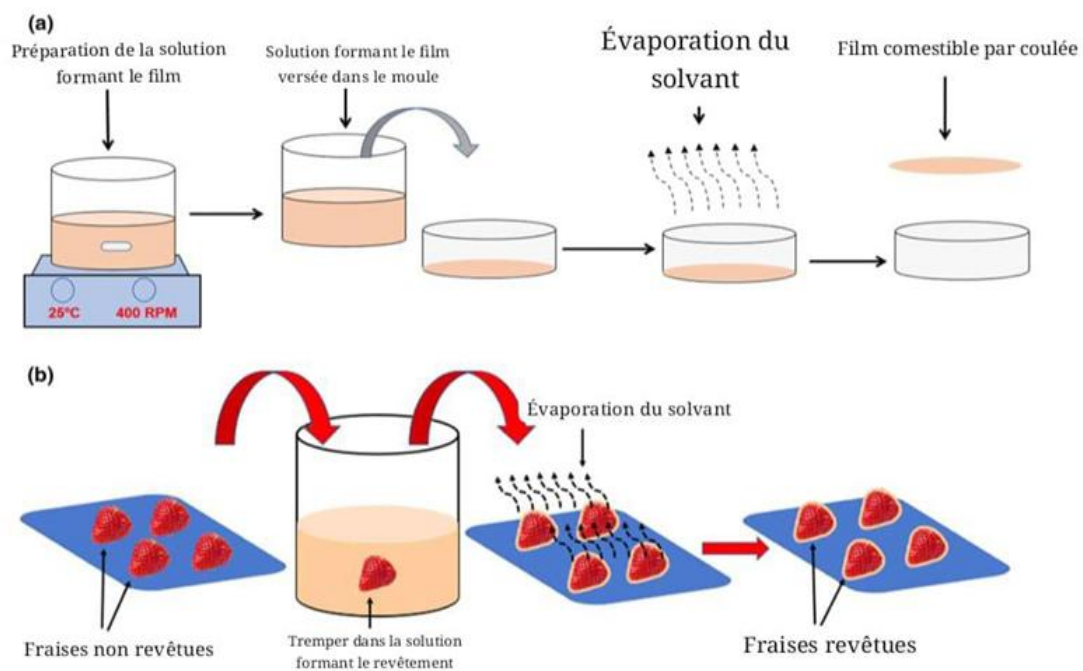


Figure1 . Différentes méthodes utilisées pour la préparation de films et de revêtements comestibles :

(a) : la méthode de coulée pour la formation d'un film comestible,

(b) :méthode de trempage pour l'application d'un revêtement comestible sur le fruit de la fraise (Guerreiro *et al.*, 2015).

3.1.Méthodes de fabrication des films comestibles

Les films comestibles enveloppent la surface des aliments et servent d'emballage comestible principal.

La solubilité des additifs avec les biopolymères est un facteur crucial pour que les additifs puissent remplir leur fonction. Les forces cohésives entre les biopolymères affectent les propriétés mécaniques globales du film. Les films comestibles peuvent être obtenus principalement par deux processus : la méthode de coulée (humide) et la méthode d'extrusion (sèche) (Cerqueira *et al.*, 2017).

3.2.Méthode de coulée en solution

La méthode de coulée est une méthode courante et peu coûteuse de préparation de films. Ce processus peut être divisé en trois étapes.

- ✓ La première est la solubilisation. À cette étape, le matériau biopolymère est solubilisé dans un solvant approprié. Comme le film est comestible, le solvant doit également être comestible et non toxique. Généralement, l'alcool éthylique et l'eau sont utilisés comme solvants.
- ✓ La deuxième étape consiste à verser la solution de coulée dans le moule prédéfini.
- ✓ La dernière étape est le séchage de la solution coulée. Lors du séchage, le solvant s'évapore du film coulé, et ces polysaccharides forment une structure semblable à un gel, en en faisant un film après un séchage supplémentaire. La figure 1a montre toutes les étapes du processus de coulée pour la préparation des films comestibles. Un séchoir sous vide, un micro-ondes et un séchoir à air sont utilisés pour le séchage du film. Le séchage est critique car le temps de séchage affecte l'intramoléculaire La

3.3. Méthode d'extrusion à chaud

Le processus d'extrusion est utilisé pour produire des films comestibles, et il peut augmenter la production au niveau commercial. La méthode d'extrusion est un processus à sec car elle utilise peu ou pas du tout de solvant. Il y a très peu ou pas de solvant, donc nous n'avons pas besoin d'attendre l'évaporation du solvant et le temps de séchage est annulé.

L'extrudeuse a principalement trois zones. La première est la zone d'alimentation, où le biopolymère et les additifs sont ajoutés à l'extrudeuse. Ensuite, la zone de pétrissage, où avec l'aide d'une vis d'extrudeuse, les ingrédients sont bien mélangés, et enfin la zone de chauffage, où une certaine quantité de chaleur est fournie à l'aide du four. C'est là que se produit la fusion et le mélange du biopolymère et des additifs. À la fin de l'extrudeuse, une filière est fixée, qui décide de la forme et de l'épaisseur du film extrudé.

La température élevée modifie la structure du biopolymère et améliore les propriétés globales du film. Le biopolymère sensible à la température ne peut pas être extrudé car des températures élevées dégraderaient le biopolymère (Suhag *et al.*, 2020 ; Cheng *et al.*, 2021).

Des paramètres tels que la vitesse de la vis de l'extrudeuse, la quantité de chaleur, la longueur de la zone de chauffage et la teneur en solvant, si elle est présente, sont cruciaux. Ils jouent un rôle majeur dans la détermination des propriétés mécaniques et optiques du film. Une extrudeuse à double vis aide à mieux mélanger la matière première par rapport à une extrudeuse à vis simple.

Si plus d'une extrudeuse est utilisée, nous pouvons produire un film multicouche avec des propriétés globales améliorées. Ce processus est appelé co-extrusion. Le film co-extrudé final aura des propriétés combinées et améliorées par rapport au film extrudé monocouche. L'inconvénient de cette méthode est que seul un biopolymère tolérant la température ou la chaleur peut être utilisé car le mélange de biopolymère et d'additifs avance et la température de l'extrudeuse augmente. Les matériaux sensibles à la chaleur se dégraderont en raison de la zone de température. L'équipement d'extrudeuse a un coût initial élevé, donc le coût de production global est plus élevé que celui de la méthode de coulée (Suhag *et al.*, 2020).

3.4. Les méthodes d'application de revêtement comestible

Le revêtement comestible en tant qu'emballage comestible principal est directement appliqué sur la surface des fruits, des légumes et d'autres produits alimentaires. Il existe quatre techniques principales de revêtement : le trempage, la pulvérisation, le lit fluidisé et le panage pour le revêtement. Le choix de la méthode de revêtement dépend de plusieurs facteurs, notamment des propriétés de surface du produit alimentaire et de l'objectif de la couche de revêtement. Dans la formation du revêtement, d'abord, les matériaux se diffusent sur la surface alimentaire, puis l'adhésion entre le matériau de revêtement et la surface de l'aliment se produit. Cette section présente une brève discussion sur les principales techniques de revêtement (Cerqueira *et al.*, 2017).

3.4.1. Méthode de trempage

La méthode de trempage est la plus couramment utilisée pour les fruits et les légumes. Cette méthode peut être divisée en trois étapes. La première consiste à plonger complètement le produit alimentaire dans la solution de formation de revêtement. Ensuite, le matériau de revêtement se dépose sur la surface du produit alimentaire. Enfin, le solvant s'évapore du revêtement, formant une solution, laissant un revêtement mince sur la surface du produit (figure 1).

L'évaporation du solvant peut se produire à température ambiante ou avec l'aide de la chaleur. Les fruits fraîchement coupés sont plongés dans le revêtement aqueux, formant une solution avec des agents antimicrobiens (Suhag *et al.*, 2020). Avec l'utilisation de la méthode de trempage, un revêtement de chitosane est réalisé sur le saumon congelé. Ce revêtement empêche la croissance de micro-organismes pathogènes et améliore la durée de conservation du poisson (Soares *et al.*, 2016).

Un revêtement d'alginate avec trempage dans l'acide malique est réalisé sur les mangues fraîchement coupées. Ce revêtement augmente la fermeté des produits alimentaires revêtus et réduit la détérioration de la qualité lors du stockage (Salinas-Roca *et al.*, 2016).

3.4.2.Méthode de pulvérisation

Dans cette méthode, la solution liquide est pulvérisée sur le produit alimentaire. La pulvérisation de liquide convertit la solution liquide en petites gouttelettes. Pour la même quantité de solution liquide, ces gouttelettes auront plus de surface. Par conséquent, les gouttelettes couvriront plus de zones du produit. En fonction de la formation des gouttelettes, cette méthode peut être divisée en atomisation par pulvérisation d'air et atomisation par pression. Dans l'atomisation par pulvérisation d'air, de l'air à haute vitesse est utilisé pour convertir le liquide en gouttelettes, et dans l'atomisation par pression, une haute pression est utilisée pour convertir le liquide en gouttelettes (figure 2).

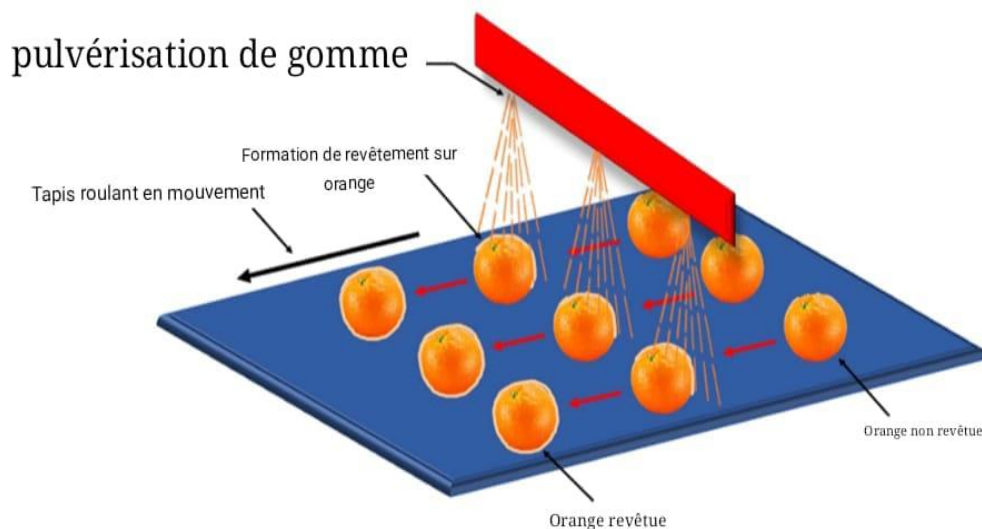


Figure 2 .Technique de pulvérisation utilisant un pistolet pulvérisateur pour appliquer un revêtement comestible sur un fruit d'orange. (Suhag *et al.*,2020).

Cette méthode présente un inconvénient majeur : les biopolymères très visqueux ne peuvent pas être pulvérisés. Pour les biopolymères très visqueux, la méthode de trempage est préférée (Suhag *et al.*, 2020 ; Lara *et al.*, 2020).

3.4.3. Le procédé de balayage

Cette méthode est un revêtement adapté aux produits alimentaires et aux confiseries. De nombreux produits alimentaires de forme ronde ou ovale peuvent être revêtus en une seule fois avec cette méthode.

Une grande boule ronde appelée pan est mise en rotation, et les produits alimentaires sont également mis en rotation à l'intérieur. La solution de formation du revêtement est pulvérisée sur la surface du produit alimentaire, pendant que le pan tourne. La quantité de solution pulvérisée détermine l'épaisseur du revêtement final sur le produit alimentaire. Avec l'aide de l'air circulant, le solvant s'évapore et le revêtement sèche (Campos *et al.*, 2010).

La figure 3 illustre le processus de fabrication de revêtement par panage où le pistolet de pulvérisation de revêtement libère le matériau de revêtement comestible sur les produits alimentaires.

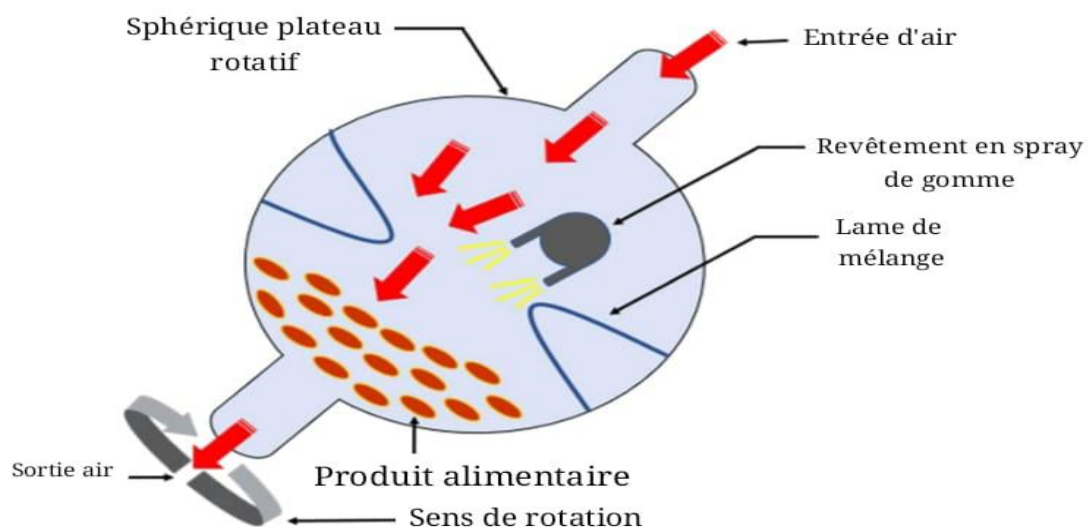


Figure 3 . Méthode de panage utilisant la circulation d'air pour former un revêtement comestible (Campos *et al.*, 2010)

3.4.4. Méthode de traitement en lit fluidisé

Cette méthode permet d'appliquer une fine couche de revêtement sur la surface de produits alimentaires secs de très petite taille tels que le blé ou les noix. La solution de revêtement est pulvérisée à l'aide de buses, ce qui permet de faire circuler le plus petit aliment avec la solution pulvérisée. La solution commence à former une coque sur l'aliment, qui se

transforme lentement en revêtement. Ensuite, le séchage est effectué. Cette méthode est plus coûteuse que les autres méthodes de revêtement (Chawala *et al.*, 2021).

Ce processus réduit les chances d'agglomération et aide à réduire le taux de libération de composés actifs (Lipin *et Lipin.*, 2021).

4. Les avantages des emballages comestibles pour la durabilité et la conservation des aliments

Les emballages comestibles sont biodégradables et non toxiques, et même après avoir rempli leur rôle d'emballage, s'ils se retrouvent dans des décharges, ils ne polluent pas la terre ou l'océan. En tant qu'emballage pour les produits alimentaires périssables, ils protègent les aliments contre la perte de qualité, améliorent les propriétés barrières, inhibent la croissance des microorganismes et fournissent les nutriments nécessaires aux aliments, et finalement améliorent la durée de conservation des produits alimentaires (Cerqueira *et al.*, 2017).

5. Rôles des emballages comestibles dans la préservation alimentaire

Les emballages comestibles créent une barrière entre les produits alimentaires et leur environnement extérieur, comprenant des gaz tels que l'oxygène et des vapeurs telles que l'humidité relative, qui favorisent la croissance des micro-organismes responsables de la détérioration des aliments. Ces films et revêtements sont essentiels pour contrôler l'humidité environnante.

Les matériaux à base de polysaccharides et de protéines sont hydrophiles, ce qui les rend très perméables à la vapeur d'eau. Par conséquent, ils doivent être utilisés dans des conditions de faible humidité relative. En revanche, les films et revêtements à base de lipides et de cires sont hydrophobes et offrent une excellente barrière à la vapeur d'eau, même en présence d'une haute humidité. De plus, ils fournissent une barrière efficace contre l'oxygène.

Les films et revêtements à base de polysaccharides et de protéines présentent une barrière aux gaz élevée dans des environnements à faible humidité relative. Cependant, leur capacité à bloquer l'oxygène diminue avec l'augmentation de l'humidité, car ces matériaux absorbent l'eau (Janjarasskul et Krochta, 2010).

En ce qui concerne les arômes, qui sont principalement des composés organiques volatils, les films comestibles empêchent leur migration grâce à la matrice biopolymère qui les compose. Les films à base de polysaccharides et de protéines, étant hydrophiles, ont moins d'affinité avec les composés aromatiques non polaires, réduisant ainsi leur tendance à migrer à travers le film.

De même, les films comestibles offrent une barrière efficace contre les huiles et les graisses. Les films à base de polysaccharides et de protéines, hydrophiles, empêchent la migration des huiles et des graisses qui sont naturellement hydrophobes, grâce à leur faible affinité mutuelle. La figure 4 montre différents types de barrières, y compris la barrière d'humidité, la barrière à l'oxygène et au dioxyde de carbone, fournies par le revêtement comestible sur les fruits.

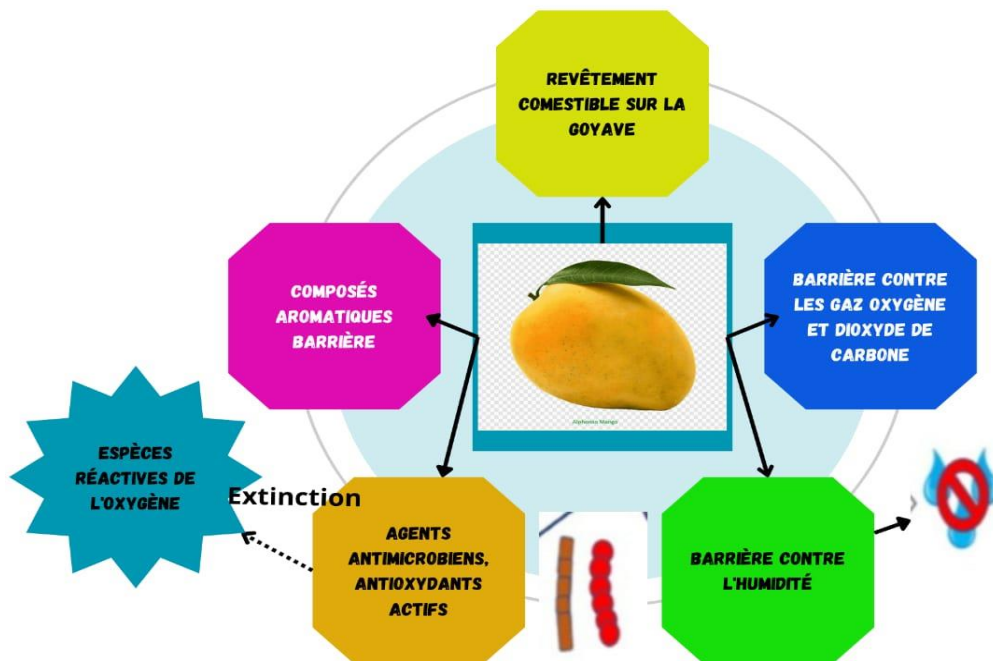


Figure 4 . Variété des barrières offertes par les revêtements comestibles des produits alimentaires (Janjarasskul et Krochta, 2010)

Les propriétés des matériaux d'emballage comestibles en termes de barrière dépendent étroitement des conditions environnementales, telles que la température et l'humidité relative. En dehors des plages optimales, ces matériaux peuvent perdre leur efficacité protectrice. Les températures élevées accélèrent la diffusion des molécules à travers les films barrière, tandis que les environnements humides compromettent la qualité des films à base de polysaccharides et de protéines, facilitant la pénétration des molécules d'eau et la détérioration des produits alimentaires (Janjarasskul et Krochta, 2010 ;Cao *et al.*, 2020 ; Cho *et al.*, 2010).

6. Les propriétés antimicrobiennes des bioemballages

En fonction du produit alimentaire, différents types de bactéries et de levures contaminent les aliments. Ce mécanisme est fortement influencé par d'autres facteurs tels que

la disponibilité en eau ou humidité, la disponibilité en oxygène, la température et le pH des aliments. Les produits chimiques synthétiques ajoutés dans les aliments pour réduire la croissance microbienne peuvent nuire à la santé humaine (Cerqueira *et al.*, 2017).

L'emballage antimicrobien aide à réduire et à restreindre la croissance des microbes ce qui réduit la détérioration des produits alimentaires. Par conséquent, cette technique augmente la durée de conservation des aliments en maintenant la qualité des aliments. Les agents antimicrobiens sont incorporés dans la matrice biopolymère de l'emballage alimentaire (Singh *et al.*,2018).

Ils réduisent ou inhibent la croissance de micro-organismes spécifiques et préviennent la détérioration des aliments. Lorsque les agents antimicrobiens entrent en contact avec une présence microbienne existante sur des produits alimentaires périssables, y compris des fruits et légumes, de la viande et des produits laitiers, ils endommagent les éléments constitutifs de la cellule vivante des microbes. De plus, ils inhibent la croissance du microorganisme et protègent le produit alimentaire. L'emballage antimicrobien maintient la qualité, assure la sécurité et améliore la durée de conservation du produit (Chawla *et al.*,2021).

La figure 5 représente différents types d'agents antimicrobiens et leurs effets sur les divers micro-organismes.

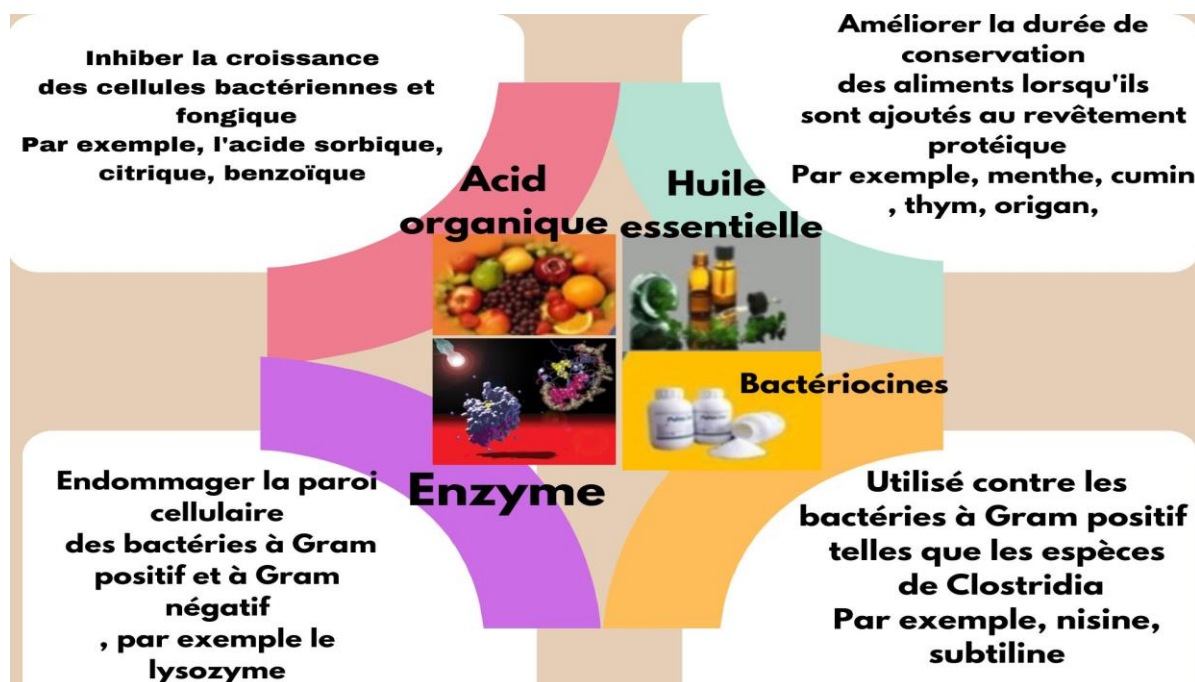


Figure. 5. Types d'agents antimicrobiens utilisés dans les emballages alimentaires comestibles (Chawla *et al.*,2021)

Divers agents antimicrobiens sont disponibles pour les applications d'emballage, tels que les huiles essentielles, les enzymes, les extraits de plantes, etc. (Chawla *et al.*, 2021).

L'ajout d'agents antimicrobiens dans la matrice biopolymère remplace la méthode conventionnelle de pulvérisation directe de produits chimiques antimicrobiens sur les aliments. La pulvérisation directe sur les aliments présente plus de chances de diffusion. Ils inhiberont la croissance des microbes ; cependant, ces produits chimiques peuvent diffuser à l'intérieur du produit alimentaire lui-même. Les films ou revêtements antimicrobiens en biopolymère contrôlent la libération des agents antimicrobiens. Le thymol, le carvacrol, l'eugénol, le cinnamaldéhyde, le romarin et le citral sont des huiles essentielles utilisées comme agents antimicrobiens naturels et sûrs.

L'huile essentielle de carvacrol et de cinnamaldéhydesont ajoutés dans le film comestible à base de pomme et présentent des propriétés antimicrobiennes. Les films comestibles à base d'isolats de protéines de lactosérum avec ajout de glycérine comme plastifiant et d'huile essentielle de citron, et de bergamote comme agent antimicrobien sont efficaces contre *Escherichia coli* et *Staphylococcus aureus* (Çakmak *et al.*, 2020).

7. Les antioxydants

Les films et revêtements antioxydants contenant des agents antioxydants actifs prolongent la durée de conservation des aliments, et ces agents sont incorporés dans les films et revêtements (Tanwar *et al.*, 2021 ; Kumar *et al.*, 2021a).

Les antioxydants sont des molécules stables, et ils peuvent donner des électrons aux molécules instables. Ces antioxydants réagissent avec les molécules instables appelées radicaux libres et espèces réactives de l'oxygène (ROS) et mettent fin à la réaction en chaîne qui peut détériorer les produits alimentaires (Lobo *et al.*, 2010).

De nombreuses graines, herbes et fruits sont des matériaux antioxydants naturels bien connus, et la plupart d'entre eux peuvent être extraits comme sous-produit, sans exploiter l'espèce végétale (Lourenço *et al.*, 2019).

L'extrait de thym comme agent antioxydant incorporé dans le film comestible à base de chitosane et d'amidon a des glycosides flavonoïdes et des terpénoïdes comme principaux composés actifs.(Talón *et al.*, 2017). L'extrait d'*Ocimumsanctum* incorporé en tant qu'agent actif dans le revêtement de fruit de goyave à base de gomme arabique contient des polyphénols et des flavonoïdes comme composés actifs (Murmu et Mishra 2017). Le succès commercial de tout fruit frais coupé est mesuré par le brunissement enzymatique. Les antioxydants aident à retarder le brunissement enzymatique des fruits coupés et augmentent l'acceptation par les consommateurs (Ghidelli *et al.*, 2013).

8. Prolongation de la durée de conservation par l'utilisation de bioemballages''

Les films et revêtements comestibles couvrent complètement la surface des produits alimentaires pour améliorer leur durée de conservation sans compromettre leurs valeurs sensorielles et nutritionnelles existantes. Les produits alimentaires contiennent des éléments nutritifs tels que les glucides, les protéines, le sucre et l'eau. Ces éléments nutritifs sont suffisants pour la croissance des microorganismes alimentaires, et lorsque le niveau de microorganismes dépasse un certain seuil, cela conduira au pourrissement des aliments. Les aliments gâtés sont nocifs pour la santé humaine. Par conséquent, ces films et revêtements comestibles inhiberont la croissance des microorganismes de différentes manières (Galus *et al.*, 2020).

Le film et le revêtement comestibles avec ajout d'agents antimicrobiens préservent les aliments pendant une période plus longue. Les agents actifs ajoutés dans l'emballage peuvent modifier l'atmosphère interne de l'emballage. Les propriétés de barrière de l'emballage comestible permettront un transfert sélectif de différents gaz et composés aromatiques volatils. Si l'oxygène n'est pas disponible autour du produit alimentaire, alors l'oxydation ne se produira pas. Si les composés volatils empêchent le transfert de l'arôme, alors le goût de l'aliment ne sera pas altéré.

Les films comestibles à base de polysaccharides, par exemple, la chitosane, sont hydrophiles, et ils ont une barrière élevée au transfert d'oxygène et de composés aromatiques organiques non polaires. Une barrière élevée à l'oxygène empêche l'oxydation des lipides présents dans le produit alimentaire (Sapper *et Chiralt* 2018).

Une faible perméabilité aux composés non polaires maintient l'arôme naturel de l'aliment pendant une période plus longue. Ces matériaux d'emballage ont des agents actifs antioxydants et antimicrobiens.

Les antioxydants empêchent également l'oxydation des aliments, et les agents antimicrobiens inhibent la croissance excessive des microorganismes de pourrissement des aliments. Ces matériaux d'emballage réduisent le processus de déshydratation, réduisent le transfert de vapeur d'eau et ralentissent le processus de maturation. Toutes ces activités combinées préservent les aliments, et ils auront une durée de conservation plus longue que les aliments non revêtus (Sapper *et Chiralt* 2018).

Une étude récente menée par Galus *et al.* (2020) a montré que les fraises non revêtues ont une durée de conservation d'environ 14 jours. Mais lorsqu'elles sont revêtues de solution d'amidon, la durée de conservation passe à 21 jours. Ce revêtement d'amidon fournit une barrière au gaz oxygène qui inhibe la croissance des microorganismes. Dans un autre

exemple, le revêtement à base de gomme arabique confère des propriétés antimicrobiennes lorsqu'il est appliqué sur des pommes et prolonge la durée de conservation des pommes revêtues.

9. Intégration de nutraceutiques dans les revêtements alimentaires comestible

Les nutraceutiques sont des composés de qualité alimentaire qui ont des bienfaits pour la santé. Ils sont ajoutés dans le revêtement alimentaire comestible pour améliorer la valeur nutritive des aliments, car lors de la transformation à haute température, une perte de nutriments peut survenir. L'utilisation directe de nutraceutiques n'est pas préférée, donc ils sont incorporés dans la matrice composite des matériaux d'emballage alimentaire. Certains nutraceutiques ont un impact sur la santé humaine, comme l'acide ascorbique en tant qu'antioxydant, la pectine en tant que support cardiovasculaire, le bêta-carotène ayant des implications liées à l'âge (Daniloski *et al.*, 2021).

Dans une recherche récente menée par Daniloski *et al.*(2021), des films et revêtements comestibles sont formés avec des protéines de lait en tant que composé nutraceutique. Les protéines de lait contiennent environ 80 % de protéines de caséine et 20 % de protéines de lactosérum. Ces deux contenus ont un impact positif sur la santé humaine et sont entièrement fabriqués à partir de produits naturels (figure 6).

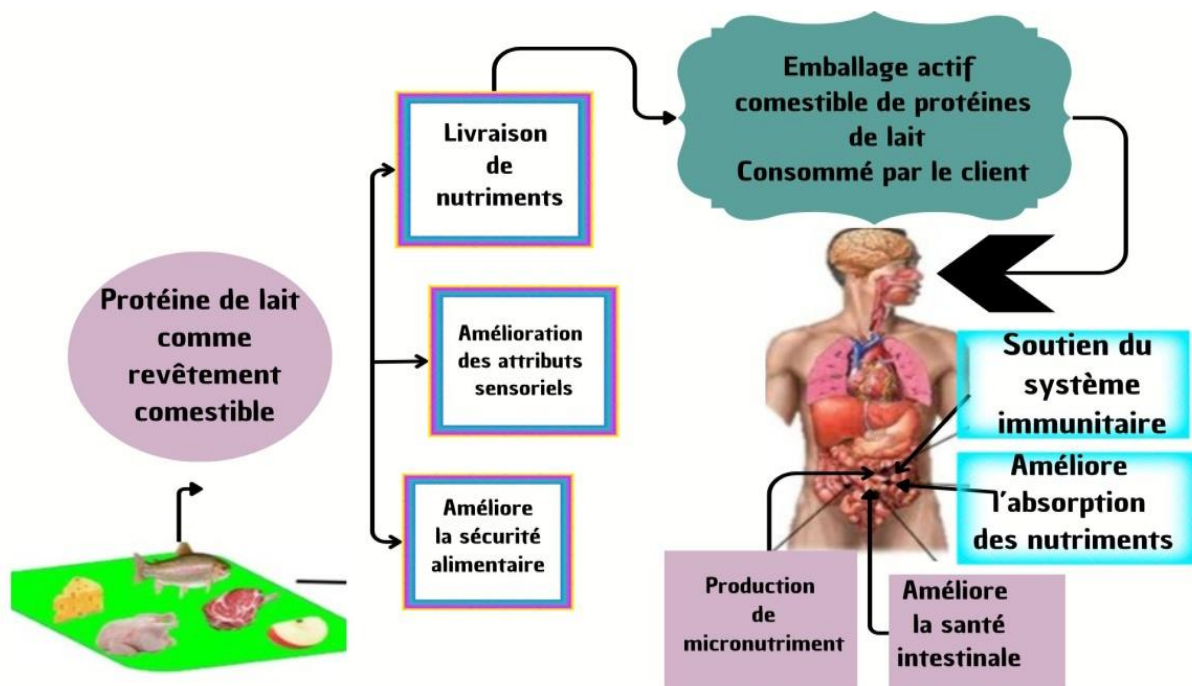


Figure 6. Valeur nutritionnelle post-consommation de l'emballage alimentaire à base de lait (Daniloski *et al.*, 2021)

Les matériaux d'emballage actifs à base de protéines de lait fournissent une barrière à l'oxygène, retardent la perte d'humidité, offrent une meilleure résistance à la traction et sont plus flexibles. Les protéines de lait servent également de vecteurs pour les additifs naturels, tels que les huiles essentielles d'origan et de gingembre, qui inhibent la croissance microbienne. Le revêtement comestible de caséinate de sodium agit comme support pour les agents antimicrobiens, notamment l'huile essentielle de gingembre. Lorsqu'appliquée sur du blanc de poulet conservé à 4°C, cette solution réduit les comptages de bactéries aérobies pendant 12 jours (Noori *et al.*, 2018). De plus, l'ajout de cire de carnauba avec un biocomposite de nanargile améliore la qualité nutritionnelle des oranges (Motamedi *et al.*, 2018).

10. Propriétés physiques et mécaniques

Les emballages comestibles tels que les films et les revêtements protègent le produit alimentaire contre les dommages physiques. La raison des dommages peut être des facteurs mécaniques, y compris la pression (compression) ou l'impact.

Des tests mécaniques standard sont utilisés pour évaluer la résistance du film comestible. La résistance à la traction, la résistance au déchirement, l'allongement à la rupture et la résistance à l'abrasion sont des tests nécessaires pour déterminer les propriétés du film.

Les films comestibles ont généralement une résistance à la traction plus faible que les films d'emballage en plastique conventionnels. Les films comestibles peuvent avoir un bon allongement par rapport aux films plastiques.

La perméation de particules indésirables et de composés aromatiques peut détériorer la qualité alimentaire et affecter l'acceptation du produit par le consommateur (Han.,2014).

Dans les films comestibles, le revêtement fournit une barrière à l'humidité et réduit la migration des nutriments entre les aliments et l'environnement. Ces films créent une barrière qui réduit le transfert d'oxygène entre les aliments et l'environnement environnant. Cela réduit le taux d'oxydation des aliments, et ainsi la durée de conservation du produit alimentaire augmente. L'humidité élevée dans l'atmosphère affecte la force physique du film. La teneur en humidité réagit avec la matrice polymère comestible, puis la résistance à la traction, l'intégrité du film, ainsi que les propriétés de barrière du film sont compromises. Les films comestibles à base de polysaccharides et de protéines sont hydrophiles, et si ces biopolymères sont utilisés dans des conditions de forte humidité, leur intégrité structurale diminuera, et l'emballage ne protégera pas le produit alimentaire. Généralement, de la cire comestible comme la carnauba et la candelilla est ajoutée aux biopolymères hydrophiles. Ces

cires sont hydrophobes et créent une barrière contre la vapeur d'eau qui maintient l'intégrité structurale du film (Cortés-Rodríguez *et al.*, 2020).

11. Applications alimentaires

Les films et les revêtements comestibles sont écologiques et biodégradables. Comme les consommateurs sont de plus en plus sensibilisés à l'environnement, la demande d'emballages écologiques a augmenté. Les films et les revêtements comestibles sont utilisés pour le fromage, la viande, le poisson, la volaille, les fruits et les légumes. L'emballage comestible fournit une barrière sélective pour l'eau et l'oxygène, améliorant la durée de conservation des produits alimentaires par rapport aux emballages plastiques classiques (Cerqueira *et al.*, 2017).

11.1. Viande, volaille et fruits de mer

Les films et revêtements comestibles offrent une barrière protectrice aux produits à base de viande, de fruits de mer et de volaille, prévenant ainsi la perte de rétraction, contrôlant la croissance microbienne et retardant la décoloration et les arômes indésirables (Gaikwad *et al.*, 2020 ; Ustunol., 2009).

L'alginate de sodium, un biopolymère naturel extrait d'algues brunes, est largement utilisé pour former ces films en raison de ses bonnes propriétés de barrière à l'oxygène (Kontominas., 2020). L'ajout d'agents actifs et antimicrobiens améliore la durée de conservation des produits carnés revêtus d'alginate (Kontominas., 2020). L'alginate a reçu l'approbation de la FDA et de l'EFSA comme matériau sûr pour différents types de viande (Kontominas., 2020).

Les défis liés à ses faibles propriétés de barrière à l'eau sont surmontés grâce à la nanotechnologie et à l'ajout de plastifiants comme le glycérol ou le sorbitol (Kontominas., 2020). De plus, l'ajout d'agents actifs tels que le chlorure de calcium et la cellulose microfibrillée, ainsi que des huiles essentielles antimicrobiennes, améliore les propriétés mécaniques et antimicrobiennes de ces films comestibles (Kontominas, 2020 ; Puscaselu *et al.*, 2020).

Ces avancées positionnent les films comestibles comme une alternative prometteuse aux films polymères non dégradables dans l'industrie de l'emballage alimentaire (Puscaselu *et al.*, 2020). Le film comestible à base d'alginate avec ajout d'huile de cumin noir comme agent antimicrobien est utilisé pour emballer la viande de blanc de poulet. Ce film inhibe la croissance d'*Escherichia coli* et empêche le changement de couleur de la viande pendant environ 5 jours lorsqu'il est stocké à 40 °C (KonukTakma *et Korel.*, 2019).

Lorsque le film de gélatine et d'alginate avec de l'huile essentielle d'origan comme agent antimicrobien a été utilisé pour l'emballage de filet de poisson, les études montrent que ce film a retardé la croissance bactérienne de 15 jours (Kazemi *et Rezaei.*, 2015).

Le film d'emballage à base d'alginate de sodium avec ajout de cannelle, d'origan et d'huile de sarriette inhibe la croissance de *Salmonella typhimurium* (Oussalah *et al.*, 2006).

Les fruits de mer sont des produits alimentaires très périssables ayant une durée de conservation concise. Pendant le transport et le stockage des fruits de mer, ils se contaminent en raison de l'environnement environnant, ce qui entraîne des maladies d'origine alimentaire et une altération de la qualité et de la valeur nutritionnelle des produits. Cela réduit également l'acceptation des fruits de mer par les consommateurs (Dehghani *et al.*, 2018).

Le traitement post-récolte des crevettes peut être effectué manuellement ; par conséquent, il existe une forte probabilité que des agents pathogènes de *Listeria monocytogenes* contaminent les crevettes. Les agents antimicrobiens ajoutés dans la gélatine à base de poisson-chat retardent la croissance microbienne et améliorent la durée de conservation des crevettes blanches fraîches de 10 jours (M *et al.*, 2011).

Un revêtement à base de gélatine enrichi en cannelle en tant qu'agents antimicrobiens actifs retarde la croissance microbienne et prolonge la durée de conservation du poisson truite arc-en-ciel frais (Andevvari *et Rezaei.*, 2011).

Un revêtement comestible à base d'isolat de protéines de lactosérum contenant de l'huile essentielle de clou de girofle en tant qu'agent actif améliore la qualité et prolonge la durée de conservation des filets de blanc de poulet (Fernández-Pan *et al.*, 2014).

Le revêtement comestible est fabriqué en pulvérisant et en trempant le produit carné dans la solution formant le revêtement. Lorsque des ingrédients actifs sont ajoutés aux polysaccharides, ces emballages deviendront des emballages actifs, qui peuvent interagir avec les produits carnés et l'environnement, ce qui améliorera la durée de conservation du produit carné. Étant donné que les films d'alginate sont transparents, la couleur et la qualité de la viande sont facilement visibles pour le client. C'est donc aussi un facteur essentiel car les consommateurs peuvent voir le produit qu'ils vont acheter, par rapport à l'impression de graphiques alimentaires attrayants sur l'emballage. Des études ont montré que le facteur de transparence de l'emballage influence la décision d'achat et incite les consommateurs à acheter en gros (Puscaselu *et al.*, 2020).

11.2. Les produits laitiers

Les produits laitiers tels que le fromage, le yaourt et le lait sont une partie essentielle de l'alimentation quotidienne. Le fromage contient principalement une grande quantité de

protéines, de vitamines et de lipides. Les films comestibles et les revêtements autour du produit laitier contrôlent le processus de maturation, préviennent le transfert de masse et améliorent la durée de conservation du produit (Leandro *et al.*, 2017 ; Cruz-Diaz *et al.*, 2019).

Les méthodes de revêtement incluent le trempage, le brossage, la pulvérisation et le brossage électrostatique, tandis que le coulage est la méthode de formation du film. Ces techniques permettent de couvrir entièrement le fromage et d'améliorer sa durée de conservation en créant une barrière entre le fromage et son environnement (Cruz-Diaz *et al.*, 2019).

Les films comestibles fabriqués à partir de protéines de lactosérum montrent de meilleures propriétés de barrière aux gaz par rapport aux polysaccharides et aux autres films à base de protéines. Les protéines de lactosérum avec des additifs tels que des plastifiants comme le glycérol et des agents de réglage du pH sont mélangées pour améliorer encore plus leurs propriétés (Leandro *et al.*, 2017)

En utilisant un solvant, une solution formant un film est préparée, puis les films sont séchés dans un four chauffé à environ 35 °C pendant 18 heures. Les films à base de protéines de lactosérum sont transparents, ce qui permet au consommateur de voir la qualité du fromage (Costa *et al.*, 2018). Des agents antimicrobiens sont ajoutés à la matrice de protéines de lactosérum pour inhiber la croissance des bactéries et des levures, avec une efficacité variable selon les agents et les microorganismes ciblés (Cruz-Diaz *et al.*, 2019).

L'ajout d'agents antioxydants réduit la réaction du fromage avec l'oxygène, préservant ainsi sa couleur et son goût (Cruz-Diaz *et al.*, 2019).

L'emballage de fromage ricotta dans un film comestible à base de chitosane et de protéines de lactosérum a montré une diminution significative des microorganismes mésophiles et psychrotrophes même après 21 jours (Di Pierro *et al.*, 2011).

De même, l'utilisation d'isolats de protéines de lactosérum avec des agents antimicrobiens pour l'emballage du fromage bovin semi-dur a également montré des résultats positifs en termes de conservation (Ramos *et al.*, 2012).

Pour le beurre, un revêtement comestible à base d'amidon de maïs et d'huile de gingembre a réduit l'oxydation des lipides lors du stockage (Arshad *et al.*, 2020).

Enfin, l'ajout d'huile essentielle de cannelle dans la matrice de revêtement comestible d'alginate de sodium a amélioré la durée de conservation du paneer en inhibant la croissance de microorganismes à sa surface (Raju *et Sasikala.*, 2016).

11.3. Les fruits et légumes

Les fruits et légumes sont associés à une alimentation plus saine et les consommateurs ont des attentes élevées en termes de sécurité alimentaire, de nutriments et de durée de conservation (Kumar *et al.*, 2021a ; Olivas *et* Barbosa-Cánovas., 2009). Le gel d'*Aloe vera* (AVG), en tant que biopolymère naturel, agit comme une membrane semi-perméable, réduisant la respiration des fruits et légumes et améliorant leur durée de conservation grâce à ses propriétés antioxydantes et antimicrobiennes (Nicolau-Lapeña *et al.*, 2021). Son application sur différents fruits et légumes, comme la papaye, la mangue, les fraises, le concombre et les tomates, a montré des résultats positifs en termes de réduction de la perte de poids et de maintien de la fermeté (Mendy *et al.*, 2019 ; Pérez *et al.*, 2016 ; Abu *et* Gedanken, 2021 ; Li *et al.* ., 2018 ; Chrysargyris *et al.*, 2016).

Matériel et méthodes

La formulation des bio-emballages et l'analyse de leur impact sur la durée de conservation des fraises ont été menées au sein du laboratoire de biochimie appliquée de l'Université du 20 août 1955 à Skikda. L'étude de la caractérisation du biofilm à l'aide du microscope électronique à balayage (MEB) a été effectuée au Centre de Recherche en Analyse Physico-Chimique (CRAPC) à Ouargla. L'analyse par Transformée de Fourier Infrarouge (FTIR) a été menée au sein de la Plateforme Technologique "Élaboration des Matériaux et Fabrication" de l'École Polytechnique, Université Constantine 3.

1. Formulation

Deux types de bioemballages ont été conçus en combinant une variété d'ingrédients, qui ont été utilisés séparément dans des protocoles antérieurs. Des ajustements ont été effectués pour optimiser la solubilité et la texture du bioemballage (Parveen *et al.*, 2024 ; Bhatia *et al.*, 2024 ; Diaz-montes *et al.*, 2021 ; Abera *et al.*, 2023 ; AberaAsfaw *et al.*, 2023 ; Popescu *et al.*, 2022 ; Cejudo *et al.*, 2023 ; Mao *et al.*, 2023). La fabrication du premier bioemballage, à base de pectine et de gélatine, commence par la préparation d'un mélange de base dans un bécher. Ce mélange est composé de 4% de gélatine et 1% de pectine, dissous dans de l'eau distillée. Le mélange est ensuite chauffé à 80°C et agité jusqu'à obtenir une solution homogène. À ce stade, 1% de glycérol est ajouté. Parallèlement, une émulsion est préparée dans un autre bécher. Elle contient 1% de vinaigre blanc, 1% d'huile d'olive, 1% d'huile essentielle et 1% de Tween80, le tout mélangé à l'aide d'un mixeur électrique. Cette émulsion est ensuite incorporée au mélange de base, qui continue d'être agité. Enfin, 1% de cire d'abeille naturelle est ajoutée au mélange, qui est laissé à agiter sur un agitateur magnétique. Le mélange final est versé dans des boîtes de Pétri et laissé à sécher jusqu'à ce qu'il soit complètement sec. Cette méthode permet de produire efficacement des biofilms à base de pectine et de gélatine. La deuxième formulation utilise les mêmes composants, avec l'ajout de chitosane à la pectine et à la gélatine.

2. Caractérisation des bioemballages

2.1 Solubilité

La solubilité dans l'eau (WS) a été déterminée selon la méthode décrite par (Weng *et al.*, 2021) les films préparés (2 cm × 2 cm) ont été séchés dans un four de séchage à 105 °C pendant 24 heures pour obtenir le poids sec initial des sections de film (figure 7). Ensuite, les sections de films ont été placées dans des béchers de 100 mL remplis de 50 mL d'eau distillée et, après avoir enveloppé la surface des béchers avec des emballages en plastique, stockées à

température ambiante pendant 24 heures. Ensuite, les films ont été positionnés sur du papier filtre et de nouveau séchés à 105 °C pendant 24 heures dans un four de séchage pour obtenir le poids sec final (W0). Ensuite, la solubilité (WS) des films dans l'eau a été analysée à l'aide de l'équation donnée :

$$WS(\%) = \frac{(Wt - W0)}{W0} \times 100$$

W0 est le poids sec final (après la dissolution dans l'eau)

Wt est le poids sec initial (avant la dissolution dans l'eau)



(A)



(B)

Figure 7. Test de solubilité des deux biofilms

A : biofilm à base gélatine pectine et B : biofilm à base chitosane , gélatine et pectine .

2.2 .Biodégradabilité

La biodégradabilité des bioemballages élaborés a été évaluée en se basant sur la méthode de test de biodégradation proposée par Tan *et al.*, (2016). Du sol, collecté dans une zone expérimentale de l'Université du 20 Août 1955 à Skikda, a été disposé dans un bac en plastique. Des échantillons de film, mesurant 2 × 2 cm, ont été enfouis à une profondeur de 4 cm dans ce sol (figure 8). Pendant une période de 30 jours, le sol a été arrosé régulièrement, deux fois par jour. Chaque semaine, les films ont été récupérés pour déterminer leur perte de poids. Cette perte de poids a été calculée en utilisant l'équation appropriée.

$$Perte\ de\ poids\ (\%) = \frac{(M0 - M1)}{M0} \times 100$$

D'où :

M0 : représente le poids initial du film avant le début du processus de biodégradation.

M1 : désigne le poids du film mesuré chaque semaine pendant un mois de biodégradation.



Figure 8. Le test de la biodégradabilité des deux biofilms

A : biofilm à base gélatine pectine et B : biofilm à base chitosane , gélatine et pectine

2.3. Analyse de la couleur des bio-emballages

La caractérisation de la couleur des deux bioemballages a été réalisée en suivant la méthodologie proposée par He *et* Pei (2020), en utilisant l'application d'extraction de couleur ColorGrab (version 3.6.1, 2017, Loomatix Ltd., Munchen, Allemagne). Afin d'éliminer toute interférence de la lumière ambiante sur la capture de la couleur, une boîte en polystyrène fermée (39 × 17 × 28 cm) a été employée, équipée d'une LED blanche de 1.2 W 5 V pour assurer une diffusion lumineuse uniforme sur l'échantillon (figure 9). Le modèle colorimétrique CIE-Lab* a été sélectionné pour cette analyse. Ce modèle mathématique de couleur est basé sur la sensibilité du spectre visuel humain (Chen *et* Ren., 2014), où L* représente la luminosité, a* indique le vert - /rouge+, et b* le bleu - /jaune+. Les mesures de couleur ont été effectuées à 5 endroits distincts sur le bioemballage.

Les valeurs de couleur ont été exprimées en fonction des paramètres suivants(Mea *et al* .,2022) :

- L'indice de jaunissement (YI)
- L'indice de blancheur (WI)

Ces indices ont été calculés en utilisant les formules suivantes :

$$YI = (142.86b) / L$$

$$WI = 100 - \sqrt{(100 - L)^2 + a^2 + b^2}$$

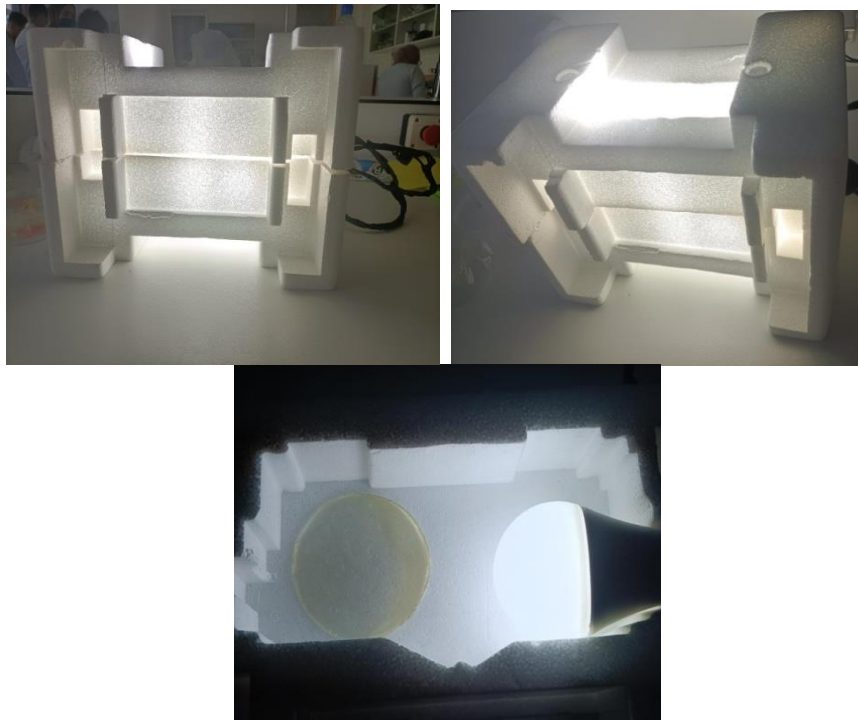


Figure 9. L'appareil utilisé pour mesurer la couleur

2.4.Évaluation de la Transmittance Lumineuse

La transparence des films synthétisés a été évaluée à une longueur d'onde spécifique de 600 nm en utilisant un spectrophotomètre. Des échantillons rectangulaires des films ont été préparés et montés dans une cuvette en quartz, puis positionnés directement dans la cellule de mesure du spectrophotomètre, avec l'air servant de référence. Les mesures ont été répétées au moins trois fois pour chaque échantillon (Sood et Saini, 2022).

2.5. Microscopie électronique à balayage (MEB)

La morphologie de surface des biofilms préparés a été examinée par microscopie électronique à balayage. Avant la visualisation, les échantillons ont été fixés sur la tête en laiton et recouverts d'une couche d'or pour obtenir une conductivité de l'échantillon (Kumar *et al* ,.2019a)

2.6.Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

Pour étudier la structure chimique et les interactions entre les composants, la spectrophotométrie FT-IR a été réalisée dans la plage de 4000 à 400 cm^{-1} . Les spectres FTIR ont été obtenus à une résolution de 4 cm^{-1} avec un minimum de 30 scans par spectre. Toutes les mesures ont été effectuées à température ambiante et rapportées en fonction de la transmission(Bako *et al* ,.2024)

2.7. Évaluation de l'Activité Antioxydante (AA) des bioemballages

Les bioemballages ont été soumis à une macération dans de l'éthanol à 96% pendant 24 heures, puis filtrés avant l'évaluation de leur activité antioxydante. Cette dernière a été évaluée en utilisant trois méthodes distinctes : DPPH, ABTS et CUPRAC.

2.7.1. Méthode DPPH

L'activité antioxydante a été déterminée en évaluant la capacité de piégeage des radicaux libres sur le radical 1,1-diphényl-2-picrylhydrazyl (DPPH), selon la méthode décrite par Villaño *et al.*, (2007), avec quelques modifications mineures. Une aliquote de 0,5 mL d'extraits éthanoliques a été ajoutée à 1,95 mL de solution DPPH (60 µM dans de l'éthanol), puis vortexée. L'absorbance a ensuite été mesurée à 515 nm en utilisant un spectrophotomètre UV/Vis. L'activité antioxydante (AA) a été calculée en utilisant la formule suivante :

$$I\% = \frac{(A_0 - A)}{A_0} \times 100$$

D'où : A₀ : l'absorbance de la solution de DPPH

A : absorbance de l'échantillon

Par la suite, la valeur IC₅₀ a été déterminée, qui correspond à la concentration provoquant l'inhibition de 50% du radical libre DPPH.

2.7.2. Méthode ABTS

Pour la préparation de la solution mère d'ABTS, 5 ml d'eau, 19,2 mg d'ABTS et 3,3 mg de K₂S₂O₈ sont mélangés. Le mélange réactionnel est ensuite laissé à incuber à l'obscurité pendant 16 heures à température ambiante. La solution de travail d'ABTS⁺ est obtenue en diluant la solution mère d'ABTS avec de l'eau jusqu'à ce qu'une absorbance d'environ 0,7 à 734 nm soit atteinte (Re *et al.*, 1999).

Dans chaque tube, 1 ml des différentes concentrations (0-1mg/ml) des extraits de biofilms, et 160 µl de la solution d'ABTS sont ajoutés. Ces tubes sont incubés à l'obscurité pendant 30 minutes. La lecture des absorbances est ensuite effectuée à 734 nm.

L'activité antioxydante est calculée en utilisant la formule suivante :

$$I\% = \frac{(A_0 - A)}{A_0} \times 100$$

D'où : A₀ : l'absorbance de la solution d'ABTS

A : absorbance de l'échantillon

Les pourcentages d'inhibition du radical ABTS sont tracés en fonction des concentrations d'extrait pour déterminer l'index IC₅₀.

2.7.3. Méthode CUPRAC

La capacité des deux types de bioemballages à réduire les ions de cuivre est évaluée, comme l'a rapporté Apaket *al.*, (2004). Cette méthode repose sur le suivi de la diminution de l'absorbance accrue du complexe néocuproïne-cuivre Cu^{2+} (Nc2-Cu^{2+}), qui est réduit par un antioxydant testé. Cette réaction est quantifiée par spectrophotométrie.

Pour ce faire, 0.5 ml de solution de chlorure de cuivre (II) (0,01 M), 0.6 ml d'acétate d'ammonium (1 M) et 0.5 ml de néocuproïne (0,0075 M) sont mélangés à 0.4 ml des différentes concentrations (0-1 mg/ml) des extraits. Le mélange est incubé pendant 1 heure à température ambiante, puis l'absorbance est enregistrée à 450 nm. Les résultats sont représentés par $A_{0.5}$ (mg/mL), qui correspond à la concentration indiquant une absorbance de 0,50.

3. Emballage des fraises par les biofilms conçus

3.1. Echantillonnage

Des fraises (*Fragaria vesca*) ont été récoltées de notre champ de la région de karkera, province de Skikda et transférées au laboratoire dans les deux heures suivant la cueillette. Ces fraises, similaires en termes de forme, de couleur et de taille, ont été soigneusement inspectées pour détecter toute décomposition ou dommage. Seules les fraises exemptes de lésions physiques ont été sélectionnées pour le traitement ultérieur. Avant l'utilisation, les fraises ont été nettoyées et laissées à sécher complètement à température ambiante. Ensuite, chaque fraise a été pesée et ses dimensions, notamment la longueur et la largeur, ont été mesurées.

3.2. Emballages des fraises

Une fois complètement sec, le biofilm est découpé de manière homogène pour correspondre à la taille des sacs qui sont préparés à l'aide d'un scellant alimentaire. Ensuite, 10 fraises y sont ajoutées avant que le sac ne soit scellé. Une fois emballées, les fraises sont conservées au réfrigérateur à 4°C. La composition, la couleur et l'aspect des fraises emballées sont suivis en comparaison avec des fraises non emballées. Les paramètres physiques et chimiques des fraises sont évalués quotidiennement (figure 10)

(A)



(B)



Figure 10 .Des fraises emballées avec des bioemballages, emballage (A) à base de gélatine, pectine et emballage (B) à base de chitosane, gélatine et pectine

3.3.Effet de l'emballage sur la qualité des fraises

3.3.1.Taux de détérioration des fraises

Le pourcentage de fraises détériorées est calculé en fonction du nombre clairement détérioré par rapport au nombre total de fraises emballées dans chaque sac (Cejudoet *al* ..,2023).

3.3.2.Effet de l'emballage sur le poids des fraises

Après la période de conservation, les poids initiaux et finaux ont été enregistrés pour chaque unité, qu'elle représente les solutions filmogènes ou le témoin. Des pesées régulières

ont été effectuées sur les échantillons de fruits, qu'ils aient été emballés ou non. La variation de poids a été calculée comme suit

$$\text{Perte de poids (\%)} = \frac{(W_o - W_i)}{W_o} \times 100$$

- W_o représente le poids initial de l'échantillon avant le début de l'expérience.
- W_i désigne le poids de l'échantillon mesuré à différents moments de l'expérience.

3.3.3. Analyse sensorielle

L'analyse sensorielle des fraises enrobées a été réalisée après la période de stockage pour évaluer l'aspect visuel, la texture (intégrité structurelle visible), la couleur et la brillance. Ces qualités sensorielles ont été notées sur une échelle de 5 points, selon (Colelli *et al.*, 1991), où :

5 = très bon.

4 = bon .

3 = passable (limite de commercialisation).

2 = médiocre (limite d'utilisation).

1 = très faible (non comestible).

3.3.4. Analyse de la couleur

La couleur des fraises, qu'elles soient emballées ou non, a été caractérisée en utilisant le même dispositif que celui employé pour les bioemballages. Cette caractérisation a été effectuée en suivant la méthodologie proposée par He *et* Pei (2020). Dans cette méthodologie, L^* représente la luminosité, a^* indique le degré de vert ou de rouge, et b^* représente le degré de bleu -jaune . Les mesures de couleur ont été prises à cinq endroits distincts sur chaque fraise.

4. Analyse statistique

Les moyennes, accompagnées de leurs écarts types, ont été calculées à partir de trois répétitions et représentées graphiquement à l'aide de Microsoft Excel 2013. Pour comparer les moyennes obtenues, un test ANOVA à un facteur a été effectué, suivi d'un test Post hoc - Tukey, en utilisant le logiciel Minitab® LLC (version 19.1.1.0, 2019). Les lettres en exposant (a, b, c, d) indiquent une différence significative au seuil de 0,05.

Résultats et discussion

1. Caractérisation des biofilm

1.1. La solubilité dans l'eau

La solubilité du film joue un rôle déterminant dans l'analyse de la dégradation des films en présence d'humidité, en particulier lorsqu'ils sont employés en tant que matériaux d'emballage. Les résultats de notre évaluation de la solubilité des bioplastiques que nous avons conçus sont représentés dans la figure 11 .

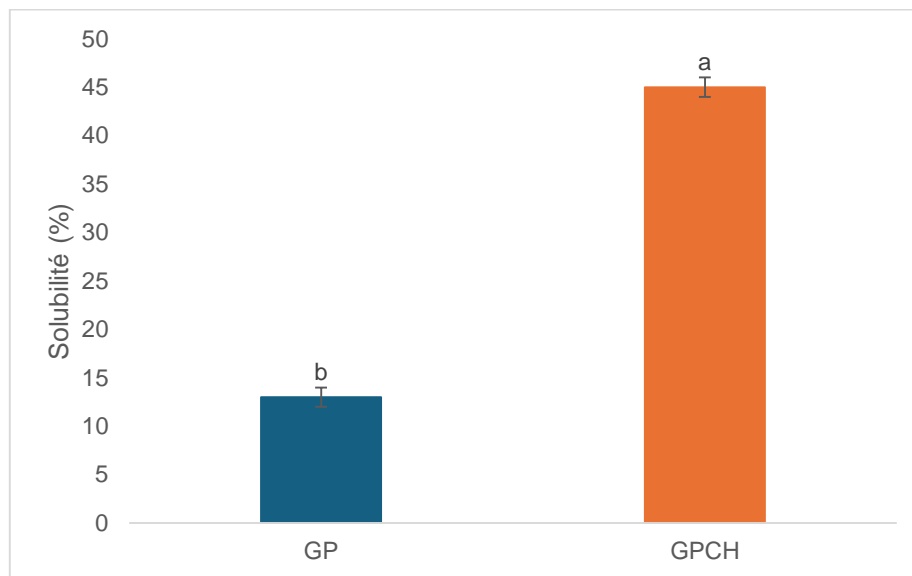


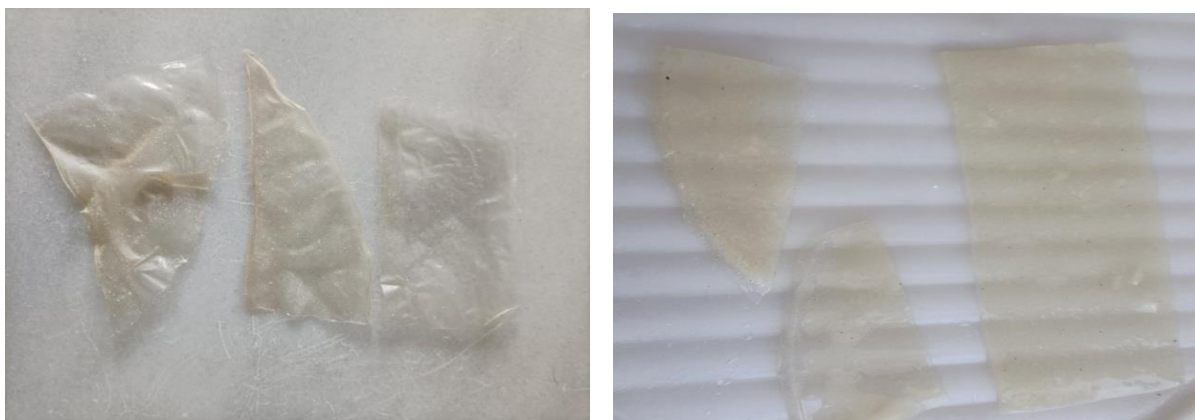
Figure11. : Évaluation de la Solubilité des Bioplastiques: GP (Bioplastique à Base de Gélatine-Pectine) et GPCH (Bioplastique à Base de Gélatine-Pectine-Chitosane).

Les biofilms constitués de chitosane, gélatine et pectine (GPCH) ont démontré une solubilité dans l'eau approximative de $45 \pm 0.35\%$. En contraste, la solubilité des biofilms formés uniquement de pectine et de gélatine (GP) a été constatée dans une gamme de $13 \pm 0.15\%$ (figures11,12). Ces données suggèrent une solubilité limitée pour ces deux types de biofilms dans un milieu aqueux. Une analyse de variance (ANOVA) a révélé une différence statistiquement significative entre les solubilités des deux biofilms ($p < 0.05$). Ces valeurs sont proches à celles rapportées par Silva *et al.* ((2009) qui ont observé des valeurs allant de 8,8% à 37,2% pour les biofilms composés de pectine et alginate.

Cependant nos résultats sont différents à ceux obtenus par Ren *et al.* (2017) qui suggèrent que le chitosane peut améliorer la solubilité des films biologiques, par rapport à l'autre biofilm. Cela est probablement dû au développement d'une structure plus compacte par un degré de polymérisation plus élevé des chaînes de chitosane (Lecetaet *al.*, 2013 ;Silva *et al.*,2009 ; Seixasaet *al.* 2013 ;Batista ,2004 ; Turbiani ,2007).

La résistance à l'eau est une propriété importante des films biodégradables pour les applications comme matériau d'emballage alimentaire où l'activité de l'eau est élevée, ou lorsque le film entre en contact avec l'eau pendant le stockage des aliments, comme pour éviter l'exsudation des produits frais ou transformés (Fonseca-Garcia *et al.*, 2021). En général, une solubilité plus élevée indiquerait une résistance à l'eau plus faible. La faible solubilité des deux bioplastiques est dû à des interactions significatives entre les polymères, ce qui réduit la solubilité ou à l'existence de composants hydrophobes tel que l'huile d'olive, la cire d'abeille et l'huile essentielle qui aident à maintenir la structure du film(waheed *et al.* ,2016).Les concentrations de glycérol et de chitosane ont un impact substantiel sur la solubilité du film comestible composite à base d'amidon et de chitosane. +pectine +gélatine.

Les résultats ont démontré que la solubilité dans l'eau des films biodégradables diminuait avec l'ajout de chitosane. Ces résultats pourraient provenir du fait qu'une teneur plus élevée en chitosane induit une interaction entre l'amidon de pomme de terre et le chitosane, ce qui entraîne une diminution de la solubilité dans l'eau (Bourtoom&Chinnan, 2008 ;Ghoshal *et al.* 2024). Ces résultats confirment des recherches antérieures qui ont montré que la solubilité du film composite diminuait avec l'augmentation des concentrations d'amidon et de chitosane. La solubilité (dans l'eau) du film composite fabriqué peut être modifiée pour répondre aux exigences particulières de l'application en modifiant la concentration de chitosane dans la formulation du film.



(A)

(B)

Figure 12. Les résultats de solubilité de chaque bioplastique après 24h dans l'eau
(A) : à base de gélatine , pectine et (B) :à base de chitosane, gélatine, pectine.

1.2. La biodégradabilité dans le sol

Les résultats du test de biodégradabilité pour les deux types de bioplastiques sont présentés dans la figure 13.

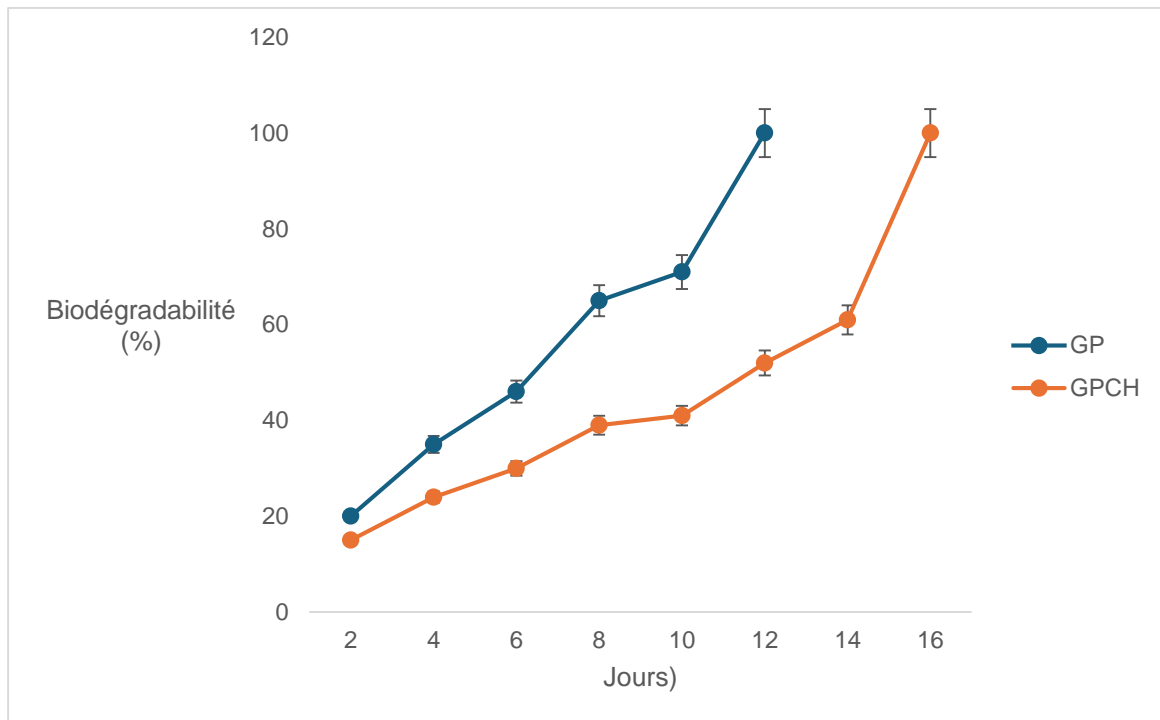


Figure 13 : Cinétique de biodégradabilité D(%) des deux bioplastiques :GP (Bioplastique à Base de Gélatine-Pectine) et GPCH (Bioplastique à Base de Gélatine-Pectine-Chitosane).

Le test de biodégradabilité (D %) a montré une biodégradation complète dans les deux biofilms. L'analyse de la dégradation a été réalisée pendant le mois d'Avril dans un climat clair et modéré, le taux d'humidité était élevé et la température était moyenne.

En plaçant des morceaux homogènes de bioplastique dans le sol sous l'influence des conditions météorologiques. Pendant les six premiers jours de surveillance, la dégradation était lente, atteignant 46% pour le biofilm composé de gélatine et de pectine et 30% pour le biofilm composé de chitosane, gélatine, et pectine. Cela était dû à la stabilité du temps malgré l'humidification continue de la parcelle de terre contenant le bioplastique. Cependant, à partir du huitième jour, nous avons observé une augmentation variable de la vitesse de dégradation pour les deux biofilms.

Pour le bioplastique composé de gélatine et de pectine, le taux de dégradation a atteint 71% au dixième jour, et nous avons constaté une dégradation totale de 100% au douzième jour. En revanche, pour le second biofilm composé de chitosane, pectine et gélatine, l'augmentation de la vitesse de dégradation est restée légèrement plus lente, atteignant 41% au dixième jour, et une dégradation complète de 100% au seizième jour (figure 14).

La durée nécessaire pour atteindre une dégradation complète, telle qu'observée dans notre étude, diffère significativement de celle rapportée dans plusieurs travaux antérieurs.

En revanche, pour le biofilm fabriqué par Tripathi *et al.*,(2010) ; Chandra *et Rustgi*(1998) ; Lopes *et al.*(2017), une dégradation complète a été obtenue en seulement 7 jours. En ce qui concerne le bioplastique fabriqué par Nguyen *et al.*(2016) ; Ferreira *et al.*(2020) ; Li *et al.*(2020) ;Assal *et al.*(2022), une dégradation incomplète de 72,72% a été observée .

Les résultats que nous avons obtenus peuvent être expliqués par le fait que les macromolécules naturelles des biofilms produits étaient formées de protéines et de glucides qui sont dégradables dans les systèmes biologiques en raison de l'hydrolyse suivie de l'oxydation.

De plus, les films ont également été attaqués par des insectes et des micro-organismes, qui ont éliminé certains des composants biodégradables et Selon Tripathi *et al.* (2010) ;Chandra *et Rustgi* (1998) au cours du processus de biodégradation dans le sol, la fraction amorphe du matériau est exposée à l'attaque par des micro-organismes et la dégradation microbienne entraîne une augmentation du degré de cristallinité des biofilms.

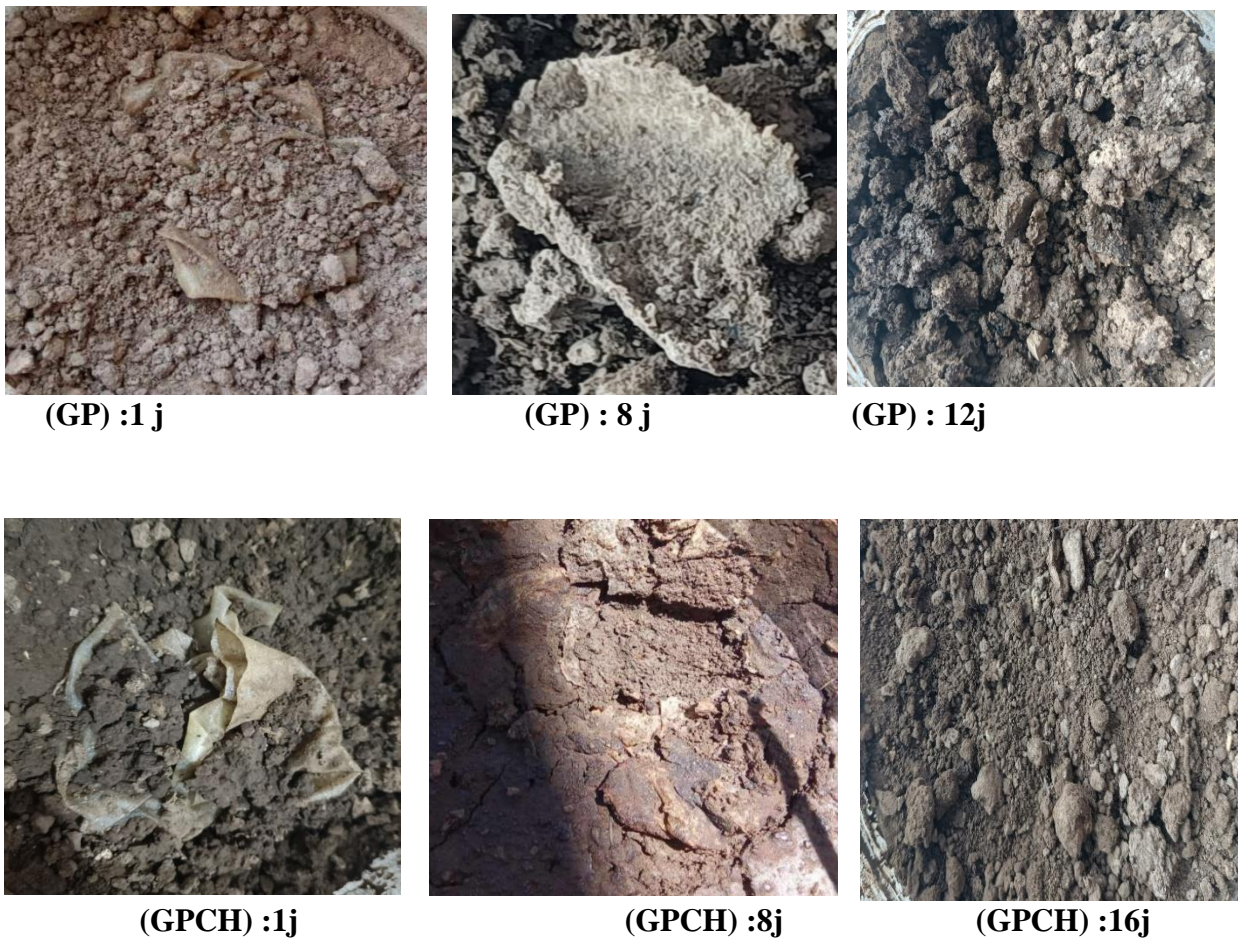


Figure 14 : La biodégradation des deux bioplastiques dans le sol GP (Bioplastique à Base de Gélatine-Pectine) et GPCH (Bioplastique à Base de Gélatine-Pectine-Chitosane).

1.3.La couleur des biofilm

Les résultats de l'analyse de la couleur pour les deux bioplastiques sont illustrés dans le tableau 4 .

Tableau 4. : Analyse de la couleur des bioplastiques

	L*	a*	b*	WI	YI
GP	90,8±2,22 ^a	-5,16±1,19 ^a	4,8±1,93 ^a	87,79±1,00 ^b	7,58±3,09 ^a
GPCH	92,8±1,41 ^a	-3,23±1,09 ^a	2,7±1,11 ^a	91,46±1,62 ^a	4,17±1,77 ^a

L'aspect visuel des revêtements alimentaires a une influence significative sur les préférences des consommateurs (Xu *et al.*, 2018). Les paramètres de couleur sont généralement désignés par les normes de luminosité (L^*), de verdure (a^*) et de jaunissement (b^*), tandis que l'indice de blancheur (WI^*) et l'indice de jaunissement (YI) précisent la couleur de l'emballage. Les deux biofilms présentent une luminosité (L^*) plus élevée, une verdure (a^*) et un jaunissement (b^*) faibles. Les deux films montrent des valeurs plus élevées de WI et des valeurs plus basses de YI . Le film à base de gélatine et pectine était extrêmement jaune par rapport au film à base de chitosane, gélatine et pectine. Cependant, un film combinant pectine et gélatine a été signalé comme ayant une couleur plus foncée. La valeur b^* indique la tendance du film à être jaunâtre car les valeurs sont positives. De même, la valeur a^* indique un nombre négatif, ce qui signifie l'absence de couleur verte. L'augmentation des scores de YI dans le film révélait une préférence pour la couleur jaune (Chen *et al.*, 2020).

1.4. Taux de transmission de la lumière et transparence du film

La transmittance des deux biofilms est montré dans le tableau 5

Tableau 5. Transmittance des biofilms

	Gélatine+pectine	Chitosane+Gélatine+pectine
Transmittance	0,258±0,001 ^a	0,006±0,0585 ^b

La transparence est une propriété précieuse des films une fois qu'ils font partie du système d'emballage et interfèrent donc avec le choix des consommateurs. Les résultats sont en accord avec l'observation visuelle des films, qui présentent un aspect clair et lisse pour toutes les formulations de films (Martins *et al.*, 2012 ; Sahli *et al.*, 2021).

L'analyse Anova montre l'existence d'une différence significatives ($p < 0,05$) entre les deux biofilms. Les résultats obtenus, illustrés dans le tableau 7, indiquent que le film composé de gélatine et de pectine ($0,258 \pm 0,001$) est plus opaque (moins transparent) que le film fabriqué à partir de chitosane ($0,006 \pm 0,0585$). Cela est dû à la nature du polymère, qui est le facteur déterminant de la transparence des membranes biologiques (González *et al.*, 2019 ; Costanza *et al.*, 2019).

Les plastifiants comme le glycérol sont supposés capables de moduler les propriétés de barrière à la lumière et déterminent la transparence des films (Zhang & Han, 2006 ; Hajj *et*

al.,2014). Nos résultats peuvent potentiellement être attribués à l'influence du chitosane sur la transparence des biofilms. Selon Bof *et al.*, (2015), le film contenant une proportion élevée d'amidon de maïs (CS) s'est avéré moins transparent que les films CH-CS, qui contiennent une proportion élevée de chitosane, ce qui est dû à l'ajout de chitosane.

1.5. Microscope Électronique à Balayage (MEB)

Selon les résultats obtenus par le microscope électronique à balayage, on remarque des agrégats et de petites particules de formes irrégulières et de taille plus ou moins homogènes sont revenus à la cire, des molécules d'amidon de forme sphérique et ovale peuvent être observées dans les films en raison de la haute concentration d'amidon en eux. Les films étaient lisses car le chitosane confère une surface lisse au film (Shapi'i& Othman, 2016). Cependant, Liu *et al.*(2013) et Yin *et al.* (2020) ont affirmé que l'incorporation de chitosane dans la matrice d'amidon rend les coupes transversales un peu rugueuses et de nombreuses rides apparaissent. Le chitosane pourrait former une interaction par liaison hydrogène avec l'amidon, ce qui augmente la résistance à la traction et l'allongement à la rupture ainsi que la perméabilité à la vapeur d'eau (Ren *et al.*, 2017a).

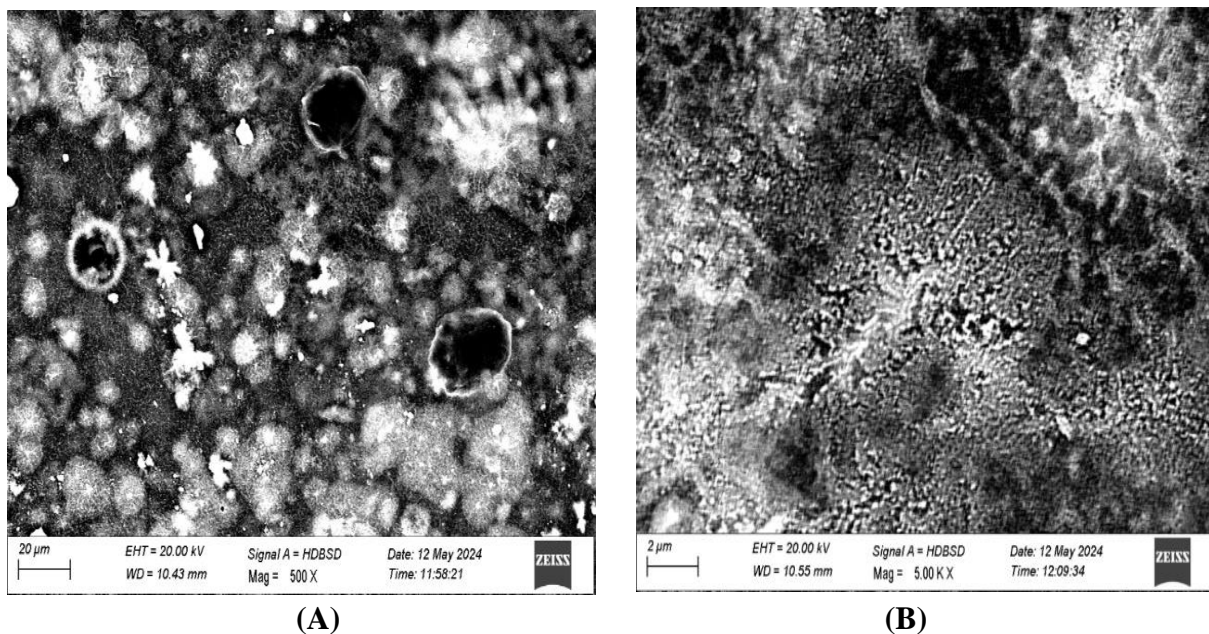


Figure 15. Les observations obtenues à partir du Microscope Électronique à Balayage (MEB) pour les deux types de bioemballages.. (A) : à base de gélatin pectine . (B) : à base de chitosane , gélatine , pectine

1.6. Spectroscopie infrarouge de transformations de Fourier (FTIR)

La spectroscopie FT-IR a été utilisée pour étudier les interactions intermoléculaires entre gélatine, pectine et le chitosane. Les résultats obtenus pour les deux biofilms sont montrés dans la figure 16 .

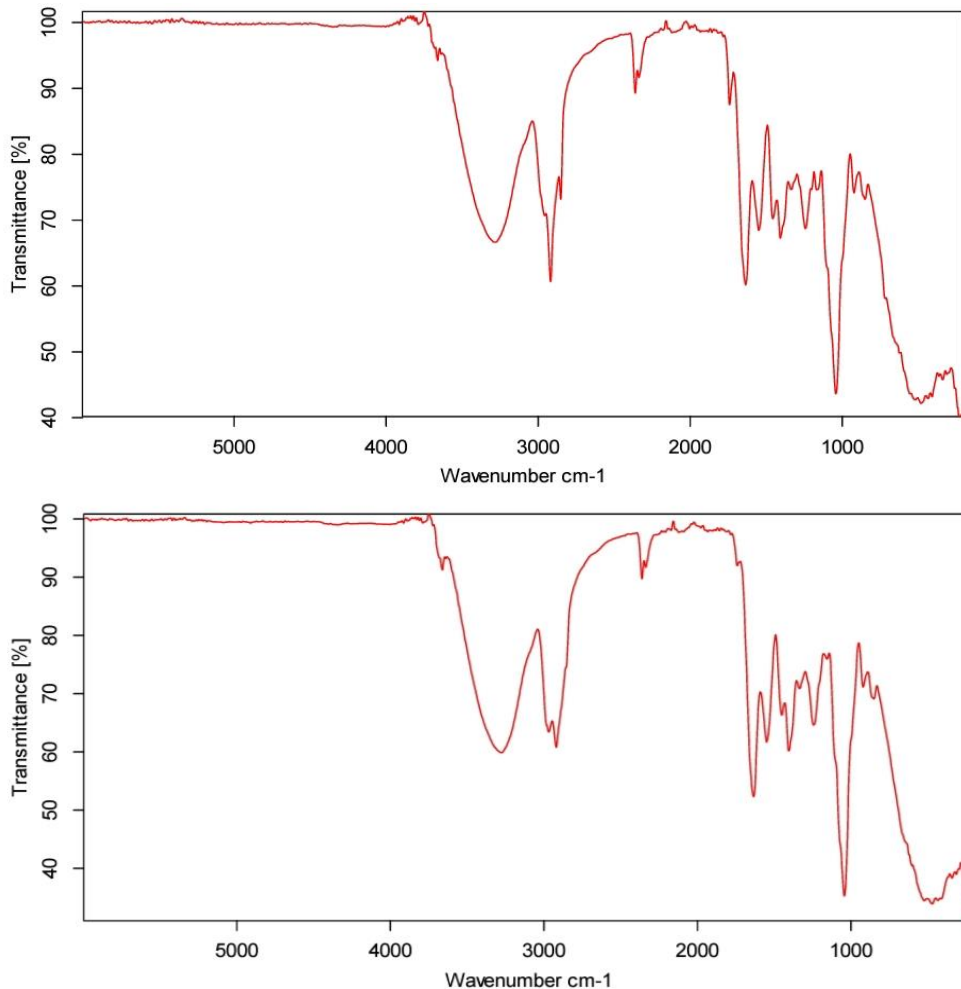


Figure 16. Résultats de Spectroscopie infrarouge de transformations de Fourier (FTIR) obtenu .

Pour les films expérimentaux, une bande large dans la plage de 3400–3300 et de 3300-2500 cm⁻¹ a été observée, correspondant à la vibration d’étirement O–H associée à la liaison hydrogène intramoléculaire formée par les groupes hydroxyles des mono/polysaccharides et de l’eau (Gopiet *al.*, 2019 ; Seididamyeh *et al.*.,2023). Les pics caractéristiques de la pectine peuvent être observés autour de 3700 -3400 et 2900-1050 cm⁻¹, attribués respectivement aux étirements O-H, COO- (asymétrique) , COO- (symétrique) et C-O-C des biopolymères, Les pics dans la région de 1700 à 500 cm⁻¹

correspondaient à plusieurs vibrations de l'anneau de glucides (Lopes *et al.*, 2017 ; Papageorgiou *et al.*, 2010).

La bande autour de 3000–2800 cm^{-1} a été attribuée aux vibrations d'étirement symétriques/asymétriques de la liaison C–H dans le groupe aliphatiques –CH₂ (Rakma *et al.*, 2017 ; Seididamyeh *et al.*, 2023)

Les deux bandes d'absorption autour de 1320–1420 cm^{-1} pour le pliage O–H et 1060–1150 cm^{-1} pour l'étirement C–O sont attribuées aux acides organiques contenant un groupe fonctionnel alcool dans leur structure moléculaire (Moreira & Santos, 2004 ; Seididamyeh *et al.*, 2023).

Le pic distinct (à 3405 cm^{-1}) de –OH dans l'amidon et de –NH dans le chitosane (à 3426 cm^{-1}) s'est déplacé vers un nombre d'onde plus élevé, apparaissant à 3431 cm^{-1} . Lorsque le chitosane et l'amidon sont mélangés, le pic dans le spectre infrarouge correspondant à l'étirement du groupe méthylène (CH₂) se déplace de 2927 cm^{-1} à 2930 cm^{-1} . Cela indique que des liaisons hydrogène se forment entre les molécules de chitosane et d'amidon. Le type et le nombre de liaisons hydrogène qui se forment dépendent de la quantité d'amidon, de chitosane et de glycérol dans le mélange. Ces liaisons hydrogène affectent la structure et les propriétés de la matrice polymère. (Mada *et al.*, 2022; Abera *et al.*, 2023)

Le pic amino du chitosane a changé de 1626 cm^{-1} à 1638 cm^{-1} avec l'ajout d'amidon. En plus du chitosane et du glycérol, le pic carbonyle de l'amidon s'est déplacé de 1623 cm^{-1} à 1638 cm^{-1} ; le pic du chitosane (1417 cm^{-1}) s'est déplacé à 1451 cm^{-1} . La vibration de liaison C–O et C–C de l'amidon à 1160 cm^{-1} s'est déplacée à 1167 cm^{-1} lorsque le chitosane et le glycérol ont été mélangés. (kumari *et al.*, 2014 ; Abera *et al.*, 2023)

les bandes entre 1320 cm^{-1} et 1025 cm^{-1} sont caractéristiques des groupes C–N, P–OH et –COOH, indiquant la présence de protéines aromatiques, de groupes phosphoriques et de polysaccharides (Zhou *et al.*, 2021; Oudir *et al.*, 2023)

L'huile essentielle ont été identifiées à 1644, 1436–1453 et 886 cm^{-1} , se référant aux groupes C=C, CH et méthylène, respectivement L'absorption significative par étirement associée aux groupes hydroxyle (–OH) dans la gamme de 3500–3000 cm^{-1} a été observée avec l'incorporation d'huile. (Schuiz *et al.*, 2002 ; abdallah *et al.*, 2023).

des pics caractéristiques de la pectine à environ 1741 cm^{-1} et 1604 cm^{-1} , correspondant respectivement à l'étirement des liaisons C=O des groupes ester et carboxylique (Li *et al.*, 2015 ; abdallah *et al.*, 2023).

Les bandes de la glycérol ont été identifiées à 3200, 2935, 2881 et 1041 cm^{-1} , caractéristiques de l'étirement O-H des groupes alcool, de l'étirement H du groupe méthylène,

de l'étirement CH des groupes méthane et des groupes CO, respectivement .(Basiak *et al* .,2018 ; Bhatia *et al.*, 2024).

Les pics à 1440-1395 cm⁻¹ étaient attribués à l'étirement C–N et N–H, à la flexion O–H et à l'amide-III de la gélatine, respectivement (Roy & Rhim, 2021). Les pics trouvés à 1037,99 cm⁻¹ et Les pics trouvés à 1037,99 cm⁻¹ étaient liés à la structure des saccharides et à la vibration d'étirement C–O (Liu *et al.*, 2023 ; Ibeoguet *et al.* , 2024).

1.7. Activité antioxydante :

Les résultats de l'activité antioxydant présentés par IC50 et A0,5 sont enregistrés dans le tableau suivant :

Tableau 6. valeurs d'IC50 et A0,5 des deux bioplastiques.

	IC50 DPPH	IC50 ABTS	A0,5 CUPRAC
Bioemballage			
GPCH	0.10±1.05 ^a	0.1029±0.98 ^a	13.2±1.2 ^a
Bioemballage			
GP	0.104±0.58 ^a	0.1065±0.78 ^a	13.25±0.25 ^a
Trolox	0.09±0.48 ^a	0.1±0.47 ^a	0.2±0.47 ^b

À travers notre analyse des résultats du tableau ci-dessus, nous remarquons que le DPPH et l'ABTS montrent une forte activité dans les biofilms 1 et 2, contrairement aux résultats du test CUPRAC qui a montré une activité faible. Selon l'analyse de variance (ANOVA), aucune différence significative n'a été observée entre l'activité antioxydante des deux biofilms et celle du Trolox, un antioxydant de référence, lorsqu'évaluée par les méthodes DPPH et ABTS. Cependant, une différence significative a été mise en évidence entre l'activité antioxydante des deux biofilms, telle qu'évaluée par la méthode CUPRAC, et celle du Trolox. Cette faiblesse dans l'activité peut être attribuée au fait que le CUPRAC n'a peut-être pas la capacité de libérer des électrons (e⁻), contrairement au DPPH et à l'ABTS qui reposent sur le piégeage des atomes d'hydrogène (H). Cette forte activité observée dans les tests ABTS et DPPH pourrait être due aux biofilms qui contiennent des huiles essentielles et huile d'olive dans leur composition, comme l'ont démontré les recherches précédentes (Nurzyńska-Wierdak *et al.* ,2016 ; Saoudi *et al.*,2024 ; Awaad *et al.* ;2015 ; Kaur *et*

al., 2022). D’auteurs ont rapporté que cette forte activité pourrait être attribuée aux groupes hydroxyles des polysaccharides utilisés pour élaborer les deux biofilms (Wathoniet *al.*, 2019 ;Kiritsakis, 2009).

1.8. Perte du poids des fraises emballées

Le tableau ci-dessous détaille les fluctuations de poids enregistrées pour les fraises, qu’elles soient emballées ou non, tout au long de la période de stockage.

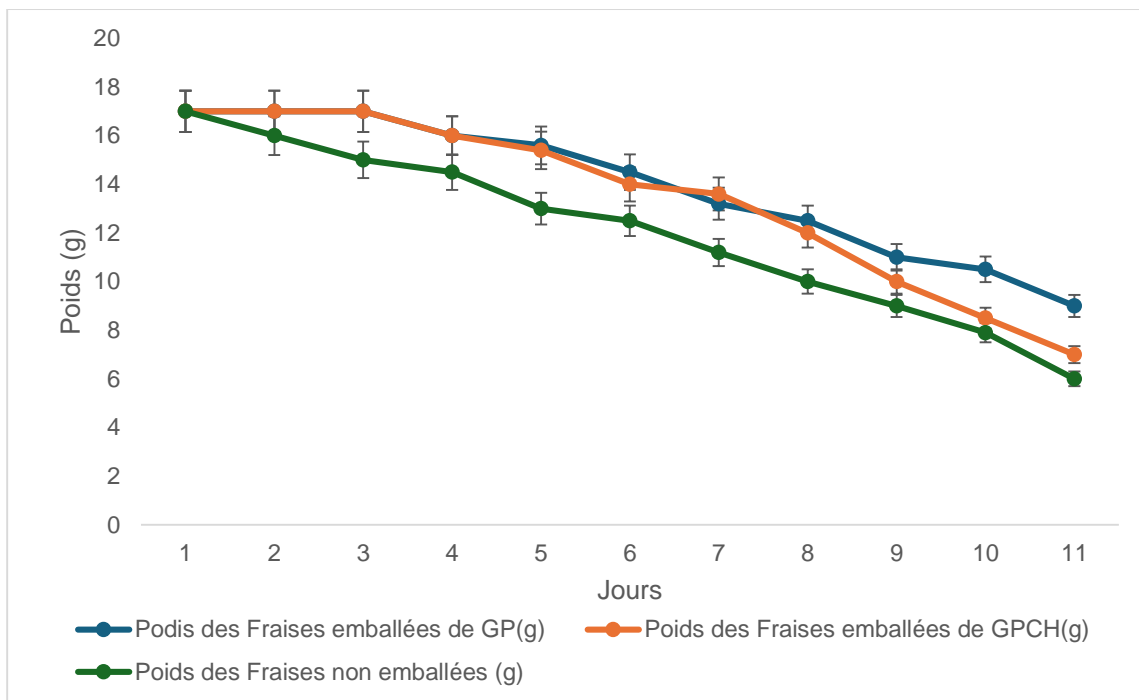


Figure 17 . Cinétique de perte de poids des fraises emballées et témoins

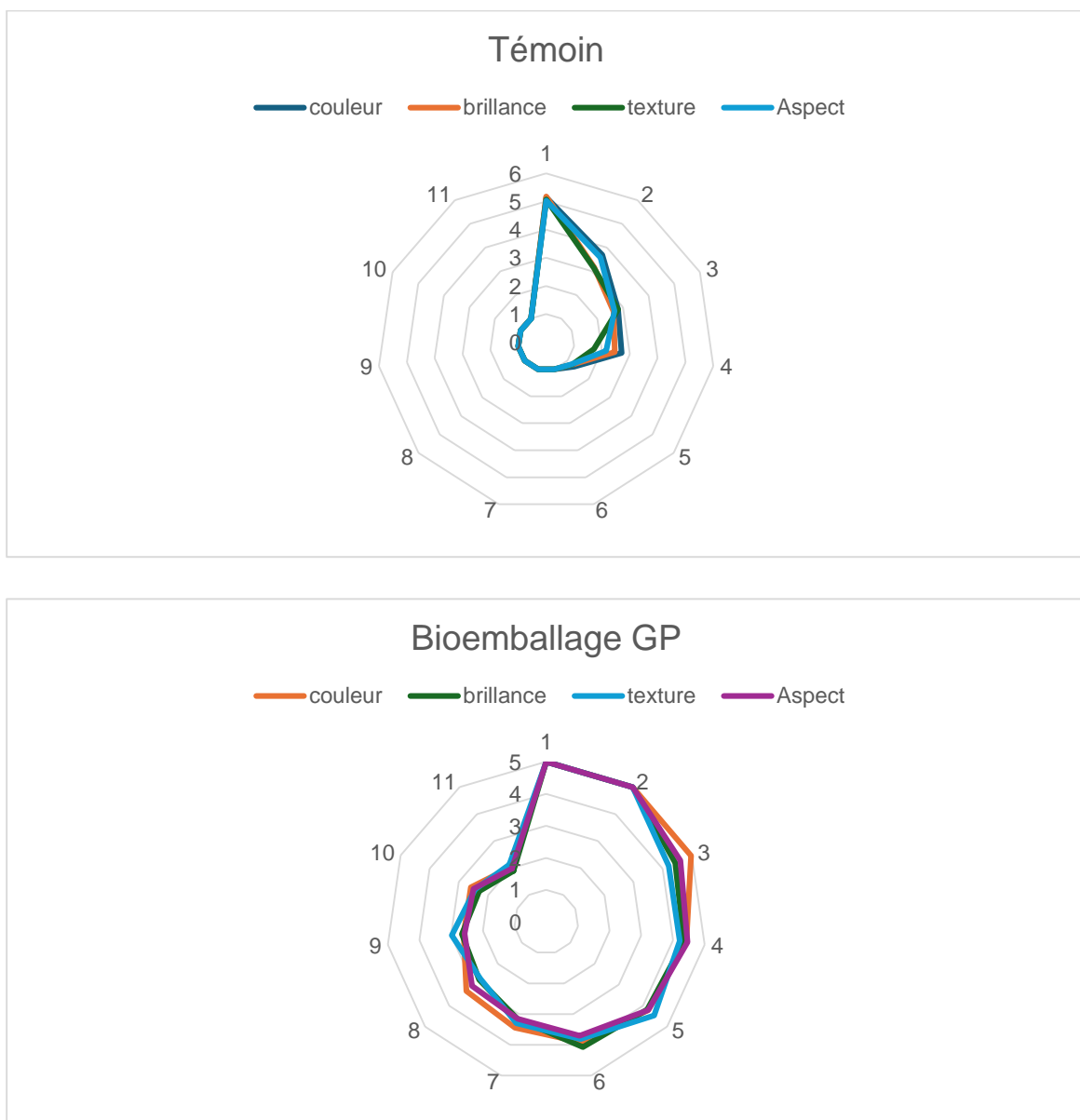
La figure 17 ,présente les étapes de perte de poids des fraises emballées dans du bioplastique et non emballées après 11 jours de stockage. On observe une stabilité du poids pendant les trois premiers jours pour les fraises emballées, tandis que les fraises non emballées montrent un changement de poids dès le deuxième jour. De plus, bien que les fraises emballées aient perdu du poids, cette perte s’est faite à un rythme plus lent comparé aux fraises non emballées, qui ont montré une accélération notable de la perte de poids. Cela est dû à l’activité microbienne et à l’augmentation de l’humidité.(Xu *et al.* ,2007 ; Ghoshalet *al.* ,2024) .

Ces observations démontrent l’efficacité du bioplastique, car les fraises sont des fruits très sensibles qui perdent rapidement leur fermeté et leur poids pendant les processus de

maturation et de vieillissement (Hernandez-Munoz *et al.*, 2008 ; Abdallah *et al.*, 2023). Nous avons également constaté que la perte de poids s'accompagnait d'une perte de fermeté et de l'apparition de moisissures, signe du début de l'activité microbienne. Toutefois, ce processus était plus lent pour les fraises emballées, indiquant la grande efficacité du bioplastique, qui contient des antioxydants et autres composants aidant à la conservation des fraises. Le bioplastique forme une couche semi-perméable autour de l'aliment pour créer une atmosphère modifiée qui ralentit la transpiration, (Allegra *et al.*, 2017 ; Sahli *et al.*, 2021).

1.9. Analyse sensorielle

Les résultats de l'analyse sensorielle des fraises emballées et témoins sont illustrés dans la figure 18.



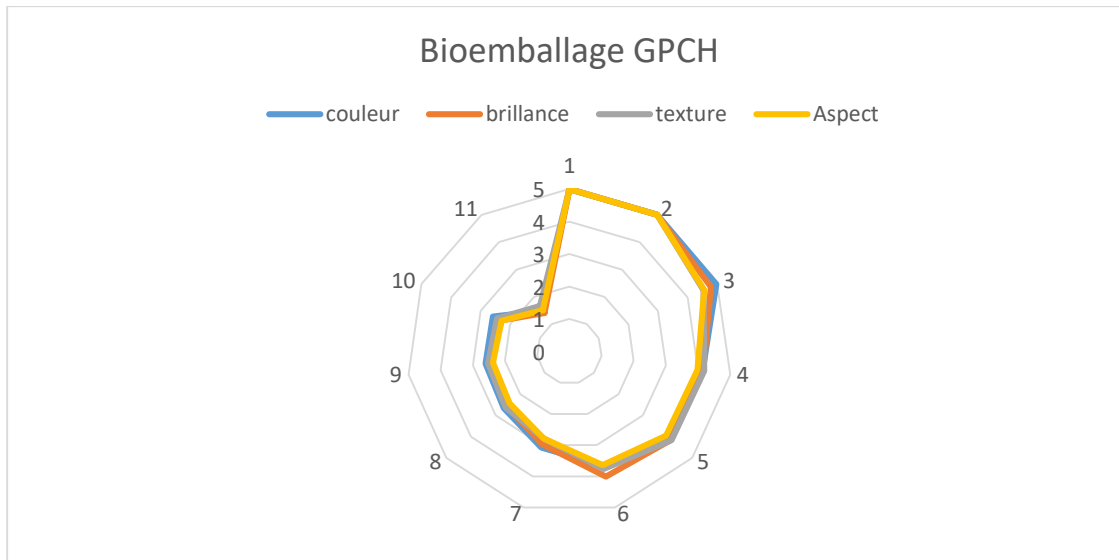


Figure 18. Analyse sensorielle des fraises témoins et emballées

Sur la base des évaluations de 30 individus, l'analyse de la couleur des fraises montre clairement la supériorité des fraises recouvertes de biofilm par rapport à celles dépourvues de cette couche protectrice. En effet, les fraises avec biofilm semblent conserver leur couleur de manière plus stable tout au long de la période d'essai, tandis que celles sans biofilm commencent à présenter une dégradation notable de leur couleur après seulement quelques jours (Figure 18, tableau 10.).

Concernant la qualité de brillance des fraises, il est observé que celles recouvertes de biofilm conservent leur éclat pendant une période beaucoup plus longue par rapport à celles non traitées, avec un éclat persistant jusqu'au huitième jour de stockage, alors que les fraises sans biofilm commencent à perdre leur brillance de manière significative après une courte période de stockage.

En ce qui concerne la qualité de texture, les données indiquent que les fraises avec biofilm maintiennent une texture excellente et homogène pendant une période beaucoup plus longue que celles non traitées, avec des signes de perte de fermeté et de texture dès les premiers jours de stockage pour les fraises sans biofilm.

Ces résultats soulignent l'avantage du biofilm dans la préservation de la qualité et des caractéristiques des fraises pendant la période de stockage, mettant en lumière l'importance et l'efficacité de l'utilisation de revêtements protecteurs biologiques pour améliorer la durabilité et la qualité des produits agricoles lors du stockage et du transport.







Notre étude a révélé que le biofilm numéro 1, constitué de pectine et de gélatine, conserve les propriétés du produit alimentaire pendant une période pouvant aller jusqu'à huit jours. Les évaluations de la couleur, de la brillance et de la structure et l'aspect de ce biofilm étaient favorables, bien que moyennes dans le dernier cas d'évaluation.

En revanche, le biofilm numéro 2, composé de chitosane, a montré des performances médiocres dans les évaluations de la couleur, de la brillance et de la structure, et l'aspect indiquant que le biofilm à base de gélatine et de pectine présente des performances nettement supérieures.

De plus, il est apparu que le produit alimentaire recouvert de biofilm maintenait ses propriétés physiques de manière excellente par rapport au produit non recouvert de biofilm, notamment en termes de couleur, de brillance et de structure, avec des performances très faibles observées uniquement le cinquième jour.

Ces résultats mettent en évidence l'importance de l'utilisation de biofilms pour améliorer et maintenir la qualité des produits alimentaires, particulièrement pendant les périodes prolongées de stockage

Tableau7. Aspect des fraises témoins et emballées durant la période de stockage.

les jours de conservations	Des fraises T	Des fraises emballées par le BEGP	Des fraises emballées par le BECHGP
1			
2			

3



4



5



6



7



8



9



10



11



Conclusion

Dans le contexte d'une demande croissante pour des produits alimentaires durables et respectueux de l'environnement, cette étude a été axée sur la conception et le développement d'emballages comestibles. Ces emballages, fabriqués à partir de polymères comestibles, sont envisagés comme une alternative aux sacs plastiques traditionnels qui nuisent à l'environnement et prennent des années à se décomposer.

Deux types de films bio-alimentaires ont été développés dans le cadre de cette recherche. Le premier type est composé de pectine, de gélatine, de glycérine, de cire d'abeille et de certaines huiles essentielles. Le second type comprend de la pectine, de la gélatine, du chitosane, de la glycérine, de la cire d'abeille et d'autres huiles essentielles. Ces films ont été synthétisés par une méthode de chauffage et de moulage.

Des évaluations ont été effectuées pour déterminer les propriétés de biodégradabilité des films, leur solubilité dans l'eau, leur transparence, ainsi que la caractérisation de leur surface par Microscopie Électronique à Balayage (MEB) et analyse par Transformée de Fourier Infrarouge (FTIR). Les deux types de films ont également été testés pour leur efficacité en tant qu'emballages pour les fraises.

Les résultats ont montré que les films bio-alimentaires possèdent des propriétés physiques satisfaisantes, indiquant ainsi le succès de la synthèse de films comestibles et biodégradables dans des conditions spécifiques. Les deux types d'emballages bios ont également permis de prolonger la durée de conservation des fraises, qui ont été préservées pendant 11 jours avec le film à base de gélatine et de pectine, et 10 jours avec le film à base de chitosane, de gélatine et de pectine. En termes de qualité sensorielle, les fraises emballées avec le film à base de gélatine et de pectine ont été préférées par le panel par rapport à celles emballées avec le film à base de chitosane, de gélatine et de pectine.

Cette étude vise à développer davantage ce projet à l'avenir afin d'éliminer totalement l'utilisation de sacs et d'emballages plastiques nocifs. Nos films, s'ils sont jetés dans les forêts, se décomposent immédiatement, réduisant ainsi le risque d'incendies. De plus, ils prolongent la durée de conservation des aliments, des légumes et des fruits, en particulier ceux qui se détériorent rapidement. En outre, ils limitent également les accidents auxquels les enfants pourraient être exposés, car notre produit est comestible et ne présente aucun danger s'il est ingéré. Nous visons également à développer davantage ce matériau pour remplacer les bouteilles d'eau minérale en plastique par des bouteilles composées de plastique biologique naturel.

Références bibliographiques

- Abdalla, G., Mussagy, C. U., Brasil, G. S. A. P., Scontri, M., da Silva Sasaki, J. C., Su, Y., ... & Herculano, R. D. (2023). Eco-sustainable coatings based on chitosan, pectin, and lemon essential oil nanoemulsion and their effect on strawberry preservation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 249, 126016.
- Abdollahzadeh, E., Nematollahi, A., & Hosseini, H. (2021). Composition of antimicrobial edible films and methods for assessing their antimicrobial activity : A review. *Trends in Food Science & Technology*, 110, 291-303.
- Abera, B., Duraisamy, R., & Birhanu, T. (2023). Study on the preparation and use of edible coating of fish scale chitosan and glycerol blended banana pseudostem starch for the preservation of apples, mangoes, and strawberries. *Journal of Agriculture and Food Research*, 15, 100916.
- Abera, B., Duraisamy, R., & Birhanu, T. (2024). Study on the preparation and use of edible coating of fish scale chitosan and glycerol blended banana pseudostem starch for the preservation of apples, mangoes, and strawberries. *Journal of Agriculture and Food Research*, 15, 100916.
- Abu Salha, B., & Gedanken, A. (2021). Extending the shelf life of strawberries by the sonochemical coating of their surface with nanoparticles of an edible anti-bacterial compound. *Applied Nano*, 2(1), 14-24.
- Ahmad Shapi'i, R., & Othman, S. H. (2016). Effect of concentration of chitosan on the mechanical, morphological and optical properties of tapioca starch film. *International Food Research Journal*, 23(suppl.), S187-S193.
- Allegra, A., Sortino, G., Inglese, P., Settanni, L., Todaro, A., & Gallotta, A. (2017). The effectiveness of *Opuntia ficus-indica* mucilage edible coating on post-harvest maintenance of 'Dottato' fig (*Ficus carica* L.) fruit. *Food packaging and shelf life*, 12, 135-141.
- Alotaibi, S., & Tahergorabi, R. (2018). Development of a sweet potato starch-based coating and its effect on quality attributes of shrimp during refrigerated storage. *LWT*, 88, 203-209.
- Andevari, G. T., & Rezaei, M. (2011). Effect of gelatin coating incorporated with cinnamon oil on the quality of fresh rainbow trout in cold storage. *International Journal of Food Science & Technology*, 46(11), 2305-2311.
- Apak, R., Güçlü, K., Özyürek, M., & Karademir, S. E. (2004). Novel total antioxidant capacity index for dietary polyphenols and vitamins C and E, using their cupric ion reducing capability in the presence of neocuproine : CUPRAC method. *Journal of agricultural and food chemistry*, 52(26), 7970-7981.
- Arshad, R., Sameen, A., Huma, N., & Zia, M. A. (2020). Exploring the potential of active edible coating on the shelf stability of dairy products. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 57(1), 237-244.
- Asada, C., Suzuki, A., & Nakamura, Y. (2021). Production and antioxidant activity of phenolic compounds from indigo plant waste using pressurized microwave-assisted hydrothermal treatment followed by water extraction. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-9.
- Asfaw, W. A., Tafa, K. D., & Satheesh, N. (2023). Optimization of citron peel pectin and glycerol concentration in the production of edible film using response surface methodology. *Heliyon*, 9(3).

- ASSAL, O., & LAACHI, Z. (2022). Élaboration et caractérisation d'un biofilm probiotique comestible à base de mucilage des cladodes d'*Opuntia ficus indica* et de la gomme de caroube de la région de Tissemsilt.
- Awad, M. A., Al-Qurashi, A. D., & Mohamed, S. A. (2015). Postharvest trans-resveratrol and glycine betaine treatments affect quality, antioxidant capacity, antioxidant compounds and enzymes activities of 'El-Bayadi' table grapes after storage and shelf life. *Scientia Horticulturae*, 197, 350-356.
- Bako, H. K., Ibeogu, H. I., Basse, A. P., Yar, M. S., Zhou, T., & Li, C. (2024).
- Basiak, E., Lenart, A., & Debeaufort, F. (2018). How glycerol and water contents affect the structural and functional properties of starch-based edible films. *Polymers*, 10(4), 412.
- Bhatia, M., & Sharma, A. (2024). Evaluation of few bioactive components of spice origin for their antimicrobial potential towards microbes commonly implicated in food spoilage and foodborne pathogenesis. *Journal of Applied and Natural Science*, 16(1), 308-314.
- Bhatia, S., Al-Harrasi, A., Shah, Y. A., Alrasbi, A. N. S., Jawad, M., Koca, E., ... & Mohan, S. (2024). Structural, mechanical, barrier and antioxidant properties of pectin and xanthan gum edible films loaded with grapefruit essential oil. *Heliyon*, 10(3).
- Bizymis, A. P., & Tzia, C. (2022). Edible films and coatings : Properties for the selection of the components, evolution through composites and nanomaterials, and safety issues. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(31), 8777-8792.
- Bourtoom, T., & Chinnan, M. S. (2008). Preparation and properties of rice starch–chitosan blend biodegradable film. *LWT-Food science and Technology*, 41(9), 1633-1641.
- Bremer, F., Grade, S., Kohorst, P., & Stiesch, M. (2011). In vivo biofilm formation on different dental ceramics. *Quintessence International*, 42(7).
- Çakmak, H., Özselek, Y., Turan, O. Y., Fıratlıgil, E., & Karbancıoğlu-Güler, F. (2020). Whey protein isolate edible films incorporated with essential oils : Antimicrobial activity and barrier properties. *Polymer Degradation and Stability*, 179, 109285.
- Campos, C. A., Gerschenson, L. N., & Flores, S. K. (2011). Development of edible films and coatings with antimicrobial activity. *Food and Bioprocess Technology*, 4, 849-875.
- Campos, C. A., Gerschenson, L. N., & Flores, S. K. (2011). Development of edible films and coatings with antimicrobial activity. *Food and Bioprocess Technology*, 4, 849-875.
- Cazón, P., Velázquez, G., Ramírez, J. A., & Vázquez, M. (2017). Polysaccharide-based films and coatings for food packaging : A review. *Food Hydrocolloids*, 68, 136-148.
- Cerqueira, M. A. P. R., Pereira, R. N. C., da Silva Ramos, O. L., Teixeira, J. A. C., & Vicente, A. A. (Eds.). (2017). *Edible food packaging : materials and processing technologies*.
- Cerqueira, M. A. P. R., Pereira, R. N. C., da Silva Ramos, O. L., Teixeira, J. A. C., & Vicente, A. A. (Eds.). (2017). *Edible food packaging : materials and processing technologies*.
- Chakravartula, S. S. N., Soccio, M., Lotti, N., Balestra, F., Dalla Rosa, M., & Siracusa, V. (2019). Characterization of composite edible films based on pectin/alginate/whey protein concentrate. *Materials*, 12(15), 2454.
- Chandra, R. U. S. T. G. I., & Rustgi, R. (1998). Biodegradable polymers. *Progress in polymer science*, 23(7), 1273-1335.
- Chawla, R., Sivakumar, S., & Kaur, H. (2021). Antimicrobial edible films in food packaging : Current scenario and recent nanotechnological advancements-a review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2, 100024.

- Chawla, R., Sivakumar, S., & Kaur, H. (2021). Antimicrobial edible films in food packaging : Current scenario and recent nanotechnological advancements-a review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2, 100024.
- Chawla, R., Sivakumar, S., & Kaur, H. (2021). Antimicrobial edible films in food packaging: Current scenario and recent nanotechnological advancements-a review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2, 100024.
- Chen, H., Sun, Z., & Yang, H. (2019). Effect of carnauba wax-based coating containing glycerol monolaurate on the quality maintenance and shelf-life of Indian jujube (*Zizyphus mauritiana* Lamk.) fruit during storage. *Scientia Horticulturae*, 244, 157-164.
- Chen, Y., Xu, L., Wang, Y., Chen, Z., Zhang, M., & Chen, H. (2020). Characterization and functional properties of a pectin/tara gum based edible film with ellagitannins from the unripe fruits of *Rubus chingii* Hu. *Food Chemistry*, 325, 126964.
- Cheng, Y., Sun, C., Zhai, X., Zhang, R., Zhang, S., Sun, C., ... & Hou, H. (2021). Effect of lipids with different physical state on the physicochemical properties of starch/gelatin edible films prepared by extrusion blowing. *International Journal of Biological Macromolecules*, 185, 1005-1014.
- Cho, S. Y., Lee, S. Y., & Rhee, C. (2010). Edible oxygen barrier bilayer film pouches from corn zein and soy protein isolate for olive oil packaging. *LWT-Food Science and Technology*, 43(8), 1234-1239.
- Chrysargyris, A., Nikou, A., & Tzortzakis, N. (2016). Effectiveness of Aloe vera gel coating for maintaining tomato fruit quality. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 44(3), 203-217.
- Colelli, G., Mitchell, F. G., & Kader, A. A. (1991). Extension of postharvest life of 'Mission' figs by CO₂-enriched atmospheres. *HortScience*, 26(9), 1193-1195.
- Cortés-Rodríguez, M., Villegas-Yépez, C., González, J. H. G., Rodríguez, P. E., & Ortega-Toro, R. (2020). Development and evaluation of edible films based on cassava starch, whey protein, and bees wax. *Heliyon*, 6(9).
- Costa, M. J., Maciel, L. C., Teixeira, J. A., Vicente, A. A., & Cerqueira, M. A. (2018). Use of edible films and coatings in cheese preservation: Opportunities and challenges. *Food Research International*, 107, 84-92.
- Cruz-Díaz, K., Cobos, Á., Fernández-Valle, M. E., Díaz, O., & Cambero, M. I. (2019). Characterization of edible films from whey proteins treated with heat, ultrasounds and/or transglutaminase. Application in cheese slices packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 22, 100397.
- Da Silva, M. A., Bierhalz, A. C. K., & Kieckbusch, T. G. (2009). Alginate and pectin composite films crosslinked with Ca²⁺ ions : Effect of the plasticizer concentration. *Carbohydrate Polymers*, 77(4), 736-742.
- Dai, L., Zhang, J., & Cheng, F. (2020). Cross-linked starch-based edible coating reinforced by starch nanocrystals and its preservation effect on graded Huangguan pears. *Food Chemistry*, 311, 125891.
- Daniloski, D., Petkoska, A. T., Lee, N. A., Bekhit, A. E. D., Carne, A., Vaskoska, R., & Vasiljevic, T. (2021). Active edible packaging based on milk proteins : A route to carry and deliver nutraceuticals. *Trends in Food Science & Technology*, 111, 688-705.

- De León-Zapata, M. A., Ventura-Sobrevilla, J. M., Salinas-Jasso, T. A., Flores-Gallegos, A. C., Rodríguez-Herrera, R., Pastrana-Castro, L., ... & Aguilar, C. N. (2018). Changes of the shelf life of candelilla wax/tarbrush bioactive based-nanocoated apples at industrial level conditions. *Scientia Horticulturae*, 231, 43-48.
- Dehghani, S., Hosseini, S. V., & Regenstein, J. M. (2018). Edible films and coatings in seafood preservation: A review. *Food chemistry*, 240, 505-513.
- Di Pierro, P., Sorrentino, A., Mariniello, L., Giosafatto, C. V. L., & Porta, R. (2011). Chitosan/whey protein film as active coating to extend Ricotta cheese shelf-life. *LWT-Food science and technology*, 44(10), 2324-2327.
- Díaz-Montes, E., & Castro-Muñoz, R. (2021). Edible films and coatings as food-quality preservers : An overview. *Foods*, 10(2), 249.
- Díaz-Montes, E., & Castro-Muñoz, R. (2021). Edible films and coatings as food-quality preservers : An overview. *Foods*, 10(2), 249.
- Fernández-Pan, I., Carrión-Granda, X., & Maté, J. I. (2014). Antimicrobial efficiency of edible coatings on the preservation of chicken breast fillets. *Food Control*, 36(1), 69-75.
- Ferreira, D. C., Molina, G., & Pelissari, F. M. (2020). Biodegradable trays based on cassava starch blended with agroindustrial residues. *Composites Part B : Engineering*, 183, 107682.
- Fonseca-García, A., Jiménez-Regalado, E. J., & Aguirre-Loredo, R. Y. (2021). Preparation of a novel biodegradable packaging film based on corn starch-chitosan and poloxamers. *Carbohydrate Polymers*, 251, 117009.
- Gaikwad, K. K., Singh, S., Negi, Y. S., & Lee, Y. S. (2020). The effect of trans-polyisoprene/LDPE based active films on oxidative stability in roasted peanuts. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14, 1857-1864.
- Galus, S., ArikKibar, E. A., Gniewosz, M., & Kraśniewska, K. (2020). Novel materials in the preparation of edible films and coatings—A review. *Coatings*, 10(7), 674.
- gelatin/CA–starch composite film : excellent food packaging material. *Journal of food*
- Gheorghita, R., Gutt, G., & Amariei, S. (2020). The use of edible films based on sodium alginate in meat product packaging : An eco-friendly alternative to conventional plastic materials. *Coatings*, 10(2), 166.
- Ghidelli, C., Rojas-Argudo, C., Mateos, M., & Pérez-Gago, M. B. (2013). Effect of antioxidants in controlling enzymatic browning of minimally processed persimmon ‘Rojo Brillante’. *Postharvest Biology and Technology*, 86, 487-493.
- Ghoshal, G., & Singh, J. (2024). Study of Coating Effectiveness of Grape Fruit Seed Extract Incorporated Chitosan/Cornstarch Based Active Packaging Film on Grapes. *Food Chemistry Advances*, 100651.
- Ghoshal, G., & Singh, J. (2024). Study of Coating Effectiveness of Grape Fruit Seed Extract Incorporated Chitosan/Cornstarch Based Active Packaging Film on Grapes. *Food Chemistry Advances*, 100651.
- Gopi, S., Amalraj, A., Kalarikkal, N., Zhang, J., Thomas, S., & Guo, Q. (2019). Preparation and characterization of nanocomposite films based on gum arabic, maltodextrin and polyethylene glycol reinforced with turmeric nanofiber isolated from turmeric spent. *Materials Science and Engineering : C*, 97, 723-729.

- Han, J. H. (2014). Edible films and coatings : a review. *Innovations in food packaging*, 213-255.
- Hassanpour, H. (2015). Effect of Aloe vera gel coating on antioxidant capacity, antioxidant enzyme activities and decay in raspberry fruit. *LWT-Food Science and Technology*, 60(1), 495-501.
- Hernandez-Munoz, P., Almenar, E., Del Valle, V., Velez, D., & Gavara, R. (2008). Effect of chitosan coating combined with postharvest calcium treatment on strawberry (*Fragaria × ananassa*) quality during refrigerated storage. *Food chemistry*, 110(2), 428-435.
- Hossain, M. A., & Hossain, M. S. (2021). Optimization of antioxidative phenolic compound extraction from freeze-dried pulp, peel, and seed of Burmese grape (*Baccaurea ramiflora* Lour.) by response surface methodology. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-15
- Hossain, M. A., & Hossain, M. S. (2021). Optimization of antioxidative phenolic compound extraction from freeze-dried pulp, peel, and seed of Burmese grape (*Baccaurea ramiflora* Lour.) by response surface methodology. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-15.
- Ibeogu, I. H., Bako, H. K., Alnadari, F., Bassey, A. P., Jibril, A. N., Zhou, T., ... & Li, C. (2024). Development and characterization of edible packaging films based on pork gelatin integrated with serum plasma for pork packaging and preservation. *Food Bioscience*, 58, 103662.
- Janjarasskul, T., & Krochta, J. M. (2010). Edible packaging materials. *Annual review of food science and technology*, 1, 415-448.
- Jeevahan, J. J., Chandrasekaran, M., Venkatesan, S. P., Sriram, V., Joseph, G. B., Mageshwaran, G., & Durairaj, R. B. (2020). Scaling up difficulties and commercial aspects of edible films for food packaging : A review. *Trends in Food Science & Technology*, 100, 210-222.
- Jiang, Y., Lan, W., Sameen, D. E., Ahmed, S., Qin, W., Zhang, Q., ... & Liu, Y. (2020). Preparation and characterization of grass carp collagen-chitosan-lemon essential oil composite films for application as food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, 160, 340-351.
- Jongsri, P., Wangsomboondee, T., Rojsitthisak, P., & Seraypheap, K. (2016). Effect of molecular weights of chitosan coating on postharvest quality and physicochemical characteristics of mango fruit. *Lwt*, 73, 28-36.
- Kaur, T., Bala, M., Kumar, G., & Vyas, A. (2022). Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles via endophyte *Trichoderma viride* and evaluation of their antimicrobial and antioxidant properties. *Archives of Microbiology*, 204(10), 620.
- Kazemi, S. M., & Rezaei, M. (2015). Antimicrobial effectiveness of gelatin–alginate film containing oregano essential oil for fish preservation. *Journal of food safety*, 35(4), 482-490.
- Kiritsakis, K., Kontominas, M. G., Kontogiorgis, C., Hadjipavlou-Litina, D., Moustakas, A., & Kiritsakis, A. (2010). Composition and antioxidant activity of olive leaf extracts from Greek olive cultivars. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 87, 369-376.
- Kontominas, M. G. (2020). Use of alginates as food packaging materials. *Foods*, 9(10), 1440.
- Kowalczyk, D., Kordowska-Wiater, M., Zięba, E., & Baraniak, B. (2017). Effect of carboxymethylcellulose/candelilla wax coating containing potassium sorbate on

- microbiological and physicochemical attributes of pears. *Scientia Horticulturae*, 218, 326-333.
- Kumar, L., Ramakanth, D., Akhila, K., & Gaikwad, K. K. (2022). Edible films and coatings for food packaging applications : A review. *Environmental Chemistry Letters*, 1-26.
- Kumar, P., Tanwar, R., Gupta, V., Upadhyay, A., Kumar, A., & Gaikwad, K. K. (2021). Pineapple peel extract incorporated poly (vinyl alcohol)-corn starch film for active food packaging : Preparation, characterization and antioxidant activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 187, 223-231.
- Kumar, R., Ghoshal, G., & Goyal, M. (2019). Synthesis and functional properties of gelatin/CA–starch composite film: excellent food packaging material. *Journal of food science and technology*, 56, 1954-1965.
- Kumari, S., & Rath, P. K. (2014). Extraction and characterization of chitin and chitosan from (Labeorohit) fish scales. *Procedia Materials Science*, 6, 482-489.
- Kurt, A. S., & Cekmecelioglu, D (2023). Bacterial cellulase production using grape pomace hydrolysate by shake-flask submerged fermentation. *Biomass conversion and biorefinery*, 13(8), 6981-6988.
- Lara, G., Yakoubi, S., Villacorta, C. M., Uemura, K., Kobayashi, I., Takahashi, C., ... & Neves, M. A. (2020). Spray technology applications of xanthan gum-based edible coatings for fresh-cut lotus root (*Nelumbonucifera*). *Food Research International*, 137, 109723.
- Leandro, O., Nuno, R., Pereira, C., Martins, J. T., & Malcata, F. X. (2017). Edible packaging for dairy products. In *Edible Food Packaging* (pp. 384-412). CRC Press.
- Leceta, I., Guerrero, P., Ibarburu, I., Dueñas, M. T., & De la Caba, K. (2013). Characterization and antimicrobial analysis of chitosan-based films. *Journal of Food Engineering*, 116(4), 889-899.
- Li, J., Li, Q., Lei, X., Tian, W., Cao, J., Jiang, W., & Wang, M. (2018). Effects of wax coating on the moisture loss of cucumbers at different storage temperatures. *Journal of food quality*, 2018(1), 9351821
- Li, S., Ma, Y., Ji, T., Sameen, D. E., Ahmed, S., Qin, W., ... & Liu, Y. (2020). Cassava starch/carboxymethylcellulose edible films embedded with lactic acid bacteria to extend the shelf life of banana. *Carbohydrate Polymers*, 248, 116805.
- Li, W., Hao, W., Xiaohua, Z., Yinchen, H., Wangwang, L., Gongming, Y., & Aimin, J. (2015). Pectin-chitosan complex : Preparation and application in colon-specific capsule. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(4), 151-160.
- Lima, M. M., Godoy, C., Modenesi, P. J., Avelar-Batista, J. C., Davison, A., & Matthews, A. (2004). Coating fracture toughness determined by Vickers indentation : an important parameter in cavitation erosion resistance of WC–Co thermally sprayed coatings. *Surface and Coatings Technology*, 177, 489-496.
- Lipin, A. A., & Lipin, A. G. (2022). Prediction of coating uniformity in batch fluidized-bed coating process. *Particuology*, 61, 41-46.
- Liu, H., Adhikari, R., Guo, Q., & Adhikari, B. (2013). Preparation and characterization of glycerol plasticized (high-amylose) starch–chitosan films. *Journal of Food Engineering*, 116(2), 588-597.

- Liu, T., & Liu, L. (2020). Fabrication and characterization of chitosan nanoemulsions loading thymol or thyme essential oil for the preservation of refrigerated pork. *International journal of biological macromolecules*, 162, 1509-1515.
- Liu, T., & Liu, L. (2020). Fabrication and characterization of chitosan nanoemulsions loading thymol or thyme essential oil for the preservation of refrigerated pork. *International journal of biological macromolecules*, 162, 1509-1515.
- Liu, X., Wang, X., Cheng, Y., Wu, Y., Yan, Y., & Li, Z. (2023). Variations in volatile organic compounds in ZhenyuanDaocai samples at different storage durations evaluated using E-nose, E-tongue, gas chromatography, and spectrometry. *LWT*, 173, 114186.
- Lobo, V., Patil, A., Phatak, A., & Chandra, N. (2010). Free radicals, antioxidants and functional foods : Impact on human health. *Pharmacognosy reviews*, 4(8), 118.
- Lopes, W., Vainstein, M. H., De Sousa Araujo, G. R., Frases, S., Staats, C. C., De Almeida, R. M., ... & Vainstein, M. H. (2017). Geometrical distribution of *Cryptococcus neoformans* mediates flower-like biofilm development. *Frontiers in Microbiology*, 8, 2534.
- Lourenço, S. C., Moldão-Martins, M., & Alves, V. D. (2019). Antioxidants of natural plant origins : From sources to food industry applications. *Molecules*, 24(22), 4132.
- Mada, T., Duraisamy, R., & Guesh, F. (2022). Optimization and characterization of pectin extracted from banana and papaya mixed peels using response surface methodology. *Food Science & Nutrition*, 10(4), 1222-1238.
- Maringgal, B., Hashim, N., Tawakkal, I. S. M. A., & Mohamed, M. T. M. (2020). Recent advance in edible coating and its effect on fresh/fresh-cut fruits quality. *Trends in Food Science & Technology*, 96, 253-267.
- Martins, J. T., Cerqueira, M. A., Bourbon, A. I., Pinheiro, A. C., Souza, B. W., & Vicente, A. A. (2012). Synergistic effects between κ -carrageenan and locust bean gum on physicochemical properties of edible films made thereof. *Food Hydrocolloids*, 29(2), 280-289.
- Massoud, R., Khodaeii, D., Hamidi-Esfahani, Z., & Khosravi-Darani, K. (2023). The effect of edible probiotic coating on quality of fresh fruits and vegetables : Fresh strawberries as a case study. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(4), 2517-2526.
- Mendy, T. K., Misran, A., Mahmud, T. M. M., & Ismail, S. I. (2019). Application of Aloe vera coating delays ripening and extend the shelf life of papaya fruit. *Scientia Horticulturae*, 246, 769-776.
- Mohamed, S. A., El-Sakhawy, M., & El-Sakhawy, M. A. M. (2020). Polysaccharides, protein and lipid-based natural edible films in food packaging : A review. *Carbohydrate polymers*, 238, 116178.
- Mohamed, S. A., El-Sakhawy, M., & El-Sakhawy, M. A. M. (2020). Polysaccharides, protein and lipid-based natural edible films in food packaging : A review. *Carbohydrate polymers*, 238, 116178.
- Moreira, J. L., & Santos, L. (2004). Spectroscopic interferences in Fourier transform infrared wine analysis. *Analytica chimica acta*, 513(1), 263-268.
- Motamedi, E., Nasiri, J., Malidarreh, T. R., Kalantari, S., Naghavi, M. R., & Safari, M. (2018). Performance of carnauba wax-nanoclay emulsion coatings on postharvest quality of 'Valencia' orange fruit. *Scientia Horticulturae*, 240, 170-178.

- Murmu, S. B., & Mishra, H. N. (2017). Optimization of the arabic gum based edible coating formulations with sodium caseinate and tulsi extract for guava. *Lwt*, 80, 271-279.
- Nasrin, T. A. A., Rahman, M. A., Arfin, M. S., Islam, M. N., & Ullah, M. A. (2020). Effect of novel coconut oil and beeswax edible coating on postharvest quality of lemon at ambient storage. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2, 100019.
- Nguyen, D. M., Do, T. V. V., Grillet, A. C., Thuc, H. H., & Thuc, C. N. H. (2016). Biodegradability of polymer film based on low density polyethylene and cassava starch. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 115, 257-265.
- Nicolau-Lapeña, I., Colàs-Medà, P., Alegre, I., Aguiló-Aguayo, I., Muranyi, P., & Viñas, I. (2021). Aloe veragel : An update on its use as a functional edible coating to preserve fruits and vegetables. *Progress in Organic Coatings*, 151, 106007.
- Noori, S., Zeynali, F., & Almasi, H. (2018). Antimicrobial and antioxidant efficiency of nanoemulsion-based edible coating containing ginger (*Zingiber officinale*) essential oil and its effect on safety and quality attributes of chicken breast fillets. *Food control*, 84, 312-320.
- Nurzynska-Wierdak, R., & Zawislak, G. (2016). Chemical composition and antioxidant activity of lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.) aboveground parts. *Acta Scientiarum Polonorum. Hortorum Cultus*, 15(5).
- Olivas, G. I. I., & Barbosa-Cánovas, G. (2009). Edible films and coatings for fruits and vegetables. *Edible films and coatings for food applications*, 211-244.
- Oloye, M. T., Jabar, J. M., Adetuyi, A. O., & Lajide, L. (2021). Extraction and characterization of pectin from fruit peels of *Irvingia gabonensis* and pulp of *Cola milleni* and *Theobroma cacao* as precursor for industrial applications. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-9
- Oudir, M., Ait Mesbah, Z., Lerari, D., Issad, N., & Djenane, D. (2023). Development of Eco-Friendly Biocomposite Films Based on *Opuntia ficus-indica* Cladodes Powder Blended with Gum Arabic and Xanthan Envisaging Food Packaging Applications. *Foods*, 13(1), 78.
- Oudir, M., Ait Mesbah, Z., Lerari, D., Issad, N., & Djenane, D. (2023). Development of Eco-Friendly Biocomposite Films Based on *Opuntia ficus-indica* Cladodes Powder Blended with Gum Arabic and Xanthan Envisaging Food Packaging Applications. *Foods*, 13(1), 78.
- Oussalah, M., Caillet, S., Salmiéri, S., Saucier, L., & Lacroix, M. (2006). Antimicrobial effects of alginate-based film containing essential oils for the preservation of whole beef muscle. *Journal of Food Protection*, 69(10), 2364-2369.
- Papageorgiou, D. G., Roumeli, E., Terzopoulou, Z., Tsanaktsis, V., Chrissafis, K., & Bikiaris, D. (2015). Polycaprolactone/multi-wall carbon nanotube nanocomposites prepared by in situ ring opening polymerization : Decomposition profiling using thermogravimetric analysis and analytical pyrolysis–gas chromatography/mass spectrometry. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 115, 125-131.
- Parveen, H., Wani, M. Y., Mukhtar, S., & Ahmad, A. (2024). Synthesis, in vitro and in silico screening of novel ferrocenyl substituted cyclohexenone and indazole derivatives as effective antimycobacterial agents. *Journal of Molecular Structure*, 1311, 138472.

- Passafiume, R., Gaglio, R., Sortino, G., & Farina, V. (2020). Effect of three different aloe vera gel-based edible coatings on the quality of fresh-cut “Hayward” kiwifruits. *Foods*, 9(7), 939.
- Pei, H., Yi, X., Zhou, H., & He, Y. (2020). Design of ultra-low power consumption approximate 4–2 compressors based on the compensation characteristic. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 68(1), 461-465.
- PÉREZ T, A. F., ARISTIZÁBAL T, I. D., & RESTREPO F, J. I. (2016). Conservation of minimally processed mango Tommy Atkins by applying an Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) coating. *Vitae*, 23(1), 65-77.
- Petkoska, A. T., Daniloski, D., D’Cunha, N. M., Naumovski, N., & Broach, A. T. (2021). Edible packaging : Sustainable solutions and novel trends in food packaging. *Food Research International*, 140, 109981.
- Phothisuwan, S., Koomhin, P., Matan, N., & Matan, N. (2021). Quality maintenance of salacca fruit with a carnauba wax coating containing orange oil and detection of sensory perception improvement with electroencephalography to appraise brain responses. *LWT*, 147, 111628.
- Pluta-Kubica, A., Jamróz, E., Kawecka, A., Juszczak, L., & Krzyściak, P. (2020). Active edible furcellaran/whey protein films with yerba mate and white tea extracts: Preparation, characterization and its application to fresh soft rennet-curd cheese. *International journal of biological macromolecules*, 155, 1307-1316.
- protein isolates and rice bran oil. *International Journal of Biological Macromolecules*, Raju, A., & Sasikala, M. S. (2016). Natural antimicrobial edible film for preservation of paneer. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 13(2), 1083-1088.
- Rakmai, J., Cheirsilp, B., Mejuto, J. C., Torrado-Agrasar, A., & Simal-Gándara, J. (2017). Physico-chemical characterization and evaluation of bio-efficacies of black pepper essential oil encapsulated in hydroxypropyl-beta-cyclodextrin. *Food hydrocolloids*, 65, 157-164.
- Ramos, Ó. L., Pereira, J. O., Silva, S. I., Fernandes, J. C., Franco, M. I., Lopes-da-Silva, J. A., ... & Malcata, F. X. (2012). Evaluation of antimicrobial edible coatings from a whey protein isolate base to improve the shelf life of cheese. *Journal of dairy science*, 95(11), 6282-6292.
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free radical biology and medicine*, 26(9-10), 1231-1237.
- Ren, J., Chen, X., & Chen, Z. J. (2014). IKK β is an IRF5 kinase that instigates inflammation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(49), 17438-17443.
- Ren, L., Yan, X., Zhou, J., Tong, J., & Su, X. (2017). Influence of chitosan concentration on mechanical and barrier properties of corn starch/chitosan films. *International journal of biological macromolecules*, 105, 1636-1643.
- Ren, Q., Li, Z., Ding, L., Wang, X., Niu, Y., Qin, X., ... & Zhang, L. (2018). Anti-biofilm and remineralization effects of chitosan hydrogel containing amelogenin-derived peptide on initial caries lesions. *Regenerative Biomaterials*, 5(2), 69-76.

- Ribeiro, A. M., Estevinho, B. N., & Rocha, F. (2021). Preparation and incorporation of functional ingredients in edible films and coatings. *Food and Bioprocess Technology*, 14, 209-231.
- Roy, S., & Rhim, J. W. (2020). Preparation of gelatin/carrageenan-based color-indicator film integrated with shikonin and propolis for smart food packaging applications. *ACS Applied Bio Materials*, 4(1), 770-779.
- Sahli, C., Moya, S. E., Lomas, J. S., Gravier-Pelletier, C., Briandet, R., & Hémadi, M. (2022). Recent advances in nanotechnology for eradicating bacterial biofilm. *Theranostics*, 12(5), 2383.
- Sahli, K., & Marif, S. (2021). Préparation et caractérisation d'un biofilm comestible à base de gomme de caroube.
- Saklani, P., Nath, S., Das, S. K., & Singh, S. M. (2019). A review of edible packaging for foods. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(7), 2885-2895.
- Saklani, P., Nath, S., Das, S. K., & Singh, S. M. (2019). A review of edible packaging for foods. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(7), 2885-2895.
- Salama, H. E., & Aziz, M. S. A. (2021). Development of active edible coating of alginate and aloe vera enriched with frankincense oil for retarding the senescence of green capsicums. *Lwt*, 145, 111341.
- Salinas-Roca, B., Soliva-Fortuny, R., Welti-Chanes, J., & Martín-Belloso, O. (2016). Combined effect of pulsed light, edible coating and malic acid dipping to improve fresh-cut mango safety and quality. *Food Control*, 66, 190-197.
- Saoudi, E., Younes, R., Mesrati, N., Ouchabane, M., Baiamonte, L., & Bradai, M. A. (2024). Effect of silicon content on microstructure and mechanical properties of AlSi alloy coating obtained by physical vapour deposition. *Transactions of the IMF*, 1-8.
- Sapper, M., & Chiralt, A. (2018). Starch-based coatings for preservation of fruits and vegetables. *Coatings*, 8(5), 152.
- Schulz, H., Schrader, B., Quilitzsch, R., & Steuer, B. (2002). Quantitative analysis of various citrus oils by ATR/FT-IR and NIR-FT Raman spectroscopy. *Applied Spectroscopy*, 56(1), 117-124.
- science and technology, 56, 1954-1965.
- Seididamyeh, M., Mantilla, S. M. O., Netzel, M. E., Mereddy, R., & Sultanbawa, Y. (2024). Gum Arabic edible coating embedded aqueous plant extracts: Interactive effects of partaking components and its effectiveness on cold storage of fresh-cut capsicum. *Food Control*, 159, 110267.
- Seixas, F., Turbiani, F., Salomão, P., Souza, R., & Gimenes, M. (2013). Biofilms composed of alginate and pectin: Effect of concentration of crosslinker and plasticizer agents. *Chemical engineering transactions*, 32.
- Senturk Parreidt, T., Lindner, M., Rothkopf, I., Schmid, M., & Müller, K. (2019). The development of a uniform alginate-based coating for cantaloupe and strawberries and the characterization of water barrier properties. *Foods*, 8(6), 203.
- Seydim, A. C., Sarikus-Tutal, G., & Sogut, E. (2020). Effect of whey protein edible films containing plant essential oils on microbial inactivation of sliced Kasar cheese. *Food Packaging and Shelf Life*, 26, 100567.

- Singh, A. K., Ramakanth, D., Kumar, A., Lee, Y. S., & Gaikwad, K. K. (2021). Active packaging technologies for clean label food products : a review. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(5), 4314-4324.
- Singh, G., Singh, S., Kumar, B., & Gaikwad, K. K. (2021). Active barrier chitosan films containing gallic acid based oxygen scavenger. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15, 585-593.
- Singh, G., Singh, S., Kumar, B., & Gaikwad, K. K. (2021). Active barrier chitosan films containing gallic acid based oxygen scavenger. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15, 585-593.
- Singh, S., Gaikwad, K. K., & Lee, Y. S. (2018). Antimicrobial and antioxidant properties of polyvinyl alcohol bio composite films containing seaweed extracted cellulose nano-crystal and basil leaves extract. *International Journal of Biological Macromolecules*, 107, 1879-1887.
- Soares, N. M., Fernandes, T. A., & Vicente, A. A. (2016). Effect of variables on the thickness of an edible coating applied on frozen fish—Establishment of the concept of safe dipping time. *Journal of Food Engineering*, 171, 111-118.
- Sood, A., & Saini, C. S. (2022). Utilization of peel of white pomelo for the development of pectin based biodegradable composite films blended with casein and egg albumen. *Food Chemistry Advances*, 1, 100054.
- Sousa, F. F., Junior, J. S. P., Oliveira, K. T., Rodrigues, E. C., Andrade, J. P., & Mattiuz, B. H. (2021). Conservation of ‘Palmer’ mango with an edible coating of hydroxypropyl methylcellulose and beeswax. *Food Chemistry*, 346, 128925.
- Suhag, R., Kumar, N., Petkoska, A. T., & Upadhyay, A. (2020). Film formation and deposition methods of edible coating on food products : A review. *Food Research International*, 136, 109582.
- Sundqvist-Andberg, H., & Åkerman, M. (2021). Sustainability governance and contested plastic food packaging—An integrative review. *Journal of Cleaner Production*, 306, 127111.
- Takma, D. K., & Korel, F. (2019). Active packaging films as a carrier of black cumin essential oil : Development and effect on quality and shelf-life of chicken breast meat. *Food Packaging and Shelf Life*, 19, 210-217.
- Talón, E., Trifkovic, K. T., Nedovic, V. A., Bugarski, B. M., Vargas, M., Chiralt, A., & González-Martínez, C. (2017). Antioxidant edible films based on chitosan and starch containing polyphenols from thyme extracts. *Carbohydrate polymers*, 157, 1153-1161.
- Tan, C. H., Lee, K. W. K., Burmølle, M., Kjelleberg, S., & Rice, S. A. (2017). All together now : experimental multispecies biofilm model systems. *Environmental Microbiology*, 19(1), 42-53.
- Tanwar, R., Gupta, V., Kumar, P., Kumar, A., Singh, S., & Gaikwad, K. K. (2021). Development and characterization of PVA-starch incorporated with coconut shell extract and sepiolite clay as an antioxidant film for active food packaging applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 185, 451-461.
- Thakur, R., Pristijono, P., Bowyer, M., Singh, S. P., Scarlett, C. J., Stathopoulos, C. E., & Vuong, Q. V. (2019). A starch edible surface coating delays banana fruit ripening. *Lwt*, 100, 341-347.

- Tonyali, B., McDaniel, A., Amamcharla, J., Trinetta, V., & Yucel, U. (2020). Release kinetics of cinnamaldehyde, eugenol, and thymol from sustainable and biodegradable active packaging films. *Food Packaging and Shelf Life*, 24, 100484.
- Turbiani, F. R. B. (2007). *Development and characterization of active sodium alginate films cross-linked with calcium benzoate* (Doctoral dissertation, Dissertation, State University of Campinas, Campinas, Brazil).
- Ustunol, Z. (2009). Edible films and coatings for meat and poultry. *Edible films and coatings for food applications*, 245-268.
- Vieira, J. M., Flores-López, M. L., de Rodríguez, D. J., Sousa, M. C., Vicente, A. A., & Martins, J. T. (2016). Effect of chitosan–Aloe vera coating on postharvest quality of blueberry (*Vaccinium corymbosum*) fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 116, 88-97.
- Villaño, D., Fernández-Pachón, M. S., Moyá, M. L., Troncoso, A. M., & García-Parrilla, M. C. (2007). Radical scavenging ability of polyphenolic compounds towards DPPH free radical. *Talanta*, 71(1), 230-235.
- Waheed, H., Hashmi, I., Khan, S. J., Kim, S. R., Arshad, M., & Nasir, H. (2016). Microbial population dynamics and profiling of quorum sensing agents in membrane bioreactor. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 113, 66-73.
- Wang, P., Fei, P., Zhou, C., & Hong, P. (2021). Stearic acid esterified pectin : Preparation, characterization, and application in edible hydrophobic pectin/chitosan composite films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 186, 528-534.
- Wathoni, N., Shan, C. Y., Shan, W. Y., Rostinawati, T., Indradi, R. B., Pratiwi, R., & Muchtaridi, M. (2019). Characterization and antioxidant activity of pectin from Indonesian mangosteen (*Garcinia mangostana* L.) rind. *Heliyon*, 5(8).
- Xia, C., Wang, W., Wang, L., Liu, H., & Xiao, J. (2019). Multilayer zein/gelatin films with tunable water barrier property and prolonged antioxidant activity. *Food Packaging and Shelf Life*, 19, 76-85.
- Xiao, Y., Liu, Y., Kang, S., Cui, M., & Xu, H. (2021). Development of pH-responsive antioxidant soy protein isolate films incorporated with cellulose nanocrystals and curcumin nanocapsules to monitor shrimp freshness. *Food Hydrocolloids*, 120, 106893.
- Xiong, Y., Li, S., Warner, R. D., & Fang, Z. (2020). Effect of oregano essential oil and resveratrol nanoemulsion loaded pectin edible coating on the preservation of pork loin in modified atmosphere packaging. *Food Control*, 114, 107226.
- Xu, L., Zhu, M. J., Liu, X. M., & Cheng, J. R. (2018). Inhibitory effect of mulberry (*Morus alba*) polyphenol on the lipid and protein oxidation of dried minced pork slices during heat processing and storage. *Lwt*, 91, 222-228.
- Xu, S., Xing, Y., Liu, S., Luo, X., Chen, W., & Huang, Q. (2020). Co-effect of minerals and Cd (II) promoted the formation of bacterial biofilm and consequently enhanced the sorption of Cd (II). *Environmental Pollution*, 258, 113774.
- Xu, X., Chua, C. C., Kong, J., Kostrzewa, R. M., Kumaraguru, U., Hamdy, R. C., & Chua, B. H. (2007). Necrostatin-1 protects against glutamate-induced glutathione depletion and caspase-independent cell death in HT-22 cells. *Journal of Neurochemistry*, 103(5), 2004-2014.
- Yin, P., Liu, J., Zhou, W., & Li, P. (2020). Preparation and properties of corn starch/chitin composite films cross-linked by maleic anhydride. *Polymers*, 12(7), 1606.

- Zhang, Y., & Han, J. H. (2006). Plasticization of pea starch films with monosaccharides and polyols. *Journal of Food Science*, 71(6), E253-E261.
- Zhou, J., Liu, G., Wang, S., Zhang, H., & Xu, F. (2020). TG-FTIR and Py-GC/MS study of the pyrolysis mechanism and composition of volatiles from flash pyrolysis of PVC. *Journal of the Energy Institute*, 93(6), 2362-2370.
- Zhou, W., He, Y., Liu, F., Liao, L., Huang, X., Li, R., ...& Li, J. (2021). Carboxymethyl chitosan-pullulan edible films enriched with galangal essential oil : Characterization and application in mango preservation. *Carbohydrate Polymers*, 256, 117579.