

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA - Bejaia

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département : Biologie physico-chimique
Spécialité : Biochimie fondamentale



Réf :

Mémoire de Fin de Cycle
En vue de l'obtention du diplôme

MASTER

Thème

**Conception de films antioxydants incorporant
les fruits de *Pistacia lentiscus***

Présenté par : Mlle. BARACHE Cylia & Mlle. BARACHE Sonia

Soutenu le :03/07/2025

Devant le jury composé de :

Mr. GHIDOUCHE A.	MCA	Président
Mme. MOULAOUÏ K.	MCB	Promotrice
Mme. BENSALÈM-BOURNINE S.	MCA	Examinatrice

Année universitaire :2024/2025

Dédicace

Louange à Dieu, le Tout-Puissant, qui nous a guidées, fortifiées et accordé la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous dédions ce mémoire avec tout notre amour et notre reconnaissance

À nos parents bien-aimés, dont le souvenir, l'amour, la tendresse et la force continuent d'inspirer chacun de nos pas.

À notre petit frère Fradjellah, source de joie et de motivation.

À notre grande sœur Damia, pour son soutien constant,

À son époux, et à leur petit trésor Ayden, ainsi qu'au nouveau membre de leur famille que nous attendons avec tendresse.

À nos grands-parents, pour leur sagesse, leurs prières silencieuses et leur présence dans nos cœurs.

Et

À notre promotion 2024/2025, avec qui nous avons partagé des souvenirs inoubliables, des efforts communs et une aventure gravée à jamais dans nos cœurs.

Enfin

À nous deux, jumelles unies, qui avons parcouru ensemble ce chemin avec complicité, force et persévérance.

Cylia et Sonia

Remerciement

En premier lieu, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Madame Moulaoui Kenza, notre promotrice, pour son accompagnement constant, ses conseils précieux, sa bienveillance et l'encadrement rigoureux qu'elle nous a apporté tout au long de ce travail.

Nous adressons également nos remerciements à Monsieur Ghidouche A, président du jury, et à Madame Bensalem-Bournine S, examinatrice, pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire et pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail.

Nous exprimons toute notre reconnaissance à Monsieur Sidali pour ses conseils avisés, sa disponibilité et son soutien tout au long des différentes étapes de notre recherche.

Nous remercions chaleureusement l'équipe de Cevital pour leur accueil, leur disponibilité et l'aide précieuse apportée lors de la mise en œuvre pratique de cette étude.

Enfin, nous adressons notre gratitude à toutes les personnes, de près ou de loin, qui nous ont soutenues, encouragées ou assistées durant cette aventure scientifique.

Sommaire

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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.1. <i>Pistacia lentiscus</i>	2
I.1.1. Taxonomie et nomenclature de <i>Pistacia lentiscus</i>	2
a. Taxonomie	2
b. Nomenclature	2
I.1.2. Description botanique de <i>Pistacia lentiscus</i>	3
I.1.3. Répartition géographique de <i>Pistacia lentiscus</i>	4
I.1.4. Composition chimique de <i>Pistacia lentiscus</i>	4
I.1.5. Usages traditionnels de <i>Pistacia lentiscus</i>	5
I.1.6. Activités biologiques de <i>Pistacia lentiscus</i>	6
a. Activité antioxydante	6
b. Activité antimicrobienne	7
c. Autres activités	7
I.2. Emballage alimentaire	7
I.2.1. Films à base de biopolymères naturels	8
a. Définition	8
b. Composants des films biopolymères naturels	8
I.3. Biopolymères	9
I.3.1. Classification des biopolymères	9
I.3.2. Propriétés des biopolymères	10
I.3.3. Domaines d'application des biopolymères	10
I.4. Carboxyméthylcellulose	11

Chapitre II : Matériel et méthodes

II.1. Matériel végétal	12
II.2. Méthodes	12
II.2.1. Préparation de l'échantillon	12
II.2.2. Extraction assistée par ultrasons	13
II.3. Dosage des composés phénoliques	13
II.3.1. Dosage des phénols totaux	13
II.3.2. Dosage des flavonoïdes	14
II.3.3. Dosage des tanins	15
a. Tanins condensés	15
b. Tanins hydrolysables	16
II.4. Propriétés des films à base de CMC enrichis en extrait de <i>Pistacia lentiscus</i>	16
II.4.1. Épaisseur	16
II.4.2. Teneur en humidité	16
II.4.3. Résistance à la traction	17

II.6. Évaluation de l'activité antioxydante	17
II.6.1. Activité DPPH	17
II.6.2. Activité ABTS	18
II.6.3. Pouvoir réducteur	18
II.6.4. Capacité antioxydante totale	19
II.7. Analyse microbiologique des films	19
II.8. Analyse statistique	20

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1. Rendement de l'extraction	21
III.2. Dosage des composés phénoliques	21
III.3. Propriétés physico-chimiques et mécaniques des films	23
III.4. Évaluation des propriétés antioxydantes	25
III.4.1. Activité DPPH	25
III.4.2. Activité ABTS	27
III.4.3. Pouvoir réducteur	28
III.4.4. Capacité antioxydante totale	29
III.7. Analyses microbiologiques des films	30
Conclusion	34

Liste des tableaux

Numéro	Titre des tableaux	Page
I	Classification de <i>Pistacia lentiscus</i>	2
II	Description botanique de <i>Pistacia lentiscus</i>	3
III	Composition chimique de <i>Pistacia lentiscus</i> selon les classes de composés et les parties de la plante	5
IV	Composants des films à base des biopolymères naturels	9
V	Milieux de culture et conditions d'incubation utilisés pour l'analyse microbiologique des films témoins et les films incorporant l'extrait des fruits de <i>Pistacia lentiscus</i> .	20
VI	Teneurs en composés phénoliques, flavonoïdes et tanins de l'extrait éthanolique des fruits de <i>Pistacia lentiscus</i>	21
VII	Récapitulatif des résultats des propriétés physico-chimiques et mécaniques des films témoins et des films incorporant l'extrait éthanolique des fruits de <i>Pistacia lentiscus</i> .	23
VIII	Présentation des résultats d'IC ₅₀ du test DPPH pour l'extrait éthanolique des fruits de <i>Pistacia lentiscus</i> , les films enrichis, les films témoins et l'acide gallique.	25
IX	Résultats d'IC ₅₀ du test ABTS de l'extrait éthanolique des fruits de <i>Pistacia lentiscus</i> , des films incorporant l'extrait éthanolique, des films témoin et de l'acide gallique.	27
X	Récapitulatif des résultats de capacité antioxydante totale de l'extrait éthanolique des fruits de <i>Pistacia lentiscus</i> , des films incorporant l'extrait éthanolique et des films témoin.	29
XI	Résultat du test de contaminations des films incorporant l'extrait éthanolique des fruits de <i>Pistacia lentiscus</i> et Film témoin.	30

Liste des figures

Numéro	Titre des figures	Page
1	Arbuste de <i>P. lentiscus</i>	3
2	Mécanisme d'action de l'activité antioxydant de <i>P. lentiscus</i>	6
3	Structure de sodium Carboxyméthylcellulose	11
4	Les fruits de <i>Pistacia lentiscus</i>	12
5	Activité antioxydante de l'extrait éthanolique des fruits de <i>Pistacia lentiscus</i> , des films incorporant l'extrait éthanolique, des film témoin et de l'acide gallique contre le radicale DPPH•.	26
6	Activité antioxydante de l'extrait éthanolique des fruits <i>Pistacia lentiscus</i> , des films incorporant l'extrait éthanolique, les films témoin et de l'acide gallique contre le radical ABTS.	27
7	Pouvoir réducteur de l'extrait éthanolique des fruits <i>Pistacia lentiscus</i> , des films incorporant l'extrait éthanolique et d'acide ascorbique contre les ions ferriques.	28

Liste des abréviations

- A_{0.5}** : Concentration indiquant 0,5 d'absorbance
- ASTM** : American society for testing and materials
- BPA** : Baird-parker base Agar
- CAT** : Capacité antioxydante totale
- CI₅₀** : Concentration d'inhibition a 50%
- CMC** : Carboxyméthylcellulose
- DP** : Degré de polymérisation
- EAA** : Equivalent d'acide ascorbique
- EAG** : Equivalent d'acide gallique
- EAU** : Extraction assisté par l'ultrason
- EFPL** : Extrait des fruits de *pistacia lentiscus*
- ERO** : Espèce réactif d'oxygène
- ES** : Extrait sec
- F** : Film sans extrait des fruits de *pistacia lentiscus*
- FEFPL** : Film incorporant l'extrait des fruits de *pistacia lentiscus*
- GCA** : Glucose cloramphenicol Agar
- Gly** : Glycérol
- ISO** : International organisation for standarization
- MRS** : Lactobacillus MRS Agar
- P. lentiscus*** : *Pistacia lentiscus*
- PCA** : Plate count Agar
- TC_s** : Tanins condensé
- VRBL** : Violet red bile lactose Agar

Introduction

Les emballages plastiques conventionnels sont largement utilisés en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques et de leur faible coût de production. Cependant, leur non-biodégradabilité constitue une menace majeure pour l'environnement, contribuant à l'accumulation de déchets persistants. Face à cette problématique, le développement de films biodégradables à base de polymères naturels représente une alternative prometteuse et durable. En plus de leur capacité à se dégrader naturellement, ces matériaux peuvent être fonctionnalisés par l'incorporation de composés bioactifs, ce qui permet d'améliorer la conservation des aliments tout en réduisant le recours aux additifs synthétiques (Lee et al., 2016).

Parmi les biopolymères d'intérêt, la carboxyméthylcellulose (CMC), un dérivé hydrosoluble de la cellulose, se distingue par sa capacité à former des films homogènes, souples et dotés de bonnes propriétés mécaniques. L'ajout de glycérol, un plastifiant couramment utilisé, permet d'accroître la flexibilité des films tout en maintenant leur intégrité structurale (Doveri et al., 2025).

Parallèlement, plusieurs études ont mis en évidence l'intérêt d'incorporer des extraits végétaux riches en composés bioactifs dans des matrices polymériques naturelles, afin de leur conférer des propriétés antioxydantes, antimicrobiennes ou anti-inflammatoires (Nogueira et al., 2020), comme c'est le cas des films à base de chitosane incorporant un extrait de curcumine (Rachtanapun et al., 2021). Dans cette perspective, *Pistacia lentiscus*, plante médicinale typique du bassin méditerranéen, suscite un intérêt croissant en raison de sa richesse en flavonoïdes, en tanins et autres composés phénoliques, lui conférant des propriétés biologiques remarquables, notamment antioxydantes, anti-inflammatoires et antimicrobiennes (Belhacha et al., 2017 ; Hemma et al., 2018).

Ce travail vise à développer des films bioactifs biodégradables à base de carboxyméthylcellulose et de glycérol, enrichis en extrait éthanolique de fruits de *Pistacia lentiscus*. L'objectif principal est d'évaluer l'impact de l'incorporation de cet extrait sur les propriétés physico-chimiques, mécaniques, antioxydantes et antimicrobiennes des films obtenus, en vue de concevoir un matériau d'emballage alimentaire à la fois fonctionnel, écologique et valorisant des ressources végétales locales.

Chapitre I
Synthèse
bibliographique

I.1. *Pistacia lentiscus*

Pistacia lentiscus est un arbuste à feuilles persistantes appartenant à la famille des Anacardiaceae. Qui regroupe environ 70 genres et plus de 600 espèces principalement distribuées dans la région méditerranéenne (Bozorgi et al., 2013).

I.1.1. Taxonomie et nomenclature de *Pistacia lentiscus*

a. Taxonomie

Le genre *Pistacia* regroupe neuf espèces d'arbustes, en Algérie, il est représenté par quatre espèces, *Pistacia lentiscus*, *Pistacia terebinthus*, *Pistacia vera* et *Pistacia atlantica* (Ghalem et Benhassaini, 2007). D'après Al-Saghir et porter. (2012) *Pistacia lentiscus* est classé comme suit :

Tableau I: Classification de *Pistacia lentiscus* (Al-Saghir et porter, 2012).

Règne	Plantea
Embranchement	Spermatophyta
Sous embranchement	Angiospermae
Division	Magnoliophyta
Classe	Dicotylédones
Ordre	Sapidales
Famille	Anacardiacea
Genre	<i>Pistacia</i>
Espèce	<i>Pistacia lentisque</i>

b. Nomenclature

Pistacia lentiscus est connue sous divers noms selon les pays et les régions. Elle est appelée *lentisque* en français ; *mastic tree* en anglais ; *Derou* ou *Tadist* en arabe et *Amadagh* en kabyle et le fruit connue sous le nom de *Tidekt* (Blama et al., 2024).

I.1.2. Description botanique de *Pistacia lentiscus*





Pistacia lentiscus est un arbrisseau vivace, mesurant entre un et trois mètres de hauteur, aux branches denses et sinueuses. C'est une espèce dioïque et thermophile, il se distingue par son odeur résineuse très prononcée (Saïdi et al., 2023), comme le montre la **figure 1**.



Figure 1: Arbuste de *P. lentiscus* (photographie originale)

Les caractéristiques morphologiques détaillées de la plante sont présentées dans le **tableau II**.

Tableau II : Description botanique de *Pistacia lentiscus* (Saïdi et al., 2023).

Description	Photos
<p>Feuilles</p> <p>De couleur vert foncé constituer d'un nombre pair de folioles persistantes, avec quatre à dix folioles oblongues se terminant par une paire.</p>	 <p>Photo originale</p>
<p>Fleurs</p> <p>Des petites grappes aromatique, unisexuées leur largeur est d'environ trois millimètres. Les fleurs males sont rouge foncé et les fleurs femelles verdâtres.</p>	 <p>Photo originale</p>
<p>Ecores et résine</p> <p>Brun rougeâtre virant vers gris avec le temps. Résine Connue sous le nom mastic, il s'agit d'une substance résineuse qui coule du tronc et des branches principales.</p>	 <p>Photo originale</p>
<p>Fruits</p> <p>Une baie globuleuse de deux à trois millimètres monosperme, d'abords rouges puis noire à maturité.</p>	 <p>www.alamy.com</p>

I.1.3. Répartition géographique de *Pistacia lentiscus*

Pistacia lentiscus est une espèce thermophile largement répandue dans le bassin méditerranéen, où elle pousse à basse altitude dans des régions chaudes et à moyenne altitude dans des zones ensoleillées et abritées, jusqu'à 1100 m (Landau et al., 2014).

Son aire de répartition s'étend sur plusieurs pays méditerranéens, notamment, Chypre, Espagne, Algérie et Tunisie, où des études ont mis en évidence une forte variabilité morphologique. En Grèce, sur l'île de Chios, elle est cultivée pour la production de mastic. Adaptée aux conditions arides, elle résiste aux sécheresses prolongées et aux gelées sévères, ce qui en fait une espèce clé des écosystèmes méditerranéens (Landau et al., 2014).

Elle est principalement présente dans le bassin de la Soummam, où elle pousse en association avec le pin d'Alep, le chêne vert et le chêne liège, contribuant ainsi à la diversité écologique de cette région (Belhadj, 2001).

I.1.4. Composition chimique de *Pistacia lentiscus*

Pistacia lentiscus contient une grande diversité de composés chimiques, avec un total de 157 composés identifiés appartenant à différentes classes chimiques (Floris et al., 2024).

L'analyse phytochimique de *Pistacia lentiscus* a permis d'identifier une grande diversité de composés bioactifs répartis dans différentes parties de la plante, notamment les feuilles, les fruits, la résine et les parties aériennes.

Ces composés appartiennent à plusieurs grandes classes chimiques, telles que les terpénoïdes, les composés phénoliques (flavonoïdes et tanins), les acides gras et les stéroïdes. Leur concentration varie en fonction de divers facteurs, notamment l'origine géographique, les conditions de culture et les techniques d'extraction utilisées (Floris et al., 2024).

Les composés chimiques identifiés dans *Pistacia lentiscus* sont regroupés dans le **tableau III** selon leur classe, leur principaux constituants et leur localisation dans la plante.

Tableau III : Composition chimique de *Pistacia lentiscus* selon les classes de composés et les parties de la plante (Floris et al., 2024).

Classe de composés	Principaux constituants	Partie de la plante
Terpénoïdes (47%)	α -Pinène, limonène, camphène, acide masticadiénique, acide isomasticadiénique, acide oléanonique, acide moronique	Fruits, gomme mastic
Composés phénoliques (38%)	Acide gallique, acide vanillique, acide trans-cinnamique, acide p-coumarique, acide caféique, acide férulique, acide tannique	Feuilles, tiges, fruits, racines
Flavonoïdes (17%)	Myricétine-3-O-rhamnoside, myricétine-3-O-glucoside, quercétine-3-O-rhamnoside, catéchine, lutéoline, apigénine, delphinidine-3-O-glucoside, cyanidine-3-O-arabinoside	Feuilles, fruits
Tanins (6%)	Acide 3,5-O-digalloyl quinique, acide 3, 4,5-tri-O-galloyl quinique, acide 3-galloyl quinique, acide 5-galloyl quinique, acide 1,5-digalloyl quinique	Fruits, feuilles
Acides gras (3%)	Acide oléique, acide palmitique, acide linoléique, acide palmitoléique, acide gadoléique, acide linoléinique, acide stéarique, acide arachidique	Fruits
Stéroïdes	Stérols, tocophérol, caroténoïdes, chlorophylle	Fruits

I.1.5. Usage traditionnelle de *Pistacia lentiscus*

Les nombreux usages de *Pistacia lentiscus* témoignent de sa grande valeur dans les pratiques médicinales traditionnelles de diverses cultures (Milia et al., 2021).

Différentes parties de *Pistacia lentiscus*, notamment les feuilles et les fruits, sont utilisées en médecine traditionnelle pour le traitement de diverses maladies (Yemmen et al., 2017 ; Aissat et al., 2022 ; Sehaki et al., 2023).

C'est une plante largement utilisée à travers différentes régions du monde pour ses multiples propriétés thérapeutiques. En Algérie, elle est utilisée pour stimuler l'appétit et comme un astringent, tandis qu'en Grèce, sa résine traite les troubles digestifs (Bozorgi et al., 2013). En Iran et en Irak, elle exerce une action stimulante sur le cerveau et le foie, en Italie, elle est utilisée comme antiseptique et cicatrisant (Milia et al., 2021).

I.1.6. Activité biologique de *Pistacia lentiscus*

Les plantes représentent une source importante de composés bénéfiques pour la santé. Plusieurs recherches ont démontré que leurs vertus thérapeutiques sont dues à la présence d'agents bioactifs dans leurs extraits, tels que les alcaloïdes, les flavonoïdes, les vitamines et d'autres composés phénoliques (Belhachat et al., 2017 ; Hemma et al., 2018 ; Rguez et al 2023). Outre ses effets thérapeutiques, *Pistacia lentiscus* est également utilisée dans l'industrie agroalimentaire en tant qu'additif naturel, en raison de ses propriétés aromatiques, antioxydantes et antimicrobiennes, contribuant ainsi à la protection et à la conservation des denrées alimentaires notamment dans les produits carnés, les saucisses chypriotes et les chewing-gums (Botsaris et al., 2015 ; Yemmen et al., 2017). Par ailleurs, en raison de sa richesse en anthocyanines, elle peut être employée comme colorant naturel (Bozrgi et al., 2013).

a. Activités antioxydants

Récemment, des études ont mis en évidence que *Pistacia lentiscus* constitue une source abondante d'acides phénoliques et de flavonoïdes, parmi lesquels l'acide hydroxybenzoïque et les flavonols jouent un rôle clé dans son activité antioxydante. Ces composés possèdent des propriétés redox leur permettant d'agir comme agents réducteurs (ElezGarofulić et al., 2020).

L'action antioxydante pour la lutte contre les radicaux libres peut se produire de plusieurs mécanismes selon (Hemma et al., 2018 ; Lee et al., 2020 ; Bareca, 2021).

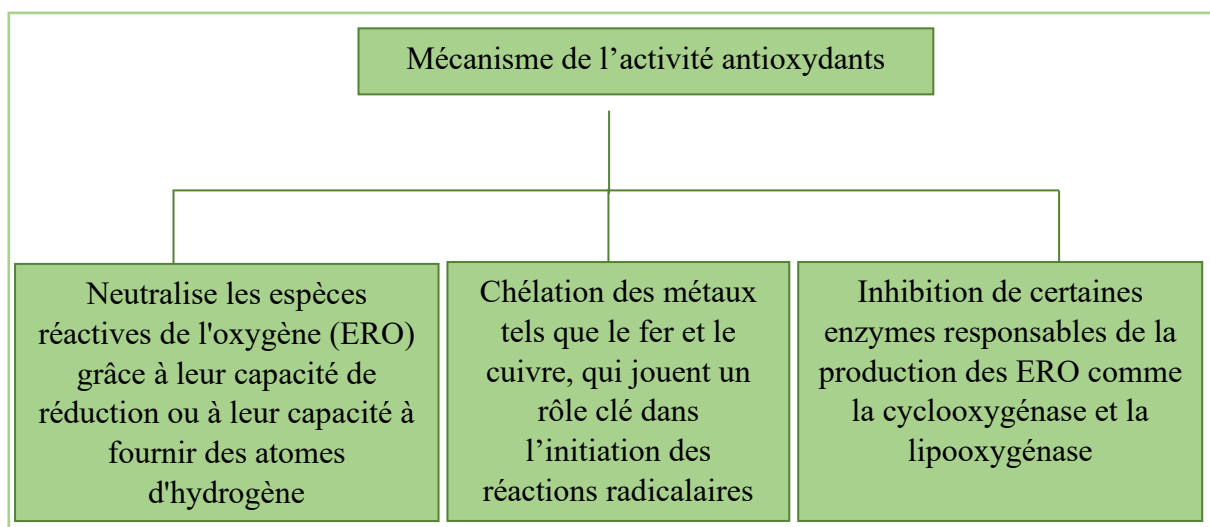


Figure 2 : Mécanisme d'action de l'activité antioxydant de *P. lentiscus* (Hemma et al., 2018 ; Lee et al., 2020 ; Bareca, 2021).

b. Activité antimicrobienne

L'activité antimicrobienne de *Pistacia lentiscus* est largement attribuée à la richesse de ses extraits en composés phytochimiques bioactifs tels que les monoterpènes, les flavonoïdes, les polyphénols et les acides gras insaturés. Ces composés agissent de façon complémentaire pour perturber les fonctions vitales des micro-organismes. Les monoterpènes oxygénés altèrent les membranes cellulaires bactériennes et fongiques, augmentant leur perméabilité, ce qui entraîne des fuites intracellulaires et la mort cellulaire (Amara et al., 2019 ; Alabrahim et Azzazy, 2024).

Les flavonoïdes comme la quercétine et la rutine interfèrent avec des processus intracellulaires essentiels, inhibant la production d'énergie et la synthèse de structures cellulaires (Selim et al., 2022 ; Sehaki et al., 2023). Ces mécanismes expliquent le fort potentiel de *Pistacia lentiscus* comme agent antimicrobien naturel (Bammou et al., 2015 ; Al-Zaben et al., 2023).

c. Autre activité

Pistacia lentiscus présente plusieurs activités biologiques remarquables. Ses extraits, notamment ceux des feuilles et des fruits, possèdent une activité anti-inflammatoire en inhibant la production de médiateurs comme les prostaglandines et les cytokines, sans effets secondaires gastriques (Bouriche et al., 2016 ; Sehaki et al., 2023). Elle montre également un potentiel anticancéreux grâce à sa richesse en flavonoïdes, tanins et composés phénoliques, agissant contre diverses lignées cellulaires cancéreuses, dont celles du poumon, du sein, de la peau et du foie, avec un effet notable de la myricétine. Enfin, *Pistacia lentiscus* exerce une activité antidiabétique prometteuse, comparable au glibenclamide, en inhibant les enzymes α -amylase et α -glucosidase impliquées dans la digestion des glucides (Mehenni et al., 2016 ; Sehaki et al., 2023).

I.2. Emballage alimentaire

L'emballage alimentaire joue un rôle essentiel dans la conservation et la protection des aliments contre divers contaminants extérieurs tels que la lumière, la poussière, les gaz, les micro-organismes, ainsi que contre les effets nuisibles liés à l'absorption d'oxygène et à l'émission de vapeur d'eau (Marsh et Bugusu, 2007 ; Dutta et Sit, 2023). C'est pourquoi il est considéré comme un élément indispensable dans l'industrie agroalimentaire (Xu et al., 2024).

Il existe divers types de matériaux utilisés pour l'emballage, à savoir le carton, le papier, le verre, les métaux et le plastique. Chacun a ses propres avantages et inconvénients (**Marsh et Bugusu 2007 ; Abdullah et al., 2022**). Le choix de matériaux dépend de type de l'aliment a 2emballé (**Li et al., 2022**).

I.2.1. Film à base des biopolymères naturels

Le film alimentaire est une catégorie spécifique d'emballage, conçus pour protéger les aliments et prolonger leur conservation. Dans une optique de durabilité, leur fabrication évolue vers l'usage de biopolymères biodégradables enrichis en composés antimicrobiens et antioxydants d'origine naturelle, notamment issus des déchets agroalimentaires (**González-López et al., 2023**).

a. Définition

Un film est considéré comme une fine couche de matériau autoportante, composée d'une matrice polymérique assurant la stabilité structurale. Généralement, les films sont élaborés à partir de polymères destinés à la formation de la matrice auxquels s'ajoutent divers additifs (**Rhim et al., 2007**).

b. Composants des films biopolymères naturels

La préparation des films comestibles nécessite l'utilisation d'au moins un polymère de haut poids moléculaire, capable de former une matrice structurale cohérente grâce à sa force de cohésion et sa capacité à la coalescence (**Perera et al., 2023**). Cette matrice polymérique joue un rôle essentiel dans les propriétés du film, influençant sa densité, sa porosité et sa perméabilité ; divers biopolymères naturels peuvent être utilisés pour cette fonction, offrant un large choix dans la fabrication de films biodégradables (**Rodrigues et al., 2023**), ils sont illustrés dans le **tableau IV**.

Tableau IV : Composants des films à base des biopolymères naturels (Rhim et al., 2007).

Composants	
Matériaux filmogènes	Additifs
<ul style="list-style-type: none"> • Polysaccharides : amidon, dérivés de cellulose, pectine, chitosane, et gommes naturelles • Protéines : caséine, collagène, gélatine et zéine de maïs • Lipides : lipides neutres, acides gras et cire 	<ul style="list-style-type: none"> • Plastifiants : glycérol, propylène glycol, polyéthylène glycol, sorbitol et eau • Ingrédients fonctionnels : antimicrobiens, antioxydants, arômes, colorants, vitamines et autres nutraceutiques

I.3. Biopolymères

Les biopolymères sont des macromolécules produites par des organismes vivants ou issues de ressources renouvelables, et se caractérisent par leur biodégradabilité (Rondeau-Mouro et al., 2008). Leur utilisation suscite un intérêt croissant en tant qu'alternatives durables aux polymères d'origine pétrochimique, offrant ainsi des perspectives prometteuses dans le cadre de la transition vers des matériaux plus respectueux de l'environnement (Jarroux, 2008).

I.3.1. Classification des biopolymères

Les biopolymères, dérivés de sources naturelles, présentent une grande diversité et jouent un rôle fondamental tant dans les systèmes biologiques que dans les applications industrielles. En fonction de leur origine, ils peuvent être classés en plusieurs catégories, notamment les biopolymères d'origine animale et végétale.

- **Lipides** : Ce sont des molécules hydrophobes constituées d'acides gras, d'origine végétale ou animale. Exemples : huile, cire, beurre.
- **Protéines** : Macromolécules formées d'acides aminés, avec un caractère amphiphile, d'origine végétale ou animale. Exemples : caséine, collagène, albumine.
- **Polysaccharides** : Longues chaînes de sucres complexes, issues de sources végétales ou animales. Exemples : chitine, cellulose, amidon, gommes naturelles (Rutot et Dubios, 2004 ; Vissac et al., 2017).

I.3.2. Propriétés des biopolymères

Grâce à leur structure chimique, les biopolymères possèdent des propriétés spécifiques et avantageuses par rapport aux polymères synthétiques, adaptées à diverses applications dans l'industrie plastique. Parmi celles-ci, la biodégradabilité est la plus importante.

- **Biodégradabilité**

Les biopolymères sont synthétisés par voie enzymatique dans les organismes vivants, ce qui les rend facilement dégradables dans un environnement biologique. La biodégradabilité est attribuée à la présence de liaisons chimiques faibles telles que les esters et les amides, qui sont décomposées par les enzymes microbiennes, produisant des molécules plus simples qui s'intègrent au cycle naturel (Rutot et Dubios, 2004).

- **Perméabilité à la vapeur d'eau des biopolymères**

Divers biopolymères tels que l'amidon, la cellulose et les protéines possèdent des propriétés hydrophiles du fait de la présence de fonctions hydroxyle et amine polaires, qui établissent des interactions avec l'eau à travers la création de liaisons hydrogène (Rabetafika et al., 2006).

- **Biocompatibilité et biorésorbable**

Les biopolymères, en raison de leur origine naturelle, sont biocompatibles. Cela signifie qu'ils peuvent remplir une fonction sans provoquer d'effets négatifs sur l'environnement biologique dans lequel ils sont utilisés (Rabetafika et al., 2006).

- **Propriétés chimiques**

Les biopolymères ont des fonctions chimiques réactives telles que les groupes hydroxyle, carboxyle, amine ou aldéhyde, qui leur donnent la capacité d'interagir avec d'autres molécules (Rabetafika et al., 2006).

I.3.3. Domaine d'application des biopolymères

Les biopolymères, en tant qu'alternatives biodégradables aux polymères d'origine pétrochimique, connaissent un essor important dans plusieurs secteurs, notamment l'agriculture, l'emballage et le domaine médical.

En agriculture, ils sont utilisés pour la fabrication de films de paillage biodégradables, réduisant l'impact environnemental des plastiques traditionnels (Ponnusamy et Mani, 2022).

Dans le secteur médical, ils servent à concevoir des matériaux ostéosynthétiques et des emballages biocompatibles (Martin et Williams, 2003 ; Kunduru et al., 2016).

Enfin, dans l'emballage, les biopolymères permettent la production de sacs et de films alimentaires, contribuant à la préservation des aliments tout en limitant la pollution plastique (Xu et al., 2024).

I.4. Carboxyméthylcellulose

La CMC est un polysaccharide hydrosoluble dérivé de la cellulose, largement utilisé à l'échelle industrielle. Elle est obtenue par une réaction d'éthérisation, impliquant la transformation de la cellulose en cellulosate de sodium, puis sa réaction avec du chloroacétate de sodium (Costa et al., 2022).

Sur le plan structural, la CMC se compose d'unités β -D-glucose reliées par des liaisons β -1,4-glycosidiques. La principale différence avec la cellulose réside dans l'introduction de groupes carboxyméthyle anioniques ($-\text{CH}_2\text{COOH}$) remplaçant certains hydroxyles (Costa et al., 2022).

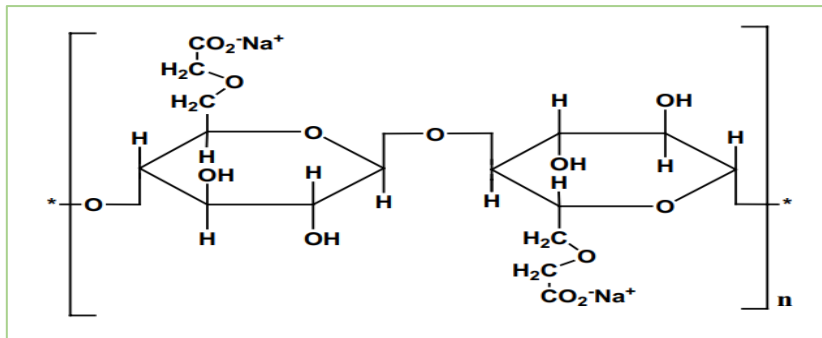


Figure 3 : structure de sodium Carboxyméthylcellulose (CMC) (Rahman et al., 2021).

Grâce à ses nombreuses propriétés fonctionnelles, telles que sa capacité à former des films, sa viscosité élevée, son hydrophilie, sa bonne résistance mécanique ainsi que son faible coût de synthèse, la CMC est largement exploitée dans divers secteurs industriels. Elle est notamment utilisée dans l'agroalimentaire comme agent épaississant ou stabilisant, dans les industries du papier, textile et plastique pour améliorer la texture et la résistance des matériaux, ainsi que dans le secteur pharmaceutique pour la formulation de médicaments. En ingénierie biomédicale, elle entre dans la conception de matériaux biocompatibles, tandis qu'en traitement des eaux usées, elle contribue à la clarification et à la purification (Rahman et al., 2021 ; Costa et al., 2022).

Chapitre II

Matériels et méthodes

Dans cette étude, nous avons développé des films bioactifs à base de CMC enrichis avec un extrait éthanolique de *Pistacia lentiscus*. Cette partie décrit les différentes étapes de préparation de l'extrait végétal, la formulation des films, ainsi que les méthodes utilisées pour caractériser leurs propriétés physico-chimiques, mécaniques et bioactives.

L'ensemble des analyses a été mené afin d'évaluer l'impact de l'incorporation de l'extrait de *Pistacia lentiscus* sur les propriétés physico chimiques des films, en vue de leur utilisation potentielle comme emballage alimentaire actif.

Les analyses physico-chimiques (épaisseur), mécaniques (résistance à la traction) et microbiologique (test de contamination) ont été réalisées au sein du laboratoire intrants packaging (IP) de l'entreprise Cevital, qui a mis ses équipements à disposition pour leur exécution.

II.1. Matériel végétale

L'échantillon est constitué de fruits de *Pistacia lentiscus*, récoltés au mois de novembre 2024, dans la forêt d'Azrou N'Béchar, située dans la province d'Amizour, wilaya de Béjaïa, en Algérie (**Figure 4**).



Figure 4 : Les fruits de *Pistacia lentiscus* (photographie originale).

II.2. Méthodes

II.2.1. Préparation de l'échantillon

Les fruits noirs de *Pistacia lentiscus* sont soigneusement sélectionnés, puis lavés et séchés à l'air libre. Ensuite, ils sont stockés au congélateur. Avant leur utilisation, ils sont placés dans une étuve à 37°C afin d'assurer un séchage. Les fruits sont broyés à l'aide d'un mixeur jusqu'à l'obtention d'une pâte. Celle-ci est ensuite soumise à une délipidation par soxhlet avec de l'hexane. À la fin du processus, le déchet est récupéré et conservé au frais à 4°C jusqu'à son utilisation.

II.2.2. Extraction assistée par ultrason

- **Principe**

L'extraction assistée par ultrasons (EAU) repose sur les phénomènes de cavitation, ainsi que sur les effets thermiques et mécaniques générés par les ondes ultrasonores. Ces effets contribuent à perturber la structure des parois cellulaires, facilitant ainsi la diffusion intermoléculaire et la libération complète des substances actives intracellulaires. Cette technique présente plusieurs avantages, notamment un temps d'extraction réduit, une consommation moindre de solvant et un rendement d'extraction élevé (Yang et al., 2021).

- **Protocole**

La poudre des fruits délipidées de *Pistacia lentiscus* a été mise en contact avec un mélange de solvants composé d'éthanol/eau (80% d'éthanol). Elle a ensuite été soumise à une macération pendant quelques minutes, suivie d'une extraction par ultrasons réalisée à une température de 35 °C pendant 45 minutes jusqu'à l'épuisement. La solution obtenue a subi une filtration sous vide deux fois, puis sécher dans une étuve à 37°C jusqu'à évaporation complète du solvant et obtention d'un extrait sec.

Détermination du rendement

Le rendement d'extraction est calculé par la formule suivante :

$$\text{Rendement (\%)} = [(P1-P0) / E] \times 100$$

P1 : Poids d'extrait après évaporation (g)

P0 : Poids de cristalliseur (g)

E : Poids de la poudre avant extraction (g)

II.3. Dosage des composés phénoliques

II.3.1. Dosage des phénols totaux

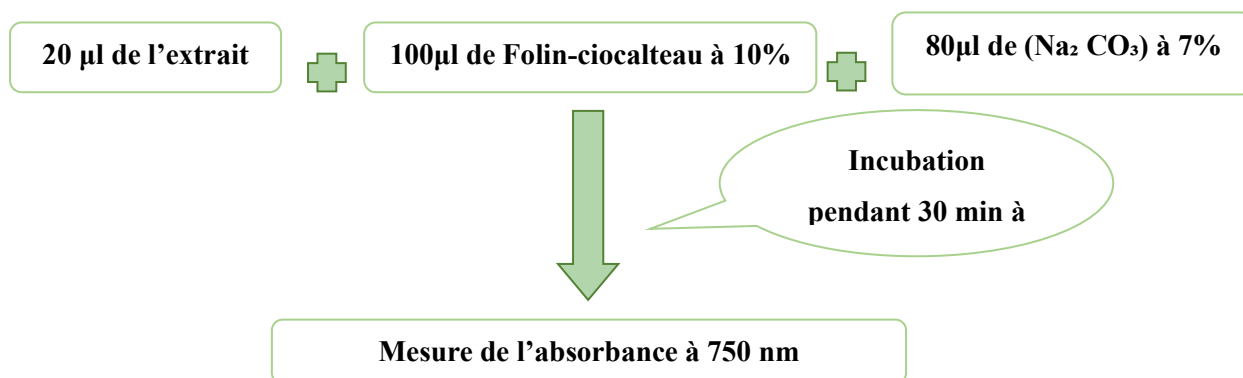
- **Principe**

La méthode de dosage des composés phénoliques repose sur l'utilisation du réactif de folin-ciocalteu, ce dernier est un acide jaune d'un mélange d'acide phosphotungstique et d'acide phosphomolybdique. En présence des composés phénoliques, le réactif est réduit en mélange d'oxydes bleus de tungstène et de molybdène.

La coloration obtenue est proportionnelle à la concentration en composés phénoliques présents dans l'extrait mesurée à environ 760 nm à l'aide d'un spectrophotomètre (**Boizot et Charpentier, 2006**).

- **Protocole**

La teneur en composé phénolique a été déterminée selon la méthode de **Kim et al. (2003)**, avec de légère modification.



Afin de déterminer la teneur de l'extrait en phénols totaux, une courbe d'étalonnage a été réalisée en utilisant l'acide gallique comme référence et la concentration en phénols totaux sont exprimées en milligrammes équivalent d'acide gallique par gramme d'extrait sec (mg EAG/g ES).

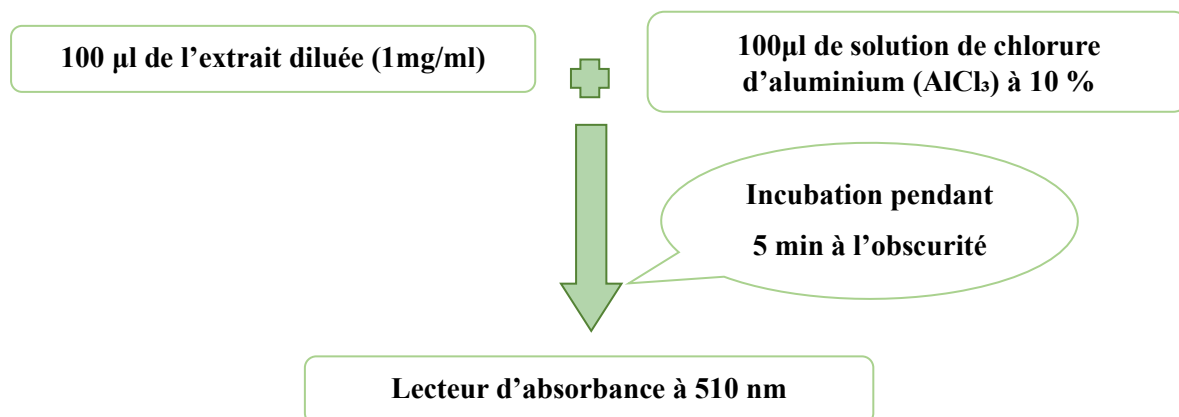
II.3.2. Dosage des Flavonoïdes

- **Principe**

La méthode colorimétrique au chlorure d'aluminium (AlCl₃) repose sur la formation d'un complexe stable entre les ions aluminium (Al³⁺) et le groupe céto en position C-4, ainsi que les groupes hydroxyles en C-3 ou C-5 du noyau flavonoïde. De plus, le réactif AlCl₃ forme également des complexes labiles, en milieu acide, avec les groupes hydroxyles vicinaux situés sur le cycle B des flavonoïdes (**Sultana et al., 2024**).

- **Protocole**

La teneur en flavonoïde de l'extrait de *Pistacia lentiscus* a été déterminée selon la méthode décrit par **Maksimović et al. (2008)**, avec de légères modifications.



Une courbe d'étalonnage a été réalisée avec la quercétine, la teneur en flavonoïdes a été exprimées en mg équivalent de quercétine par gramme d'extrait sec (mg EQ/g ES).

II.3.3. Dosage des tanins

a. Tanins condensés

- **Principe**

La méthode vanilline-HCl repose sur la réaction de la vanilline avec le groupement flavonoïde terminal des tanins condensés (TCs), conduisant à la formation de complexes rouges en milieu acide. Ce phénomène s'explique par la capacité des tanins à se transformer en anthocyanidols (**Ali-Rachedi et al., 2018**).

- **Protocole**

La teneur en tanins condensés a été quantifiée selon le protocole décrit par **Palacios et al. (2021)**. Un volume de 50 µl d'extrait a été mélangé à 1500 µl de la solution de vanilline à 4 %, puis complété par 750 µl d'acide chlorhydrique concentré. Après une incubation de 20 minutes, l'absorbance a été mesurée à 550 nm.

La concentration en tanins condensés a été calculée à partir de la courbe d'étalonnage de la catéchine. Les résultats sont exprimés en milligrammes d'équivalents catéchine par gramme d'extrait sec (mg EC/g ES).

b. Tanins hydrolysables

- **Principe**

Cette méthode est basée sur une réaction de complexation entre les tanins présents dans l'extrait et le trichlorure de fer (FeCl₃), conduisant à la formation d'un complexe coloré rouge violacé (Dif et al., 2015).

- **Protocole**

La teneur en tanins hydrolysables a été déterminée selon la méthode décrite par Palacios et al. (2021). Un volume de 1 ml d'extrait, préalablement dilué dans l'eau (dilution 1 :9), mélangé avec 3,5 ml d'une solution de chlorure ferrique (FeCl₃) à 0,01 M, préparée dans de l'acide chlorhydrique (HCl) à 1 mM. Le mélange a été incubé pendant 5 minutes à l'abri de la lumière. L'absorbance a ensuite été mesurée à 660 nm à l'aide d'un spectrophotomètre.

Une courbe d'étalonnage a été établie à l'aide de l'acide tannique comme standard. Les résultats sont exprimés en milligrammes d'équivalents acide tannique par gramme d'extrait sec (mg EAT/g ES).

II.4. Étude des propriétés de films à base de CMC enrichis en extrait de *Pistacia lentiscus*

II.4.1. Epaisseur

L'épaisseur des films ont été mesuré par un micromètre électronique, cinq emplacement aléatoires autour de chacun des quatre échantillons des films.

II.4.2. Teneur en humidité

La teneur en eau des films a été déterminée selon la méthode décrite par Rhim et Wang. (2013). Les échantillons de film ont été découpés en petits carrés de 3 cm × 3 cm, puis pesés (W1). Ils ont ensuite été placés dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures. Après séchage, les films ont été de nouveau pesés (W2). La teneur en eau (WC) a été calculée comme le pourcentage de la masse initiale perdue au cours du séchage, selon la formule suivante :

$$WC (\%) = 100(W1 - W2) / W1$$

II.4.3. Résistance à la traction

La résistance à la traction a été déterminée selon la méthode de l'American Society for Testing and Materials (ASTM), avec quelques modifications. Un appareil de test de type MTS Criterion™ modèle 43 a été utilisé. Trois échantillons de dimensions 2 × 10 cm ont été préparés pour chaque film. La vitesse de déplacement de la traverse a été réglée à 80 mm/min, avec une cellule de charge de 100 N (Taweechat *et al.*, 2021).

II.5. Evaluation de l'activité antioxydante

II.5.1. Activité de piégeage du radical DPPH (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle)

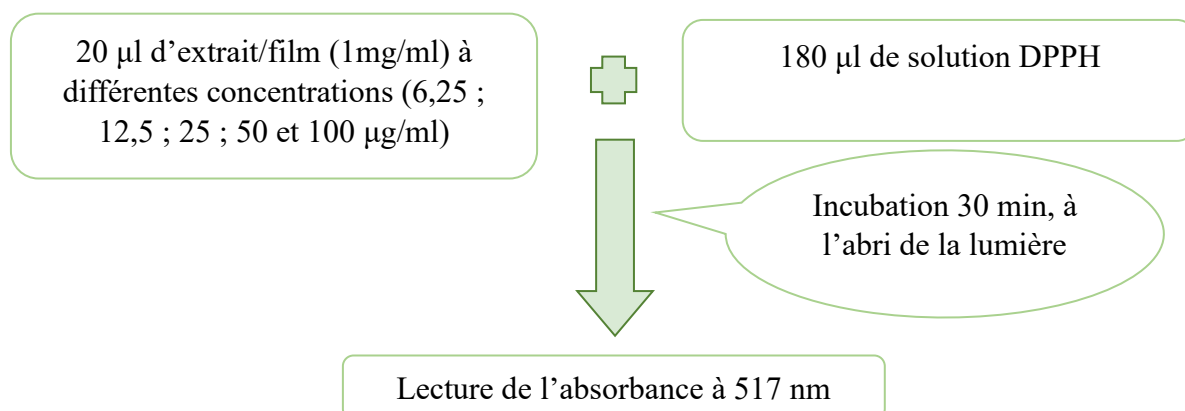
- **Principe**

La méthode repose sur la capacité des antioxydants à neutraliser le radical azoté stable DPPH•, qui présente initialement une couleur violette. Lorsqu'il est réduit par un antioxydant, il se transforme en diphénylpicrylhydrazine, un composé de couleur jaune. Cette réaction s'accompagne d'une diminution de l'absorbance mesurée à 517 nm.

L'intensité de la couleur violette est inversement proportionnelle à la capacité des antioxydants présents à libérer des protons (Pisoschi *et al.*, 2016).

- **Protocole**

L'activité antioxydant des échantillons a été évaluée selon le protocole décrit par Ambarwati *et al.* (2021).



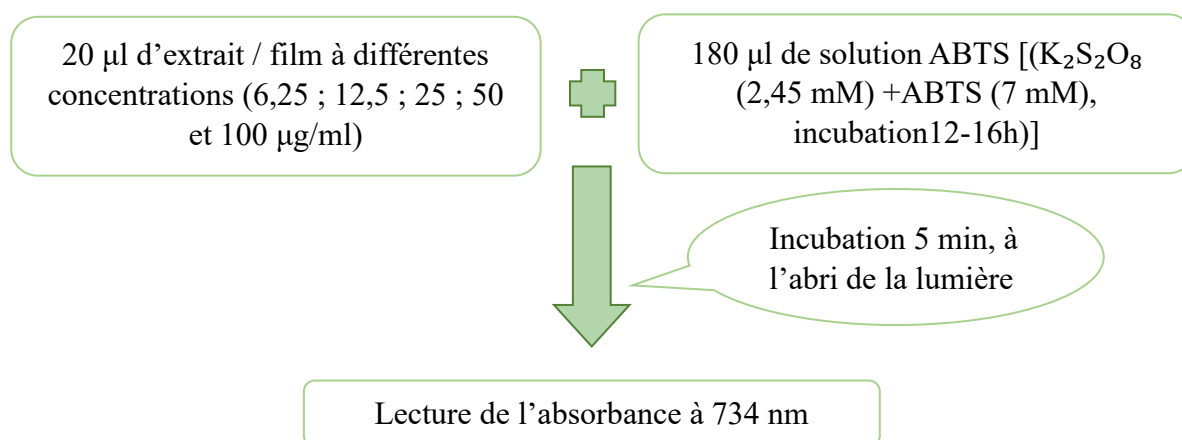
II.5.2. Activité scavenging du radical ABTS

• Principe

La méthode ABTS (2,2'-azino-bis (3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique acid)) repose sur la réduction du radical cation $ABTS^{\bullet+}$, de couleur bleu-vert, par les antioxydants présents dans l'échantillon. Cette réaction entraîne une décoloration mesurable par spectrophotométrie à 734 nm, proportionnelle à l'activité antioxydante (Cano et al., 2023).

• Protocole

Le test ABTS a été réalisé selon la méthode décrite par Re et al. (1999).



Expression des résultats

Les résultats sont exprimés en pourcentage d'inhibition du radical libre DPPH° et du radical $ABTS^{\bullet+}$, calculés selon la formule suivante :

$$\% \text{ d'inhibition} = [(Ac - At) / Ac] \times 100$$

Ac : Absorbance du contrôle.

At : Absorbance du test

II.5.3. Pouvoir réducteur

• Principe

Le test repose sur la capacité des antioxydants à réduire le ferricyanure de potassium en ferrocyanure de potassium. Ce dernier réagit ensuite avec le trichlorure ferrique, conduisant à la formation d'un complexe bleu de ferrocyanure ferrique, dont l'absorbance maximale est détectée à 700 nm (Pisoschi et al., 2016).

- **Protocole**

Le pouvoir réducteur a été déterminé selon la méthode décrite par **Menakh et al. (2020)** avec quelque modification. Un volume de 100 µl d'extrait ou du film a différentes concentrations (25 ; 50 ; 100 ; 150 ; 200 µg/ml), a été mélangé avec 400 µl de tampon phosphate (0,2M ; pH=6,6) et 500 µl de ferricyanate de potassium à 1% ($K_3 Fe (CN)_6$) préparé dans l'eau distillée. 2

Après incubation à 50 °C pendant 20 minutes, 500 µl de TCA à 10 %, puis 400 µl d'eau distillée et 100 µl de $FeCl_3$ à 0,1 % ont été ajoutés. L'absorbance a ensuite été mesurée à 700 nm. Les résultats sont exprimés en $A_{0,5}$ qui est la Concentration qui donne une absorbance de 0,5.

II.5.4. Capacité antioxydante totale

- **Principe**

Le test au phosphomolybdène permet l'évaluation de la capacité antioxydante totale. Il repose sur la capacité des antioxydants à réduire le molybdène (VI) en molybdène (V). Cette réduction assurée par les antioxydants présents dans l'échantillon, conduit à la formation d'un complexe vert phosphate/Mo(V), dont l'intensité est directement proportionnelle à l'activité antioxydante totale (**Aamer et al., 2024**).

- **Protocole**

L'activité antioxydante totale a été mesurée par le test du phosphomolybdène selon le protocole de **Prieto et al. (1999)**. Un volume de 3 ml de réactif (acide sulfurique 0,6 M, phosphate de sodium 28 mM, molybdate d'ammonium 4 mM) a été ajouté à 0,3 ml d'extrait ou des films à une concentration de 100 µg/ml. Le mélange a ensuite été incubé à 95°C pendant 90 minutes, puis l'absorbance a été lue à 695 nm. Le potentiel antioxydant total des extraits a été exprimé en mg d'équivalent acide gallique par gramme d'extrait sec (mg EAG/g d'ES).

II.6. Analyse microbiologique des films

L'analyse microbiologique a pour but d'évaluer l'innocuité des films bioactifs en détectant la présence éventuelle de micro-organismes contaminants. Cette étape est essentielle pour s'assurer de la conformité des matériaux d'emballage aux normes d'hygiène, notamment dans le domaine alimentaire.

- **Protocole**

Conformément à la norme ISO 18593 :2018, des fragments stériles de 1 g de chaque type de film ont été découpés et placés dans des tubes stériles contenant 9 ml d'eau peptonée tamponnée. Après homogénéisation, 1 ml de chaque suspension a été transféré dans des boîtes de pétri stériles.

Des milieux de culture spécifiques ont été ajoutés selon le type de micro-organisme recherché. Le mélange a étéensemencé par la méthode de l'ensemencement en masse. Les boîtes ont ensuite été incubées dans des conditions appropriées (**Tableau V**), puis observées à l'œil nu pour détecter la croissance microbienne. Les résultats ont été exprimés sous forme qualitative : présence (+) ou absence (–) de contamination.

Tableau V : Milieux de culture et conditions d'incubation utilisés pour l'analyse microbiologique des films témoins et les films incorporant l'extrait des fruits de *Pistacia lentiscus*.

Micro-organisme	Levurs et moisissures	Germe aérobie	<i>Staphylococcus aureus</i>	Bactéries lactiques	Coliformes totaux
Milieu de culture	GCA	PCA	BPA	MRS	VRBL
Température d'incubation (°C)	25	30	37	30	30
Temps d'incubation (jours)	5	3	2	2	1

GCA : Glucose Chloramphenicol Agar ; PCA : Plate Count Agar ; BPA : Baird-Parker Base Agar ; MRS : Lactobacillus MRS Agar ; VRBL : Violet Red Bile Lactose Agar.

II.7. Analyse statistique

Une analyse statistique a été effectuée à l'aide du logiciel R. La comparaison des moyennes a été réalisée par le test de Student. La significativité statistique a été évaluée à l'aide de la valeur de p (p-value), avec un seuil de signification fixé à $p < 0,05$. Trois analyses ont été effectuées pour chaque échantillon et la moyenne des trois répétitions a été utilisée comme résultat final.

Chapitre III

Résultats et discussion

III.1. Rendement de l'extraction

L'extraction par sonication à l'aide d'un mélange de solvants éthanol/eau, appliquée sur les fruits de *Pistacia lentiscus* préalablement délipidées par soxhlet, nous a permis d'obtenir un rendement de **11,65 %**.

Ce rendement est supérieur à celui obtenu pour l'extrait éthanolique des fruits de *Pistacia lentiscus* récolté dans la région d'Amizour, Bejaïa, qui étaient de 3,07 % selon les travaux de **Remila et al. (2015)**. Par ailleurs, **Trabelsi et al. (2016)** ont démontré que les paramètres d'extraction, tels que la technique utilisée, la durée ou la température, avaient une influence sur le rendement d'extraction.

III.2. Analyse quantitative : Dosage des composés phénoliques

Dans ce travail, nous avons évalué la teneur en composés phénoliques de l'extrait éthanolique des fruits de *Pistacia lentiscus*. L'analyse a porté sur le dosage des phénols totaux, des flavonoïdes, ainsi que des tanins hydrolysables et condensés, des composés reconnus pour leurs propriétés antioxydantes (**Lang et al., 2024**).

Les résultats quantitatifs relatifs à ces différentes familles de composés sont présentés dans le **Tableau VI**. Les courbes d'étalonnage des quatre standards utilisés sont disponibles en Annexes **I, II, III, IV**.

Tableau VI : Teneurs en composés phénoliques, flavonoïdes et tanins de l'extrait éthanolique des fruits de *Pistacia lentiscus*

Composé phénolique	Phénols totaux (mg EAG/g ES)	Flavonoïde (mg EQ/g ES)	Tannin hydrolysable (mg EAT/g ES)	Tannin condensé (mg EC/g ES)
Teneur (mgE/g ES)	181,7±5,63	41,87±3,89	18,56±2,09	0,99±0,22

Les résultats sont exprimés en moyenne ± écart type (n = 3).

La teneur en phénols totaux de l'extrait des fruits de *Pistacia lentiscus* a été déterminée selon la méthode de Folin-Ciocaltau avec utilisation de l'acide gallique comme standard, à une longueur d'onde de 765nm.

L'extrait éthanolique des fruits de *Pistacia lentiscus* a présenté une teneur en phénols totaux de $181,7 \pm 5,63$ mg EAG/g d'extrait sec (ES).

Cette valeur est nettement supérieure à celle rapportée par **Yemmen et al. (2017)** pour un extrait similaire (41,8 mg EAG/g de matière sèche), mais demeure légèrement inférieure à celle obtenue par **Remila et al. (2015)**, qui ont rapporté $205,97 \pm 6,51$ mg EAG/g ES.

Les flavonoïdes ont été dosés dans l'extrait éthanolique des fruits de *Pistacia lentiscus* par utilisation de la méthode du trichlorure d'aluminium tout en utilisant la quercétine comme standard, à une longueur d'onde de 430 nm.

L'extrait a présenté une teneur en flavonoïdes de $41,87 \pm 3,89$ mg EAG/g ES, indiquant une présence modérée de cette famille de composés. Ce taux est supérieur à celui rapporté par **Remila et al. (2015)**, qui ont obtenu $6,28 \pm 1,04$ mg Rut E/g ES pour les fruits de la même espèce.

La quantification des tanins présents dans l'extrait éthanolique des fruits de *Pistacia lentiscus* a été effectuée en distinguant deux grandes classes de composés : les tanins hydrolysables et les tanins condensés. Cette distinction repose sur leurs structures chimiques et leurs propriétés physico-chimiques (**Scalbert, 1992**).

Selon le **tableau VI**, l'extrait éthanolique des fruits de *Pistacia lentiscus* présente une teneur élevée en tanins hydrolysables avec $18,56 \pm 2,09$ mg EAT/g ES, par rapport aux tanins condensés qui est nettement plus faible avec $0,99 \pm 0,22$ mg EC/g ES. Cette différence peut s'expliquer par la meilleure solubilité des tanins hydrolysables dans l'éthanol et leur accumulation plus importante dans les fruits matures. À l'inverse, les tanins condensés, généralement localisés dans les feuilles ou l'écorce, sont moins solubles dans ce solvant (**Smeriglio et al., 2017 ; Tanaka et al., 2018**).

Les résultats obtenus montrent que l'extrait éthanolique des fruits de *Pistacia lentiscus* est particulièrement riche en polyphénols, en flavonoïdes et en tanins hydrolysables. Les différences observées avec les données rapportées dans la littérature peuvent être attribuées à plusieurs facteurs : la méthode d'extraction, le stade de maturité des fruits, la localisation géographique ou encore la saison de récolte (**Dragović et al., 2020**).

Le profil polyphénolique des extraits des plantes peut varier sous l'influence de divers facteurs parmi lesquels la variété, le climat et les différentes maladies qui peuvent affecter la plante (**Ryan et al., 1999**).

Cependant, le contenu phénolique dans les extraits de la plante dépend également du type d'extrait, c'est à dire de la polarité du solvant utilisé dans l'extraction. La solubilité élevée des phénols dans les solvants polaires donne la concentration élevée de ces composés dans les extraits obtenus en utilisant les solvants polaires pour l'extraction (Conde *et al.*, 2009).

III.3. Caractérisation des propriétés physico-chimiques et mécaniques des films incorporant l'extrait des fruits de *Pistacia lentiscus*

Les caractéristiques physico-chimiques (comme la teneur en humidité), physiques (comme l'épaisseur) et mécaniques (comme la résistance à la traction) des films témoins et des films incorporant l'extrait éthanolique des fruits de *Pistacia lentiscus* ont été évalués afin de déterminer leurs performances. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau VII : Récapitulatif des résultats des propriétés physico-chimiques et mécaniques des films témoins (F1 et F2) et des films incorporant l'extrait éthanolique des fruits de *Pistacia lentiscus* (F1EFPL et F2EFPL).

	Epaisseur (mm)	Résistance à la traction (MPa)	Teneur en humidité (%)
F1	0,176 ± 0,004***	28,55±1,81**	34,5 ± 1,38***
F2	0,209 ± 0,003	19,62±0,67	45,93 ± 1,26
F1EFPL	0,150 ± 0,002**	30,5±5,89*	32,85 ± 1,54**
F2EFPL	0,211 ± 0,005	20,02±0,84	44,03 ± 0,57

Les valeurs sont exprimées en moyenne ± écart-type (n = 3). Les astérisques indiquent les différences significatives entre F1 et F2, ainsi qu'entre F1EFPL et F2EFPL, selon le test t de Student (*p < 0,05 ; **p < 0,01 ; ***p < 0,001). Aucune différence statistiquement significative n'a été observée entre F1 et F1EFPL, ni entre F2 et F2EFPL (p > 0,05)

Les données du **tableau VII** indiquent que le film F2 présente une épaisseur significativement plus élevée (0,209 ± 0,003 mm) que celle du film F1 (0,170 ± 0,004 mm), avec une différence hautement significative (p < 0,001). Une tendance similaire est observée pour les films enrichis en extrait de fruits de *Pistacia lentiscus*, où F2EFPL (0,211 ± 0,005 mm) est également significativement plus épais que F1EFPL (0,150 ± 0,002 mm) (p < 0,01). Il convient de rappeler que les formulations F1 et F2 diffèrent par leur teneur en glycérol, respectivement de 2g et 3g, y compris dans leurs versions enrichies.

Ces résultats montrent clairement que l'augmentation de la concentration en glycérol entraîne une hausse de l'épaisseur des films. Des observations similaires ont été rapportées dans des travaux antérieurs, notamment sur des films à base d'amidon de sajou (Lintang *et al.*, 2021) ainsi que sur des films composites élaborés à partir de gélatine, de CMC et d'alginate de sodium

(**Bhatia et al., 2024**). Cette augmentation est généralement attribuée à l'effet plastifiant du glycérol, qui perturbe les interactions intermoléculaires au sein de la matrice polymérique, augmentant le volume libre (c'est-à-dire l'espace entre les chaînes polymériques).

Il en résulte une structure plus relâchée, conduisant à la formation de films plus épais (**Bhatia et al., 2024**).

Comme présenté dans le **tableau VII**, les films F2 ($19,62 \pm 0,67$ MPa) et F2EFPL ($20,02 \pm 0,84$ MPa) présentent une résistance à la traction significativement plus faible que F1 ($28,55 \pm 1,81$ MPa) et F1EFPL ($30,5 \pm 5,8$ MPa), avec des valeurs de $p < 0,01$ et $p < 0,05$ respectivement.

Ces résultats indiquent que l'augmentation de la concentration en glycérol diminue la résistance mécanique du film. Ce comportement a également été observé dans d'autres études sur les films à base de chitosane (**Gadgery et Sharma, 2020**). Cette diminution peut être attribuée à l'effet plastifiant du glycérol, qui réduit les interactions intermoléculaires entre les chaînes polymériques, notamment les points d'attache, permettant ainsi une plus grande mobilité moléculaire. Cette réduction des interactions entraîne une structure plus souple mais moins résistante à la traction (**Eslami et al., 2023**).

L'analyse statistique montre que les films F2 ($45,93 \pm 1,26$ %) et F2EFPL ($44,03 \pm 0,57$ %) présentent une teneur en humidité significativement plus élevée que leurs homologues F1 ($34,5 \pm 1,38$ %) et F1EFPL ($32,85 \pm 1,54$ %), avec des différences hautement significatives ($p < 0,001$ et $p < 0,01$, respectivement).

Ces résultats suggèrent que l'augmentation de la concentration en glycérol entraîne une augmentation de la teneur en humidité, ce qui est en accord avec les résultats rapportés par **Eslami et al. (2023)**. Cette augmentation est attribuée à la nature hydrophile du glycérol, qui contient plusieurs groupes hydroxyles (-OH) capables de former des liaisons hydrogène avec les molécules d'eau, favorisant leur rétention dans la matrice polymérique du film (**Sanyang et al., 2015 ; Eslami et al., 2023**).

L'étude statistique montre une absence de différence significative entre F1 et F1EFPL, ainsi qu'entre F2 et F2EFPL ($p > 0,05$), concernant l'épaisseur, la résistance à la traction et la teneur en humidité. Cela suggère que l'incorporation de l'extrait des fruits de *Pistacia lentiscus* n'exerce pas d'effet notable sur les propriétés physico-chimiques et mécaniques des films. Ces observations concordent avec celles rapportées par **Rachtanapun et al. (2021)**, qui ont montré

que l'ajout d'un extrait de curcumine dans des films à base de chitosane n'entraînait pas de modification significative de l'épaisseur ni de la teneur en humidité.

En revanche, nos résultats divergent de ceux de **Kaya et al. (2018)**, qui ont observé une diminution marquée de la résistance à la traction dans des films de chitosane enrichis en extrait de *Pistacia terebinthus*. Cette divergence pourrait s'expliquer par plusieurs facteurs, tels que la nature du polymère utilisé, l'origine botanique et géographique des extraits, ou encore la concentration de l'extrait incorporé (**Siripatrawan et Harte, 2010**).

III.4. Évaluation des propriétés antioxydantes

L'activité antioxydante des films composites a été évaluée à l'aide de plusieurs méthodes *in vitro* complémentaires : le test DPPH, le test ABTS, le pouvoir réducteur et la capacité antioxydante totale (TAC). Ces analyses ont porté sur les films témoins (F1, F2), les films enrichis en extrait de *Pistacia lentiscus* (F1EFPL, F2EFPL), l'extrait seul (EFPL), ainsi qu'un standard de référence (acide gallique).

III.4.1. Mesure de la capacité antioxydante par le test DPPH

L'activité antioxydante des différents échantillons a été évaluée par le test DPPH. Les résultats sont exprimés en pourcentages d'inhibition du radical DPPH^{•+} et présentés dans la **figure 5** et les valeurs d'IC₅₀ définie comme la concentration d'antioxydant nécessaire pour inhiber 50 % du radical DPPH^{•+}, sont reportées dans le **tableau VIII**.

Tableau VIII : Présentation des résultats d'IC₅₀ du test DPPH pour l'extrait éthanolique des fruits de *Pistacia lentiscus* (EFPL), les films enrichis F1EPL et F2EPL, les films témoins (F1 et F2) et l'acide gallique (AG).

Echantillons	F1	F1EFPL	F2	F2EFPL	EFPL	AG
IC ₅₀ (µg/ml)	/	24,83	/	23,08	20,87	9,07

/ : valeur d'IC₅₀ non déterminée

Le test DPPH repose sur la capacité des antioxydants à neutraliser le radical libre DPPH^{•+}. Les films témoins F1 et F2 ont montré une activité très faible (0,94 % et 2,08 % à 100 µg/ml), traduisant une faible efficacité radicalaire. En revanche, l'incorporation de l'extrait a permis une nette amélioration, atteignant 76,45 % d'inhibition pour les deux films enrichis, avec des IC₅₀ de 24,83 µg/ml (F1EFPL) et 23,08 µg/ml (F2EFPL).

Ces valeurs proches de l'extrait seul (IC₅₀ = 20,87 µg/ml) confirment que les propriétés antioxydantes de l'extrait sont bien conservées après incorporation. La différence avec l'acide gallique (IC₅₀ = 9,07 µg/ml) reste attendue mais souligne néanmoins la puissance antioxydante de l'extrait naturel.

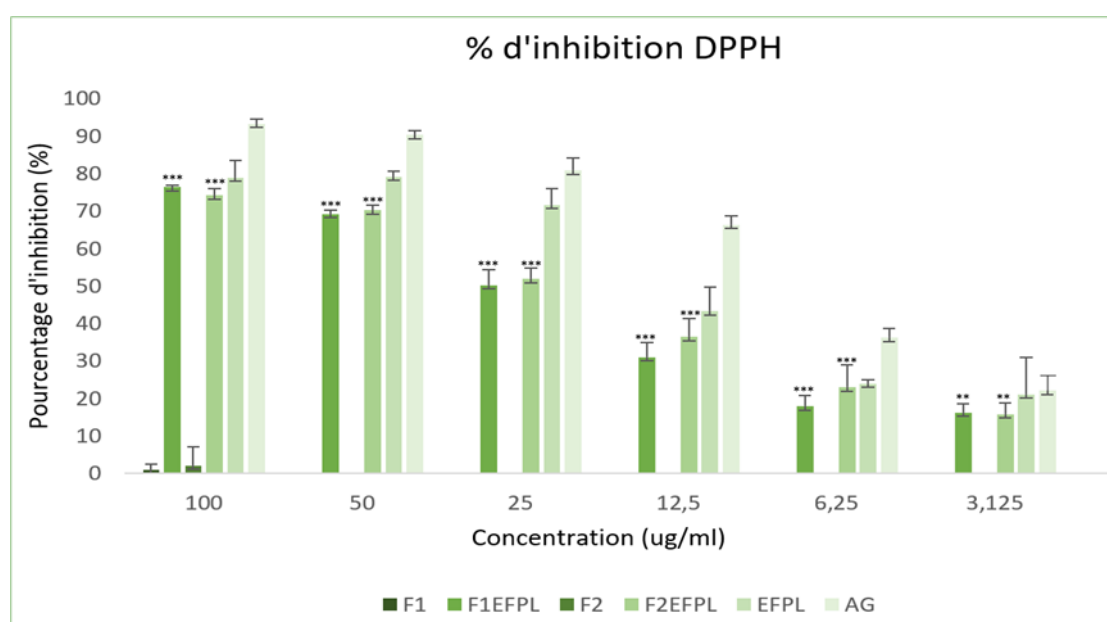


Figure 5 : Activité antioxydante de l'extrait éthanolique des fruits de *Pistacia lentiscus*(EFPL), des films incorporant l'extrait éthanolique(F1EFPL et F2EFPL), des films témoin(F1 et F2) et de l'acide gallique(AG) contre le radical DPPH[•]. Les valeurs sont exprimées en moyenne ±écart type (n=3). Les astérisques indiquent une différence significative par rapport au témoin (*** : p < 0,001 ; ** : p < 0,01 ; * : p < 0,05 ; ns : non significatif).

L'analyse statistique a révélé une différence significative (p<0.05) des pourcentages d'inhibition entre les films témoin (F1, F2) et les films enrichis d'extrait des fruits de *Pistacia lentiscus* (F1EFPL et F2EFPL) pour toutes les concentrations testées.

Par ailleurs, l'absence de différence significative entre F1EFPL et F2EFPL indique que la variation des proportions de formulation n'a pas affecté significativement l'efficacité du système, probablement grâce à une bonne dispersion des actifs dans la matrice (Siracusa et al., 2008).

III.4.2. Capacité anti-radical ABTS

Le test ABTS a également été réalisé afin d'évaluer l'activité antioxydante des échantillons selon une méthode complémentaire. Les valeurs d'IC₅₀ correspondantes sont reportées dans le **tableau IX** et les pourcentages d'inhibition du radical ABTS•⁺ sont présentés dans la figure ci-dessous :

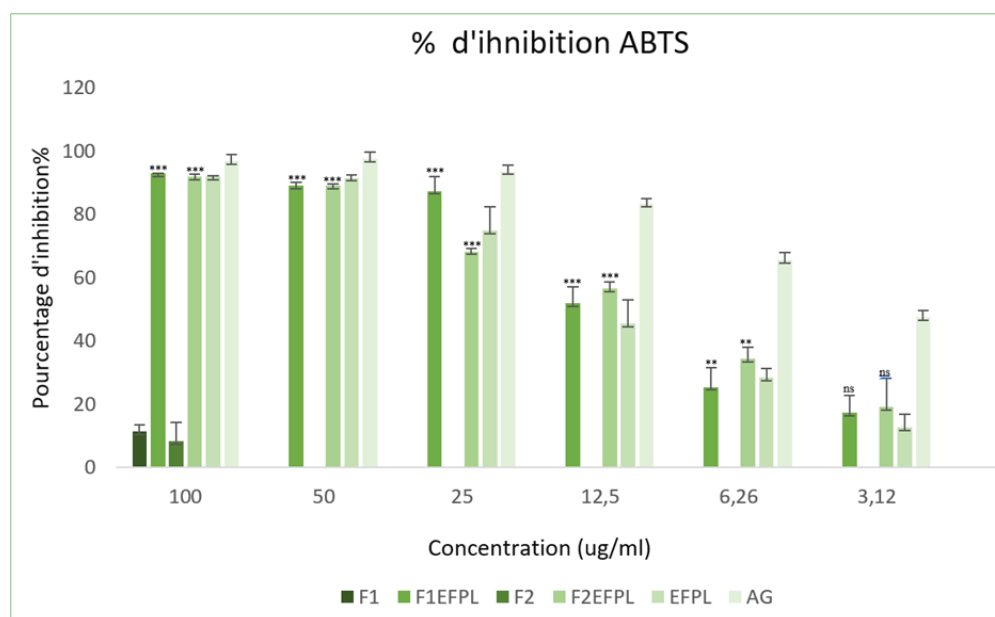


Figure 6 : Activité antioxydante de l'extrait éthanolique des fruits *Pistacia lentiscus* (EFPL), des films incorporant l'extrait éthanolique (F1EFPL et F2EFPL), les films témoin (F1 et F2) et de l'acide gallique (AG) contre le radicale ABTS. Les valeurs sont exprimées en moyenne ±écart type (n=3). Les astérisques indiquent une différence significative par rapport au témoin (*** : p < 0,001 ; ** : p < 0,01 ; * : p < 0,05 ; ns : non significatif).

Les films F1 et F2 ont montré une faible activité (11,4 % et 8,44 % à 100 µg/ml), tandis que F1EFPL et F2EFPL, ont respectivement atteint 92,96 % et 91,83 % (**figure 6**), avec des IC₅₀ de 13,08 et 15,37 µg/ml. Ces résultats sont comparables à l'extrait seul (92,44 %, IC₅₀ = 15,23 µg/ml), et relativement proches du standard AG (96,89 %, IC₅₀ = 3,54 µg/ml).

Tableau IX : Résultats d'IC₅₀ du test ABTS de l'extrait éthanolique des fruits de *Pistacia lentiscus* (EFPL), des films incorporant l'extrait éthanolique (F1EFPL et F2EFPL), des films témoin (F1 et F2) et de l'acide gallique (AG).

Echantillons	F1	F1EPL	F2	F2EPL	EPL	AG
IC ₅₀ (µg/ml)	/	13,08	/	15,37	15,23	3,54

/ : valeur d'IC₅₀ non déterminée

L'analyse statistique confirme une amélioration significative ($p < 0,05$) avec l'enrichissement en extrait. Ces résultats montrent que les composés bioactifs conservent leur activité antioxydante dans la matrice, même après transformation.

Le test ABTS, reconnu pour sa polyvalence, permet d'évaluer à la fois des antioxydants hydrophiles et lipophiles, contrairement au DPPH plus limité aux composés lipophiles. Cette caractéristique peut expliquer les pourcentages d'inhibitions plus élevées et les IC_{50} plus faibles obtenues avec l'ABTS (Untea et al., 2018).

III.4.3. Pouvoir réducteur

Ce test mesure la capacité de l'extrait phénolique des fruits de *Pistacia lentiscus* ainsi que des films incorporant l'extrait à réduire les ions ferriques (Fe^{3+}) en ions ferreux (Fe^{2+}) a été mis en évidence, illustrer dans la **figure 7**, à travers le test du pouvoir réducteur. Les résultats sont exprimés sous forme d' $A_{0,5}$ qui représente la concentration de l'échantillon (en $\mu\text{g/ml}$) nécessaire pour atteindre une absorbance de 0,5.

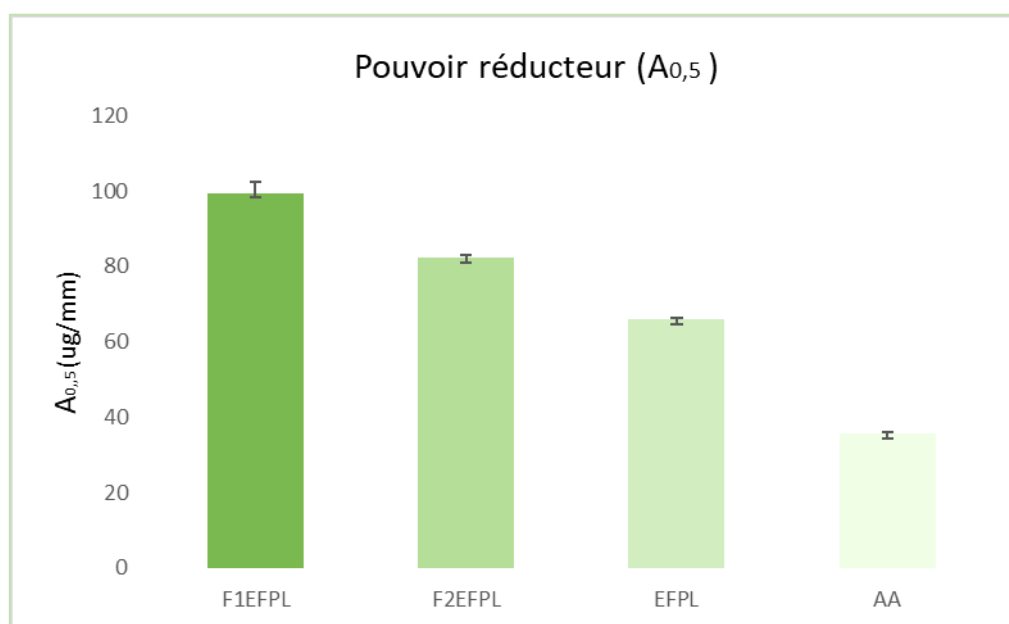


Figure 7 : Pouvoir réducteur de l'extrait éthanolique des fruits *Pistacia lentiscus* (EFPL), des films incorporant l'extrait éthanolique (F1EFPL et F2EFPL) et d'acide ascorbique (AA) contre les ions ferriques.

Les résultats montrent que l'extrait EFPL présente une bonne capacité réductrice ($A_{0,5} = 65,08 \mu\text{g/ml}$), relativement inférieure à celle de l'acide ascorbique ($A_{0,5} = 35,45 \mu\text{g/ml}$), les valeurs restent relativement proches, ce qui indique que l'extrait peut réduire efficacement les ions ferriques (Fe^{3+}) en ions ferreux (Fe^{2+}) à des concentrations modérées.

Les deux films enrichis présentent une activité modérément plus faible ($A_{0,5}$ de 82,06 pour F1EFPL et 99,25 pour F2EFPL), probablement en raison de l'emprisonnement partiel des antioxydants dans la matrice filmogène, limitant leur disponibilité (Benzie et Strain, 1996 ; Vargas *et al.*, 2008).

L'incorporation de l'extrait dans les deux films (F1EFPL et F2EFPL) a entraîné une augmentation des valeurs $A_{0,5}$ (82,06 et 99,25 $\mu\text{g/ml}$), indiquant une diminution apparente du pouvoir réducteur. Cette baisse s'explique probablement par une réduction de la disponibilité des composés actifs, retenus ou piégés dans la matrice du film.

III.4.4. Capacité antioxydante totale

La capacité antioxydante totale (TAC), exprimée en équivalents d'acide ascorbique, permet d'évaluer l'action synergique des antioxydants hydrosolubles et liposolubles. Les résultats des échantillons testés sont présentés dans le **tableau X**.

Tableau X : Récapitulatif des résultats de capacité antioxydante totale (TAC) de l'extrait éthanolique des fruits de *Pistacia lentiscus* (EFPL), des films incorporant l'extrait éthanolique (F1EFPL et F2EFPL) et des films témoin (F1 et F2).

Les échantillons	F1	F1EFPL	F2	F2EFPL	EFPL
TAC (mgEAA/gES)	47,28±3,97	84,95±3,62	55,09±3,41	90,22±4,20	127,46±3,38

Les résultats sont exprimés en moyenne \pm écart type (n = 3).

Les résultats montrent que l'extrait EFPL possède une forte capacité antioxydante, avec une valeur de $127,46 \pm 3,38$ mg EAA/g ES. Cette valeur est nettement supérieure à celle rapportée par Dkhil *et al.* (2023), qui ont trouvé une TAC de $31,20 \pm 1,87$ mg AAE/g MS pour une fraction flavonoïdique de *Pistacia atlantica*.

Cette différence peut s'expliquer par la diversité des composés présents dans l'extrait brut de *P. lentiscus*, qui agissent en synergie pour renforcer l'activité antioxydante globale, ainsi que par la variabilité interspécifique entre *P. lentiscus* et *P. atlantica*. L'incorporation de cet extrait dans des matrices polymériques a également permis d'améliorer la capacité antioxydante des films. En effet, les films F1EFPL et F2EFPL ont présenté des valeurs de TAC de $84,95 \pm 3,62$ et $90,22 \pm 4,20$ mg EAA/g ES, respectivement, contre $47,28 \pm 3,97$ et $55,09 \pm 3,41$ mg EAA/g ES pour les témoins F1 et F2. Ces résultats démontrent clairement que l'ajout de l'extrait de *P. lentiscus* augmente significativement l'activité antioxydante des films.

III.5. Analyses microbiologiques des films

La stabilité microbiologique des matériaux d'emballage constitue un paramètre fondamental pour garantir la sécurité sanitaire des produits alimentaires qu'ils protègent. Dans ce cadre, une analyse a été réalisée afin d'évaluer la présence éventuelle de micro-organismes indicateurs dans les films formulés. Les résultats, exprimés sous forme de présence (+) ou d'absence (-) de contamination, sont présentés dans le **tableau XI** ci-dessous.

Tableau XI : Résultat du test de contaminations des films incorporant l'extrait éthanolique des fruits de *Pistacia lentiscus* (F1EFPL et F2EFPL) et Film témoin (F1 et F2), (-) : absence de contamination.

Micro-organisme	F1	F1EFPL	F2	F2EFPL
Leveurs et moisissures	-	-	-	-
Germe aérobie	-	-	-	-
<i>Staphylococcus aureus</i>	-	-	-	-
Bactéries lactiques	-	-	-	-
Coliformes totaux	-	-	-	-

Les tests ont révélé qu'aucune croissance microbienne n'a été détectée pour l'ensemble des micro-organismes ciblés, tant dans les films enrichis en extrait de *Pistacia lentiscus* (F1EFPL et F2EFPL) que dans les films témoins (F1 et F2) (**annexe VII**). Cette absence de contamination témoigne de l'efficacité des conditions de fabrication, de séchage et de conditionnement, qui ont été rigoureusement maîtrisées sur le plan hygiénique. Ainsi, les films produits répondent aux exigences de sécurité microbiologique nécessaires pour des applications dans le domaine de l'emballage alimentaire.

Les résultats obtenus dans notre étude ne permettent pas d'attribuer l'absence de contamination à l'action de l'extrait. En effet, les films sans extrait (F1 et F2) ont montré un profil microbiologique identique à celui des films enrichis. Il apparaît donc que l'effet antimicrobien potentiel de l'extrait ne peut être confirmé dans ce contexte, en l'absence de tests spécifiques visant à évaluer directement son activité contre des souches microbiennes pathogènes ou d'altération.

Cette observation met en évidence l'importance de compléter ce type d'évaluation par des tests ciblés, tels que des essais d'inhibition de croissance sur gélose ou en milieu liquide, réalisés avec des micro-organismes représentatifs de l'altération alimentaire (par exemple *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* ou *Salmonella spp.*).

Le développement de films bioactifs intégrant des extraits végétaux antioxydants constitue une stratégie prometteuse pour améliorer la stabilité et la fonctionnalité des matériaux d'emballage alimentaire. L'utilisation de l'extrait éthanolique des fruits de *Pistacia lentiscus*, riche en composés phénoliques, a permis d'explorer à la fois ses effets antioxydants, protecteurs et antimicrobiens, au travers d'une série de tests *in vitro*. Les résultats obtenus à partir des différentes analyses apportent une vision globale et cohérente de l'efficacité fonctionnelle de ces films composites.

L'incorporation de l'extrait de *Pistacia lentiscus* a démontré un fort potentiel antioxydant dans plusieurs systèmes tests (DPPH, ABTS, pouvoir réducteur, capacité antioxydante totale). Cette activité est étroitement liée à la composition chimique de l'extrait, particulièrement en flavonoïdes, tanins hydrolysables, et acides phénoliques. Ces composés agissent via plusieurs mécanismes : la neutralisation des radicaux libres par transfert d'électron ou d'atome d'hydrogène, la stabilisation des radicaux par résonance et la chélation des ions pro-oxydants **(Pisoschi et Pop, 2015 ; Ivanova et al., 2020)**.

Les composés phénoliques présents dans *Pistacia lentiscus*, notamment les flavonoïdes, les tanins hydrolysables et les acides phénoliques, sont reconnus pour leur capacité à neutraliser les ERO par divers mécanismes biochimiques. L'un des modes d'action les plus couramment observés est le transfert d'un atome d'hydrogène à un radical libre, conduisant à sa stabilisation. Ce processus repose essentiellement sur la présence de groupes hydroxyles en position ortho ou para sur le noyau aromatique des flavonoïdes ou sur les structures condensées des tanins, permettant une délocalisation efficace de l'électron célibataire, stabilisant ainsi le radical formé **(Pisoschi et Pop, 2015 ; Ivanova et al., 2020)**.

En parallèle, les composés phénoliques exercent également leur activité par transfert monoélectronique, réduisant les agents oxydants comme les cations ferriques ou les radicaux azotés en espèces non réactives. Ce mécanisme est à la base du pouvoir réducteur observé dans les extraits végétaux riches en polyphénols. Les structures polyhydroxylées des flavonoïdes et des tanins leur confèrent une excellente capacité à agir comme donneurs d'électrons dans des systèmes redox biologiques, ce qui contribue à limiter la formation des produits d'oxydation dans les matrices alimentaires **(Rice-Evans et al., 1996)**.

De plus, les résultats indiquent que les propriétés antioxydantes de l'extrait sont globalement préservées après incorporation dans la matrice filmogène, ce qui suggère une

bonne compatibilité physico-chimique entre les composants du film et les antioxydants naturels. Cette stabilité est cruciale, car certains processus de formulation, tels que le chauffage ou le séchage, peuvent parfois altérer la structure des composés sensibles. Dans ce cas, la conservation de l'activité biochimique suggère que les interactions entre les antioxydants et la matrice n'entravent pas leur réactivité, et que leur mobilité au sein du réseau polymérique reste suffisante pour permettre une interaction efficace avec les espèces radicalaires (**Siracusa et al., 2008 ; Kumar et al., 2021**).

Par ailleurs, les résultats obtenus avec les tests basés sur la capacité totale antioxydante confirment l'action synergique entre les différents composés phénoliques présents dans l'extrait. En effet, il est bien établi que l'effet combiné de plusieurs antioxydants peut surpasser la somme de leurs effets individuels. Les interactions positives entre les flavonoïdes, les tanins, les acides phénoliques et d'autres métabolites secondaires renforcent la capacité globale du système à intercepter les radicaux libres et à prévenir l'initiation ou la propagation des réactions oxydatives (**Domínguez et al., 2018**).

Le test de dénaturation des protéines du blanc d'œuf a été utilisé comme modèle de protection cellulaire contre les agressions oxydatives ou inflammatoires. Ce modèle repose sur la capacité d'un extrait à inhiber la dénaturation thermique des protéines, phénomène qui simule l'altération des structures biologiques lors de processus inflammatoires. L'extrait de *Pistacia lentiscus*, et les films qui en sont enrichis, ont montré une inhibition marquée de cette dénaturation, ce qui confirme leur potentiel protecteur.

Cette activité est étroitement liée à la richesse en composés phénoliques de l'extrait de *Pistacia lentiscus*, bien connue pour sa teneur élevée en polyphénols. Plusieurs études ont rapporté la présence d'acide gallique, d'acide caféique, la catéchine, la quercétine, la myricétine, ainsi que de tanins hydrolysables et condensés dans les extraits des fruits et feuilles de cette espèce (**Bouaziz et al., 2009 ; Derwich et al., 2010**). Ces composés sont réputés pour leur capacité à interagir avec les protéines, formant des complexes stables via des liaisons hydrogène, des ponts salins, ainsi que des interactions hydrophobes. De telles interactions stabilisent la conformation tridimensionnelle des protéines, réduisant ainsi leur sensibilité aux agents dénaturants, notamment la chaleur (**Rawel et al., 2005 ; Shahidi et Dissanayaka, 2023**).

Dans ce contexte, l'action protectrice observée peut être attribuée à ces mécanismes moléculaires. Les flavonoïdes tels que la quercétine et la catéchine, par exemple, peuvent se lier préférentiellement aux régions hydrophobes des protéines et ainsi limiter leur dépliement

ou leur agrégation. Les tanins, quant à eux, présentent une forte affinité pour les protéines globulaires, entraînant une stabilisation du réseau de liaisons intra- et intermoléculaires.

L'analyse microbiologique a révélé l'absence de micro-organismes indicateurs (tels que coliformes totaux, levures et moisissures) dans les films enrichis, ce qui témoigne d'une bonne stabilité hygiénique du système. Cette absence peut s'expliquer par plusieurs facteurs, en premier lieu la présence de composés antimicrobiens naturels dans l'extrait de *Pistacia lentiscus*, notamment certains tanins, acides phénoliques et terpènes, connus pour leur action inhibitrice sur une large gamme de bactéries et de champignons (**Al-Zaben et al., 2023**).

Les mécanismes d'action de ces composés antimicrobiens reposent principalement sur leur capacité à altérer la perméabilité membranaire des cellules microbiennes et perturber les processus enzymatiques. La libération contrôlée de ces substances depuis la matrice polymérique contribue à créer un microenvironnement défavorable à la croissance microbienne. L'intégrité hygiénique des films est également renforcée par les conditions de préparation (température, pH, agents filmogènes) qui limitent la contamination (**Appendini et Hotchkiss, 2002**).

Conclusion

Les fruits de *Pistacia lentiscus* constituent une source précieuse de composés bioactifs tels que les polyphénols, les flavonoïdes et les tanins, leur conférant un potentiel intéressant pour des applications fonctionnelles, notamment dans le domaine de l'emballage alimentaire. Dans cette étude, des extraits éthanoliques issus de résidus de fruits de *P. lentiscus* ont été valorisés par leur incorporation dans des films biodégradables à base de carboxyméthylcellulose (CMC) et de glycérol, dans le but d'exploiter leurs propriétés antioxydantes et protectrice.

Les films obtenus ont été caractérisés sur les plans physico-chimique, mécanique et fonctionnel. Il a été démontré que l'augmentation de la teneur en glycérol entraîne une hausse de l'humidité résiduelle, une diminution de la résistance à la traction et une augmentation de l'épaisseur du film. En revanche, l'ajout de l'extrait de *P. lentiscus* n'a pas significativement altéré ces propriétés mécaniques.

D'un point de vue fonctionnel, l'incorporation de l'extrait a conféré aux films une activité antioxydante notable, confirmée par les tests DPPH, ABTS, du pouvoir réducteur et de la capacité antioxydante totale. Les films enrichis ont présenté une efficacité comparable à celle de l'extrait libre, tandis que les films témoins sont restés dépourvus d'activité. Par ailleurs, ces films ont montré une capacité à limiter la dénaturation des protéines, soulignant leur potentiel en tant que matériaux actifs pour la conservation d'aliments sensibles, tels que les produits carnés.

Bien que cette recherche ait permis de concevoir et d'évaluer un matériau d'emballage bioactif innovant, plusieurs pistes méritent d'être explorées afin d'optimiser ses performances et d'envisager son application à l'échelle industrielle. Des investigations complémentaires portant sur la caractérisation morphologique par microscopie électronique à balayage (MEB), l'analyse thermique (TGA) ainsi que des essais mécaniques approfondis (Allongement à la rupture) sont recommandées. Par ailleurs, des tests en conditions réelles sur des denrées alimentaires permettront de valider leur efficacité et leur innocuité dans un contexte applicatif.

Ce travail ouvre la voie au développement de films d'emballage biodégradables et fonctionnels, combinant l'utilisation de polymères naturels et d'extraits végétaux locaux, contribuant ainsi à la réduction de l'impact environnemental des plastiques tout en améliorant la sécurité et la conservation des aliments.

Référence bibliographique

-A-

Aamer HA, Elalem SF, Al-Askar AA, Sharaf OA, Gaber MA, Kowalczewski P, Behiry S, Abdelkhalek A. Activités antioxydantes et antimicrobiennes de l'extrait méthanolique de *Salsola imbricata* et sa caractérisation phytochimique. *Open Life Sci* 2024 ;19(1) :20221011.

Abdullah A, Cai J, Hafeez MA, Wang Q, Farooq S, Huang Q, Tian W, Xiao J. Biopolymer-based functional films for packaging applications. *Front Nutr* 2022 ;9 :1000116.

Aissat AK, Chaher-Bazizi N, Richard T, Kilani-Atmani D, Pedrot E, Renouf E, Atmani D, Valls Fonayet J. Analysis of individual anthocyanins, flavanols and other polyphenols in *Pistacia lentiscus* L. fruits during ripening. *J Food Compos Anal* 2022 ;106 :104286.

Al Saghir MG, Porter DM. Taxonomy revision of the genus *Pistacia* L. (Anacardiaceae). *Am J Plant Sci* 2012 ;3(1) :24–27.

Alabrahim OA, Azzazy HMES. Antimicrobial activities of *Pistacia lentiscus* essential oils nanoencapsulated into hydroxypropyl- β -cyclodextrins. *ACS Omega* 2024 ;9(11) :12622–12634.

Ali-Rachedi F, Meraghni S, Touaibia N, Mesbah S. Analyse quantitative des composés phénoliques d'une endémique algérienne *Scabiosa atropurpurea* subsp. *maritima* L. *Bull Soc R Sci Liège*. 2018 ;87 :13–21.

Al-Zaben M, Al Zaban M, Naghmouchi S, Alsaloom AN, Al-Sugiran N, Alrokban A. Comparison of phytochemical composition, antibacterial, and antifungal activities of extracts from three organs of *Pistacia lentiscus* from Saudi Arabia. *Molecules* 2023 ;28(13) :5156.

Amara N, Benrima A, Anba C, Belkhir H. Activité antimicrobienne de l'huile essentielle des fruits du *Pistacia lentiscus* (*Pistacia lentiscus* L.). *Rev Agrobiologia* 2019 ;9(2) :1669–1676.

Ambarwati NSS, Elya B, Mahayasih PGMW, Awang MSN, Omar H. Antioxidant activity of *Litsea petiolata* Hk. F. *J Phys Conf* 2021 ;1869 :1–5.

Appendini P, Hotchkiss JH. Review of antimicrobial food packaging. *Innov Food Sci Emerg Technol*. 2002 ;3(2) :113–126.

-B-

Bammou M, Daoudi A, Slimani I, Najem M, Bouiamrine E, Ibijbjen J, Nassiri L. Valorisation du lentisque *Pistacia lentiscus* L. : Étude ethnobotanique, screening phytochimique et pouvoir antibactérien. *J Appl Biosci* 2015 ;86 :7966–7976.

Barreca D. Mechanisms of plant antioxidants action. *Plants* 2021 ;10(1) :35.

Belhachat D, Aid F, Mekimene L, Belhachat M. Phytochemical screening and in vitro antioxidant activity of *Pistacia lentiscus* berries ethanolic extract growing in Algeria. *Mediterr J Nutr Metab* 2017 ;10(3) :273–285.

Benzie IFF, Strain JJ. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of antioxidant power : the FRAP. *Anal Biochem* 1997 ;239 :70–76.

Bhatia S, Al-Harrasi A, Almohana IH, Albayati MS, Jawad M, Shah YA, Ullah S, Philip AK, Halim SA, Khan A, Anwer MK, Koca E, Aydemir LY, Diblan S. Étude des propriétés physicochimiques et de l'arrimage moléculaire des films plastifiés à base d'alginate de sodium, de carboxyméthylcellulose et de gélatine chargée d'amphotéricine B. *Heliyon* 2024 ;10(2) : e24210.

Blama A, Fedjer Z, Mahdeb A, Mazari A. Ethnobotanical study on the traditional use of *Pistacia lentiscus* L. among the local population of the northern central-east region of Algeria. *Turk J Agric Food Sci Technol* 2024 ;12(2) :252–258.

Boizot N, Charpentier JP. Méthode rapide d'évaluation du contenu en composés phénoliques des organes d'un arbre forestier. *Cah Tech INRA* 2006 ;79–82.

Botsaris G, Orphanides A, Yiannakou E, Gekas V, Goulas V. Antioxidant and antimicrobial effects of *Pistacia lentiscus* L. extracts in pork sausages. *Food Technol Biotechnol* 2015 ;53(4) :472–478.

Bouaziz M, Feki I, Ayadi M, Jemai H, Sayadi S. Polyphenol content, antioxidant and antibacterial activities of *Pistacia lentiscus* bark and leaves extracts. *J Med Plants Res* 2009 ;3(5) :248–255.

Bouriche H, Saidi A, Ferradji A, Belambri SA, Senator A. Anti-inflammatory and immunomodulatory properties of *Pistacia lentiscus* extracts. *J Appl Pharm Sci* 2016 ;6(7) :140–146.

Bozorgi M, Memariani Z, Mobli M, Salehi Surmaghi MH, Shams-Ardekani MR, Rahimi R. Five *Pistacia* species (*P. vera*, *P. atlantica*, *P. terebinthus*, *P. khinjuk*, and *P. lentiscus*): a review of their traditional uses, phytochemistry, and pharmacology. *Sci World J* 2013 ; 219815.

-c-

Cano A, Maestre AB, Hernández-Ruiz J, Arnao MB. ABTS/TAC methodology: Main milestones and recent applications. *Processes* 2023 ;11(1) :185.

Conde E, Cara C, Moure A, Ruiz E, Castro E, Dominguez H. Antioxidant activity of the phenolic compounds released by hydrothermal treatments of olive tree pruning. *Food Chem* 2009 ;114(3) :806–812.

Costa EM, Pereira CF, Ribeiro AA, Casanova F, Freixo R, Pintado M, Ramos OL. Characterization and evaluation of commercial carboxymethyl cellulose potential as an active ingredient for cosmetics. *Appl Sci* 2022 ;12(13) :6560.

-D-

Derwich E, Benziane Z, Boukir A. Chemical composition and antibacterial activity of essential oil of leaves of *Pistacia lentiscus* grown in Morocco. *J Med Plants Res* 2010 ;4(10) :811–816.

Dif MM, Mehdadi Z, Mohamed B, Bouterfas K, Zerargui F, Boussaha B. Étude quantitative des polyphénols dans les différents organes de l'espèce *Papaver rhoeas* L. *Phytothérapie* 2015 ;13(4) :257–263.

Domínguez R, Barba FJ, Gómez B, Putnik P, Bursac Kovačević D, Pateiro M, Santos EM, Lorenzo JM. Active packaging films with natural antioxidants to be used in meat industry. *Food Res Int* 2018 ;113 :93–101.

Dragović S, Dragović-Uzelac V, Pedisić S, Čošić Z, Friščić M, Elez Garofulić I, Zorić Z. Les feuilles de lentisque (*Pistacia lentiscus* L.) comme source de composés bioactifs : effet du lieu de croissance, du stade phénologique et du solvant d'extraction sur la teneur en composés phénoliques. *Food Technol Biotechnol* 2020 ;58(3) :303–314.

Dutta D, Sit N. Application of natural extracts as active ingredients in biopolymer-based packaging systems. *J Food Sci Technol* 2023 ;60(7) :1888–1902.

-E-

Elez Garofulić I, Kruk V, Martić A, Martić I, Zorić Z, Pedisić S, Dragović S, Dragović-Uzelac V. Evaluation of polyphenolic profile and antioxidant activity of *Pistacia lentiscus* L. leaves and fruit extract obtained by optimized microwave-assisted extraction. *Foods* 2020 ;9(11) :1556.

Eslami Z, Elkoun S, Robert M, Adjallé K. A review of the effect of plasticizers on the physical and mechanical properties of alginate-based films. *Molecules* 2023 ;28(18) :6637.

-F-

Floris S, Di Petrillo A, Pintus F, Delogu GL. *Pistacia lentiscus* : Phytochemistry and antidiabetic properties. *Nutrients* 2024 ;16(11) :1638.

-G-

Gadgery KK, Sharma GS. Investigation of mechanical properties of chitosan-based films prepared from Narmada riverside crab shells. *Int J Mech Eng Technol* 2020 ;11(6):21–28.

Gao H, Qin C, Chen X. The formation and development of the school of consolidating the vital base and supplementing primordial Qi in Xin'an medicine. *J Nat Ayurvedic Med* 2023 ;7(3).

Ghalem BR, Benhassaini H. Étude des phytostéroïdes et des acides gras de *Pistacia atlantica*. *Afr Sci* 2007 ;3(3) :405–412.

Gómez-Estaca J, López-de-Dicastillo C, Hernández-Muñoz P, Catalá R, Gavara R. Advances in antioxidant active food packaging. *Trends Food Sci Technol* 2009 ;20(9) :526–536.

González-López ME, Calva-Estrada SdJ, Gradilla-Hernández MS, Barajas-Álvarez P. Current trends in biopolymers for food packaging. *Front Sustain Food Syst* 2023 ;7 :1225371.

-H-

Hemma R, Belhadj S, Ouahchia C, Saidi F. Antioxidant activity of *Pistacia lentiscus* methanolic extracts. *Agrobiologia* 2018 ;8(1) :845–852.

-I-

Ivanova A, Gerasimova E, Gazizullina E. Study of antioxidant properties of agents from the perspective of their action mechanisms. *Molecules* 2020 ;25(18) :4251–4278.

-J-

Jarroux N. Biopolymers: Various families, properties and applications. *Green Chem* 2008;(1) :3580.

-K-

Kaya M, Khadem S, Cakmak YS, Mujtaba M, Ilk S, Akyuz L, Salaberria AM, Labidi J, Abdulqadir AH, Deligöz E. Antioxidative and antimicrobial edible chitosan films blended with stem, leaf and seed extracts of *Pistacia terebinthus* for active food packaging. *RSC Adv* 2018 ;8(7) :3941–3950.

Kim DO, Jeong SW, Lee CY. Antioxidant capacity of phenolic phytochemicals from various cultivars of plums. *Food Chem* 2003 ;81(3) :321–326.

Kumar L, Ramakanth D, Akhila K, Gaikwad KK. Edible films and coatings for food packaging applications. *Environ Chem Lett* 2021 ;20(4) :26.

Kunduru KR, Basu A, Domb AJ. Biodegradable polymers: Medical applications. *Encycl Polym Sci Technol* 2016 ;1–22.

-L-

Landau S, Muklada H, Markovics A, Azaizeh H. Traditional uses of *Pistacia lentiscus* in veterinary and human medicine. In : Yaniv Z, Dudai N, eds. *Medicinal and aromatic plants of the Middle-East*. 2014 ; (2) : 63–180.

Lang Y, Gao N, Zang Z, Meng X, Lin Y, Yang S, Yang Y, Jin Z, Li B. Classification and antioxidant assays of polyphenols. *J Future Foods* 2024 ;4(3) :193–204.

Lee CY, Sharma A, Semenya J, Anamoah C, Chapman KN, Barone V. Étude informatique des effets de l'ortho-substituant sur les activités antioxydantes des composés phénoliques et des antioxydants dendritiques. *Antioxidants* 2020 ;9(2) :157.

Lintang M, Tandi O, Layuk P, Karouw S, Dirpan A. Characterization of edible films of sago with glycerol as a plasticizer. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 2021 ;807 :022070.

-M-

Maksimović Z, Zeković Z, Kujundžić S, Ristić M, Šavikin K. Flavonoid composition and antimicrobial activity of *Pistacia lentiscus* L. extracts. *Phytother Res.* 2008 ;22(2) :279–82.

Marsh K, Bugusu B. Food packaging—Roles, materials, and environmental issues. *J Food Sci* 2007 ;72(3) : R39–R55.

Martin DP, Williams SF. Medical applications of poly-4-hydroxybutyrate : A strong, pliable, biodegradable thermoplastic. *Biochem Eng J* 2003 ;16(2) :97–105.

Mehenni C, Atmani-Kilani D, Dumarçay S, Perrin D, Gérardin P, Atmani D. Hepatoprotective and antidiabetic effects of *Pistacia lentiscus* leaf and fruit extracts. *J Food Drug Anal* 2016 ;24(3) :653–669.

Menakh M, Mahdi D, Boutellaa S, Zellagui A, Lahouel M, Bensouici C. In vitro antioxidant activity and protective effect of *Hertia cheirifolia* L. n-butanol extract against liver and heart mitochondrial oxidative stress in rat. *Acta Naturae Scientia* 2020 ;7(1) :33–45.

Milia E, Bullitta S, Mastandrea G, Szotáková B, Schoubben A, Langhansová L, Quartu M, Bortone A, Eick S. Leaves and fruit preparations of *Pistacia lentiscus* L. : A review on the ethnopharmacological uses and implications in inflammation and infection. *Antibiotics (Basel)* 2021 ;10(5) :425.

-P-

Palacios CE, Nagai A, Torres P, Rodrigues JA, Salatino A. Contents of tannins of cultivars of sorghum cultivated in Brazil, as determined by four quantification methods. *Food Chem* 2021 ;337 :127970.

Perera KY, Jaiswal AK, Jaiswal S. Biopolymer-based sustainable food packaging materials: Challenges, solutions, and applications. *Foods* 2023 ;12(12) :2422.

Pisoschi AM, Pop A, Cimpeanu C, Predoi G. Antioxidant capacity determination in plants and plant-derived products. *Oxid Med Cell Longev* 2016 ;2016 :1–36.

Ponnusamy PG, Mani S. Material and environmental properties of natural polymers and their composites for packaging applications. *Polymers* 2022 ;14(18) :4033.

Prieto P, Pineda M, Aguilar M. Spectrophotometric quantitation of antioxidant capacity through the formation of a phosphomolybdenum complex: Specific application to the determination of vitamin E. *Anal Biochem* 1999 ;269(2) :337–341.

-R-

Rabetafika HN, Paquot M, Dubois P. Les polymères issus du végétal : matériaux à propriétés spécifiques pour des applications ciblées en industrie plastique. *Biotechnol Agron Soc Environ* 2006 ;10(3) :185–196.

Rachtanapun P, Klunklin W, Jantrawut P, Jantanasakulwong K, Phimolsiripol Y, Seesuriyachan P, Leksawasdi N, Chaiyaso T, Ruksiriwanich W, Phongthai S, Sommano SR, Punyodom W, Reungsang A, Ngo TMP. Characterization of chitosan film incorporated with curcumin extract. *Polymers*. 2021 ;13(6) :963.

Rahman MS, Hasan MS, Nitai AS, Nam S, Karmakar AK, Ahsan MS, Shiddiky MJA, Ahmed MB. Recent developments of carboxymethyl cellulose. *Polymers* 2021 ;13(8) :1345.

Rawel HM, Kroll J, Rohn S. Interactions of plant phenolics with food proteins and enzymes. *Food Chem* 2005 ;92(4) :673–683.

Re R, Pellegrini N, Proteggente A, Pannala A, Yang M, Rice-Evans C. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radic Biol Med* 1999 ;26(9–10) :1231–1237.

Remila S, Atmani-Kilani D, Delemasure S, Connat JL, Azib L, Richard T, Atmani D. Antioxidant, cytoprotective, anti-inflammatory and anticancer activities of *Pistacia lentiscus* (Anacardiaceae) leaf and fruit extracts. *Eur J Integr Med*. 2015 ;7(3) :274–286.

Rguez S, Bettaieb-Rebeiy I, Bourgou S, Hammami M, Hamrouni Sellami I. *Pistacia lentiscus* extracts as a valuable source of antioxidant compounds. *J New Sci Agric Biotechnol* 2023 ;91(3) :5160–5167.

Rhim JW, Ng PKW. Natural biopolymer-based nanocomposite films for packaging applications. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2007 ;47(4) :411–433.

Rhim JW, Wang LF. Mechanical and water barrier properties of agar/κ-carrageenan/konjac glucomannan ternary blend biohydrogel films. *Carbohydr Polym* 2013 ;96(1) :71–81.

Rice-Evans CA, Miller NJ, Paganga G. Structure-antioxidant activity relationships of flavonoids and phenolic acids. *Free Radic Biol Med*. 1996 ;20(7) :933–956.

Rodrigues AAM, Costa RR, Santos LF, Silva SM, Britto D, Lima MAC. Properties and characterization of biodegradable films obtained from different starch sources. *Food Sci Technol* 2023 ;41(4).

Rondeau-Mouro C, Buléon A, Lahaye M. Caractérisation par RMN des biopolymères d'origine végétale, de la molécule à l'organisation supramoléculaire. *C R Chimie* 2008 ;11(4–5) :370–379.

Rutot D, Dubois P. Les (bios) polymères biodégradables : l'enjeu de demain ? *Chim Nouv* 2004;(86) :66–75.

Ryan MT, Muller H, Pfanner N. Functional staging of ADP/ATP carrier translocation across the outer mitochondrial membrane. *J Biol Chem* 1999 ;274(29) :20619–20627.

-S-

Saïdi O, Derradji L, HadeF Y, Dekhil M. Pratiques traditionnelles d'utilisation dans le nord-est algérien des huiles de lentisque (*Pistacia lentiscus* L) pour les affections cutanées. *Ethnopharmacologia* 2023 ;69(2).

Sanyang ML, Sapuan SM, Jawaïd M, Ishak MR, Sahari J. Effect of plasticizer type and concentration on physical properties of biodegradable films based on sugar palm (*Arenga pinnata*) starch for food packaging. *J Food Sci Technol* 2016 ;53(1) :326–336.

Scalbert A. Tannins in woods and leaves: Why are they there ? *Ann Sci For* 1992 ;49(3) :241–250.

Sehaki C, Jullian N, Ayati F, Fernane F, Gontier E. A review of *Pistacia lentiscus* polyphénols : Chemical diversity and pharmacological activities. *Plants (Basel)* 2023 ;12(2) :279.

Selim S, Almuhayawi MS, Alharbi MT, Al Jaouni SK, Alharthi A, Abdel-Wahab BA, Ibrahim MAR, Alsuhaibani AM, Warrad M, Rashed K. Insights into the antimicrobial, antioxidant, anti-SARS-CoV-2 and cytotoxic activities of *Pistacia lentiscus* bark and phytochemical profile ; in silico and in vitro study. *Antioxidants (Basel)* 2022 ;11(5) :930.

Shahidi F, Dissanayaka M. Interactions of polyphenols with food proteins and their applications. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2023 ;63(5) :701–722.

Siracusa V, Rocculi P, Romani S, Dalla Rosa M. Biodegradable polymers for food packaging. *Trends Food Sci Technol* 2008 ;19(12) :634–643.

Siripatrawan U, Harte BR. Physical properties and antioxidant activity of an active film from chitosan incorporated with green tea extract. *Food Hydrocoll* 2010 ;24(8) :770–775.

Smeriglio A, Barreca D, Bellocco E, Trombetta D. Proanthocyanidins and hydrolysable tannins : Occurrence, dietary intake and pharmacological effects. *Br J Pharmacol* 2017 ;174(11) :1244–1262.

Sultana S, Lawag IL, Lim LY, Foster KJ, Locher C. A critical exploration of the total flavonoid content assay for honey. *Methods Protoc.* 2024 ;7(6) :95.

-T-

Tanaka T, Matsuo Y, Saito Y. Solubility of tannins and preparation of oil-soluble derivatives. *J Oleo Sci.* 2018 ;67(10) :1179–87

Taweecat C, Wongsooka T, Rawdkuen S. Properties of banana (*Cavendish spp.*) starch film incorporated with banana peel extract and its application. *Molecules*. 2021 ;26(5) :1406.

Trabelsi H, Ben Lajnef H, Ben Arfa K, Boukhchina S. Phenolic compounds characterization from *Pistacia lentiscus* fruit. *J Chem Pharm Res* 2016 ;8(1) :1–8.

-U-

Untea A, Lupu A, Sărăcilă M, Panaite T. Comparison of ABTS, DPPH, and phosphomolybdenum assays for estimating antioxidant activity and phenolic compounds in five different plant extracts. *Bull UASVM Anim Sci Biotechnol* 2018 ;75(2).

-V-

Vargas M, Pastor C, Chiralt A, McClements DJ, González-Martínez C. Recent advances in edible coatings for fresh and minimally processed fruits. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 2008 ;48(6) :496–511.

Vissac A, Bourgès A, Gandreau D, Anger R, Fontaine L, Joffroy T. Argiles & biopolymères : les stabilisants naturels pour la construction en terre. Grenoble : *CRAterre éditions* ; 2017. ISBN : 978-2-906901-88-9.

-X-

Xu Y, Wu Z, Li A, Chen N, Rao J, Zeng Q. Nanocellulose composite films in food packaging materials. *Polymers (Basel)* 2024 ;16(3) :423.

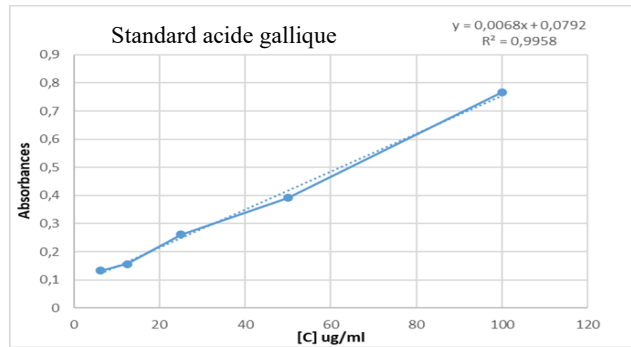
-Y-

Yang J, Li N, Wang C, Chang T, Jiang H. Ultrasound-homogenization-assisted extraction of polyphenols from coconut mesocarp: Optimization study. *Ultrason Sonochem* 2021 ;78 :105739.

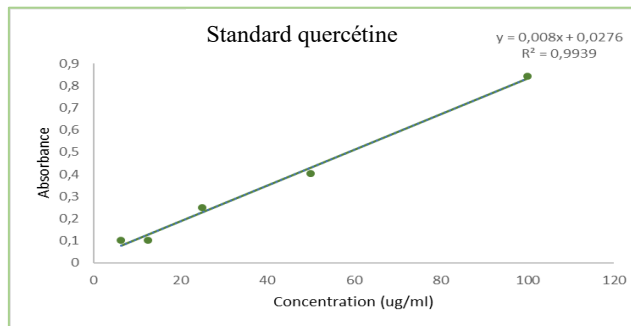
Yemmen M, Landolsi A, Ben Hamida J, Mégraud F, Trabelsi Ayadi M. Antioxidant activities, anticancer activity and polyphenolics profile of leaf, fruit and stem extracts of *Pistacia lentiscus* from Tunisia. *Cell Mol Biol* 2017 ;63(9) :273–285.

Annexes

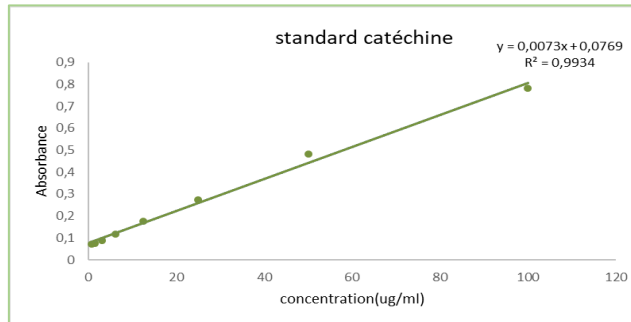
Annexe I : Courbe d'étalonnage de dosage des polyphénols totaux dans l'extrait éthanolique de *Pistacia lentiscus*



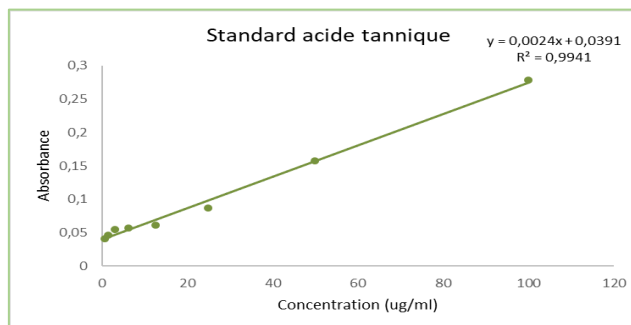
Annexe II : Courbe d'étalonnage de dosage des flavonoïdes dans l'extrait éthanolique de *Pistacia lentiscus*



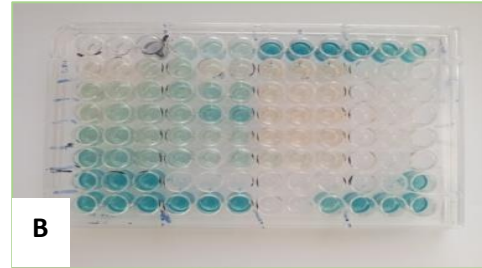
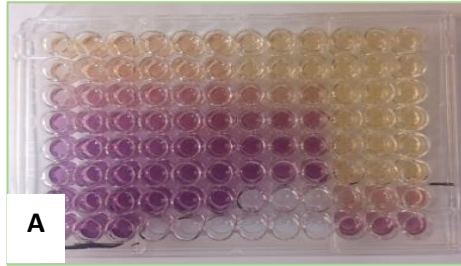
Annexe III : Courbe d'étalonnage de dosage des tanins condensés dans l'extrait éthanolique de *Pistacia lentiscus*.



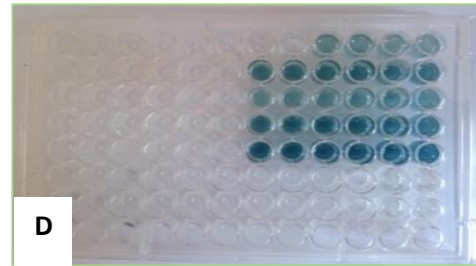
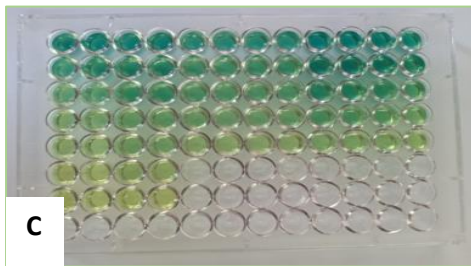
Annexe IV : Courbe d'étalonnage de dosage des tanins hydrolysables dans l'extrait éthanolique de *Pistacia lentiscus*



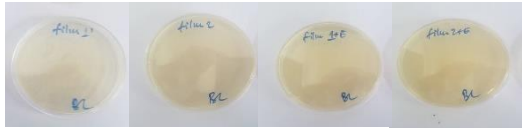
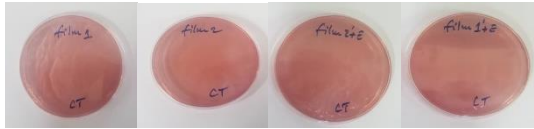

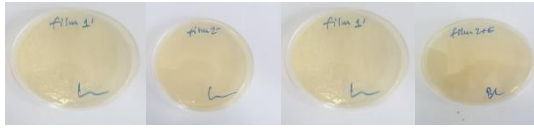
Annexe V : Les plaques de dosage de la capacité antiradicalaire DPPH (A) et ABTS (B) de l'extrait, des films témoin et des films enrichi avec l'extrait de *Pistacia lentiscus*



Annexe VI : Résultats du test de la capacité antioxydante (C) et pouvoir réducteur (D) de l'extrait, des films témoin et des films enrichi avec l'extrait de *Pistacia lentiscus*



Annexe VII : Résultats du test de recherche des contaminations

	
Bactérie lactique	Coliformes totaux
	
Germe aérobie	Leveurs

Annexe VIII : Référence des milieux de culture utilisés dans le test de contamination des films

Milieu	BPA	PCA	VRB	CGA	MRS
Référence	M043S-500G	DSHB3034	1.01406.0500	DSHB3034	M641I-500G

Résumé

Dans une optique de valorisation des ressources naturelles et de réduction de l'utilisation des polymères synthétiques, la présente étude a porté sur l'élaboration de films bioactifs à base de carboxyméthylcellulose (CMC) et de glycérol, enrichis en extrait éthanolique de déchets de fruits de *Pistacia lentiscus*. Les films obtenus ont été caractérisés selon leurs propriétés physico-mécaniques, notamment la teneur en humidité, la résistance à la traction et l'épaisseur. L'augmentation de la concentration en glycérol a significativement influencé ces paramètres. L'incorporation de l'extrait, quant à elle, n'a pas modifié la structure des films, mais leur a conféré des propriétés fonctionnelles intéressantes. Les films enrichis ont démontré une activité antioxydante marquée, avec des pourcentages d'inhibition atteignant $76,45 \pm 1,83$ % pour le DPPH et $92,96 \pm 0,14$ % pour l'ABTS, ainsi qu'un pouvoir réducteur et une capacité antioxydante totale notables.

Ces résultats mettent en évidence l'intérêt des films à base de CMC enrichis en composés phénoliques comme alternative durable pour l'emballage alimentaire fonctionnel. Toutefois, des études complémentaires sont nécessaires pour renforcer leur stabilité à l'humidité et évaluer leur performance en conditions réelles d'utilisation.

Mots clés : *Pistacia lentiscus*, film alimentaire, activité antioxydante, carboxyméthylcellulose (CMC), emballage alimentaire.

Abstract

With a view to valorizing natural resources and reducing the use of synthetic polymers, the present study focused on the development of bioactive films based on carboxymethylcellulose (CMC) and glycerol, enriched with ethanolic extract from *Pistacia lentiscus* fruit waste. The films obtained were characterized according to their physico-mechanical properties, notably moisture content, tensile strength and thickness. Increasing the concentration of glycerol significantly influenced these parameters. The incorporation of the extract, on the other hand, did not modify the structure of the films, but gave them interesting functional properties. The enriched films showed marked antioxidant activity, with inhibition percentages reaching $76.45 \pm 1.83\%$ for DPPH and $92.96 \pm 0.14\%$ for ABTS, as well as notable reducing power and total antioxidant capacity. These results highlight the relevance of CMC-based films enriched with phenolic compounds as a sustainable alternative for functional food packaging. However, further studies are needed to enhance their moisture stability and evaluate their performance under real-life conditions.

Keywords : *Pistacia lentiscus*, food film, antioxidant activity, carboxymethylcellulose (CMC), food packaging.

المخلص

في إطار تثمين الموارد الطبيعية وتقليل استخدام البوليمرات الاصطناعية، تهدف هذه الدراسة إلى إعداد أغشية نشطة بيولوجيًا تعتمد على كربوكسي ميثيل السليلوز (CMC) والجليسرول، ومخصبة بمستخلص إيثانولي من نفايات ثمار *Pistacia lentiscus*. تم توصيف الأغشية المنتجة وفقًا لخصائصها الفيزيائية والميكانيكية، وخاصة محتواها من الرطوبة، ومقاومتها للشد، وسمكها. لقد أثرت زيادة تركيز الجليسرول بشكل كبير على هذه المعايير. أما إدماج المستخلص، فلم يُغير من بنية الأغشية، لكنه منحها خصائص وظيفية مثيرة للاهتمام. أظهرت الأغشية المدعمة نشاطًا مضادًا للأكسدة بشكل واضح، مع نسب تثبيط بلغت 76.45 ± 1.83 % في اختبار DPPH و 92.96 ± 0.14 % في اختبار ABTS، بالإضافة إلى قدرة اختزال وإجمالية مضادة للأكسدة ملحوظة. تُبرز هذه النتائج أهمية الأغشية المعتمدة على CMC والمدعمة بالمركبات الفينولية كبديل مستدام لتغليف الأغذية الوظيفي. ومع ذلك، لا بد من إجراء دراسات إضافية لتحسين ثباتها تجاه الرطوبة وتقييم أدائها في ظروف الاستخدام الفعلية.

الكلمات المفتاحية: التغليف الغذائي، كربوكسي ميثيل سليلوز (CMC)، النشاط المضاد للأكسدة، الفيلم الغذائي، *Pistacia lentiscus*