الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES

Département d'Agronomie

Mémoire

Présenté pour obtenir le diplôme de Master

En Sciences Agronomique

Spécialité : Phytopathologie

Thème

Valorisation de l'huile essentielle d'Artemisia herba-alba pour la lutte contre les agents phytopathogènes

Présenté par :

Melle. BENAIAD IKRAM

Soutenue le : 23/06/2026

Devant le jury composé de :

Dr. CHAOUATI Karima	MCB	U. Médéa	Présidente
Mr. KIRDI Bilel	MAA	U. Médéa	Examinateur
Dr. CHAOUCH Abderrezak	MCA	U. Médéa	Encadreur
Dr. Mostefaoui Houda	MCA	U. Médéa	Co-encadreur

Année universitaire 2025/2026

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents, qui ont été mon soutien et mon appui tout au long de mon parcours universitaire, et qui n'ont jamais cessé de m'encourager, de me soutenir et de se sacrifier pour ma réussite. J'espère que ce travail sera le fruit de leurs efforts et de leurs sacrifices, ainsi qu'un témoignage de ma profonde gratitude et de ma reconnaissance.

À mes frères et sœurs, pour leur affection sincère, leur soutien constant et leurs encouragements permanents.

À tous les membres de ma famille, qui m'ont entouré(e) de confiance et de soutien tout au long de mon parcours.

À mes amis et collègues, avec qui j'ai partagé les moments de travail, d'effort, les difficultés et les réussites.

À toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à ma formation et à la réalisation de ce travail.

Et à tous les étudiants en quête de savoir et d'excellence.

Je dédie ce travail avec mes sincères sentiments de respect et de considération.

Remerciements

Nous adressons avant tout nos plus sincères remerciements à Dieu Tout-Puissant pour nous avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires à l'aboutissement de ce modeste travail. Ce mémoire n'aurait pu voir le jour sans le soutien et l'accompagnement de nombreuses personnes. Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à sa réalisation.

Nous saisissons cette occasion pour adresser nos vifs remerciements à notre encadreur, Monsieur Abderrezak Chaouch, pour ses précieux conseils, sa disponibilité constante, ses orientations pertinentes et la confiance qu'il nous a accordée tout au long de ce projet. Son expérience et son soutien ont constitué un élément essentiel dans la réalisation de cette étude.

Nos sincères remerciements vont également à Madame Karima Chaouati, présidente du jury, pour avoir accepté de présider le jury de ma soutenance. Nous exprimons également notre profonde reconnaissance à Monsieur Bilal Kirdi, examinateur, pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant d'évaluer ce travail. Nous le remercions pour le temps qu'il y a consacré et pour son engagement. La qualité de sa lecture et la pertinence de ses remarques ont grandement contribué à l'amélioration de ce travail.

Nous adressons aussi nos remerciements les plus chaleureux à Madame Houda Mostefaoui pour son aide précieuse, sa disponibilité permanente et ses conseils avisés, qui ont largement contribué à l'aboutissement de ce mémoire.

Nous remercions vivement les ingénieurs de laboratoire pour leur précieuse assistance technique, leur disponibilité et leur soutien logistique, qui ont été indispensables à la réussite de nos expérimentations.

Nos remerciements particuliers s'adressent à Monsieur Mohamed pour son accueil au sein de son usine ainsi que pour son accompagnement et son encadrement durant la phase d'extraction de l'huile essentielle. Son expertise, sa disponibilité et son assistance technique ont été déterminantes dans l'obtention de nos résultats.

Nous exprimons également notre profonde gratitude à Madame Hasiba Harhar de l'Institut National de la Protection des Végétaux (INPV) pour son aide et sa précieuse collaboration.

Enfin, nous remercions l'ensemble des membres du Département des Sciences et Technologies Végétales, les enseignants, les étudiants ainsi que le personnel administratif pour leur soutien, leurs encouragements et leur contribution au succès de ce parcours académique.

Résumé

Cette étude a été réalisée afin d'évaluer les activités antifongiques et antibactériennes de l'huile essentielle, de l'hydrolat et des nanoparticules d'argent biosynthétisées à partir d'Artemisia herba-alba contre certains phytopathogènes d'intérêt agricole. Les essais biologiques ont été effectués par la méthode de diffusion en gélose par puits afin d'apprécier l'efficacité des différents produits testés vis-à-vis de *Fusarium* sp., *Botrytis* sp. et *Erwinia amylovora*.

Les résultats obtenus ont révélé que l'huile essentielle possède une activité antimicrobienne importante. Elle a montré une forte inhibition de la croissance de *Fusarium* sp., une inhibition totale de *Botrytis* sp., ainsi qu'une activité antibactérienne notable contre *Erwinia amylovora*. En revanche, l'hydrolat n'a présenté qu'une activité antifongique faible et temporaire. Les nanoparticules d'argent biosynthétisées à partir d'Artemisia herba-alba n'ont montré aucune activité antifongique ou antibactérienne significative dans les conditions expérimentales adoptées. Ces résultats mettent en évidence le potentiel de l'huile essentielle d'Artemisia herba-alba comme alternative naturelle aux produits phytosanitaires conventionnels pour la lutte contre certains agents phytopathogènes. Des études complémentaires sont toutefois nécessaires afin d'optimiser les procédés de biosynthèse des nanoparticules et de confirmer l'efficacité de ces produits dans des conditions réelles d'application.

Mots-clés : *Artemisia herba-alba*, huile essentielle, hydrolat, nanoparticules d'argent, activité antifongique et antibactérienne, phytopathogènes, biocontrôle.

ملخص

تثمين زيت Artemisia herba–alba العطري لمكافحة مسببات الأمراض النباتية

أُنجزت هذه الدراسة بهدف تقييم النشاطين المضاد للفطريات والمضاد للبكتيريا لكل من الزيت العطري والماء الأبيض العطري (الهيدرولات) وجسيمات الفضة النانوية ال مُصنَّعة حيو يًا انطلاقًا من نبات الشيح (Artemisia herba–alba) ضد بعض الممرضات النباتية ذات الأهمية الزراعية.وقد أُجريت الاختبارات البيولوجية باستعمالطريقة الانتشار في الوسط الهلامي بالحفر (Diffusion engélose par puits)لتقييم فعالية مختلف المنتجاتالمختبرة تجاهsp *Fusarium* .*Botrytis sp* و *Erwinia amylovora*أظهرت النتائج أن الزيت العطري يمتلك نشاطا مضادًا للميكروبات ذا فعالية عالية، حيث حقق تثبيطًا مهمًا لنموsp *Fusarium*.وتثبيطًا كليا لـ.Botrytis sp،بالإضافة إلى نشاط مضاد للبكتيريا ملحوظ ضد. *Erwinia*في المقابل، أظهر الهيدرولات نشاطًا مضادًا للفطريات ضعيفًاومؤقتًا فقط. أما جسيمات الفضة النانوية المُصنَّعة حيويًا من نبات الشيح الأبيض فلم تُظهرأي نشاط مضاد للفطريات أو للبكتيريا يُذكر في ظل الظروف التجريبية المعتمدة.

تُبرز هذه النتائج الإمكانات الواعدة للزيت العطري لنبات الشيح الأبيض كبديل طبيعي للمبيدات والمنتجات الصحية النباتية التقليدية فيمكافحة بعض الممرضات النباتية.

ومع ذلك، تبقى هناك حاجة إلى دراسات إضافية لتحسين ظروف التخليق الحيوي للجسيمات النانوية والتحقق من فعالية هذه المنتجات في الظروف الحقلية الفعلية.

الكلمات المفتاحية : *Artemisia herba-alba.* الزيت العطري. هيدرولا. جسيمات الفضة النانوية. النشاط المضاد للفطريات والبكتيريا. مسببات الأمراض النباتية، المكافحة الحيوية

Abstract

Valuation of Artemisia herba-alba essential oil for the control of plant pathogens

This study was conducted to evaluate the antifungal and antibacterial activities of the essential oil, hydrosol, and biosynthesized silver nanoparticles derived from Artemisia herba-alba against several agriculturally important plant pathogens. The biological assays were performed using the agar well diffusion method in order to assess the effectiveness of the tested products against Fusarium spp., Botrytis spp., and Erwinia spp.

The results showed that the essential oil exhibited strong antimicrobial activity. It caused significant inhibition of Fusarium spp. growth, complete inhibition of Botrytis spp., and notable antibacterial activity against Erwinia spp. In contrast, the hydrosol showed only weak and transient antifungal activity. The biosynthesized silver nanoparticles from Artemisia herba-alba did not demonstrate any significant antifungal or antibacterial activity under the experimental conditions used. These findings highlight the promising potential of Artemisia herba-alba essential oil as a natural alternative to conventional plant protection products for the control of certain plant pathogens. However, further studies are required to optimize the biosynthesis process of nanoparticles and to evaluate their effectiveness under real field conditions.

Keywords: Artemisia herba-alba, essential oil, hydrosol, silver nanoparticles, antifungal and antibacterial activity, plant pathogens, biocontrol.

Liste des Figures

Figure 1 : Photographie de l'Artemisia herba-alba (Abou El-Hamd H et al., 2010) 3
Figure 2 : Morphologie de l'Artemisia herba-alba 4
Figure 3 : Répartition géographique de l'Artemisia herba-alba (Abduali et al., 2026) 6
Figure 4 : Répartition géographique de l'Artemisia herba-alba en Algérie (Abderrahmane, 2022)..... 7
Figure 5 : Squelette de base des principales classes de lactones sesquiterpéniques (Moujir et al., 2020) 8
Figure 6 : Composition chimique de certains des principaux flavonoïdes de l'Artemisia herba-alba (Mohamed et al., 2010) 9
Figure 7 : Chromatogramme HPLC des composés phénoliques dans différentes fractions de Artemisia herba-alba (Mohammed et al., 2021) 11
Figure 8 : Composition chimique de l'huile essentielle d'Artemisia herba-alba déterminée par GC-MS (Meddour et al., 2016)..... 12
Figure 9 : Technique de synthèse des nanoparticules : approches Top-down et Bottom-up (Abid et al., 2022) 15
Figure 10 : Processus de conidiation chez Fusarium oxysporum (Ohara & Tsuge, 2004) 18
Figure 11 : Caractéristiques morphologiques et macroscopiques des colonies de six espèces du genre Fusarium cultivées sur milieu PDA après 7 jours d'incubation (Wang et al., 2021)..... 20
Figure 12 : Représentation schématique du cycle de vie du genre Fusarium (Jackson et al., 2024).... 21
Figure 13 : Morphologie du genre Botrytis : conidiophores (B), conidies (C), mycélium (D) et sclérotes (E) (Cuervo-Parra et al., 2024)..... 24
Figure 14 : Caractéristiques morphologiques des espèces Botrytis cinerea (a-h) et Botrytis pelargonii (i-l) sur milieu PDA (Maghsoodi et al., 2025) 26
Figure 15 : Cycle de vie du genre Botrytis (Cheung et al., 2020)..... 27
Figure 16 : Voies de signalisation chez Botrytis cinerea (Williamson et al., 2007)..... 29
Figure 17 : Morphologie d'Erwinia (Erwinia amylovora). A : Morphologie cellulaire (MET), B : Aspect macroscopique des colonies, C : Coloration de Gram (OEPP, 2022)..... 30
Figure 18 : Cycle de vie du feu bactérien « Erwinia amylovora » (Ivey, 2016) 32
Figure 19 : Appareil d'hydrodistillation de type Clevenger 36
Figure 20 : Préparation du milieu PDA..... 37
Figure 21 : Autoclave utilisé pour la stérilisation du matériel et des milieux de culture 38
Figure 22 : Préparation du milieu peptoné 39
Figure 23 : Agitation et homogénéisation de la suspension bactérienne à l'aide d'un agitateur vortex avant les analyses microbiologiques 39
Figure 24 : Incubation des cultures bactériennes à la température appropriée de 30 °C..... 39
Figure 25 : Les produits utilisés pour la préparation du milieu de culture King B 41
Figure 26 : Préparation du milieu de culture King B avec un pH d'environ 7 41
Figure 27 : Solution d'huile essentielle..... 42
Figure 28 : Les nanoparticules avant la centrifugation 43
Figure 29 : La centrifugation..... 44
Figure 30 : Les doses de (a) l'huile essentielle, (b) les nanoparticules..... 46
Figure 31 : La méthode des puits 46
Figure 32 : A) Homogénéité bactérienne, B) La densité..... 48
Figure 33 : A) Coulage du milieu de culture dans les boîtes de Petri 49
Figure 34 : Effet de l'huile d'Artemisia herba-alba sur Fusarium spp. 52
Figure 35 : Effet de l'hydrolat d'Artemisia herba-alba sur Fusarium spp.. 53

Figure 36 : Effet des nanoparticules sur Fusarium spp. 55
Figure 37 : Effet de l'huile d'Artemisia herba-alba sur Botrytis spp. 56
Figure 38 : Effet de l'hydrolat sur Botrytis spp. 58
Figure 39 : Effet des nanoparticules sur Botrytis spp.....59
Figure 40 : Effet de différentes concentrations des traitements (l'huile, nanoparticules, hydrolat) d'Artemisia sur Erwinia sp. 60

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Volumes des produits et de l'eau distillée utilisés pour la préparation des dilutions 45
Tableau 2 : Évolution de la croissance de Fusarium spp. sous l'effet de l'huile essentielle d'Artemisia herba-alba 52
Tableau 3 : Comparaison de la croissance de Fusarium spp. en présence de différentes concentrations d'Artemisia (témoin vs traitements) 52
Tableau 4 : Évolution de la croissance de Fusarium spp. sous l'effet de l'hydrolat d'Artemisia herba-alba 53
Tableau 5 : Comparaison de la croissance de Fusarium spp. en présence de l'hydrolat d'Artemisia (témoin vs traitements) 53
Tableau 6 : Évolution de la croissance de Fusarium spp. sous l'effet des nanoparticules 54
Tableau 7 : Comparaison de la croissance de Fusarium spp. en présence de différentes concentrations des nanoparticules (témoin vs traitements) 55
Tableau 8 : Évolution de la croissance de Botrytis spp. sous l'effet de l'huile d'Artemisia herba-alba 56
Tableau 9 : Comparaison de la croissance de Botrytis spp. en présence de différentes concentrations de l'huile d'Artemisia (témoin vs traitements) 56
Tableau 10 : Évolution de la croissance de Botrytis spp. sous l'effet de l'hydrolat d'Artemisia herba-alba 57
Tableau 12 : Évolution de la croissance de Botrytis spp. sous l'effet des nanoparticules 58
Tableau 13 : Comparaison de la croissance de Botrytis spp. en présence de différentes concentrations des nanoparticules (témoin vs traitements) 59
Tableau 14 : Évolution du diamètre de la zone d'inhibition (en cm) d'Erwinia sous l'effet de différents traitements à diverses concentrations (jour 1) 60
Tableau 15 : Comparaison de la croissance d'Erwinia sp. en présence de différentes concentrations des traitements (l'huile, nanoparticules, hydrolat) d'Artemisia (témoin vs traitements) 60

Table des matières

Dédicace.....
Remerciements.....
Résumé.....
Liste des Figures.....
Table des matières.....
Introduction.....**1**
Chapitre I : Synthèse bibliographique.....**3**
I.1. L'Artemisia (Herba-Alba).....3
I.1.1. Présentation et description botanique.....3
I.1.1.1. Classification taxonomique (Abduali et al., 2026).....4
I.1.1.2. Autres noms scientifiques.....5
I.1.1.3. Distribution géographique.....5
Distribution dans le monde.....5
Distribution en Algérie.....7
I.1.2. Composition chimique d'Artemisia herba-alba.....7
I.1.2.1. Les lactones sesquiterpéniques.....7
I.1.2.2. Les flavonoïdes.....8
I.1.2.3. Les composés phénoliques.....9
I.1.2.4. Les huiles essentielles d'Artemisia herba-alba.....11
I.1.2.4.1. Activités biologiques de l'huile essentielle d'Artemisia herba-alba.....12
I.1.2.4.2. Importance en phytopathologie et lutte biologique.....13
I.2. Les nanoparticules.....13
I.2.1. Généralités sur les nanoparticules.....13
I.2.2. Exemples de nanoparticules.....14
I.2.3. Les nanoparticules d'argent.....14
I.2.4. Stratégies de synthèse des nanoparticules.....14
I.2.5. Méthodes de synthèse des nanoparticules d'argent.....15
I.2.6. Mécanismes de la synthèse verte des nanoparticules métalliques utilisant des extraits végétaux et des huiles essentielles.....16
I.3. Agents phytopathogènes.....16
I.3.1. Fusarium sp.....16
a) Généralités.....17
b) Espèces principales.....17
c) Importance agronomique.....17
d) Morphologie de Fusarium.....17
e) Classification taxonomique.....18

f) Classification morphologique 18
g) Cycle de vie 21
I.3.2. Botrytis sp. 22
a) Généralités 22
b) Les principales espèces 23
c) Importance agronomique 23
d) Morphologie 23
e) Classification taxonomique (Fillinger & Elad, 2016) 25
f) La classification morphologique : 25
g) Cycle de vie 27
h) Maladies causées par le genre Botrytis 28
i) Facteurs de virulence 28
I.3.3. Erwinia amylovora 29
a) Généralités 29
b) Importance phytopathologique 29
c) Morphologie 30
d) Classification taxonomique (Coutinho & Shin, 2023) 31
e) Cycle de vie 31
f) Maladies causées par le genre Erwinia 32
Chapitre II : Matériel et méthodes 35
II.1. Introduction 35
II.2. Matériel 35
II.3 Méthodes 35
II.3.1. Extraction de l'huile essentielle 35
II.3.2. Souches phytopathogènes fongiques et bactériennes 37
II.4. Préparation des milieux de culture 37
II.4.1. Le milieu PDA pour les champignons 37
II.4.2. Le milieu peptoné 39
II.4.3. Le milieu King B 40
II.5. Synthèse des nanoparticules d'argent par voie verte 41
II.5.1. Préparation du nitrate d'argent ($AgNO_3$) 41
II.5.2. Synthèse verte des nanoparticules d'argent à l'aide des huiles essentielles 42
II.5.3. Préparation des solutions d'huiles essentielles 42
II.5.4. Mélange des solutions 43
II.5.5. Suivi de la réaction 43
II.5.6. Centrifugation 43
II.5.7. Lavage des nanoparticules 44

II.5.8. Stockage 44
II.6. Préparation des solutions et évaluation des activités antifongique et antibactérienne.. 45
II.6.1. Témoins négatifs 45
II.6.2. Témoins positifs 45
A) Préparation des solutions d'huile essentielle 45
Test antifongique sur Fusarium sp. 46
Test antifongique sur Botrytis sp. 47
Test antibactérien sur Erwinia sp. 47
B) Préparation des solutions de nanoparticules d'argent (AgNPs) 47
II.6.3. Inoculation et évaluation 47
II.6.4. Évaluation des activités 49
II.7. Analyse statistique 49
Chapitre III : Résultats et discussion 51
III.1. Résultats 51
III.1.1. Les champignons 51
III.1.1.1. Fusarium sp. — L'huile essentielle 51
III.1.1.2. Fusarium sp. — L'hydrolat 53
III.1.1.3. Fusarium sp. — Les nanoparticules 54
III.1.2.1. Botrytis sp. — L'huile essentielle 55
III.1.2.2. Botrytis sp. — L'hydrolat 58
III.1.2.3. Botrytis sp. — Les nanoparticules 59
III.1.3. Les bactéries 61
III.2. Discussion 61
III.2.1. Activité antifongique de l'huile essentielle contre Fusarium sp. 62
III.2.2. Activité antifongique contre Botrytis spp. 62
III.2.3. Activité de l'hydrolat 62
III.2.4. Activité des nanoparticules d'argent biosynthétisées 63
III.2.5. Activité antibactérienne contre Erwinia sp. 63
III.2.6. Synthèse de la discussion 64
Conclusion 65
Bibliographie 68

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les maladies phytopathogènes constituent l'une des principales contraintes limitant la productivité agricole à l'échelle mondiale. Elles sont responsables de pertes économiques considérables en affectant la qualité et le rendement des cultures. Parmi les agents phytopathogènes les plus redoutés figurent les champignons des genres Fusarium et Botrytis ainsi que les bactéries du genre Erwinia, capables d'infecter un large éventail d'espèces végétales et de provoquer des dommages importants au cours de la production, de la récolte et du stockage (Dean et al., 2012).

La lutte contre ces agents repose essentiellement sur l'utilisation de produits phytosanitaires chimiques. Cependant, l'emploi intensif et répété de ces substances a entraîné l'apparition de phénomènes de résistance chez plusieurs microorganismes phytopathogènes, tout en soulevant des préoccupations environnementales et sanitaires croissantes. Face à ces limitations, la recherche de solutions alternatives, efficaces et respectueuses de l'environnement est devenue une priorité dans le domaine de la protection des végétaux (Popp et al., 2013).

Dans ce contexte, les plantes aromatiques et médicinales représentent une source prometteuse de molécules bioactives naturelles. Les huiles essentielles, en particulier, suscitent un intérêt croissant grâce à leurs propriétés antimicrobiennes, antifongiques et antioxydantes. Leur richesse en composés terpéniques et phénoliques leur confère une activité biologique susceptible d'être exploitée dans la lutte contre divers agents pathogènes des plantes (Bakkali et al., 2008).

Parmi les espèces les plus intéressantes figure *Artemisia herba-alba* Asso., communément appelée armoise blanche. Cette plante, largement répandue dans les régions arides et semi-arides de l'Afrique du Nord et du bassin méditerranéen, est reconnue pour sa richesse en métabolites secondaires et pour les nombreuses propriétés biologiques de son huile essentielle. Plusieurs travaux ont mis en évidence son activité antimicrobienne vis-à-vis de différents microorganismes, ce qui en fait un candidat potentiel pour le développement de stratégies de biocontrôle contre les maladies phytopathogènes (Rafiq et al., 2016; Younsi et al., 2016).

Outre l'huile essentielle, l'hydrolat obtenu lors de l'hydrodistillation constitue également un sous-produit valorisable. Longtemps considéré comme un simple résidu de distillation, il est aujourd'hui reconnu pour contenir diverses molécules hydrosolubles susceptibles de présenter une activité biologique intéressante. La valorisation simultanée de l'huile essentielle et de

l'hydrolat s'inscrit dans une démarche de gestion durable et d'exploitation optimale des ressources végétales.

Parallèlement, les avancées récentes dans le domaine des nanotechnologies ont ouvert de nouvelles perspectives pour la protection des cultures. Les nanoparticules d'argent (AgNPs) sont particulièrement étudiées en raison de leur large spectre d'activité antimicrobienne. Elles exercent leur action par différents mécanismes, notamment l'altération de la membrane cellulaire, la perturbation des processus métaboliques et la production d'espèces réactives de l'oxygène, conduisant à l'inhibition ou à la destruction des microorganismes ciblés (Rai et al., 2009).

Dans une optique de développement durable, la synthèse verte des nanoparticules d'argent utilisant des produits d'origine végétale constitue une alternative écologique aux méthodes chimiques conventionnelles. Les composés bioactifs présents dans les huiles essentielles peuvent intervenir comme agents réducteurs et stabilisants, permettant ainsi l'obtention de nanoparticules tout en limitant l'utilisation de substances toxiques.

C'est dans cette perspective que s'inscrit le présent travail, dont l'objectif est de valoriser l'huile essentielle d'*Artemisia herba-alba* dans la lutte contre certains agents phytopathogènes.

Cette étude porte sur l'évaluation de l'activité antifongique et antibactérienne de l'huile essentielle et de l'hydrolat vis-à-vis de *Fusarium* sp., *Botrytis cinerea* et *Erwinia amylovora*, ainsi que sur la synthèse verte de nanoparticules d'argent à partir de l'huile essentielle et l'étude de leur potentiel biologique.

Les résultats obtenus pourraient contribuer au développement d'alternatives naturelles et innovantes pour une protection plus durable des cultures.

CHAPITRE I
Synthèse bibliographique

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.1. L'Artemisia (Herba-Alba)

I.1.1. Présentation et description botanique

Le genre **Artemisia** comprend environ 500 espèces (Amri et al., 2013), parmi lesquelles *Artemisia herba-alba*, une plante herbacée vivace sous forme d'un arbrisseau aromatique et médicinal (Hidar et al., 2024), à odeur forte et à goût amer (Medjeldi et al., 2024). Elle est connue sous le nom d'« armoise du désert » en français ou « chih » en arabe (Amri et al., 2013). Elle appartient à la famille des Asteraceae et à la tribu des Anthemideae (Amri et al., 2013).



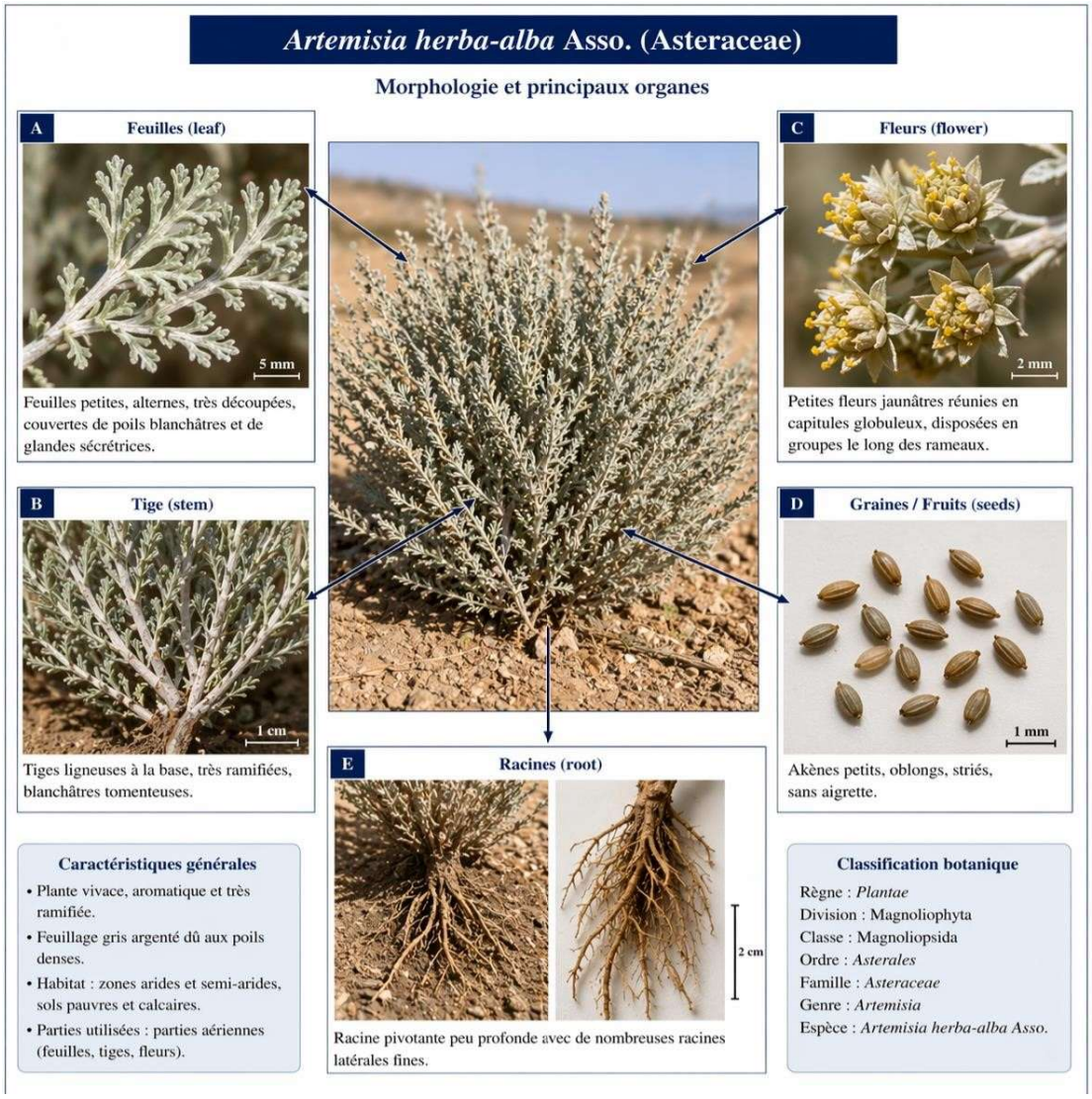
[Figure 1 : Photographie de l'Artemisia herba-alba (Abou El-Hamd H et al., 2010)]

Cet arbrisseau est nain, avec une hauteur comprise entre 20 et 40 cm (Amri et al., 2013), et possède des tiges ramifiées et relativement rigides. Ses feuilles sont petites, sessiles, pubescentes et de couleur argentée, divisées en segments fins.

Les fleurs sont regroupées en inflorescences sous forme de capitules très petits, de forme ovoïde, mesurant entre 1,5 et 3 mm de diamètre, de couleur jaune à rougeâtre.

Les fruits sont des akènes (fruits secs indéhiscents).

Les racines sont constituées d'une racine principale ligneuse et épaisse, mesurant entre 40 et 50 cm de longueur, nettement distincte des racines secondaires (Figure 2) (Hidar et al., 2024).



[Figure 2 : Morphologie de l'Artemisia herba-alba]

I.1.1.1. Classification taxonomique (Abduali et al., 2026)

- **Règne** : Plantae (Plantes)
- **Sous-règne** : Trachéobiontés (plantes vasculaires)
- **Superdivision** : Spermatophytes (plantes à graines)
- **Division** : Magnoliophytes (Angiospermes)
- **Classe** : Magnoliopsides (Dicotylédones)
- **Ordre** : Astérales
- **Famille** : Astéracées
- **Genre** : Artemisia
- **Espèce** : Artemisia herba-alba Asso

I.1.1.2. Autres noms scientifiques

- Artemisia herba-alba Asso
- Seriphidium herba-alba (Asso) Soják
- Artemisia inculta Delile
- Artemisia herba-alba subsp. inculta
- Artemisia herba-alba var. albissima
- Artemisia herba-alba var. villosa
- Artemisia herba-alba subsp. maroccana
- Artemisia herba-alba subsp. garcinia

Nom commun : Armoise blanche

Anglais : White wormwood

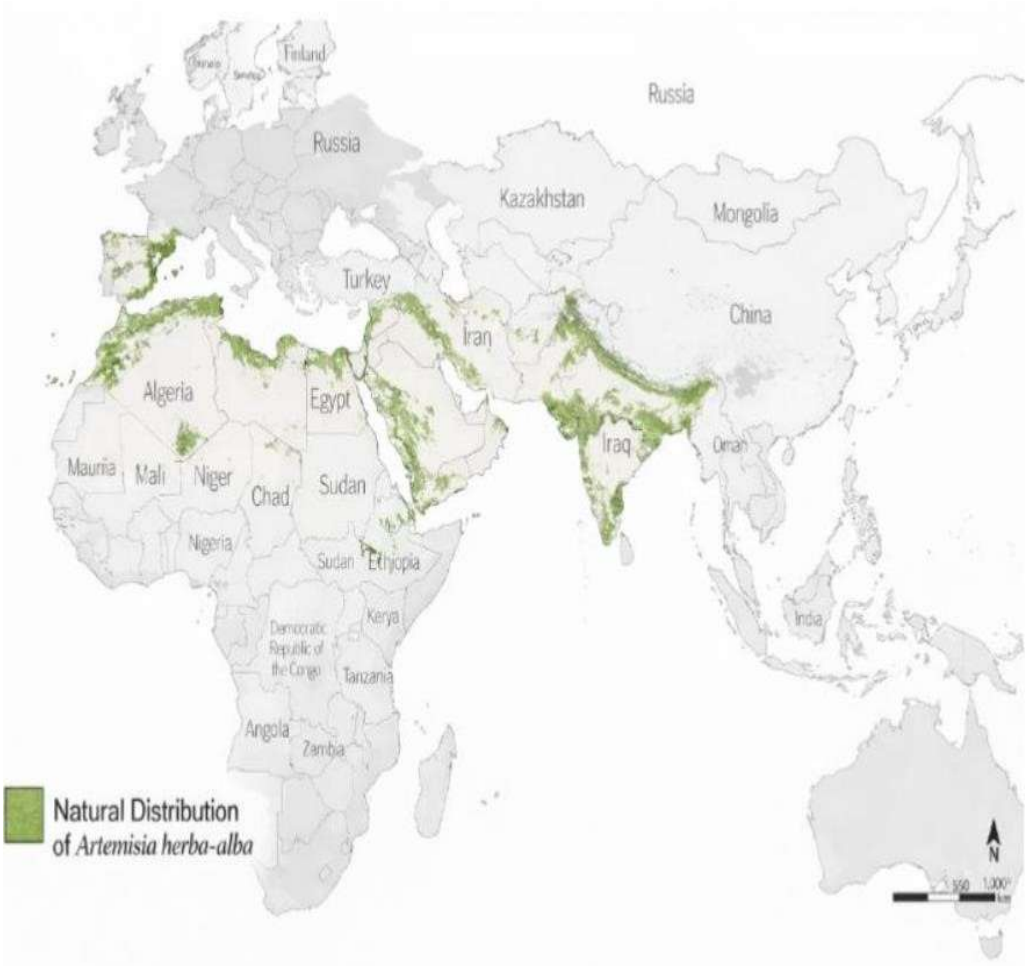
Espagnol : Ajenjo blanco

Arabe : Achih al-abyad

I.1.1.3. Distribution géographique

- ***Distribution dans le monde***

Artemisia herba-alba est une espèce steppique largement distribuée dans les régions arides et semi-arides du bassin méditerranéen, de l'Afrique du Nord et du Moyen-Orient. Sa présence est signalée dans plusieurs pays tels que l'Algérie, le Maroc, la Tunisie, ainsi que dans d'autres régions méditerranéennes comme l'Espagne et la Grèce (Abduali et al., 2026).



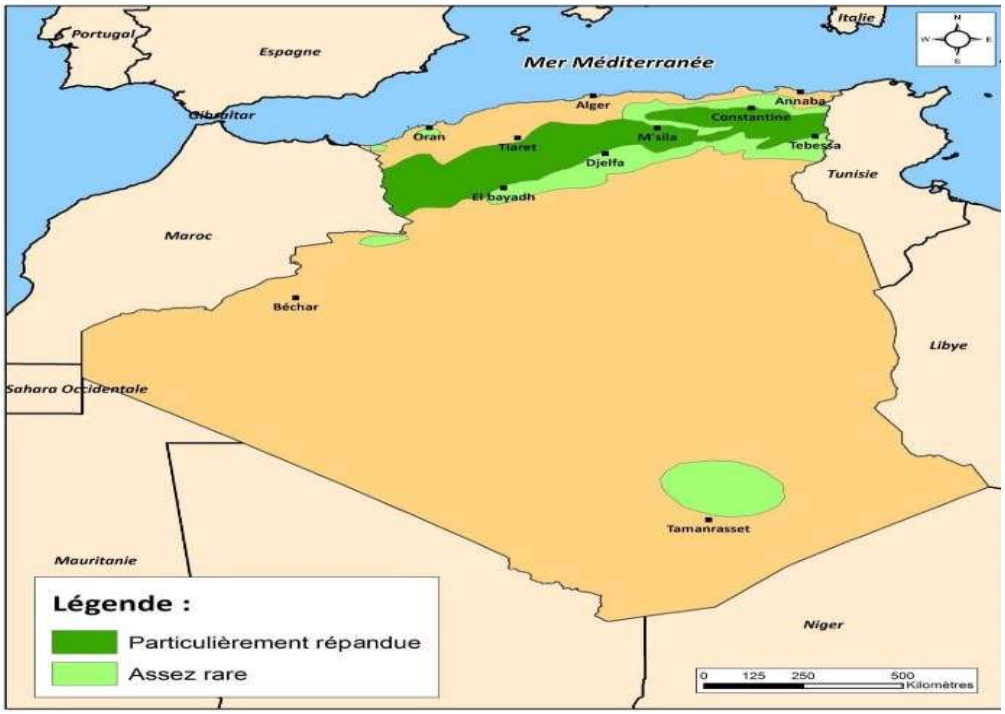
[Figure 3 : Répartition géographique de l'Artemisia herba-alba (Abduali et al., 2026)]

Cette large distribution est liée à sa forte adaptation aux conditions climatiques extrêmes, notamment la sécheresse et les températures élevées. L'espèce se développe principalement sur des sols secs, sableux et rocailleux, et présente une variabilité morphologique et chimique importante selon les conditions écologiques locales (Abduali et al., 2026).

La tolérance de cette plante à la sécheresse est due à des adaptations morphologiques et physiologiques, telles que la présence de feuilles petites recouvertes de poils et d'un système racinaire profond, lui permettant de résister aux fortes chaleurs et au déficit hydrique. Par ailleurs, cette espèce est largement utilisée en médecine traditionnelle dans toutes les régions où elle est présente, notamment pour le traitement des troubles digestifs. Les parties aériennes, en particulier les sommités fleuries, sont généralement préparées sous forme d'infusion ou de décoction (Abduali et al., 2026).

- ***Distribution en Algérie***

L'Artemisia herba-alba fait partie des espèces les plus répandues en Algérie, en particulier dans les steppes ainsi que dans les régions arides et semi-arides. Elle est présente dans l'Est algérien, notamment à Tébessa, dans l'Ouest comme à Tiaret, ainsi que dans les Hauts Plateaux tels que Djelfa. On la retrouve également dans les régions du centre, notamment dans les Hauts Plateaux du centre (Médéa et régions voisines). Cette répartition témoigne de sa grande capacité d'adaptation aux conditions environnementales difficiles et aux sols pauvres (Houérou, 2001; Ozenda, 2004).



[Figure 4 : Répartition géographique de l'Artemisia herba-alba en Algérie (Abderrahmane, 2022)]

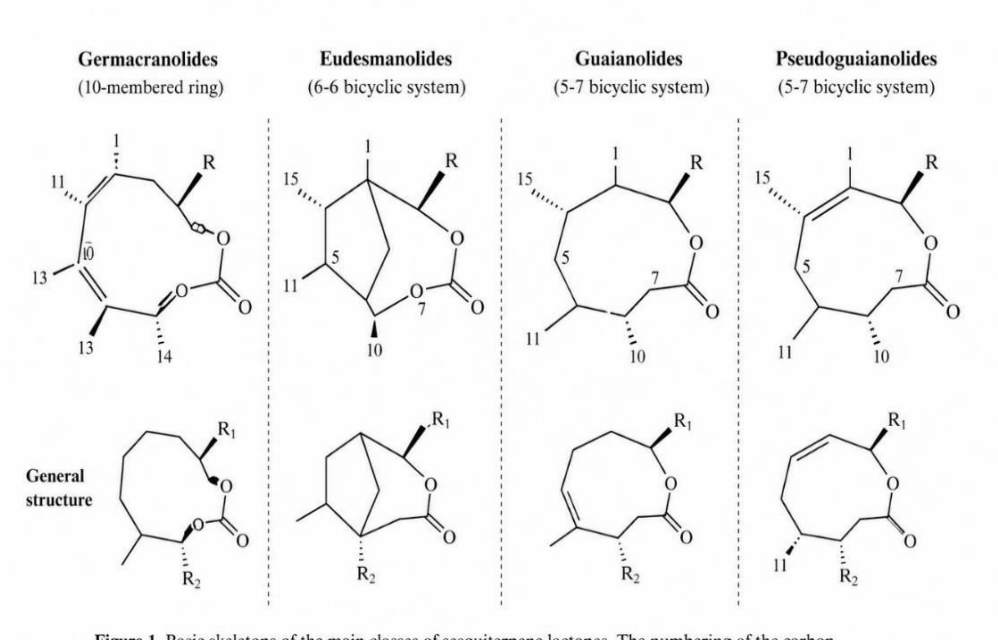
I.1.2. Composition chimique d'Artemisia herba-alba

I.1.2.1. Les lactones sesquiterpéniques

Il existe plus de 4 000 lactones sesquiterpéniques aux structures connues, constituant un groupe vaste et diversifié de métabolites secondaires végétaux bioactifs. La majorité d'entre elles se trouvent dans la famille des Astéracées, qui représente la plus grande diversité structurale avec plus de 3 000 structures différentes. Ces composés sont classés selon leur squelette carboné en plusieurs types : les germacranolides, les eudesmanolides — qui sont les

plus fréquemment rencontrés chez les espèces du genre Artemisia —, ainsi que les guaianolides, les pseudoguaianolides et les xanthonolides.

Des études ont montré que les lactones isolées de *Artemisia herba-alba* présentent une grande variabilité dans leurs profils chimiques selon les pays et les régions, en fonction des conditions géographiques et environnementales (Abou El-Hamd et al., 2010; Moufid & Eddouks, 2012).



[Figure 5 : Squelette de base des principales classes de lactones sesquiterpéniques (Moujir et al., 2020)]

I.1.2.2. Les flavonoïdes

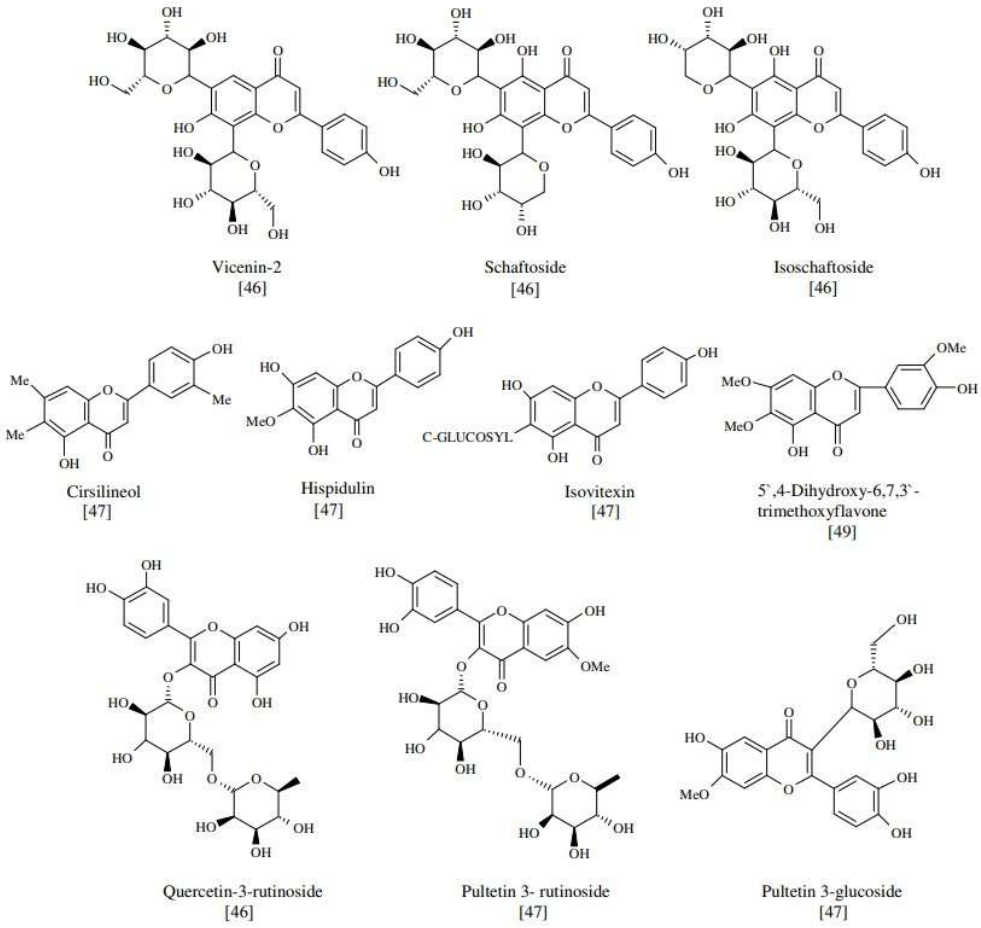
Il existe une grande diversité structurale des flavonoïdes chez *Artemisia herba-alba*, allant des flavones et flavonols glycosidiques courants à des flavonoïdes fortement méthoxylés plus rares, tels que l'hispiduline et la cirsilinéol.

Certaines études menées sur les feuilles et les tiges de cette plante dans différentes régions ont permis d'identifier un ensemble de huit flavonoïdes de type O- et C-glycosides.

D'autres flavonoïdes ont également été identifiés au niveau des parties aériennes de la plante, notamment :

– Un flavone méthoxylé hydroxylé (3-hydroxy-6,7-diméthoxyflavone) isolé à partir de l'extrait aglyconique des parties aériennes (dans certains pays);

- La vicénine-2;
- Le schaftoside;
- L'isoschaftoside;
- La quercétine-3-rutinoside (rutine);
- La patulétine-3-rutinoside;
- La patulétine-3-glucoside (Mohamed et al., 2010; Moufid & Eddouks, 2012).



[Figure 6 : Composition chimique de certains des principaux flavonoïdes de l'Artemisia herba-alba (Mohamed et al., 2010)]

I.1.2.3. Les composés phénoliques

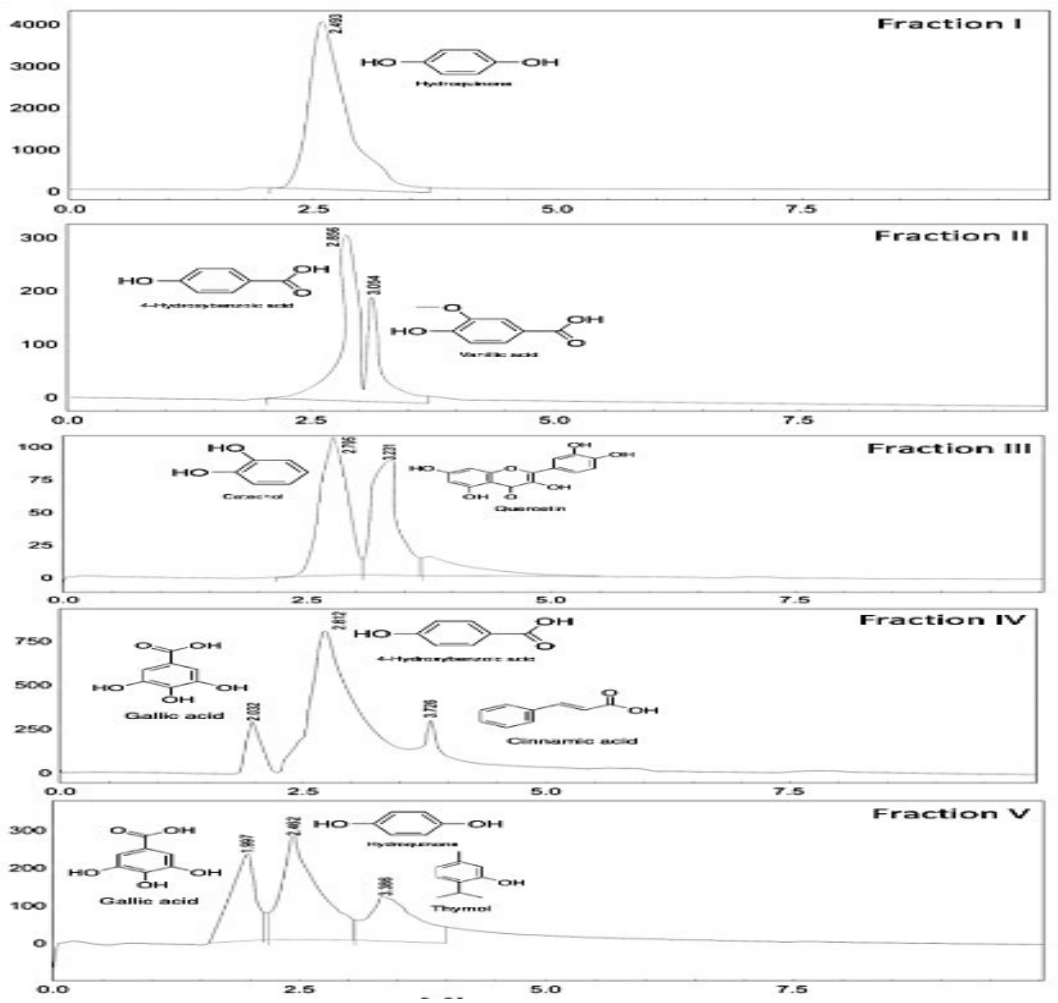
Les composés phénoliques constituent l'un des principaux groupes de substances biologiquement actives dans la plante *Artemisia herba-alba*. Les études ont révélé une grande diversité de leur composition ainsi qu'une variabilité de leur teneur en fonction des méthodes d'extraction et des techniques analytiques utilisées. Les analyses par chromatographie liquide à haute performance (HPLC) des différents extraits de la plante, obtenus à l'aide de solvants tels que l'acétate d'éthyle et l'éthanol, ont mis en évidence plusieurs composés phénoliques majeurs,

notamment l'hydroquinone, l'acide 4-hydroxybenzoïque et l'acide cinnamique, ainsi que d'autres composés comme le catéchol, la quercétine, l'acide gallique et le thymol, dont les concentrations varient selon la partie végétale et le type de solvant utilisé (Mohammed et al., 2021).

Par ailleurs, d'autres travaux utilisant différentes approches analytiques, telles que le criblage phytochimique et la spectroscopie par résonance magnétique, ont permis d'identifier des polyphénols plus complexes, notamment l'acide chlorogénique et ses dérivés, la rutine, la schaftoside, l'isoschaftoside et la vicénine, mettant en évidence la richesse de cette plante en flavonoïdes et en glycosides (Moufid & Eddouks, 2012).

De plus, certaines études ont signalé des différences dans la teneur totale en composés phénoliques par rapport à des travaux antérieurs, ce qui est principalement attribué aux variations des méthodes d'extraction (comme l'utilisation de l'appareil de Soxhlet) et à l'origine du matériel végétal (Mohammed et al., 2021).

L'ensemble de ces résultats indique que le profil phénolique de l'armoise blanche se caractérise par une grande complexité et diversité, ce qui explique ses propriétés antioxydantes et son potentiel d'application dans les domaines alimentaire et pharmaceutique (Mohammed et al., 2021).



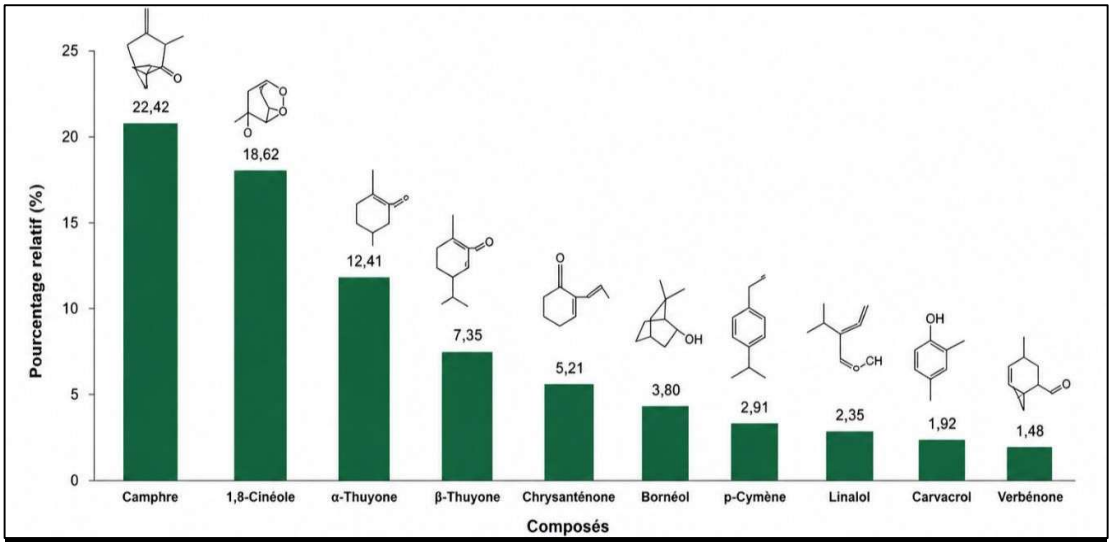
[Figure 7 : Chromatogramme HPLC des composés phénoliques dans différentes fractions de Artemisia herba-alba (Mohammed et al., 2021)]

I.1.2.4. Les huiles essentielles d'Artemisia herba-alba

L'huile essentielle d'Artemisia herba-alba se caractérise par une grande diversité chimique et un polymorphisme chimique (chimiodiversité), où les hydrocarbures monoterpéniques et les monoterpènes oxygénés constituent les groupes chimiques les plus abondants; la présence de certaines quantités importantes de sesquiterpènes a également été signalée chez quelques chémotypes (Haouari & Ferchichi, 2009).

Les principaux composés identifiés dans cette huile sont le camphre, le 1,8-cinéole, la thuyone, le p-cymène, le bornéol, l'α-pinène, ainsi que les dérivés du chrysanthényle et la davanone (Haouari & Ferchichi, 2009; Saleh Faraj et al., 2025). La composition chimique de cette huile essentielle varie selon l'origine géographique, les conditions environnementales et climatiques, le stade de développement de la plante, la période de récolte ainsi que les méthodes

d'extraction, ce qui conduit à l'apparition de chémotypes distincts présentant des activités biologiques variables (Saleh Faraj et al., 2025). En Algérie, les monoterpènes constituent les principaux composés de l'huile essentielle, notamment le camphre, l'α- et le β-thuyone, le 1,8-cinéole ainsi que les dérivés du chrysanthényle, tandis qu'en Tunisie les monoterpènes oxygénés dominent la composition chimique de l'huile (Haouari & Ferchichi, 2009). Ces composés, en particulier les monoterpènes oxygénés, sont associés à d'importantes activités antimicrobiennes et antioxydantes, ce qui explique l'intérêt biologique et thérapeutique de cette huile essentielle (Saleh Faraj et al., 2025).



[Figure 8 : Composition chimique de l'huile essentielle d'Artemisia herba-alba déterminée par GC-MS (Meddour et al., 2016)]

I.1.2.4.1. Activités biologiques de l'huile essentielle d'Artemisia herba-alba

Activité antibactérienne : Plusieurs études ont montré l'efficacité de l'huile essentielle d'Artemisia herba-alba contre différentes bactéries telles que Staphylococcus aureus et Escherichia coli. Cette activité antibactérienne est principalement attribuée à la présence de composés terpéniques et phénoliques capables d'altérer les membranes cellulaires bactériennes et de perturber leurs fonctions biologiques (Helieli et al., 2018).

Activité antifongique : L'huile essentielle d'Artemisia herba-alba possède une activité antifongique importante contre plusieurs champignons pathogènes, grâce à sa richesse en composés terpéniques bioactifs (Kadri et al., 2023). Elle présente également un potentiel intéressant dans la lutte contre certains champignons phytopathogènes affectant les cultures agricoles (Ouguirti et al., 2021).

- **Activité antioxydante :** L'huile essentielle d'Artemisia herba-alba possède une activité antioxydante importante grâce à sa richesse en monoterpènes et en composés biologiquement actifs (Goudjil et al., 2015). Ces composés contribuent à réduire les effets des radicaux libres et à limiter les dommages causés par le stress oxydatif (Mohammed et al., 2021).
- **Activité insecticide :** L'huile essentielle d'Artemisia herba-alba a montré une activité insecticide importante contre certains ravageurs des produits stockés, tels que Tribolium castaneum et Sitophilus zeamais. L'étude a démontré que cette huile essentielle exerce une toxicité directe sur les insectes aussi bien par contact que par fumigation. Cette activité insecticide est principalement liée à la présence de composés volatils, notamment les terpènes, qui agissent comme agents toxiques ou répulsifs en perturbant les fonctions biologiques des insectes et en réduisant leur survie. Ces résultats soulignent le potentiel de l'huile essentielle d'Artemisia herba-alba comme alternative naturelle et écologique aux pesticides chimiques conventionnels, particulièrement dans la protection des produits stockés et dans le domaine de la lutte biologique (Amara et al., 2024).

I.1.2.4.2. Importance en phytopathologie et lutte biologique

Grâce à ses différentes activités biologiques, l'huile essentielle d'Artemisia herba-alba présente un intérêt considérable dans les domaines agricole et phytopathologique (Ouguirti et al., 2021). Elle représente également un candidat naturel prometteur pour des applications dans la lutte biologique contre plusieurs microorganismes pathogènes (Kadri et al., 2023).

I.2. Les nanoparticules

I.2.1. Généralités sur les nanoparticules

Les nanoparticules sont des matériaux ultrafins dont la taille varie généralement entre 1 et 100 nanomètres, et elles représentent un domaine important de la nanotechnologie. À cette échelle, elles présentent des propriétés physicochimiques différentes de celles des matériaux conventionnels en raison de leur grande surface spécifique (Ju-Nam & Lead, 2008). Ces caractéristiques particulières ont favorisé leur utilisation dans plusieurs domaines tels que la médecine, l'agriculture, l'industrie alimentaire et les sciences environnementales. Différents types de nanoparticules métalliques, notamment celles à base d'argent, d'oxyde de zinc, d'oxyde de cuivre, de dioxyde de titane et d'or, ont été largement étudiés pour leurs activités antimicrobiennes et biologiques (Prasad et al., 2014). De plus, des facteurs comme la taille, la morphologie et la composition chimique influencent fortement les interactions des

nanoparticules avec les systèmes biologiques ainsi que leur efficacité dans diverses applications (Parveen et al., 2016).

I.2.2. Exemples de nanoparticules

- Les nanoparticules d'argent (AgNPs) présentent une forte activité antimicrobienne.
- Les nanoparticules de ZnO possèdent des propriétés antifongiques et antibactériennes (Sirelkhatim et al., 2015).
- Les nanoparticules de TiO_2 sont utilisées dans la photocatalyse et la dégradation des polluants (Ochiai & Fujishima, 2012).

I.2.3. Les nanoparticules d'argent

Les nanoparticules d'argent comptent parmi les nanoparticules les plus étudiées en raison de leurs propriétés physicochimiques uniques, notamment leur forte capacité à lutter contre les microorganismes (Morones et al., 2005). Leur taille varie généralement entre 1 et 100 nm, avec une plage fréquente de 10 à 50 nm, ce qui leur confère une activité biologique élevée grâce à l'augmentation de la surface spécifique par rapport au volume (Ju-Nam & Lead, 2008). Elles se distinguent également par leur capacité à perturber les membranes cellulaires microbiennes et à générer des espèces réactives de l'oxygène (ROS), entraînant un stress oxydatif au niveau cellulaire et renforçant ainsi leur activité antimicrobienne. Dans le domaine agricole, ces nanoparticules sont utilisées pour lutter contre les maladies des plantes causées par des bactéries et des champignons, contribuant ainsi à réduire les pertes de rendement et à améliorer la productivité agricole (Rai & Ingle, 2012). Elles sont également intégrées dans les technologies agricoles modernes, notamment les engrais et pesticides nanométriques, afin d'améliorer l'absorption des nutriments et de stimuler plus efficacement la croissance des plantes par rapport aux méthodes conventionnelles (Dimkpa & Bindraban, 2016). Enfin, leurs applications s'étendent à d'autres domaines tels que la purification de l'eau contaminée par des micro-organismes, la conservation des aliments, ainsi qu'au domaine médical où elles sont utilisées comme agents antimicrobiens dans les pansements et les dispositifs biomédicaux (Prasad et al., 2014).

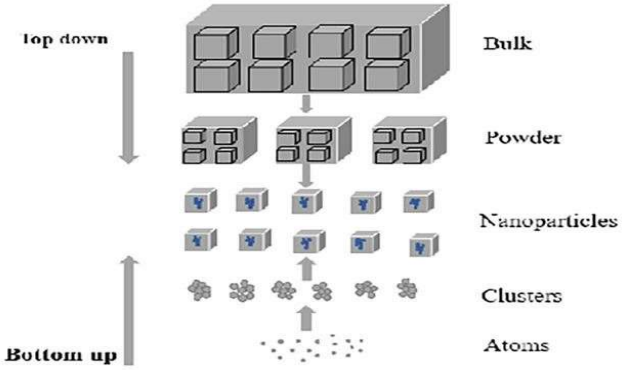
I.2.4. Stratégies de synthèse des nanoparticules

Les stratégies de synthèse des nanoparticules reposent principalement sur deux approches majeures : l'approche « top-down » et l'approche « bottom-up ». Dans l'approche « top-down », les nanoparticules sont obtenues par fragmentation de matériaux massifs en particules de taille nanométrique à l'aide de techniques physiques telles que le broyage mécanique, la gravure ou la lithographie. Cependant, cette méthode peut entraîner une

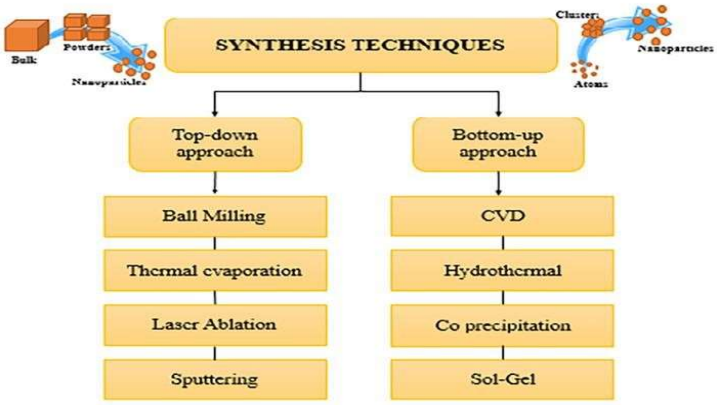
distribution non homogène des tailles et l'apparition de défauts de surface dans les particules obtenues (Ju-Nam & Lead, 2008).

En revanche, l'approche « bottom-up » consiste à construire les nanoparticules à partir d'atomes ou de molécules par des processus d'assemblage chimiques ou biologiques, permettant un meilleur contrôle de la taille, de la forme et de la structure cristalline des nanoparticules (Iravani, 2011). Cette approche constitue la base de la synthèse verte des nanoparticules, où celles-ci sont produites à l'aide de micro-organismes ou d'extraits de plantes agissant comme agents réducteurs et stabilisants des ions métalliques, conduisant à la formation de nanoparticules stables et adaptées à diverses applications (Iravani, 2011; Parveen et al., 2016).

De plus, la synthèse verte est plus respectueuse de l'environnement que les méthodes physiques et chimiques conventionnelles, car elle réduit l'utilisation de produits chimiques toxiques et diminue la consommation d'énergie, tout en permettant la production de nanoparticules stables et efficaces (I. Khan et al., 2019).



The top-down approach and the bottom-up approach



[Figure 9 : Technique de synthèse des nanoparticules : approches Top-down et Bottom-up (Abid et al., 2022)]

I.2.5. Méthodes de synthèse des nanoparticules d'argent

Les nanoparticules d'argent (AgNPs) peuvent être synthétisées selon trois approches principales : physiques, chimiques et biologiques (Rai et al., 2009).

Les méthodes chimiques reposent sur la réduction des ions argent (Ag^{+}) en argent métallique (Ag^{0}) en solution. Par exemple, le nitrate d'argent ($AgNO_3$) est souvent utilisé comme précurseur métallique, tandis que des agents réducteurs en solution permettent la formation des nanoparticules. Cette approche est efficace mais peut impliquer des réactifs potentiellement nocifs pour l'environnement (Mittal et al., 2013).

Les méthodes physiques consistent à transformer un matériau massif en nanoparticules sans utilisation directe de réactifs chimiques. Par exemple, la condensation de vapeur ou des procédés de fragmentation physique de la matière permettent d'obtenir des AgNPs, mais ces techniques nécessitent généralement des équipements spécialisés et une forte consommation énergétique (Rai et al., 2009).

Les méthodes biologiques utilisent des systèmes biologiques naturels. Par exemple, des extraits de plantes contenant des composés bioactifs (tels que des polyphénols) ou des micro-organismes peuvent réduire les ions métalliques et stabiliser les nanoparticules formées. Cette approche est considérée comme simple et respectueuse de l'environnement (Iravani, 2011; Mittal et al., 2013).

I.2.6. Mécanismes de la synthèse verte des nanoparticules métalliques utilisant des extraits végétaux et des huiles essentielles

La synthèse verte des nanoparticules métalliques à partir d'extraits végétaux et d'huiles essentielles représente une approche moderne et écologique de la nanofabrication. Elle repose sur l'interaction entre les ions métalliques et des biomolécules naturelles actives, sans recours à des agents chimiques toxiques. Ce procédé est rendu possible grâce à la richesse des systèmes végétaux en composés bioactifs tels que les polyphénols, les flavonoïdes, les terpènes, les protéines et les alcaloïdes, ainsi qu'aux huiles essentielles particulièrement riches en terpènes et en composés phénoliques aromatiques comme l'eugénol, le thymol et le carvacrol. Ces biomolécules jouent un rôle central dans les étapes de réduction, de nucléation, de croissance et de stabilisation, en agissant simultanément comme agents réducteurs et agents de recouvrement (capping agents) capables de contrôler la formation et la stabilité des nanoparticules métalliques (Ahmed et al., 2016; Iravani, 2011; Jeevanandam et al., 2022; Mittal et al., 2013).

I.3. Agents phytopathogènes

I.3.1. Fusarium sp.

a) Généralités

Le genre Fusarium appartient à la famille des Nectriaceae et regroupe des champignons filamenteux cosmopolites présents dans les sols, les débris végétaux et les tissus végétaux infectés. Ce genre comprend des espèces saprophytes, endophytes et phytopathogènes capables d'infecter un très large éventail de cultures agricoles. Les espèces de Fusarium sont particulièrement connues pour provoquer des maladies vasculaires et produire des mycotoxines dangereuses pour les animaux et l'Homme. Grâce aux avancées en biologie moléculaire et en phylogénie, plus de 300 espèces phylogénétiques de Fusarium ont été identifiées à ce jour (Aoki et al., 2014; Ekwomadu & Mwanza, 2023; Stepien, 2020).

b) Espèces principales

Parmi les espèces les plus importantes du genre Fusarium, on retrouve :

- Fusarium oxysporum, responsable des flétrissements vasculaires;
- Fusarium graminearum, agent majeur de la fusariose des épis des céréales;
- Fusarium verticillioides, fréquemment associé au maïs et à la production de fumonisines;
- Fusarium culmorum, pathogène des céréales en climat tempéré;
- Fusarium solani, impliqué dans les pourritures racinaires.

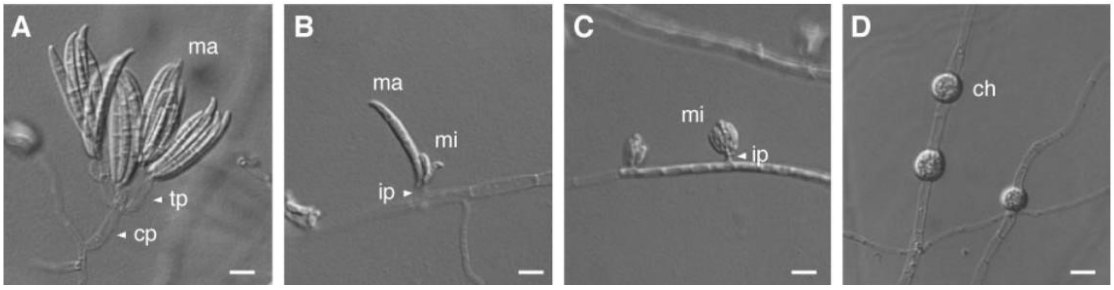
Ces espèces possèdent d'importantes capacités d'adaptation et présentent une grande diversité génétique et pathogénique (Aoki et al., 2014; Ekwomadu & Mwanza, 2023).

c) Importance agronomique

Le genre Fusarium possède une importance agronomique considérable en raison des pertes économiques majeures qu'il provoque dans les cultures céréalières, maraîchères et fruitières. Les maladies fusariennes réduisent le rendement, détériorent la qualité des récoltes et contaminent les produits agricoles par des mycotoxines toxiques. Certaines espèces comme F. graminearum et F. oxysporum comptent parmi les agents phytopathogènes les plus importants à l'échelle mondiale. Les changements climatiques et les pratiques agricoles modernes favorisent davantage la propagation de ces champignons et augmentent les risques de contamination des denrées alimentaires (Ekwomadu & Mwanza, 2023; Ji et al., 2019).

d) Morphologie de Fusarium

Les espèces appartenant au genre Fusarium se caractérisent par un mycélium filamenteux, abondant, hyalin (dépourvu de pigmentation intrinsèque dans les hyphes) et régulièrement cloisonné par des septums (Ekwomadu & Mwanza, 2023; Leslie & Summerell, 2006). Bien que les hyphes soient initialement transparentes, les colonies en culture sur milieu gélosé (notamment sur PDA) développent une grande variété de pigmentations macroscopiques (blanche, rose, violette, jaune ou rouge) dues à la sécrétion de métabolites secondaires diffusibles (Burgess et al., 1994). Sur le plan de la reproduction asexuée et de la survie, le cycle morphologique de ce genre est complexe et repose généralement sur la différenciation potentielle de trois types de structures sporales distinctes, comme illustré chez F. oxysporum.



[Figure 10 : Processus de conidiation chez Fusarium oxysporum (Ohara & Tsuge, 2004)]

e) Classification taxonomique (Aoki et al., 2014)

- Règne : Fungi
- Embranchement : Ascomycota
- Sous-embranchement : Pezizomycotina
- Classe : Sordariomycetes
- Sous-classe : Hypocreomycetidae
- Ordre : Hypocreales
- Famille : Nectriaceae
- Genre : Fusarium

f) Classification morphologique

La démarche traditionnelle pour la caractérisation et l'identification des espèces du genre Fusarium repose sur une double évaluation systématique combinant les critères morphologiques et les caractères culturaux du champignon (Gerlach & Nirenberg, 1982).

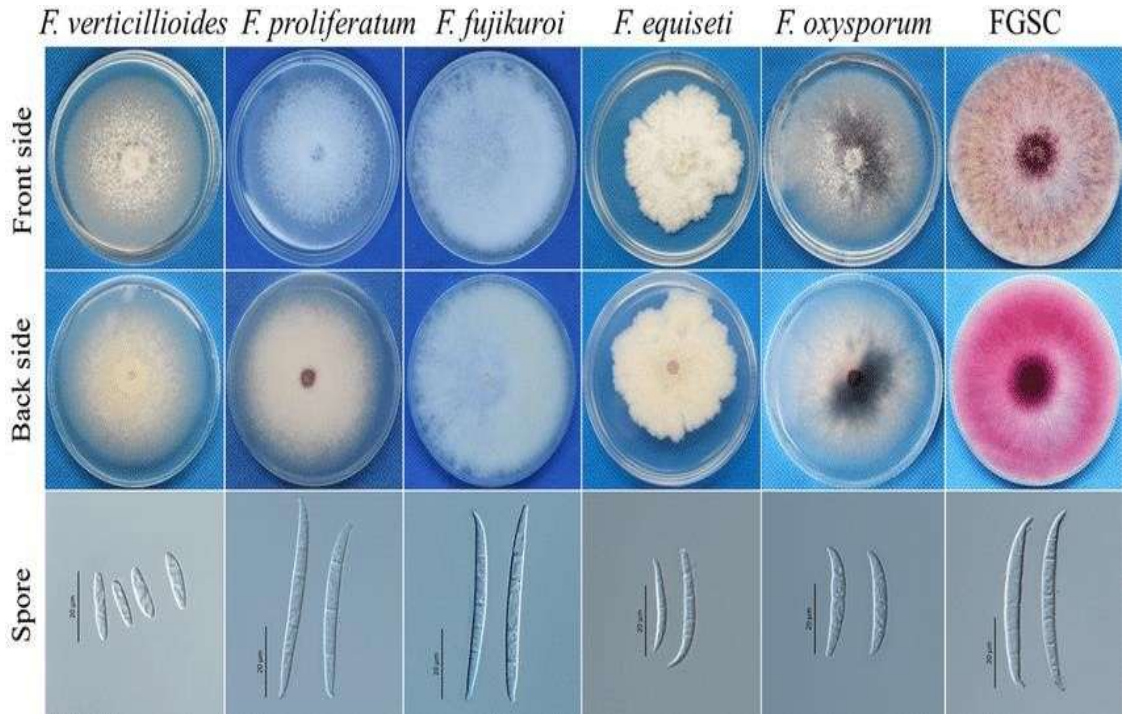
Ce processus implique, dans un premier temps, l'examen des propriétés macroscopiques des colonies fongiques développées en culture, ce qui nécessite la détermination de la texture du mycélium, l'enregistrement de la vitesse de croissance, l'observation de l'aspect général ainsi

que l'évaluation de la capacité des isolats à sécréter des pigments diffusibles, notamment sur le milieu Potato Dextrose Agar (PDA) (Burgess et al., 1994; O'Donnell et al., 2010).

Dans un second temps, le diagnostic s'oriente vers un examen microscopique rigoureux, basé de manière cruciale sur le suivi des traits structuraux et morphologiques fins des différentes structures sporales (Leslie & Summerell, 2006) :

- L'examen des microconidies : en confirmant leur présence ou leur absence, en déterminant leur forme géométrique, leur taille et leur mode d'arrangement ou d'alignement sur les phialides;
- Le suivi des chlamydospores : en observant leur présence ou leur absence, en identifiant la nature de leur emplacement stratégique (intercalaires ou terminales) ainsi qu'en estimant leur abondance et leur densité numérique dans l'échantillon;
- L'analyse des macroconidies : en mesurant leurs dimensions globales, leur forme, en examinant leur courbure et en inspectant la morphologie spécifique de la cellule basale et de la cellule apicale.

Bien que cette approche phénotypique globale ait longtemps permis l'identification, la définition et la structuration des nombreuses espèces et sections au sein du genre Fusarium, elle se heurte aujourd'hui à des limites biologiques majeures. En effet, la grande variabilité morphologique observée entre les isolats, accentuée par une forte plasticité phénotypique (l'aptitude d'une espèce à modifier son aspect en fonction des conditions environnementales), rend la distinction entre certaines espèces particulièrement difficile, subjective et parfois imprécise (Aoki et al., 2014).



[Figure 11 : Caractéristiques morphologiques et macroscopiques des colonies de six espèces du genre Fusarium cultivées sur milieu PDA après 7 jours d'incubation (Wang et al., 2021)]

De plus, l'insuffisance de la morphologie classique a été révélée par deux phénomènes majeurs

- L'émergence d'« espèces cryptiques » : il s'agit de lignées évolutives totalement identiques sur le plan visuel et morphologique, mais isolées et distinctes sur le plan génétique.
- La formation de « complexes d'espèces » (species complexes) : ce déficit méthodologique a fréquemment conduit au regroupement erroné de souches génétiquement différentes sous une seule et même dénomination nomenclaturelle (Geiser et al., 2013).

Enfin, pour aborder la variabilité liée au pouvoir pathogène, la méthodologie s'appuie sur l'introduction du concept de Formae speciales (f. sp.). Ce terme désigne des populations fongiques au sein d'une même espèce morphologique qui ne peuvent pas être différenciées visuellement, mais qui manifestent une spécificité pathogénique stricte vis-à-vis d'un ou de plusieurs hôtes végétaux spécifiques (Baayen et al., 2000). Cette distinction pratique demeure un pilier fondamental pour lier précisément chaque agent pathogène à sa plante cible et pour concevoir des stratégies de lutte intégrée et de gestion individualisée.

g) Cycle de vie

Le cycle de vie des espèces du genre Fusarium est principalement polycyclique, caractérisé par une alternance entre phases de survie dans le sol, colonisation racinaire et production de propagules infectieuses. La reproduction est majoritairement asexuée, reposant sur la production de microconidies, macroconidies et chlamydospores, bien que certaines espèces présentent une phase sexuée associée au genre Gibberella (Ekwomadu & Mwanza, 2023; Jackson et al., 2024).

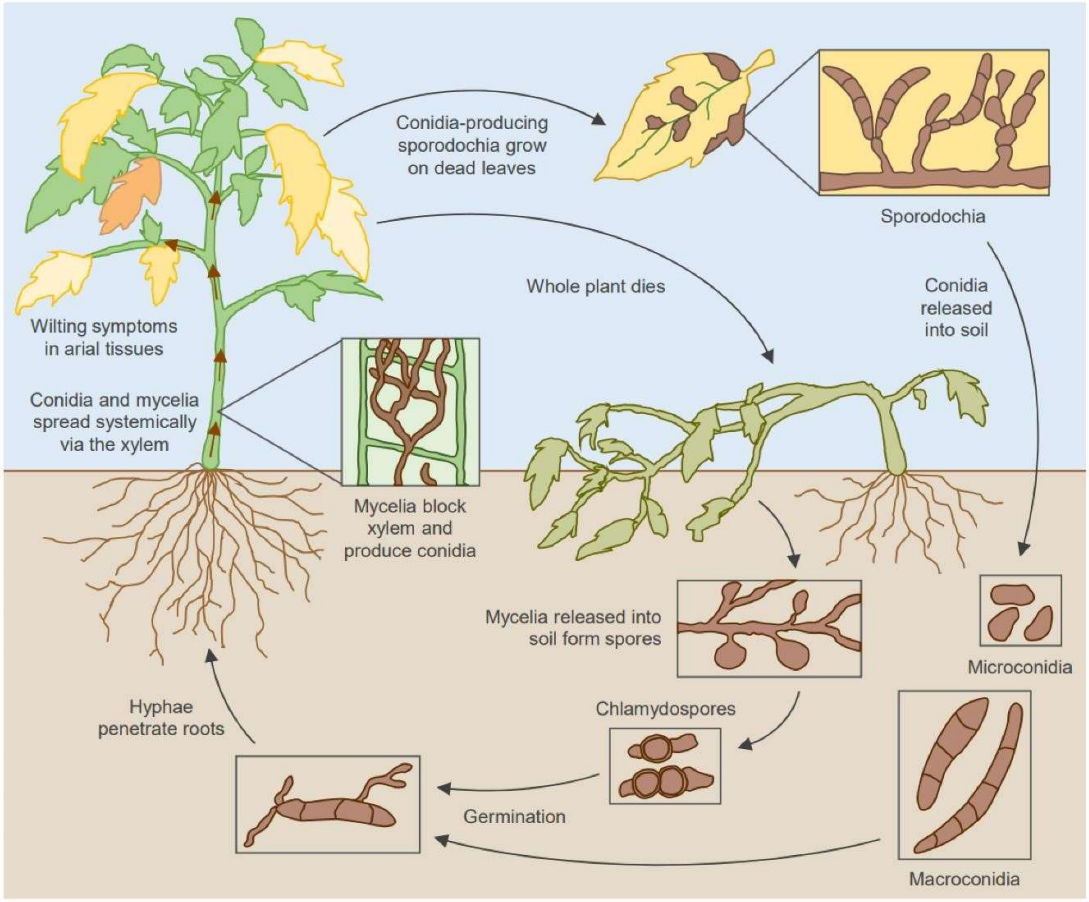


Figure 12 : Représentation schématique du cycle de vie du genre Fusarium (Jackson et al., 2024)

Dans les agroécosystèmes, Fusarium persiste dans le sol et les résidus végétaux sous forme saprophyte grâce à sa capacité d'adaptation écologique et surtout à la formation de chlamydospores, structures épaisses à paroi renforcée permettant une survie prolongée dans des conditions défavorables. Ces structures constituent la principale source d'inoculum primaire et expliquent la persistance du pathogène dans les sols agricoles (Were et al., 2023).

Lorsque les conditions environnementales deviennent favorables (humidité élevée, température adéquate et présence d'exsudats racinaires), les chlamydospores germent et donnent naissance à un mycélium actif capable de coloniser la rhizosphère. Le processus initial d'infection repose sur l'interaction entre le champignon et les tissus racinaires, où des effecteurs fongiques facilitent la pénétration et la suppression des défenses de la plante, permettant ainsi une colonisation réussie des racines (Redkar et al., 2022).

Après pénétration, le champignon progresse de manière intercellulaire à travers le cortex racinaire jusqu'au système vasculaire, en particulier le xylème. Cette colonisation entraîne une obstruction progressive des vaisseaux conducteurs et une perturbation du transport de l'eau, conduisant aux symptômes caractéristiques de flétrissement vasculaire (Jackson et al., 2024). Au cours de l'infection, le pathogène produit des microconidies qui sont transportées par le flux xylémien, assurant une dissémination systémique à l'intérieur de la plante. Les macroconidies, quant à elles, se forment principalement sur les tissus nécrosés et participent à la contamination des résidus végétaux, du sol et de l'eau d'irrigation, contribuant ainsi à la propagation secondaire du pathogène (Ekwomadu & Mwanza, 2023).

En conditions défavorables, le cycle se termine par la formation ou la persistance de chlamydospores issues du mycélium ou des conidies, assurant la survie du champignon dans le sol pendant plusieurs années. Cette stratégie de survie rend la gestion des fusarioses particulièrement difficile en agriculture et explique la récurrence des infections d'une saison culturale à l'autre (Jackson et al., 2024; Were et al., 2023).

I.3.2. *Botrytis* sp.

a) Généralités

Le genre Botrytis regroupe des champignons filamenteux largement distribués dans l'environnement et associés à de nombreuses espèces végétales. Les espèces de ce genre se caractérisent par la formation d'un mycélium septé, de conidiophores ramifiés et de conidies asexuées qui assurent leur reproduction et leur dissémination. Elles sont également capables de produire des sclérotes, structures de résistance leur permettant de survivre dans des conditions défavorables pendant de longues périodes. Parmi les espèces décrites, Botrytis cinerea est la plus connue et sert souvent de modèle pour l'étude de la biologie et du développement du genre.

Les espèces de Botrytis présentent une grande capacité d'adaptation aux conditions environnementales, notamment en présence d'une humidité élevée qui favorise la germination des conidies et la croissance du mycélium (Elad et al., 2007; Fillinger & Elad, 2016).

b) Les principales espèces

Le genre Botrytis comprend plusieurs espèces présentant des degrés variables de spécificité vis-à-vis de leurs plantes hôtes. Parmi les espèces les plus connues figurent :

- Botrytis cinerea, qui possède un large spectre d'hôtes;
- B. aclada et B. squamosa, fréquemment associées aux espèces du genre Allium;
- B. elliptica, qui infecte les lis;
- B. tulipae, qui infecte les tulipes;
- B. gladiolorum, qui infecte les glaïeuls.

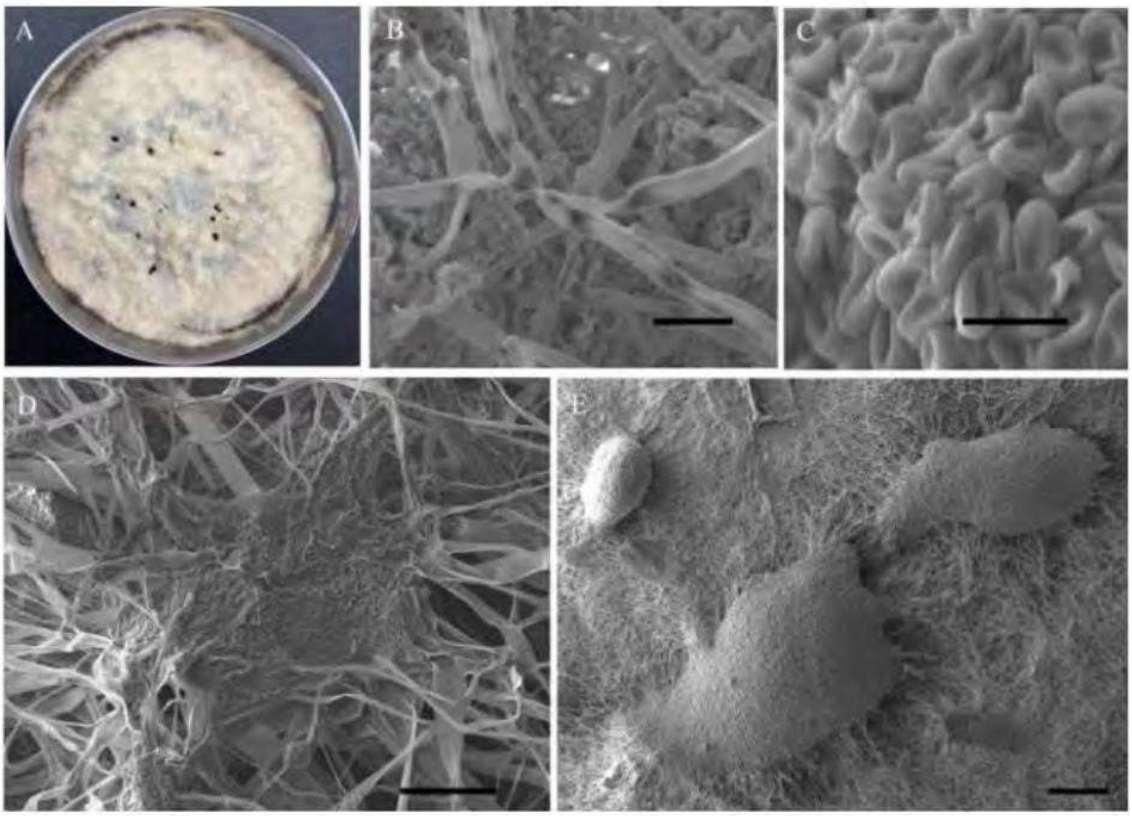
Cette diversité spécifique illustre l'adaptation des espèces de Botrytis à différents hôtes végétaux et à diverses conditions environnementales (Fillinger & Elad, 2016; Staats et al., 2004).

c) Importance agronomique

Le genre Botrytis revêt une grande importance agronomique en raison de sa capacité à affecter de nombreuses cultures d'intérêt économique. Les espèces de ce genre sont responsables de diverses maladies entraînant des pertes significatives au champ, durant le transport et au cours du stockage post-récolte. Les infections causées par Botrytis peuvent altérer la qualité des produits végétaux, réduire leur valeur commerciale et diminuer les rendements agricoles. Parmi les espèces du genre, Botrytis cinerea est considérée comme l'une des plus importantes en raison de son large spectre d'hôtes et de sa distribution mondiale. La maîtrise des maladies causées par les espèces de Botrytis constitue ainsi un enjeu majeur pour la production agricole et la conservation des récoltes (Elad et al., 2007; Fillinger & Elad, 2016).

d) Morphologie

Le genre Botrytis regroupe des champignons filamenteux présentant des caractéristiques morphologiques communes qui permettent leur identification. Ces champignons se distinguent par la présence d'un mycélium septé, de conidiophores ramifiés portant des conidies asexuées, ainsi que de structures de résistance appelées sclérotes. L'étude de ces caractères morphologiques est essentielle pour la reconnaissance et la différenciation des espèces du genre (Fillinger & Elad, 2016).



[Figure 13 : Morphologie du genre Botrytis : conidiophores (B), conidies (C), mycélium (D) et sclérotes (E) (Cuervo-Parra et al., 2024)]

Mycélium : Le mycélium de Botrytis est constitué d'hyphes hyalines, septées et abondamment ramifiées. Il se développe à la surface ou à l'intérieur des tissus colonisés et assure l'absorption des nutriments nécessaires à la croissance du champignon (Elad et al., 2007).

Conidiophores : Les conidiophores sont des structures aériennes dressées qui émergent du mycélium. Ils présentent une ramification caractéristique à leur extrémité, donnant un aspect arborescent. Ces structures portent les cellules productrices de conidies et jouent un rôle essentiel dans la reproduction asexuée et la dissémination du champignon (Fillinger & Elad, 2016).

Conidies : Les conidies sont des spores asexuées unicellulaires, généralement ovoïdes à ellipsoïdales. Elles sont produites en grand nombre à l'extrémité des conidiophores et constituent le principal moyen de propagation du champignon. Leur germination est favorisée par des conditions d'humidité élevée (Elad et al., 2007).

Sclérotes : Les sclérotes sont des structures compactes constituées d'un amas d'hyphes fortement condensées. De couleur sombre à maturité, ils permettent au champignon de survivre

pendant de longues périodes dans des conditions défavorables et représentent une importante structure de conservation du pathogène dans l'environnement (Fillinger & Elad, 2016).

e) Classification taxonomique (Fillinger & Elad, 2016)

- Règne : Fungi
- Sous-règne : Dikarya
- Embranchement (phylum) : Ascomycota
- Sous-embranchement : Pezizomycotina
- Classe : Leotiomycetes
- Sous-classe : Leotiomycetidae
- Ordre : Helotiales
- Sous-ordre : Sclerotiniineae
- Famille : Sclerotiniaceae
- Genre : Botrytis

f) La classification morphologique :

La classification morphologique du genre *Botrytis* repose essentiellement sur l'observation des structures végétatives et reproductrices du champignon. Historiquement, l'identification des espèces de *Botrytis*a été basée sur plusieurs critères morphologiques, notamment l'aspect des colonies en culture après incubation **(Figure.14a,i)**, les caractéristiques du mycélium, la morphologie des conidiophores **(Figure.14 g,k)**, la forme et les dimensions des conidies **(Figure.20 h,l)**, ainsi que la présence, la taille et la disposition des sclérotes **(Fugure14 c-f,j) (Staats et al., 2005)**.



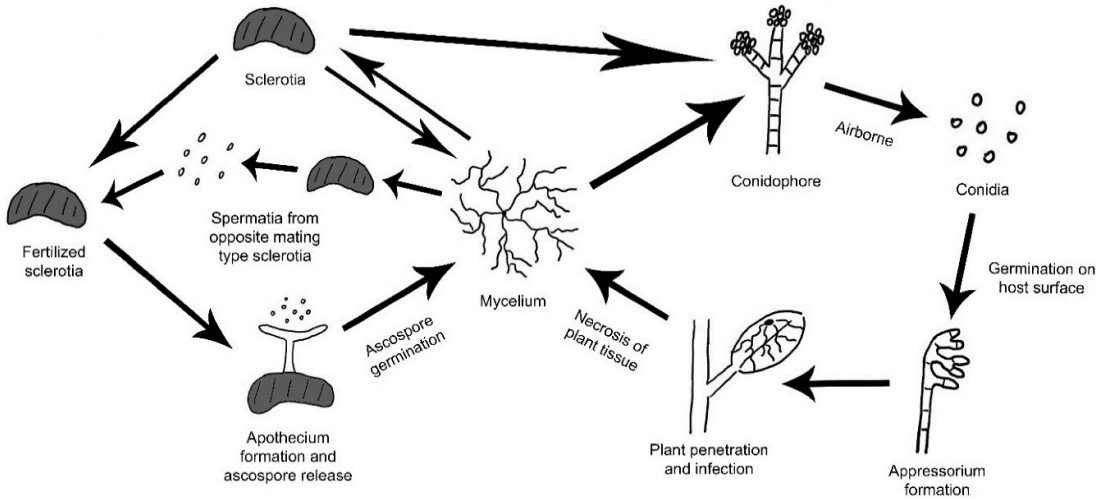
Figure 14. Caractéristiques morphologiques des espèces Botrytis cinerea (a-h) et Botrytis pelargonii (i-l) sur milieu PDA (Maghsoodi et al., 2025).

Les espèces du genre se distinguent généralement par un mycélium hyalin, septé et abondamment ramifié, à partir duquel se développent des conidiophores dressés et ramifiés portant des conidies asexuées regroupées en amas **(Figure 14g,k)**. Ces conidies, généralement unicellulaires et de forme ovoïde à ellipsoïdale, constituent un caractère diagnostique important dans la distinction des espèces **(Figure 14h, l)**. La formation de sclérotes, structures de résistance composées d'hyphes compactées et mélanisées, représente également un critère morphologique majeur utilisé dans la classification traditionnelle du genre **(Figure 14 c-f, j)**.

Toutefois, en raison de la forte similitude morphologique observée entre certaines espèces de *Botrytis*, les caractères morphologiques seuls ne permettent pas toujours une identification fiable. C'est pourquoi les approches modernes combinent aujourd'hui les observations morphologiques aux analyses moléculaires et phylogénétiques afin d'améliorer la délimitation et la classification des espèces au sein du genre **(Fillinger & Elad, 2016; Jarvis, 1977; Staats et al., 2005).**

g) Cycle de vie

Le genre Botrytis, notamment Botrytis cinerea, est capable de survivre pendant de longues périodes dans des conditions environnementales défavorables grâce à la formation de structures de résistance appelées sclérotes. Ces structures mélanisées peuvent persister dans le sol ou sur les débris végétaux infectés et constituent une source importante d'inoculum pour les infections futures. Le champignon peut également subsister sous forme de mycélium dormant dans les tissus végétaux contaminés. Lorsque les conditions deviennent favorables, en particulier sous une humidité élevée et des températures modérées, les sclérotes germent et initient un nouveau cycle de développement.



[Figure 15 : Cycle de vie du genre Botrytis (Cheung et al., 2020)]

La reproduction asexuée représente la phase la plus importante du cycle biologique de Botrytis et joue un rôle majeur dans l'épidémiologie de la maladie. Au cours de cette phase, le champignon produit des conidiophores portant de nombreuses conidies, qui sont disséminées par le vent, les éclaboussures d'eau, les insectes ou les activités culturales. Après leur dépôt sur les organes végétaux sensibles, les conidies germent en présence d'eau libre et forment des tubes germinatifs capables de pénétrer les tissus de l'hôte, soit directement, soit par l'intermédiaire de blessures ou de tissus sénescents. Le mycélium colonise ensuite les tissus infectés, provoquant la pourriture grise caractéristique et produisant de nouvelles conidies, à l'origine de multiples cycles d'infections secondaires au cours d'une même saison (Fillinger & Elad, 2016).

Bien que moins fréquente dans les conditions naturelles, la reproduction sexuée fait également partie du cycle de vie du genre Botrytis. Cette phase implique la recombinaison génétique entre souches compatibles et conduit à la formation d'apothécies, structures fructifères produisant des ascospores. Ces dernières participent à la dissémination du

champignon et contribuent au maintien de la diversité génétique des populations. Même si leur rôle dans le développement des épidémies est généralement considéré comme secondaire par rapport aux conidies, les ascospores constituent un élément important dans l'évolution et l'adaptation des espèces du genre Botrytis (Fillinger & Elad, 2016; Williamson et al., 2007).

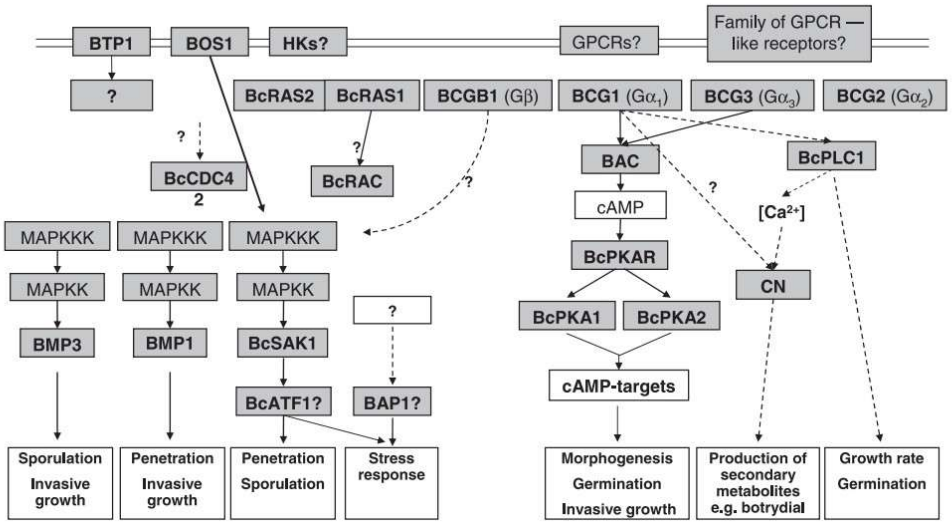
h) Maladies causées par le genre Botrytis

Les espèces du genre Botrytis sont responsables de nombreuses maladies affectant les cultures agricoles, maraîchères et ornementales. Parmi les principales maladies causées par ce genre :

- La pourriture grise : provoquée par Botrytis cinerea, qui affecte de nombreuses plantes cultivées telles que la vigne, la tomate, la fraise et plusieurs espèces ornementales. Elle se caractérise par l'apparition de lésions brunes recouvertes d'un feutrage gris constitué de conidies et de conidiophores (Williamson et al., 2007).
- Les taches chocolatées de la fève : causées par Botrytis fabae, qui se manifestent par des taches brun foncé à noirâtres sur les feuilles, les tiges et les fleurs de la fève, pouvant entraîner une réduction importante du rendement (Fillinger & Elad, 2016).
- La pourriture du col de l'oignon : provoquée principalement par Botrytis aclada et Botrytis allii, qui se développe généralement après la récolte et entraîne la dégradation des bulbes durant le stockage (Fillinger & Elad, 2016).
- Le feu de la tulipe : causé par Botrytis tulipae, caractérisé par l'apparition de taches nécrotiques sur les feuilles, les fleurs et les tiges, pouvant conduire à la destruction complète des plants infectés (Fillinger & Elad, 2016).
- La brûlure du lys : provoquée par Botrytis elliptica, qui affecte principalement les feuilles et les fleurs des lys en entraînant des lésions nécrotiques et une diminution de la qualité ornementale des plantes (Fillinger & Elad, 2016).

i) Facteurs de virulence

La virulence de Botrytis cinerea repose sur une stratégie nécrotrophe hautement coordonnée, impliquant l'expression simultanée de multiples facteurs moléculaires qui perturbent les défenses de la plante et conduisent à une destruction rapide des tissus hôtes (Williamson et al., 2007).



[Figure 16 : Voies de signalisation chez Botrytis cinerea (Williamson et al., 2007)]

I.3.3. *Erwinia amylovora*

a) Généralités

Le genre Erwinia regroupe des bactéries phytopathogènes largement impliquées dans diverses maladies affectant de nombreuses plantes cultivées et ornementales. Ces bactéries sont capables de coloniser différents tissus végétaux et d'y induire une variété de symptômes, notamment des nécroses, des chancres, des brûlures bactériennes ainsi que des pourritures, dont l'expression dépend de l'espèce bactérienne et de l'hôte infecté (Piqué et al., 2015).

Le genre Erwinia tire son nom du phytopathologiste américain Erwin F. Smith, considéré comme l'un des fondateurs de la bactériologie végétale. Erwinia amylovora occupe une importance historique particulière, puisqu'elle a été la première bactérie formellement identifiée comme agent causal d'une maladie végétale — le feu bactérien —, marquant ainsi une étape fondamentale dans le développement de la phytobactériologie moderne (Van der Zwet & Keil, 1979).

b) Importance phytopathologique

Les espèces du genre Erwinia figurent parmi les bactéries phytopathogènes les plus importantes sur le plan économique. Erwinia amylovora, agent causal du feu bactérien, affecte plus de 130 espèces appartenant principalement à la famille des Rosaceae, notamment le pommier (Malus domestica) et le poirier (Pyrus communis). Cette maladie provoque des pertes économiques considérables dans les régions productrices de fruits à pépins à travers le monde (Agrios, 2005; Mansfield et al., 2012).

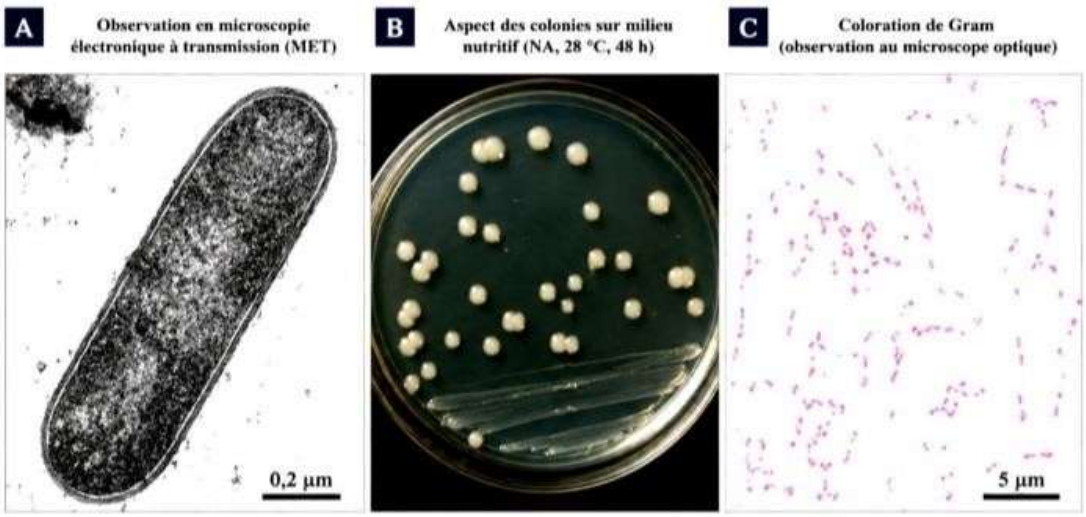
Par ailleurs, certaines espèces anciennement rattachées au genre Erwinia et aujourd'hui classées dans les genres Pectobacterium et Dickeya sont responsables de pourritures molles affectant diverses cultures d'intérêt agronomique. Leur pouvoir pathogène est principalement lié à la production d'enzymes dégradant les parois cellulaires végétales ainsi qu'à d'autres facteurs de virulence favorisant la colonisation des tissus végétaux (Agrios, 2005; Mansfield et al., 2012).

c) Morphologie

Les bactéries du genre Erwinia sont des bacilles à Gram négatif, généralement droits, mesurant environ 0,5 à 1,0 µm de largeur et 1,0 à 3,0 µm de longueur (Coutinho & Shin, 2023). Les cellules sont observées isolément, par paires ou parfois regroupées en courtes chaînes.

La majorité des espèces du genre sont mobiles grâce à la présence de flagelles péritriches répartis sur l'ensemble de la surface cellulaire, bien que le degré de mobilité puisse varier selon les espèces et les conditions de culture (Eastgate, 2000). Les bactéries du genre Erwinia sont non sporulées et présentent l'organisation cellulaire typique des bactéries à Gram négatif, caractérisée par une membrane cytoplasmique entourée d'une fine couche de peptidoglycane et d'une membrane externe (Coutinho & Shin, 2023).

En culture sur milieu nutritif, les colonies apparaissent généralement lisses, circulaires, convexes et de couleur blanc crème à jaunâtre, bien que certains caractères culturaux puissent varier selon les espèces et les conditions de croissance (Eastgate, 2000).



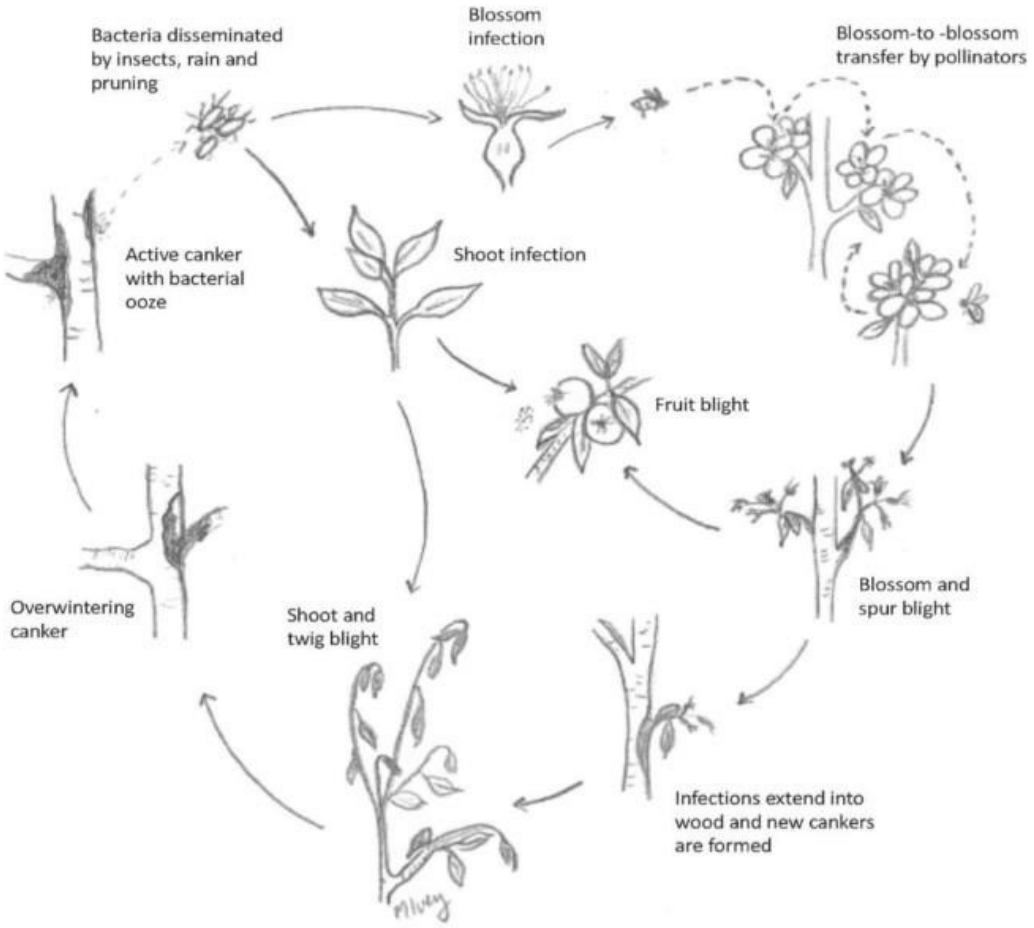
[Figure 17 : Morphologie d'Erwinia (Erwinia amylovora). A : Morphologie cellulaire (MET), B : Aspect macroscopique des colonies, C : Coloration de Gram (OEPP, 2022)]

d) Classification taxonomique (Coutinho & Shin, 2023)

- Domaine : Bacteria
- Phylum : Pseudomonadota
- Classe : Gammaproteobacteria
- Ordre : Enterobacterales
- Famille : Erwiniaceae
- Genre : Erwinia

e) Cycle de vie

Le cycle de développement d'Erwinia amylovora, agent causal du feu bactérien, débute par la survie de la bactérie durant l'hiver dans les chancres présents sur les branches et les troncs des arbres infectés (Thomson, 2000). Au printemps, sous l'effet de conditions favorables de température et d'humidité, la bactérie reprend son activité, se multiplie et produit un exsudat bactérien riche en cellules infectieuses (Thomson, 2000). Cet inoculum est ensuite disséminé par la pluie, le vent, les insectes pollinisateurs ou les outils contaminés vers les fleurs et les jeunes tissus sensibles (Thomson, 2000). Après son entrée dans la plante, principalement par les nectarthodes florales ou les blessures, la bactérie colonise les espaces intercellulaires et les tissus vasculaires (Thomson, 2000), où elle se multiplie activement et forme des biofilms favorisant sa propagation systémique (Koczan et al., 2009; Thomson, 2000). Cette colonisation entraîne l'apparition des symptômes caractéristiques du feu bactérien, tels que le flétrissement, les nécroses et la formation de nouveaux chancres, lesquels serviront de réservoir à la bactérie durant l'hiver suivant, assurant ainsi la continuité du cycle infectieux (Thomson, 2000).



[Figure 18 : Cycle de vie du feu bactérien « Erwinia amylovora » (Ivey, 2016)]

f) Maladies causées par le genre Erwinia

Feu bactérien : causé principalement par Erwinia amylovora; affecte les arbres fruitiers à pépins, surtout le pommier et le poirier (Rosacées). Les symptômes incluent le flétrissement rapide des fleurs et des jeunes pousses, le noircissement des tissus donnant un aspect brûlé, et la présence d'exsudats bactériens. Impact : maladie très destructrice entraînant des pertes importantes dans les vergers (Mansfield et al., 2012; Van der Zwet & Keil, 1979).

Pourriture molle : causée par des espèces autrefois classées dans le genre Erwinia; affecte plusieurs cultures maraîchères comme la pomme de terre, la carotte et la tomate. Symptômes : dégradation rapide des tissus végétaux, aspect aqueux et mou, accompagnée d'une odeur caractéristique de putréfaction. Impact : pertes importantes surtout en post-récolte et lors du stockage (Mansfield et al., 2012).

Nécroses et chancres bactériens : associés à certaines espèces proches du complexe Erwinia; affectent les tiges, feuilles et fruits. Symptômes : lésions localisées évoluant vers des nécroses et parfois des chancres sur les tissus. Impact : réduction de la qualité et du rendement des cultures (Mansfield et al., 2012).

CHAPITRE II
Matériel et méthodes

Chapitre II : Matériel et méthodes

II.1. Introduction

Cette étude repose sur l'hypothèse que l'association de l'huile essentielle d'Artemisia herba-alba avec des nanoparticules d'argent (AgNPs) pourrait améliorer de manière significative son activité antimicrobienne.

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer l'activité antimicrobienne, à la fois antifongique et antibactérienne, de l'huile essentielle, de l'hydrolat ainsi que de leur formulation sous forme de nanoparticules. Pour atteindre cet objectif, les points suivants ont été envisagés :

- Synthétiser des nanoparticules d'argent (AgNPs) en utilisant l'huile essentielle extraite d'Artemisia herba-alba;
- Évaluer l'activité antimicrobienne de l'hydrolat obtenu à partir d'Artemisia herba-alba;
- Étudier et comparer l'activité antimicrobienne de l'huile essentielle pure, de l'hydrolat et des nanoparticules d'argent synthétisées à partir de l'huile essentielle contre les souches pathogènes testées;
- Évaluer l'activité antifongique vis-à-vis de Botrytis sp. et de Fusarium sp., ainsi que l'activité antibactérienne vis-à-vis d'Erwinia sp., puis comparer les résultats obtenus entre les différents traitements afin d'identifier la formulation la plus efficace.

II.2. Matériel

Matériel biologique : *Artemisia herba-alba* et les souches phytopatogènes (*Fusarium sp., Botrytis sp., Erwinia amylovora*).

Réactifs : Nitrate d'ARGENT (AgNO3).

Matériel d'extraction : Appareil d'hydrodistillation.

II.3 Méthodes de travail

II.3.1. Extraction de l'huile essentielle

Les parties aériennes d'Artemisia herba-alba Asso, séchées à l'ombre, ont été acquises auprès d'un herboriste. Le matériel végétal provenait de la région de Ksar El Boukhari, wilaya de Médéa (Algérie). Une quantité de 8 kg de matière végétale séchée a été utilisée pour l'extraction de l'huile essentielle par hydrodistillation selon la technique d'entraînement à la vapeur d'eau, à l'aide d'un alambic en acier inoxydable (INOX).

L'unité de distillation utilisée est constituée d'une cuve cylindrique de 80 cm de hauteur et de 30 cm de diamètre, équipée d'une double enveloppe et d'une plaque perforée destinée à supporter le matériel végétal. La durée totale de l'extraction a été fixée à 2 heures.



[Figure 19 : Appareil d'hydrodistillation de type Clevenger]

Le procédé d'hydrodistillation repose sur l'entraînement des composés volatils par la vapeur d'eau. Lors du passage de celle-ci à travers la matière végétale, les structures sécrétrices contenant l'huile essentielle sont rompues, permettant la libération des composés aromatiques qui sont ensuite transportés par la vapeur. Le mélange vapeur–huile obtenu est dirigé vers un condenseur refroidi par circulation d'eau froide, où il se liquéfie pour former le distillat.

Le distillat est recueilli dans une ampoule florentine, où la séparation des phases s'effectue naturellement. En raison de sa faible densité et de son immiscibilité avec l'eau, l'huile essentielle flotte à la surface et peut être séparée de la phase aqueuse résiduelle, appelée hydrolat. Une étape supplémentaire de décantation a ensuite été réalisée à l'aide d'une ampoule à décanter afin d'assurer une meilleure séparation des deux phases non miscibles : la phase organique correspondant à l'huile essentielle et la phase aqueuse correspondant à l'hydrolat. Les

huiles essentielles obtenues ont été recueillies puis conservées dans des flacons en verre ambré et stockées au réfrigérateur à 4 °C jusqu'à leur utilisation pour les analyses physicochimiques et chromatographiques.

II.3.2. Souches phytopathogènes fongiques et bactériennes

Les souches fongiques utilisées dans cette étude, à savoir Fusarium sp. et Botrytis sp., ont été obtenues en mai 2026 auprès de la station de Boufarik de l'Institut National de la Protection des Végétaux (INPV) dans la wilaya de Blida et de l'Institut National de Protection des Végétaux de El Harrach.

De même, la souche bactérienne Erwinia sp. a été fournie par le même organisme.

Ces souches ont été cultivées au laboratoire afin de produire une biomasse suffisante pour l'évaluation des effets antifongiques et antibactériens des solutions préparées dans le cadre de cette étude.

La réalisation des essais en répétitions constitue une étape essentielle pour garantir la fiabilité et la reproductibilité des résultats obtenus concernant l'activité antifongique et antibactérienne des traitements testés.

II.4. Préparation des milieux de culture

II.4.1. Le milieu PDA pour les champignons

Préparation : La préparation du milieu Potato Dextrose Agar (PDA) consiste à dissoudre 39 g de milieu déshydraté dans 1 L d'eau distillée, sous chauffage et agitation continue à température modérée, jusqu'à dissolution complète et obtention d'une solution homogène.



[Figure 20 : Préparation du milieu PDA]

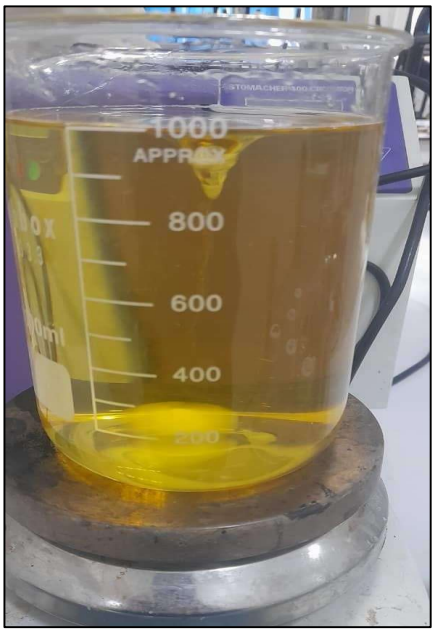
Stérilisation du milieu : Après dissolution complète du milieu, la solution est transférée dans un flacon en verre approprié et fermé sans serrage complet afin d'éviter toute augmentation de pression. Le milieu est ensuite stérilisé à l'autoclave à 121 °C sous une pression de 1,1 bar pendant 15 à 20 minutes. Le milieu stérilisé est ensuite conservé au réfrigérateur à 4 °C jusqu'à son utilisation. Avant emploi, il est réchauffé afin de le liquéfier de nouveau.



[Figure 21 : Autoclave utilisé pour la stérilisation du matériel et des milieux de culture]

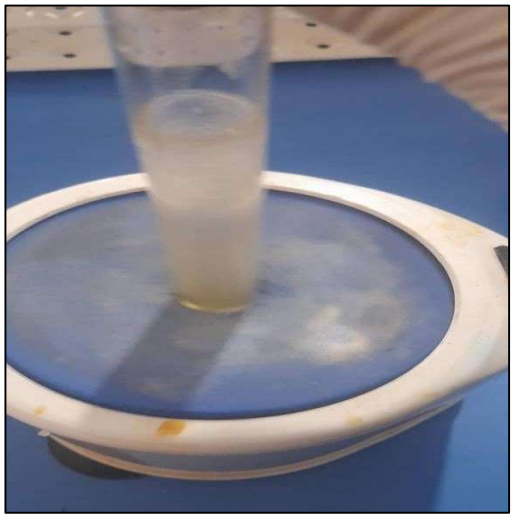
II.4.2. Le milieu peptoné

Le milieu peptoné a été préparé en dissolvant 20 g de peptone dans 1 L d'eau distillée sous agitation continue jusqu'à dissolution complète de la poudre. Le milieu a ensuite été réparti dans des flacons appropriés et stérilisé à l'autoclave à 121 °C pendant 15 minutes. Après refroidissement, le milieu obtenu, de couleur jaune pâle et d'aspect limpide, a été utilisé pour la culture et la multiplication des souches bactériennes avant les essais d'activité antibactérienne.

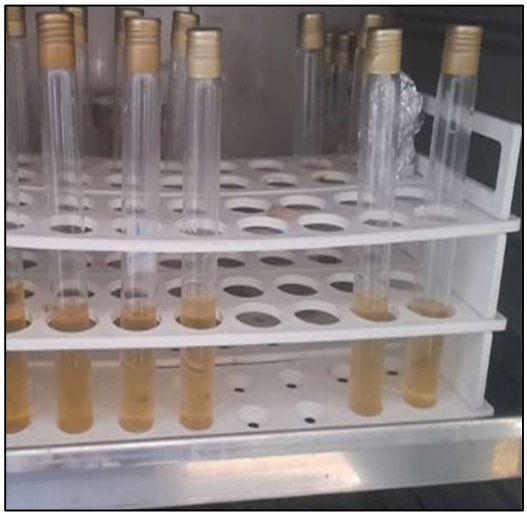


[Figure 22 : Préparation du milieu peptoné]

La culture et la multiplication des souches bactériennes ont été réalisées en ajoutant 10 mL de milieu peptoné dans des tubes à essai stériles, puis en les inoculant avec une quantité homogénéisée à l'aide d'un agitateur vortex afin d'assurer l'uniformité de la suspension bactérienne. Les tubes ont finalement été incubés à 30 °C pendant une durée appropriée permettant la croissance et la multiplication des souches bactériennes.



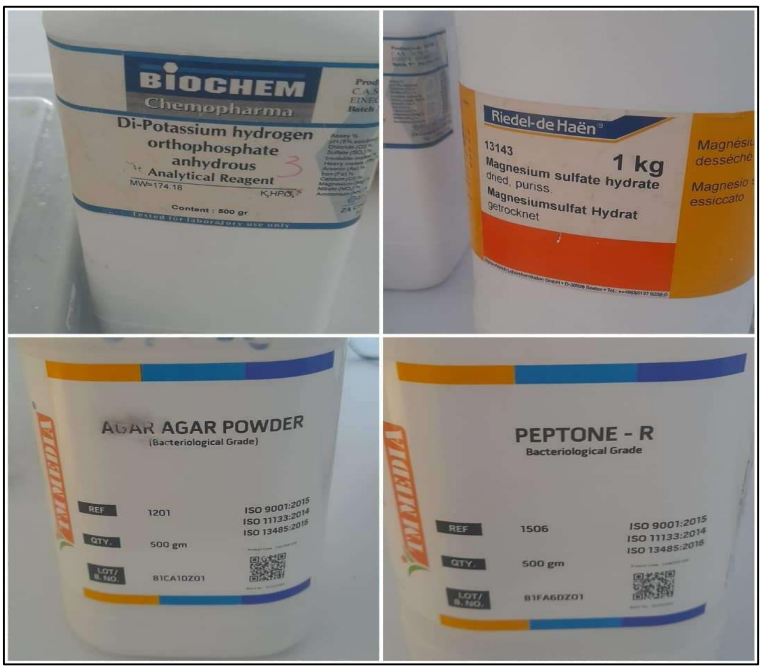
[Figure 23 : Agitation et homogénéisation de la suspension bactérienne à l'aide d'un agitateur vortex avant les analyses microbiologiques]



[Figure 24 : Incubation des cultures bactériennes à la température appropriée de 30 °C]

II.4.3. Le milieu King B

Le milieu de culture King B a été préparé en dissolvant 20 g de protéose peptone (peptone R), 1,5 g de phosphate dipotassique (K_2HPO_4), 1,5 g de sulfate de magnésium heptahydraté ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) et 20 g d'agar dans 1 L d'eau distillée.



[Figure 25 : Les produits utilisés pour la préparation du milieu de culture King B]

Le mélange a été chauffé sous agitation continue jusqu'à dissolution complète des constituants et obtention d'un milieu homogène. Le milieu a ensuite été réparti dans des flacons appropriés puis stérilisé à l'autoclave à 121 °C pendant 15 minutes. Après stérilisation, il a été laissé refroidir avant son utilisation dans les essais microbiologiques.





[Figure 26 : Préparation du milieu de culture King B avec un pH d'environ 7]

II.5. Synthèse des nanoparticules d'argent par voie verte

II.5.1. Préparation du nitrate d'argent ($AgNO_3$)

Le nitrate d'argent ($AgNO_3$) est un composé cristallin de couleur blanche, de masse molaire égale à 169,87 g/mol, et hautement soluble dans l'eau. Il constitue la principale source d'ions argent (Ag^+), indispensables à la synthèse des nanoparticules d'argent (AgNPs). Lors de leur réduction, les ions Ag^+ sont transformés en argent métallique (Ag^0), favorisant ainsi la formation des nanoparticules.

L'utilisation du nitrate d'argent permet un meilleur contrôle de la taille et de la morphologie des nanoparticules, puisque sa concentration influence directement leur croissance et leur agrégation. De plus, la stabilité des solutions de nitrate d'argent en fait un précurseur idéal pour la synthèse verte des nanoparticules d'argent, notamment lorsqu'elle est réalisée à l'aide d'agents réducteurs naturels tels que les extraits végétaux ou les huiles essentielles.

II.5.2. Synthèse verte des nanoparticules d'argent à l'aide des huiles essentielles

La synthèse verte des nanoparticules d'argent a été réalisée selon la méthodologie décrite par Matheus Vinícius de Oliveira, Priscila Maciel et collaborateurs (2019).

- **Préparation de la solution de nitrate d'argent :** La quantité nécessaire de nitrate d'argent ($AgNO_3$) a été calculée à partir de sa masse molaire (169,87 g/mol). Pour préparer une solution à une concentration de 0,31 mmol/L, 5,23 mg de nitrate d'argent ont été pesés, puis ajoutés à environ 100 mL d'eau distillée. Le mélange a été soigneusement agité jusqu'à dissolution complète.

II.5.3. Préparation des solutions d'huiles essentielles

Un volume de 1 mL d'huile essentielle d'Artemisia herba-alba a été mélangé avec 40 µL de Tween 80, 5 mL d'éthanol et 8 mL d'eau distillée. Cette formulation a été conçue afin d'améliorer la dispersion de l'huile essentielle et de favoriser son incorporation dans le milieu aqueux.



[Figure 27 : Solution d'huile essentielle]

II.5.4. Mélange des solutions

Les nanoparticules d'argent ont été synthétisées par addition goutte à goutte de 4 mL de la solution diluée d'huile essentielle à 60 mL de solution de nitrate d'argent préalablement chauffée. Le mélange a été maintenu sous agitation et chauffage continus jusqu'à ébullition, puis l'agitation a été poursuivie pendant 30 minutes supplémentaires.

L'apparition d'une coloration jaune brunâtre dans la solution a indiqué la formation des nanoparticules d'argent, confirmant ainsi la réduction des ions argent et la synthèse des nanoparticules.



[Figure 28 : Les nanoparticules avant la centrifugation]

II.5.5. Suivi de la réaction

L'absorbance de chaque solution a été mesurée à intervalles réguliers à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible en mode balayage spectral. La présence de pics d'absorption situés entre 420 et 450 nm a été vérifiée afin de confirmer la formation des nanoparticules d'argent.

II.5.6. Centrifugation

Les mélanges réactionnels ont été centrifugés à 5 000 tr/min pendant 10 minutes afin de séparer les nanoparticules formées du milieu réactionnel. Le surnageant a été éliminé avec précaution sans perturber le culot de nanoparticules déposé au fond du tube.



[Figure 29 : La centrifugation]

II.5.7. Lavage des nanoparticules

Les culots de nanoparticules ont été remis en suspension dans 10 mL d'eau distillée afin d'éliminer les substances non réagies. Le mélange a ensuite été centrifugé de nouveau dans les mêmes conditions pendant 10 minutes supplémentaires. Le surnageant a été retiré à l'aide d'une micropipette. Cette étape de lavage a été répétée deux fois supplémentaires, incluant une remise en suspension finale dans 10 mL d'eau distillée des culots obtenus après chaque centrifugation, afin d'assurer une purification optimale des nanoparticules. Un agitateur vortex a été utilisé lors de chaque remise en suspension afin d'éviter l'agrégation des particules.

II.5.8. Stockage

Les nanoparticules d'argent synthétisées ont été conservées dans un environnement froid et sombre, de préférence à 4 °C, dans des récipients stériles et opaques à la lumière afin d'éviter toute photodégradation.

II.6. Préparation des solutions et évaluation des activités antifongique et antibactérienne

II.6.1. Témoins négatifs

Le témoin négatif a été réalisé en utilisant le milieu PDA standard, sans ajout d'aucun agent antifongique ou antibactérien, y compris l'huile essentielle et ses formulations à base de

nanoparticules d'argent. Ce milieu a permis d'observer la croissance normale et non inhibée des souches fongiques Fusarium sp. et Botrytis sp., constituant ainsi une référence pour évaluer l'efficacité des traitements antifongiques. De même, pour la souche bactérienne Erwinia sp., le témoin négatif a été réalisé sur le milieu King B, afin d'observer le développement bactérien en l'absence de tout agent inhibiteur.

II.6.2. Témoins positifs

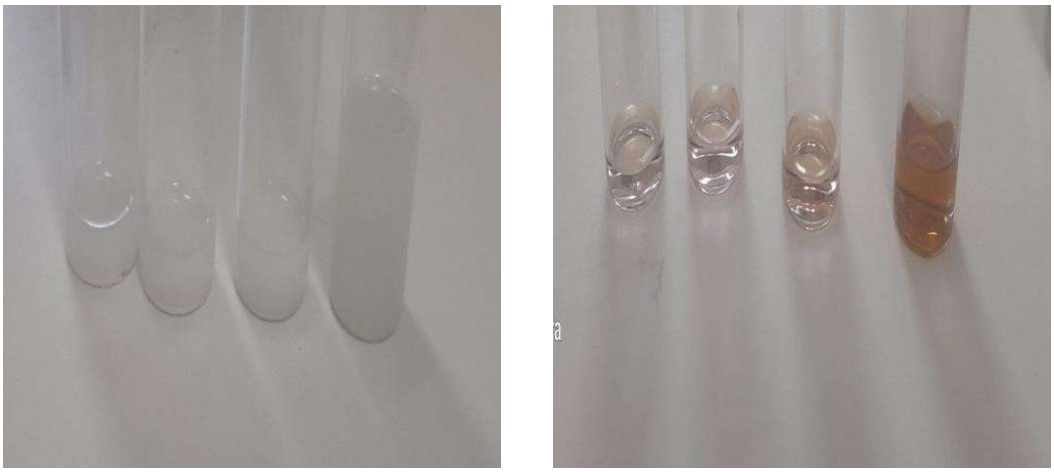
Les témoins positifs ont consisté en la préparation et l'évaluation de solutions d'huile essentielle et de formulations à base de nanoparticules d'argent selon un protocole expérimental défini.

A) Préparation des solutions d'huile essentielle

L'huile essentielle d'Artemisia herba-alba a été testée à quatre concentrations : 100 µL/mL, 75 µL/mL, 50 µL/mL et 25 µL/mL. Pour les concentrations de 75 %, 50 % et 25 %, l'huile essentielle a été préalablement émulsionnée dans 5 mL d'éthanol, puis diluée avec de l'eau distillée afin d'obtenir les concentrations finales souhaitées.

[Tableau 1 : Volumes des produits et de l'eau distillée utilisés pour la préparation des dilutions]

Volume µL / **Doses**	**Émulsion d'huile essentielle et les nanoparticules**	**Eau distillé**
75%	562,5	188
50%	375	305
25%	187,5	562,5



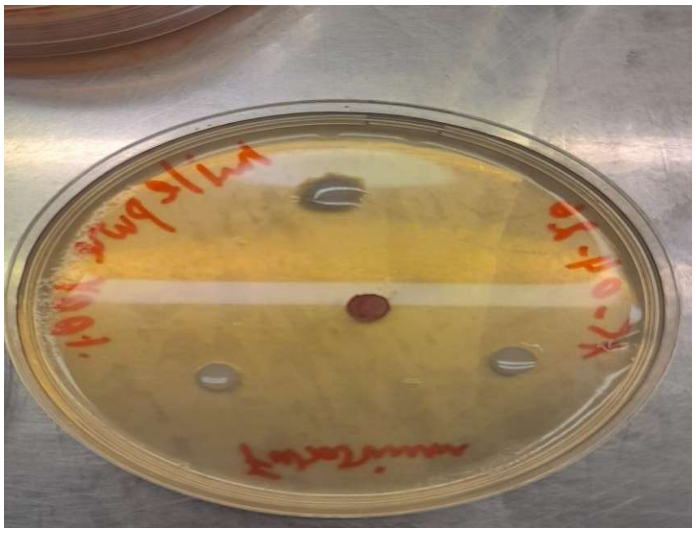
(a) *(b)*

[Figure 30 : Les doses de (a) l'huile essentielle, (b) les nanoparticules]

Toutes les émulsions ont été homogénéisées par agitation afin d'assurer une dispersion uniforme.

- ***Test antifongique sur Fusarium sp.***

Le milieu PDA stérile a été coulé dans des boîtes de pétri jusqu'à remplir environ la moitié de chaque boîte. Après solidification du milieu, trois puits de 6 mm de diamètre ont été réalisés dans chaque boîte. Chaque puits a ensuite été rempli avec 50 µL de l'émulsion d'huile essentielle correspondant à la concentration testée. Les boîtes ont été laissées à température ambiante pendant 5 minutes afin de permettre la diffusion des composés dans le milieu avant l'ensemencement de la souche fongique.



[Figure 31 : La méthode des puits]

- ***Test antifongique sur Botrytis sp.***

Pour la souche Botrytis sp., la même procédure a été appliquée, à l'exception du nombre de puits réalisés dans chaque boîte de pétri. Quatre puits ont été creusés, chaque puits recevant 50 µL d'une concentration différente de l'huile essentielle à tester.

- ***Test antibactérien sur Erwinia sp.***

L'évaluation de l'activité antibactérienne contre la souche Erwinia sp. a été réalisée selon le même protocole que celui utilisé pour Botrytis sp. Quatre puits ont été réalisés dans chaque boîte de pétri, puis remplis avec 50 µL des différentes concentrations de l'huile essentielle ou des formulations testées. Les boîtes ont ensuite été incubées afin d'évaluer l'effet inhibiteur des traitements sur la croissance bactérienne.

B) Préparation des solutions de nanoparticules d'argent (AgNPs)

Les nanoparticules d'argent (AgNPs) ont été préparées et testées à quatre concentrations : 100 µL/mL, 75 µL/mL, 50 µL/mL et 25 µL/mL. Les solutions diluées ont été obtenues par dilution de la solution mère de nanoparticules d'argent avec de l'eau distillée. Toutes les solutions ont été soigneusement homogénéisées à l'aide d'un agitateur vortex afin d'assurer une dispersion uniforme. Le protocole d'application était similaire à celui utilisé pour les huiles essentielles.

II.6.3. Inoculation et évaluation

Après l'ajout des solutions de test (huile essentielle ou nanoparticules d'argent) et leur diffusion préalable dans le milieu, tous les témoins (négatifs et positifs) ont été inoculés avec un disque mycélien de 5 mm de diamètre prélevé à partir d'une culture fongique active et placé au centre de chaque boîte de Petri. Les boîtes ont ensuite été incubées à une température comprise entre 25 et 28 °C.

L'activité antifongique a été évaluée par la mesure de la croissance mycélienne des champignons. Chaque essai a été réalisé en cinq répétitions afin d'assurer la reproductibilité et la fiabilité des résultats.

Pour l'évaluation de l'activité antibactérienne, une petite quantité de la souche bactérienne Erwinia sp. a été suspendue dans 20 mL d'eau physiologique stérile. La suspension bactérienne a ensuite été homogénéisée à l'aide d'un vortex, puis sa densité a été ajustée à 0,9 à l'aide d'un densitomètre.



(a) *(b)*

[Figure 32 : A) Homogénéité bactérienne, B) La densité]

Cette suspension a été incorporée à 200 mL de milieu nutritif King B maintenu à environ 40 °C afin d'assurer une répartition homogène des bactéries dans le milieu. Le milieu inoculé a ensuite été réparti dans des boîtes de Petri stériles. Après solidification, quatre puits équidistants ont été réalisés dans chaque boîte et remplis avec les différentes doses à tester, toutes les doses étant déposées dans une même boîte. Les boîtes ont été incubées à 30 °C.



(a) *(b)*

[Figure 33 : A) Coulage du milieu de culture dans les boîtes de Petri]

II.6.4. Évaluation des activités

Évaluation de l'activité antibactérienne : L'activité antibactérienne a été évaluée par la mesure du diamètre des zones d'inhibition. Les diamètres ont été mesurés en centimètres à l'aide d'une règle graduée. Plus le diamètre de la zone d'inhibition est important, plus l'activité antibactérienne est élevée.

Évaluation de la croissance fongique : La croissance fongique a été suivie par la mesure du diamètre des colonies développées sur le milieu de culture après incubation. Les diamètres ont été mesurés en centimètres à l'aide d'une règle graduée, puis les valeurs obtenues ont été utilisées pour comparer le développement mycélien entre les différents traitements et le témoin. Cette évaluation permet d'apprécier l'effet des traitements sur la croissance du champignon.

CHAPITRE III
Résultats et discussion

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1. Résultats

Dans cette étude, nous avons évalué l'activité antifongique et antibactérienne de l'huile essentielle, de l'hydrolat et des nanoparticules d'argent synthétisées à partir de l'extrait d'*Artemisia herba-alba*, sur deux genres fongiques pathogènes (*Fusarium* sp. et *Botrytis* sp.) et une souche bactérienne (*Erwinia amylovora*).

Les résultats obtenus à travers des tests de croissance mycélienne et des mesures de zones d'inhibition pour la bactérie permettent d'apprécier l'effet de l'huile, des nanoparticules et de l'hydrolat selon la dose et la durée d'incubation.

III.1.1. Activité antifongique d'huile essentielle de l'*Artemisia herba-alba*

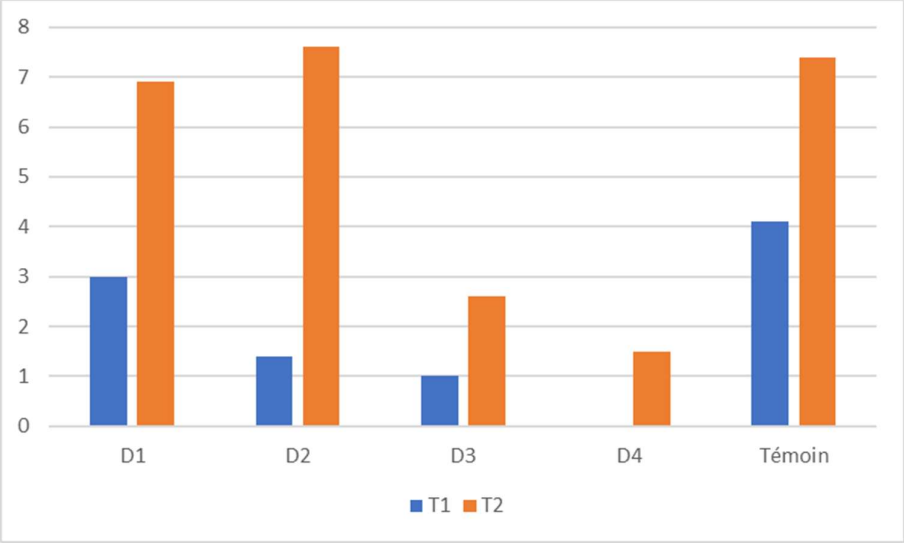
III.1.1.1. Effet d'HE sur *Fusarium sp.*

Le tableau 02 et 03, montrent que l'huile essentielle exerce un effet inhibiteur marqué sur la croissance de Fusarium sp. par rapport au témoin non traité. À la première période d'incubation (T1), la croissance moyenne du champignon dans le témoin était d'environ 4,1 cm, alors qu'elle a diminué à 3,03 cm avec la concentration de 25 %, à 1,4 cm avec 50 %, puis à 1 cm avec 75 %, tandis qu'une inhibition totale de la croissance a été observée à la concentration de 100 %. Après prolongation de l'incubation jusqu'à T2, la croissance mycélienne a augmenté dans toutes les modalités, mais elle est restée nettement inférieure à celle du témoin, dont la croissance moyenne a atteint environ 7,5 cm. Les valeurs moyennes enregistrées pour les concentrations de 25 %, 50 %, 75 % et 100 % étaient respectivement de 6,93 cm, 3,7 cm, 2,63 cm et 1,57 cm.

Ces résultats mettent en évidence une relation inverse entre la concentration de l'huile essentielle et la croissance du champignon, indiquant que l'activité antifongique augmente avec l'augmentation de la dose appliquée. La comparaison avec le témoin confirme ainsi l'efficacité significative de l'huile essentielle dans la réduction du développement mycélien de Fusarium spp., en particulier aux concentrations de 75 % et 100 %, qui ont présenté les effets inhibiteurs les plus importants. (Figure 34).

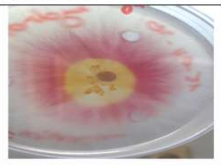
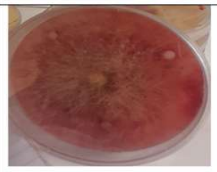
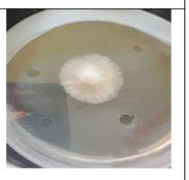
[Tableau 2 : Évolution de la croissance de Fusarium spp. sous l'effet de l'huile essentielle d'Artemisia herba-alba]

Dose	Dose 1 : 25%	Dose 2 : 50%	Dose 3 : 75%	Dose 4:100%	T
Temps	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy
T1(jour 4)	3,03	1,4	1	0	4,1
T2 (jour7)	6,93	3,7	2,63	1,5	7,53



[Figure 34 : Effet de l'huile d'Artemisia herba-alba sur Fusarium sp.]

[Tableau 3 : Comparaison de la croissance de Fusarium spp. en présence de différentes concentrations d'Artemisia (témoin vs traitements)]

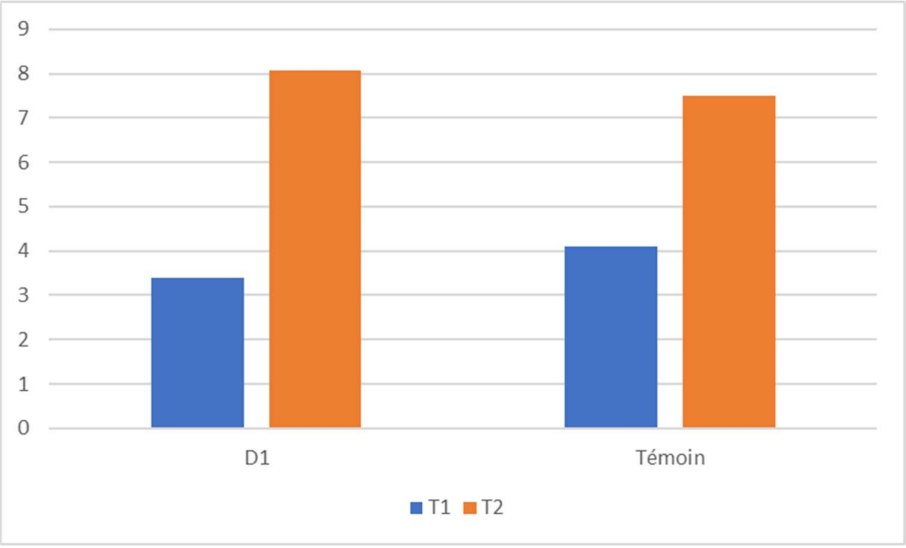
Doses	Téùoin	25%	50%	75%	100%
T1					
T2					

III.1.1.2. Effet d'hydrolat sur le *Fusarium sp.*

Le tableau expérimental relatif à la dose 1 (100 %) met en évidence une comparaison entre l'effet de l'hydrolat et du témoin sur deux variables ou intervalles de temps (T1 et T2), à travers trois répétitions. Les résultats révèlent une grande stabilité et une homogénéité des valeurs entre les répétitions, ce qui témoigne de la précision de l'expérimentation. Dans la première phase (T1), l'hydrolat a enregistré une valeur moyenne de 3,40, inférieure à celle du témoin qui a atteint 4,10, ce qui indique un effet inhibiteur de l'hydrolat à ce stade. En revanche, lors de la seconde phase (T2), la tendance s'est inversée : la moyenne de l'hydrolat a augmenté pour atteindre 8,07, dépassant ainsi le témoin qui a enregistré 7,53, ce qui démontre que l'effet est devenu stimulant au fil de l'expérience.

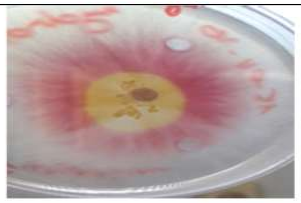
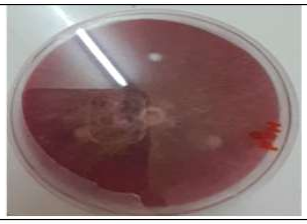
[Tableau 4 : Évolution de la croissance de *Fusarium* sp. sous l'effet de l'hydrolat d'*Artemisia herba-alba*]

Hydrolat	**Dose 1 :100%**	**Témoin**
Temps	**Moy**	**Moy**
T1 (jour4)	3,4	4,1
T2 (jour7)	8,06	7,5



[Figure 35 : Effet de l'hydrolat d'Artemisia herba-alba sur Fusarium spp.]

[Tableau 5 : Comparaison de la croissance de Fusarium spp. en présence de l'hydrolat d'Artemisia (témoin vs traitements)]

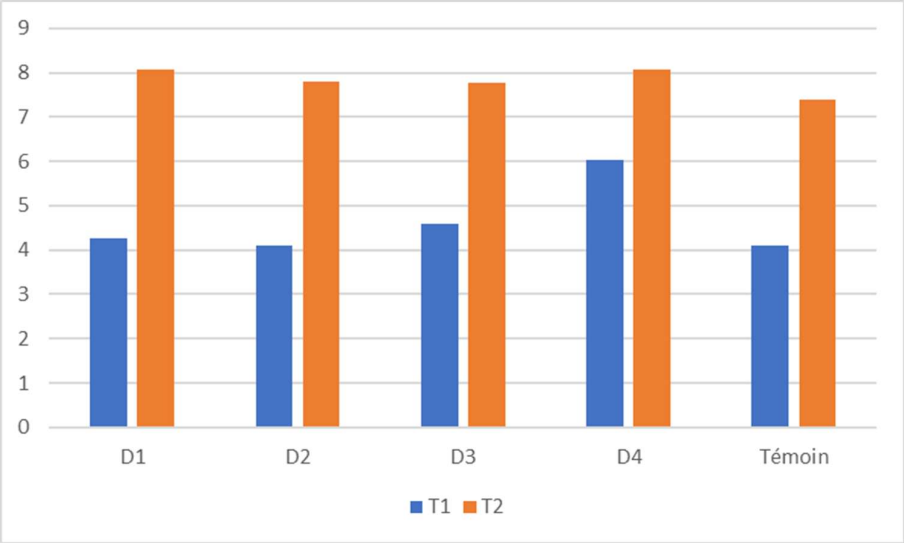
Doses	Témoin	100%
T1		
T2		

III.1.1.3. Effet des nanoparticules *sur le Fusarium sp.*

Les résultats de l'évaluation de la croissance de *Fusarium* sp. sous l'effet des nanoparticules révèlent un effet stimulant et activateur sur le développement fongique au cours du temps, plutôt qu'un effet inhibiteur. On observe une accélération marquée du diamètre de croissance au deuxième jour (T2) par rapport au premier jour (T1), atteignant une croissance maximale moyenne de 8,07 aux concentrations de 25 % et 100 %. Quant au premier jour, il montre une réponse positive et progressive en fonction de l'augmentation de la dose, où la croissance moyenne de la souche passe de 4,28 à une concentration de 25 % pour culminer à 6,03 à la concentration de 100 %. Cela traduit une forte capacité d'adaptation des isolats de Fusarium spp. face à ces nanoparticules, ces dernières agissant comme un promoteur de croissance biologique, malgré une fluctuation locale instable enregistrée dans la troisième répétition à la dose de 50 % pour les deux jours.

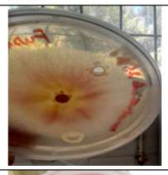
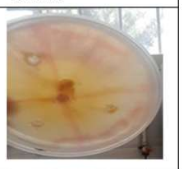
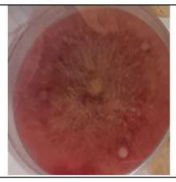
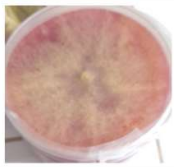
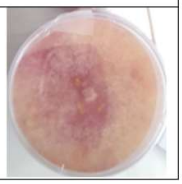
[Tableau 6 : Évolution de la croissance de Fusarium spp. sous l'effet des nanoparticules]

Nanoparticule	Dose1 :25%	Dose 2 : 50%	Dose 3 : 75%	Dose 4 :100%	T
Temps	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy
T1 (jour 4)	4,27	4,1	4,6	6,03	4,1
T2 (jour 7)	8,06	7,86	7,76	8,06	7,5



[Figure 36 : Effet des nanoparticules sur Fusarium spp.]

[Tableau 7 : Comparaison de la croissance de Fusarium spp. en présence de différentes concentrations des nanoparticules (témoin vs traitements)]

	Témoin	25%	50%	75%	100%
T1					
T2					

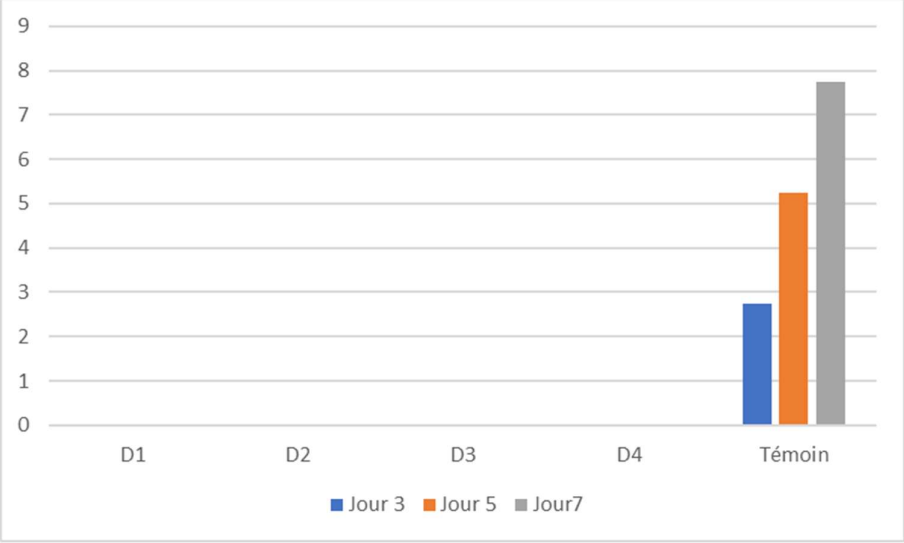
III.1.2.1. Effet d'huile essentielle sur *Botrytis sp.*

Le tableau présente les résultats d'une étude in vitro évaluant l'efficacité antifongique de différentes concentrations d'huile essentielle sur l'inhibition de la croissance mycélienne du champignon pathogène Botrytis, sur une période de trois étapes (jours 3, 5 et 7). En examinant les témoins négatifs (T1 et T2), on observe un développement fongique normal et progressif au fil du temps, atteignant son maximum au septième jour avec des valeurs de 7,5 et 8. En contrepartie, l'huile essentielle manifeste un pouvoir inhibiteur extrêmement puissant dès la plus faible dose testée (25 %) jusqu'à la concentration pure (100 %). En effet, toutes les doses sans exception ont réussi à bloquer totalement la croissance du champignon, maintenant les valeurs à zéro (0) durant toute la durée de l'expérience. On en conclut que cette huile essentielle possède des propriétés fongicides hautement efficaces contre Botrytis, puisqu'une dose

minimale de 25 % est déjà suffisante pour induire une inhibition totale, équivalente à celle obtenue avec la concentration à 100 %.

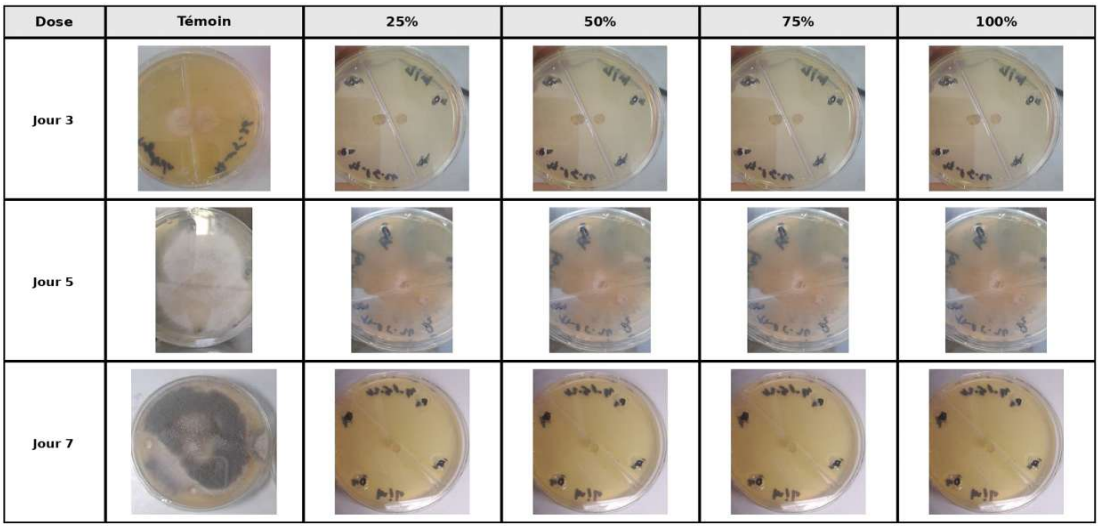
[Tableau 8 : Évolution de la croissance de Botrytis sp. sous l'effet de l'huile d'Artemisia herba-alba]

Dose	Dose1 :25%	Dose 2 :50%	Dose 3 : 75%	Dose4 :100%	T
Temps	Moy	Moy	Moy	Moy	
Jour 3	0	0	0	0	2,75
Jour 5	0	0	0	0	5,25
Jour 7	0	0	0	0	7,75



[Figure 37 : Effet de l'HE d'Artemisia herba-alba sur Botrytis sp.]

[Tableau 9 : Comparaison de la croissance de Botrytis spp. en présence de différentes concentrations de l'huile d'Artemisia (témoin vs traitements)]

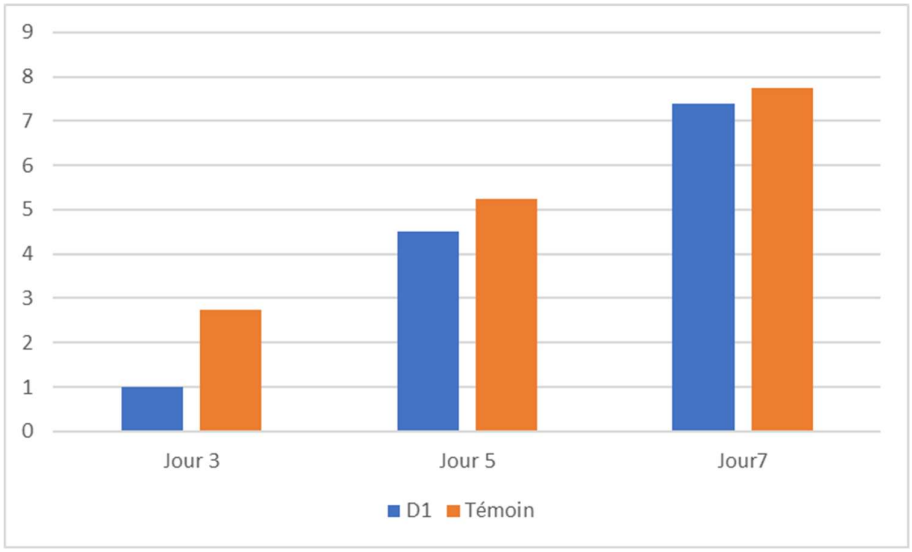


III.1.2.2. Effet de L'hydrolat contre *Botrytis sp.*

Ce tableau présente l'évolution de la croissance du champignon Botrytis spp. sur une période de 7 jours sous l'effet de l'hydrolat d'Artemisia herba-alba à une dose de 100 %, en comparaison avec des échantillons témoins. Au 3ème jour, l'effet inhibiteur de l'extrait est clairement visible, avec les valeurs de croissance les plus faibles enregistrées dans les milieux traités (1) par rapport aux témoins (2,5 et 3).

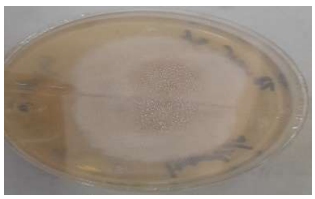
[Tableau 10 : Évolution de la croissance de Botrytis spp. sous l'effet de l'hydrolat d'Artemisia herba-alba]

Hydrolat	***Dose 1 : 100%***	***T***
Temps	***Moy***	***Moy***
Jour 3	1	2,75
Jour 5	3,5	5,25
Jour 7	7,4	7,75



[Figure 38 : Effet de l'hydrolat sur Botrytis spp.]

[Tableau 11 : Comparaison de la croissance de Botrytis spp. en présence de l'hydrolat d'Artemisia (témoin vs traitements)]

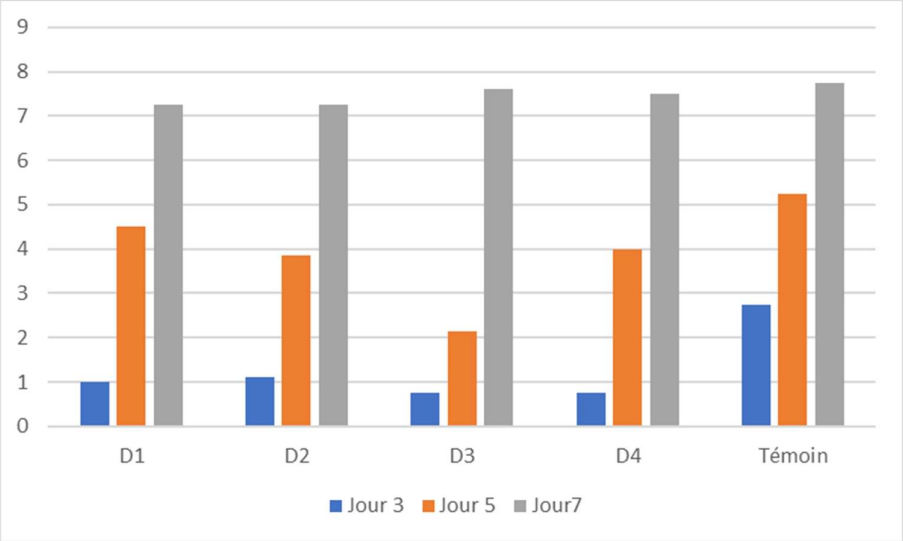
Temps	*Témoin*	*Dose :100%*
Jour3		
Jour5		
Jour7		

III.1.2.3. Effet des nanoparticules contre *Botrytis sp.*

Les résultats expérimentaux consignés dans le tableau montrent que les nanoparticules n'ont donné aucun résultat positif dans l'inhibition de la croissance du champignon Botrytis. En effet, en comparant les mesures de croissance au septième jour (jour 7) entre la première dose (25 %) et la quatrième dose (100 %), on constate que le taux de croissance n'a pas diminué, mais s'est maintenu à des niveaux élevés. La croissance a enregistré une valeur de 7 pour la première répétition (R1) à une concentration de 25 %, et a augmenté pour atteindre 8 à une concentration de 100 %. En comparaison avec le témoin (T1), qui a enregistré une valeur de croissance de 7,5 au septième jour, il apparaît clairement qu'il n'y a pas de différence significative. Cette similitude et cette progression ascendante confirment l'échec des nanoparticules, aux concentrations actuelles, à freiner l'activité fongique, le champignon ayant poursuivi sa croissance normale sans être affecté par leur présence.

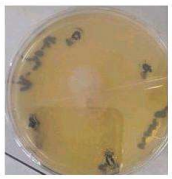
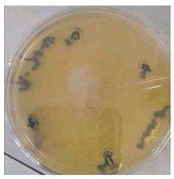
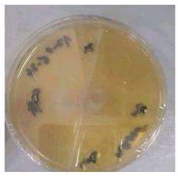
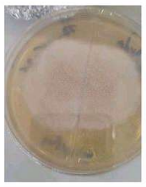
[Tableau 12 : Évolution de la croissance de Botrytis spp. sous l'effet des nanoparticules]

Nanoparticule	Dose 1 : 25%	Dose 2 : 50%	Dose 3 :75%	Dose 4 :100%	T
Répétition	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy
Jour 3	1	1,1	0,75	0,75	2,75
Jour 5	3,5	3,85	2,15	2,75	5,25
Jour 7	7,25	7,25	7,6	7,75	7,75



[Figure 39 : Effet des nanoparticules sur Botrytis spp.]

[Tableau 13 : Comparaison de la croissance de Botrytis spp. en présence de différentes concentrations des nanoparticules (témoin vs traitements)]

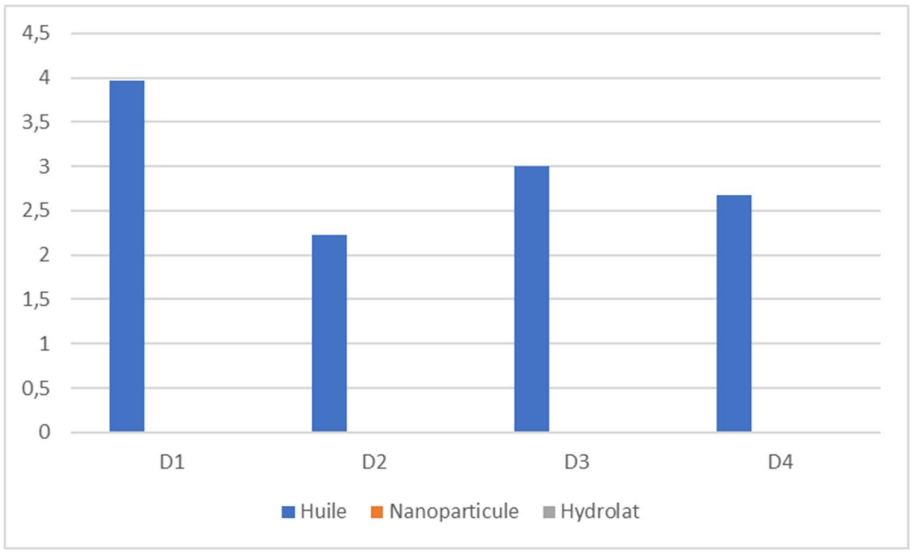
Dose	Témoin	25%	50%	75%	100%
Jour 3					
Jour 5					
Jour 7					

III.1.3. L'activité antibactérienne d'HE

Le tableau montre les résultats de la mesure de la zone d'inhibition en centimètres (cm) pour la bactérie *Erwinia amylovora* au premier jour (J 1) de l'expérience, sous l'effet de trois types de traitements à des concentrations progressives (25 %, 50 %, 75 %, 100 %). L'analyse des données révèle clairement que l'huile est le seul composant biologiquement actif contre la bactérie *Erwinia*. Son efficacité et son pouvoir inhibiteur augmentent de manière proportionnelle avec la hausse de la concentration, enregistrant ainsi le taux d'inhibition le plus élevé à la concentration pure de 100 % (atteignant 0,385 cm). En revanche, les résultats montrent une absence totale d'effet antibactérien de la part des nanoparticules et de l'hydrolat, dont les valeurs d'inhibition sont restées nulles (0) pour l'ensemble des concentrations et des répétitions, ce qui signifie qu'ils ne possèdent aucune efficacité individuelle contre la souche d'*Erwinia* testée.

[Tableau 14 : Évolution du diamètre de la zone d'inhibition (en cm) d'Erwinia sous l'effet de différents traitements à diverses concentrations (jour 1)]

Dose	Dose 1 :25%	Dose 2 :50%	Dose 3 :75%	Dose4 :100%
Répétition	Moy	Moy	Moy	Moy
HE	1,98	2,22	3	2,67
Nanoparticules	0	0	0	0
Hydrolat	0	0	0	0



[Figure 40 : Effet de différentes concentrations des traitements (l'huile, nanoparticules, hydrolat) d'Artemisia sur Erwinia sp.]

[Tableau 15 : Comparaison de la croissance d'Erwinia sp. en présence de différentes concentrations des traitements (l'huile, nanoparticules, hydrolat) d'Artemisia (témoin vs traitements)]

Traitement	*Jour 1*
Témoin	
Nanoparticule	
Huile	
Hydrolat	

III.2. Discussion

Cette étude vise à évaluer l'activité biologique des extraits d'*Artemisia herba-alba*, notamment l'huile essentielle, l'hydrolat et les nanoparticules d'argent biosynthétisées, contre certains phytopathogènes tels que Fusarium sp., Botrytis sp. et Erwinia sp. Les résultats obtenus seront discutés et comparés à ceux rapportés dans la littérature afin de déterminer l'efficacité de ces extraits ainsi que leurs mécanismes d'action potentiels.

III.2.1. Activité antifongique de l'huile essentielle contre Fusarium sp.

Les résultats obtenus montrent que l'huile essentielle d'Artemisia herba-alba possède une activité antifongique importante contre Fusarium spp., caractérisée par une inhibition dose-dépendante de la croissance mycélienne. L'augmentation de la concentration de l'huile essentielle a entraîné une diminution progressive du diamètre de croissance du champignon, jusqu'à une inhibition totale à la concentration la plus élevée lors de la première période d'incubation.

Cette activité peut être attribuée à la présence de composés monoterpéniques bioactifs tels que l'α-thujone, le camphre et le 1,8-cinéole, connus pour leur capacité à perturber l'intégrité des membranes cellulaires fongiques et à inhiber différents processus métaboliques essentiels à la croissance du mycélium (Medjeldi et al., 2024; Younsi et al., 2016). Ces observations confirment les résultats rapportés dans la littérature concernant le potentiel antifongique élevé des huiles essentielles d'Artemisia herba-alba.

III.2.2. Activité antifongique contre Botrytis spp.

L'effet inhibiteur observé contre Botrytis spp. s'est révélé encore plus marqué que celui enregistré contre Fusarium spp. En effet, une inhibition totale de la croissance mycélienne a été observée dès la plus faible concentration testée. Cette forte sensibilité pourrait être liée à la vulnérabilité particulière de Botrytis spp. aux composés volatils présents dans les huiles essentielles. Selon Bsharat et al. (2025), les monoterpènes oxygénés contenus dans l'huile essentielle d'Artemisia herba-alba exercent une action directe sur les membranes cellulaires et les organites intracellulaires, entraînant une inhibition rapide du développement fongique. Des résultats similaires ont également été rapportés par Medjeldi et al. (2024). Ainsi, l'huile essentielle étudiée pourrait constituer une alternative naturelle intéressante aux fongicides chimiques utilisés dans la lutte contre la pourriture grise.

III.2.3. Activité de l'hydrolat

Comparativement à l'huile essentielle, l'hydrolat a présenté une activité antifongique limitée. Bien qu'une légère inhibition ait été observée au début de l'incubation, celle-ci a progressivement diminué avec le temps.

Cette différence s'explique probablement par la faible concentration en composés hydrophobes biologiquement actifs dans la phase aqueuse obtenue après hydrodistillation. En effet, la majorité des molécules responsables de l'activité antimicrobienne reste concentrée dans la fraction huileuse, tandis qu'une faible proportion seulement passe dans l'hydrolat (Medjeldi et al., 2024). Cette faible teneur en substances actives pourrait expliquer l'absence d'un effet inhibiteur durable.

III.2.4. Activité des nanoparticules d'argent biosynthétisées

Contrairement aux attentes, les nanoparticules d'argent biosynthétisées à partir de l'extrait d'Artemisia herba-alba n'ont présenté aucune activité antifongique ou antibactérienne significative contre Fusarium spp., Botrytis spp. et Erwinia spp. Dans certains cas, une croissance fongique comparable, voire supérieure à celle du témoin, a été observée.

L'efficacité biologique des nanoparticules d'argent dépend fortement de plusieurs paramètres physicochimiques, notamment leur taille, leur morphologie, leur stabilité colloïdale et leur capacité à libérer des ions Ag^{+} (Thakker et al., 2013). Une forte couverture de la surface des nanoparticules par des composés organiques issus de l'extrait végétal peut réduire cette libération ionique et limiter ainsi leur activité antimicrobienne.

Par ailleurs, Iravani (2011) a montré que certaines nanoparticules biosynthétisées à faible concentration peuvent induire un phénomène d'hormèse, caractérisé par une stimulation de la croissance microbienne plutôt que par son inhibition. Cette hypothèse pourrait expliquer les résultats observés dans la présente étude.

III.2.5. Activité antibactérienne contre Erwinia sp.

L'évaluation de l'activité antibactérienne a révélé que seule l'huile essentielle possède un effet inhibiteur mesurable contre Erwinia sp. Cette activité est probablement liée à la capacité des composés volatils de traverser la membrane bactérienne, d'en perturber l'intégrité et de provoquer une fuite des constituants intracellulaires essentiels.

Des mécanismes similaires ont été décrits pour plusieurs huiles essentielles riches en monoterpènes et composés oxygénés, notamment celles d'Artemisia herba-alba (Younsi et al.,

2016). L'absence d'activité des nanoparticules d'argent suggère que leur concentration ou leurs caractéristiques structurales n'étaient pas optimales pour générer un stress oxydatif suffisant ou provoquer des dommages cellulaires significatifs.

III.2.6. Synthèse de la discussion

Les résultats obtenus confirment le potentiel biologique important de l'huile essentielle d'Artemisia herba-alba contre les phytopathogènes étudiés. Son efficacité élevée contre Fusarium spp., Botrytis spp. et Erwinia spp. met en évidence son intérêt potentiel dans le développement de stratégies de biocontrôle respectueuses de l'environnement.

En revanche, l'absence d'activité significative des nanoparticules d'argent biosynthétisées souligne la nécessité d'optimiser davantage les conditions de biosynthèse et de réaliser une caractérisation approfondie des nanoparticules par spectroscopie UV-Visible, diffraction des rayons X (DRX) et microscopie électronique (TEM ou SEM). Des études complémentaires en conditions réelles de culture seront également nécessaires afin de confirmer l'efficacité pratique de ces produits naturels.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Le présent travail a permis d'évaluer les activités antifongiques et antibactériennes de l'huile essentielle, de l'hydrolat et des nanoparticules d'argent biosynthétisées à partir d'Artemisia herba-alba contre différents phytopathogènes d'intérêt agricole.

Les résultats obtenus ont montré que l'huile essentielle possède une activité biologique remarquable. Elle a exercé un effet antifongique important contre Fusarium spp. et une inhibition totale de la croissance de Botrytis spp., tout en présentant également une activité antibactérienne notable vis-à-vis d'Erwinia spp. Cette efficacité est probablement liée à la richesse de l'huile essentielle en composés terpéniques bioactifs capables d'altérer les structures cellulaires des microorganismes ciblés.

À l'inverse, l'hydrolat n'a présenté qu'une activité antifongique limitée et transitoire, ce qui suggère une faible concentration en substances actives dans la phase aqueuse issue de l'hydrodistillation.

Concernant les nanoparticules d'argent biosynthétisées à partir de l'extrait d'Artemisia herba-alba, aucune activité antifongique ou antibactérienne significative n'a été observée contre les microorganismes testés. Ces résultats indiquent que les conditions de biosynthèse ou les caractéristiques physicochimiques des nanoparticules obtenues n'étaient probablement pas optimales pour exprimer un effet antimicrobien efficace.

Dans l'ensemble, cette étude met en évidence le potentiel prometteur de l'huile essentielle *d'Artemisia herba-alba* comme alternative naturelle aux produits phytosanitaires conventionnels dans la lutte contre certains agents phytopathogènes. Toutefois, des investigations complémentaires portant sur la caractérisation chimique détaillée des extraits, l'optimisation de la biosynthèse des nanoparticules et l'évaluation de leur efficacité dans des conditions réelles de culture demeurent nécessaires afin de confirmer leur intérêt pour des applications de biocontrôle durable.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

Livres

Agrios, G. N. (2005). Plant Pathology (5th ed.). Elsevier Academic Press.

Thèses et mémoires

Abderrahmane, [Prénom]. (2022). Titre de la thèse. Université [Nom]. [Lieu].

Articles scientifiques et revues

Abid, N., Khan, A. M., Shujait, S., Chaudhary, K., Ikram, M., Imran, M., ... & Maqbool, M. (2022). Synthesis of nanomaterials using various top-down and bottom-up approaches, influencing factors, advantages, and disadvantages: A review. Advances in Colloid and Interface Science, 300, 102597.

Abou El-Hamd, H., Ali, A. A., Ahmed, A. S., & Aly, A. A. (2010). Chemical composition and biological activities of Artemisia herba-alba essential oil. Journal of Essential Oil Research, 22(4), 316–322.

Ahmed, S., Annu, Saifullah, Ahmad, M., Swami, B. L., & Ikram, S. (2016). Green synthesis of silver nanoparticles using Azadirachta indica aqueous leaf extract. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 9(1), 1–7.

Amara, U., Khellas, A., Dellouch, A., & Djeddi, S. (2024). Insecticidal potential of Artemisia herba-alba essential oil against stored grain insects. Natural Product Research. [En ligne].

Amri, I., Hamrouni, L., Hanana, M., & Jamoussi, B. (2013). Review on the Artemisia genus: biological activities and phytochemical constituents. Journal of Animal and Plant Sciences, 16(1), 2460–2472.

Aoki, T., O'Donnell, K., & Geiser, D. M. (2014). Systematics of key phytopathogenic Fusarium species: current status and future challenges. Journal of General Plant Pathology, 80(3), 189–201.

Baayen, R. P., O'Donnell, K., Bonants, P. J., Cigelnik, E., Kroon, L. P. N. M., Roebroeck, E. J. A., & Waalwijk, C. (2000). Gene genealogies and AFLP analyses in the Fusarium oxysporum complex identify monophyletic and non-monophyletic formae speciales causing wilt and rot disease. Phytopathology, 90(8), 891–900.

Bakkali, F., Averbeck, S., Averbeck, D., & Idaomar, M. (2008). Biological effects of essential oils: a review. Food and Chemical Toxicology, 46(2), 446–475.

Bsharat, O., et al. (2025). Antifungal activity of Artemisia herba-alba essential oil against Botrytis cinerea. Journal of Plant Diseases and Protection. [En ligne].

Burgess, L. W., Nelson, P. E., Toussoun, T. A., & Summerell, B. A. (1994). Fusarium species in the Discolor Section from gramineous hosts in Australia: Descriptions and a key. Sydowia, 46(2), 1–14.

Cheung, N., et al. (2020). Biology and lifecycle of Botrytis cinerea. Molecular Plant Pathology. [En ligne].

Coutinho, T. A., & Shin, S. (2023). Erwinia: taxonomy, ecology and pathogenicity. In: Bacterial Plant Pathogens. Springer.

Cuervo-Parra, J. A., et al. (2024). Morphological and cultural characteristics of Botrytis species. Frontiers in Agronomy.

Dean, R., Van Kan, J. A. L., Pretorius, Z. A., Hammond-Kosack, K. E., Di Pietro, A., Spanu, P. D., ... & Foster, G. D. (2012). The Top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology. Molecular Plant Pathology, 13(4), 414–430.

Dimkpa, C. O., & Bindraban, P. S. (2016). Nanofertilizers: new products for the industry? Journal of Agricultural and Food Chemistry, 66(26), 6462–6473.

Eastgate, A. C. (2000). Erwinia amylovora: the continuing battle to understand fire blight. Molecular Plant Pathology, 1(6), 325–329.

Ekwomadu, T. I., & Mwanza, M. (2023). Fusarium fungi, fumonisins, biological detection, and control in the sustainable production of food commodities: a review. Agriculture, 13(1), 197.

Elad, Y., Williamson, B., Tudzynski, P., & Delen, N. (2007). Botrytis: Biology, Pathology and Control. Springer.

Fillinger, S., & Elad, Y. (2016). Botrytis: The Fungus, the Pathogen and its Management in Agricultural Systems. Springer.

Geiser, D. M., et al. (2013). One fungus, one name: defining the genus Fusarium in a scientifically robust way. Phytopathology, 103(5), 400–408.

Gerlach, W., & Nirenberg, H. (1982). The genus Fusarium: a pictorial atlas. Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem, 209, 1–406.

Goudjil, M. B., Ladjel, S., Bencheikh, S. E., Zighmi, S., & Hamada, D. (2015). Antioxidant activity, phytochemical screening of the essential oils and ethanol extracts of Artemisia herba-alba. Journal of Chemical and Pharmaceutical Research, 7(1), 51–56.

Haouari, M., & Ferchichi, A. (2009). Essential oil composition of Artemisia herba-alba from southern Tunisia. Molecules, 14(4), 1585–1594.

Helieli, I., et al. (2018). Antibacterial activity of Artemisia herba-alba essential oil. Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine. [En ligne].

Hidar, N., et al. (2024). Phytochemical characterization and biological properties of Artemisia herba-alba. Plants. [En ligne].

Houérou, H. N. (2001). Bioclimatology and biogeography of the Sahara. Land Degradation and Development, 12(2), 101–110.

Iravani, S. (2011). Green synthesis of metal nanoparticles using plants. Green Chemistry, 13(10), 2638–2650.

Ivey, M. L. L. (2016). Fire blight (Erwinia amylovora). Ohio State University Extension Fact Sheet.

Jackson, M. A., et al. (2024). Fusarium oxysporum lifecycle and pathogenicity. Annual Review of Phytopathology. [En ligne].

Jarvis, W. R. (1977). Botryotinia and Botrytis species: taxonomy, physiology and pathogenicity. Monograph. Agriculture Canada.

Jeevanandam, J., Barhoum, A., Chan, Y. S., Dufresne, A., & Danquah, M. K. (2022). Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations. Beilstein Journal of Nanotechnology, 9, 1050–1074.

Ji, F., et al. (2019). Fusarium species and their mycotoxin contamination of wheat and maize. Toxins. [En ligne].

Ju-Nam, Y., & Lead, J. R. (2008). Manufactured nanoparticles: an overview of their chemistry, interactions and potential environmental implications. Science of the Total Environment, 400(1–3), 396–414.

Kadri, A., et al. (2023). Antifungal properties of Artemisia herba-alba essential oil. Journal of Essential Oil-Bearing Plants. [En ligne].

Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. (2019). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. Arabian Journal of Chemistry, 12(7), 908–931.

Koczan, J. M., McGrath, M. J., Zhao, Y., & Sundin, G. W. (2009). Contribution of Erwinia amylovora exopolysaccharides amylovoran and levan to biofilm formation: implications in pathogenicity. Phytopathology, 99(11), 1237–1244.

Leslie, J. F., & Summerell, B. A. (2006). The Fusarium Laboratory Manual. Blackwell Publishing.

Maghsoodi, M., et al. (2025). Morphological and molecular characterization of Botrytis species. Scientific Reports. [En ligne].

Mansfield, J., Genin, S., Magori, S., Citovsky, V., Sriariyanum, M., Ronald, P., ... & Foster, G. D. (2012). Top 10 plant pathogenic bacteria in molecular plant pathology. Molecular Plant Pathology, 13(6), 614–629.

Medjeldi, S., et al. (2024). Antifungal activity of Artemisia herba-alba against Fusarium and Botrytis. Industrial Crops and Products. [En ligne].

Meddour, A., Mahdi, D., Beddou, F., & Allem, R. (2016). Antimicrobial and antioxidant properties of essential oils and ethanol extract of Artemisia herba-alba Asso from Algeria. Der Pharmacia Lettre, 8(2), 256–265.

Mittal, A. K., Chisti, Y., & Banerjee, U. C. (2013). Synthesis of metallic nanoparticles using plant extracts. Biotechnology Advances, 31(2), 346–356.

Mohamed, N. H., et al. (2010). Flavonoids of Artemisia herba-alba. Phytochemistry. [En ligne].

Mohammed, M. S. A., et al. (2021). Phenolic compounds and antioxidant activity of Artemisia herba-alba. South African Journal of Botany. [En ligne].

Morones, J. R., Elechiguerra, J. L., Camacho, A., Holt, K., Kouri, J. B., Ramírez, J. T., & Yacaman, M. J. (2005). The bactericidal effect of silver nanoparticles. Nanotechnology, 16(10), 2346–2353.

Moufid, A., & Eddouks, M. (2012). Artemisia herba-alba: pharmacological aspects. World Academy of Science, Engineering and Technology. [En ligne].

Moujir, L., et al. (2020). Sesquiterpene lactones: types and biological activities. Molecules. [En ligne].

Ochiai, T., & Fujishima, A. (2012). Photoelectrochemical properties of TiO2 photocatalyst and its applications for environmental purification. Journal of Photochemistry and Photobiology C, 13(4), 247–262.

O'Donnell, K., et al. (2010). Species-specific detection of Fusarium oxysporum. Phytopathology. [En ligne].

OEPP/EPPO. (2022). Erwinia amylovora (fire blight). EPPO Global Database.

Ohara, T., & Tsuge, T. (2004). FoSTUA, encoding a basic helix-loop-helix protein, controls primary conidiophore development and fusariosis. Molecular Plant-Microbe Interactions, 17, 696–710.

Ouguirti, L., et al. (2021). Biocontrol potential of Artemisia herba-alba essential oil against plant pathogens. Biological Control. [En ligne].

Ozenda, P. (2004). Flore et végétation du Sahara (3e éd.). CNRS Éditions.

Parveen, A., Naseem, S., & Mazhar, K. (2016). Nanoparticles and their applications in agriculture. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 16(12), 12234–12251.

Piqué, N., Miñana-Galbis, D., Merino, S., & Tomás, J. M. (2015). Virulence potential of Erwinia species isolated from plant hosts. International Microbiology, 18(2), 93–102.

Popp, J., Pető, K., & Nagy, J. (2013). Pesticide productivity and food security: a review. Agronomy for Sustainable Development, 33(1), 243–255.

Prasad, R., Bhattacharyya, A., & Nguyen, Q. D. (2017). Nanotechnology in sustainable agriculture: recent developments, challenges, and perspectives. Frontiers in Microbiology, 8, 1014.

Rafiq, M., et al. (2016). Antimicrobial properties of Artemisia herba-alba. Asian Pacific Journal of Tropical Disease. [En ligne].

Rai, M., Yadav, A., & Gade, A. (2009). Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials. Biotechnology Advances, 27(1), 76–83.

Rai, M., & Ingle, A. (2012). Role of nanotechnology in agriculture with special reference to management of insect pests. Applied Microbiology and Biotechnology, 94(2), 287–293.

Redkar, A., et al. (2022). Effectors and virulence mechanisms in Fusarium oxysporum. Molecular Plant Pathology. [En ligne].

Saleh Faraj, A., et al. (2025). Chemical composition and antimicrobial activity of Artemisia herba-alba essential oil from different geographic origins. Molecules. [En ligne].

Sirelkhatim, A., Mahmud, S., Seeni, A., Kaus, N. H. M., Ann, L. C., Bakhori, S. K. M., ... & Mohamad, D. (2015). Review on zinc oxide nanoparticles: antibacterial activity and toxicity mechanism. Nanomicro Letters, 7(3), 219–242.

Staats, M., van Baarlen, P., & van Kan, J. A. L. (2005). Molecular phylogeny of the plant pathogenic genus Botrytis and the evolution of host specificity. Molecular Biology and Evolution, 22(2), 333–346.

Stepien, Ł. (2020). Fusarium species classification. Biology, 9(12), 426.

Thakker, J. N., Thakar, S. H., Nair, N., & Varshney, V. K. (2013). Synthesis and characterization of silver nanoparticles using Rosmarinus officinalis. Indian Journal of Experimental Biology, 51(7), 531–537.

Thomson, S. V. (2000). Epidemiology of fire blight. In: Vanneste, J. (Ed.). Fire blight: the disease and its causative agent, Erwinia amylovora. CABI Publishing.

Van der Zwet, T., & Keil, H. L. (1979). Fire blight: a bacterial disease of rosaceous plants. USDA Agriculture Handbook.

Wang, Y., et al. (2021). Morphological and molecular identification of Fusarium species from soil. Plant Disease. [En ligne].

Were, H., et al. (2023). Chlamydospore survival and Fusarium persistence in agricultural soils. Soil Biology and Biochemistry. [En ligne].

Williamson, B., Tudzynski, B., Tudzynski, P., & Van Kan, J. A. L. (2007). Botrytis cinerea: the cause of grey mould disease. Molecular Plant Pathology, 8(5), 561–580.

Younsi, F., Mehani, M., Ousaaid, D., Laaroussi, H., Bakour, M., El Ghouizi, A., & Lyoussi, B. (2016). Phytochemical composition, antioxidant and antimicrobial activities of Artemisia herba-alba. Arabian Journal of Chemistry. [En ligne].