الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

N° Ref :……

Université El Moudjahid Abdelhafid BOUSSOUF- Mila

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département des Sciences Biologiques et Agricoles

Mémoire préparé en vue de l'obtention du diplôme de

Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : Biochimie Appliquée

Thème :

Biosynthèse verte des nanoparticules antibactériennes à partir de la flore algérienne

Présenté par :

- **Zemmouri Aya**
- **Hamlaoui Nihad**

Devant le jury :

Medjani Soumia	**MCB**	**Présidente**
Amira Aicha	**MCB**	**Examinatrice**
Kadjoudj Nadia	**MCB**	**Promotrice**

Année Universitaire : 2025/2026

Remerciements

Nous tenons à rendre grâce à Dieu Tout-Puissant pour nous avoir donné la force et la santé nécessaires à la réalisation de ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre directrice de mémoire, Melle **Kadjoudj Nadia**, pour son précieux accompagnement, ses conseils avisés et son soutien constant tout au long de ce parcours de recherche.

Nous remercions également les membres du jury :

Mme **Medjani Soumia**, qui a accepté de présider la soutenance de ce mémoire.

Melle **Amira Aicha**, pour avoir bien voulu évaluer ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à l'ensemble de nos enseignants qui, par leur engagement et leur expertise, ont grandement contribué à notre formation académique et scientifique.

Enfin, nous exprimons notre reconnaissance à toutes les personnes qui nous ont apporté leur aide, leur conseil, leur orientation ou leur soutien moral durant la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

À la lumière de ma vie, mes chers parents,

À ma chère mère, qui m'a comblé(e) de son amour, de sa tendresse et de son soutien constant, et qui a été un pilier solide dans toutes les épreuves. Merci pour cet amour indescriptible.

À mon cher père, source de soutien et d'encouragement, qui m'a accompagné(e) avec amour à travers toutes les étapes de ma vie.

À mon frère et à ma sœur, qui ont partagé avec moi les joies et les difficultés et qui ont toujours été une source de force et de réconfort.

Et je remercie du fond du cœur toutes celles et tous ceux qui m'ont soutenu(e) dans la réalisation de ce travail, de près ou de loin.

Aya

Dédicace

Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux.

Je rends grâce à Allah le Tout-Puissant pour m'avoir accordé la santé, la patience, la force et la volonté nécessaires afin de mener à bien ce travail de fin d'études. Sans Sa bénédiction et Son soutien, cette réalisation n'aurait pas été possible.

À mon cher père

Source de courage, de sagesse et de détermination. Merci pour tous les sacrifices consentis, pour ton soutien indéfectible et pour les valeurs que tu m'as transmises. Que ce travail soit le témoignage de ma profonde gratitude, de mon immense respect et de mon amour filial.

À ma très chère mère

Symbole d'amour, de tendresse et de dévouement. Merci pour tes prières, ton affection infinie et tes encouragements qui m'ont accompagnée à chaque étape de mon parcours. Aucune parole ne saurait exprimer l'étendue de mon amour et de ma reconnaissance envers toi.

À mes chers frères : Abdellah, Abderrahim et Abdessamad,

Merci pour votre présence, votre soutien moral et les précieux moments de fraternité que nous avons partagés. Je vous souhaite une vie remplie de réussite, de bonheur et d'épanouissement.

À mes chères sœurs : Saïda, Soria, Ibtissam, Yasmine et Bouchra

Merci pour votre affection, votre bienveillance et vos encouragements constants. Votre amour et votre confiance ont toujours été une source de motivation pour avancer et réussir.

À ma chère enseignante Selma

Qui occupe une place particulière dans mon cœur, telle une grande sœur. Merci pour votre gentillesse, votre écoute, vos précieux conseils et votre soutien. Votre présence bienveillante restera pour moi un modèle, une source d'inspiration et un exemple à suivre.

À toutes mes amies

Chacune par son nom et sa place particulière dans ma vie. Merci pour votre sincérité, votre confiance, votre soutien et tous les merveilleux souvenirs partagés. Votre amitié a rendu ce parcours plus agréable et plus enrichissant.

À mes amies du groupe « Ahd Al Asdiqa »

Une dédicace toute particulière pour les moments de solidarité, d'entraide, de joie et de complicité que nous avons vécus ensemble. Je vous souhaite à toutes une vie pleine de succès, de bonheur et de belles réalisations.

Enfin

Je dédie humblement ce mémoire à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à ma formation, à mon épanouissement et à ma réussite.

Qu'elles trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance et de mes sincères remerciements.

Nihad

Résumé

Biosynthèse verte des nanoparticules antibactériennes à partir de la flore algérienne

Ce travail a valorisé *Thymus vulgaris*, une plante médicinale algérienne, pour la synthèse verte de nanoparticules d'argent (AgNPs) et l'évaluation de leurs activités antioxydante et antibactérienne. L'extrait éthanolique a montré une teneur en polyphénols de 1,77 µg EAG/mg et une activité antioxydante modérée (IC_{50} = 107,4 µg/ml). L'extrait aqueux a permis de biosynthétiser des AgNPs, confirmées par un changement de couleur et un pic SPR à 420-450 nm en UV-Vis. Les AgNPs ont exhibé une activité antibactérienne supérieure aux extraits bruts, avec des zones d'inhibition de 13,39 mm contre *E. coli* et 9,04 mm contre *P. aeruginosa* (dès 12,5 mg/ml), tandis que les extraits seuls étaient quasiment inactifs. Ces résultats démontrent que la biosynthèse d'AgNPs à partir de thym améliore significativement l'efficacité antibactérienne selon un procédé écologique, ouvrant la voie à des applications dans la lutte contre les infections résistantes.

Mots clés : *Thymus vulgaris*, biosynthèse verte, nanoparticules d'argent, activité antibactérienne,activité antioxydante.

Abstract

Green biosynthesis of antibacterial nanoparticles from Algerian flora

This work valorized *Thymus vulgaris*, an Algerian medicinal plant, for the green synthesis of silver nanoparticles (AgNPs) and the evaluation of their antioxidant and antibacterial activities. The ethanolic extract showed a total polyphenol content of 1.77 µg GAE/mg and moderate antioxidant activity (IC_{50} = 107.4 µg/ml). The aqueous extract enabled the biosynthesis of AgNPs, confirmed by a color change and a SPR peak at 420-450 nm by UV-Vis spectroscopy. The AgNPs exhibited superior antibacterial activity compared to crude extracts, with inhibition zones of 13.39 mm against *E. coli* and 9.04 mm against *P. aeruginosa* (at 12.5 mg/ml), while the extracts alone were almost inactive. These results demonstrate that the biosynthesis of AgNPs from thyme significantly improves antibacterial efficacy through an eco-friendly process, paving the way for applications in the fight against resistant infections.

Keywords : *Thymus vulgaris*, green biosynthesis, silver nanoparticles, antibacterial activity, antioxidant activity.

ملخص

التركيب الأخضر للنانو جسيمات الفضة المضادة للبكتيريا من النباتات الجزائرية

قيّم هذا العمل نبات الزعتر، وهو نبات طبي جزائري، للتركيب الأخضر لنانو جسيمات الفضة (AgNPs)وتقييم أنشطتها المضادة للأكسدة والمضادة للبكتيريا.

أظهر المستخلص الإيثانولي محتوى من البوليفينولات قدره1.77 ميكروغرام مكافئ حمض الغاليك (GAE) لكل ملغ من ونشاطًا مضادًا للأكسدة معتدلًا(IC_{50} = 107.4 ميكروغرام/مل)

ساهم المستخلص المائي في التركيب الحيوي للـAgNPs ، وقد تم التأكد من تشكلها من خلال تغير اللون وظهور قمة SPR بين 420-450 نانومتر في مطيافية الأشعة فوق البنفسجية-المرئية.(UV-Vis)

أظهرت نانو جسيمات الفضة نشاطًا مضادًا للبكتيريا أعلى بكثير من المستخلصات الخام، حيث بلغت قطر مناطق التثبيط 13,39 مم ضد *(E. coli)* و9,04 مم ضد (*P.* aeruginosa) ابتداءً من تركيز(12,5 /مل) ، بينما كانت المستخلصات لوحدها شبه غير فعالة.

تُظهر هذه النتائج أن التركيب الحيوي لنانو جسيمات الفضة من الزعتر يُحسن بشكل ملحوظ الفعالية المضادة للبكتيريا بطريقة بيئية نظيفة، مما يفتح آفاقًا لتطبيقات في مكافحة العدوى المقاومة للمضادات الحيوية.

الكلمات المفتاحية:

الزعتر، التركيب الأخضر، نانو جسيمات الفضة، النشاط المضاد للبكتيريا، النشاط المضاد للأكسدة.

Sommaire

Introduction	**1**
Chapitre I : Synthèse bibliographique	
I. Nanoparticules	**4**
I.1. Histoire et définitions	**4**
I.2. Propriétés spécifiques des nanoparticules	**5**
I.2.1. Propriétés optiques et résonance plasmon de surface	**5**
I.2.2. Propriétés mécaniques	**6**
I.2.3. Propriétés électriques	**6**
I.2.4. Propriétés magnétiques	**6**
I.2.5. Propriétés thermiques	**6**
I.3. Les nanoparticules d'argent (AgNPs)	**7**
I.3.1. Généralités sur l'argent	**7**
I.3.2. Définition et propriétés spécifiques des AgNPs	**7**
I.3. 3. Applications des des AgNPs	**7**
I.3.4. Mécanisme d'action antibactérien des AgNPs	**9**
I.3.5. Facteurs influençant l'activité antibactérienne des AgNPs	**11**
I.4. Méthodes de synthèse des AgNPs	**11**
I.5. Synthèse verte (biosynthèse) à partir d'extraits de plantes	**12**
I.5.1. Principes de la chimie verte	**12**
I.5.2. Avantages de la synthèse verte	**12**
I.5.3. Mécanisme de la synthèse verte par les extraits de plantes	**13**
I.5.4. Rôle des métabolites secondaires	**13**
I.5.5. Facteurs influençant la biosynthèse	**14**
I.6. Plante modèle : *Thymus vulgaris* (thym)	**16**
I.6.1. Place du thym dans la flore médicinale	**16**
I.6.2. Nomenclature et classification systématique	**16**
I.6.3. Description botanique	**17**
I.6.4. Caractères organoleptiques	**19**
I.6.5. Polymorphisme chimique	**19**
I.6.6. Phytogéographie et écologie	**19**
I.6.7. Composition chimique	**19**

I.6.8. Utilisations traditionnelles et pharmacologiques	**20**
I.6.9. Rôle des métabolites secondaires dans la synthèse verte de nanoparticules d'argent	**21**
I.6.10. Pourquoi le thym est-il un excellent candidat pour la synthèse verte ?	**22**
I.7. Activité antibactérienne : généralités et méthodes d'évaluation	**22**
I.7.1. Généralités sur les bactéries pathogènes	**22**
I.7.2. Activité antibactérienne des extraits de plantes	**23**
I.7.3. Activité antibactérienne des AgNPs	**23**
I.7.4. Méthodes d'évaluation de l'activité antibactérienne	**23**
Chapitre II : Matériel et méthodes	
II.1. Matériel végétal	**25**
II. 2. Extraits végétaux	**26**
II .2.1. Extraction aqueuse (pour synthèse des AgNPs)	**26**
II .2.2. Extraction éthanolique (pour analyses phytochimiques et biologiques)	**26**
II.3. Synthèse verte des nanoparticules d'argent (AgNPs)	**26**
II.3.1. Préparation de la solution de nitrate d'argent (AgNO3)	**26**
II.3.2. Biosynthèse des AgNPs	**27**
II.3.3. Purification des AgNPs	**27**
II.3.4. Caractérisation par spectrophotométrie UV-Visible	**27**
II.4. Screening phytochimique qualitatif	**28**
II.5. Dosage des polyphénols totaux	**29**
II.6. Évaluation de l'activité antioxydante (méthode au DPPH)	**30**
II.7. Évaluation de l'activité antibactérienne	**30**
II.7.1. Souches bactériennes	**30**
II.7.2. Méthode de diffusion sur disques (antibiogramme)	**31**
II.7.3. Activité antibactérienne des AgNPs	**33**
Chapitre III : Résultats et discussion	
III.1. Rendement d'extraction	**35**
III.2. Biosynthèse et caractérisation des nanoparticules d'argent (AgNP)	**36**
III.3. Screening phytochimique	**38**
III.4. Dosage des polyphénols totaux	**42**

III.5. Activité antioxydante (test DPPH)	**45**
III.6. Activité antibactérienne	**46**
Conclusion	**50**

Liste des figures

Figures	Titre	Page
01	Intégration à l'échelle nanométrique de nanoparticule et de biomolécules	**5**
02	Applications des nanoparticules d'argent dans différents domaines de la Médecine, de l'agriculture et de l'environnement	**8**
03	Mécanisme d'action antibactérien des AgNPs	**10**
04	Synthèse et caractérisation de nanoparticules d'argent par des voies physique, chimique et biologique	**12**
05	Mécanisme potentiel de réduction et de fonctionnalisation des nanoparticules d'argent par des extraits végétaux	**14**
06	Facteurs influençant la biosynthèse des nanoparticules	**15**
07	Plante de *Thymus vulgaris*	**16**
08	Illustration morphologique détaillée de *Thymus vulgaris*	**18**
09	Étapes préparatives de la poudre foliaire de *Thymus vulgaris*	**25**
10	Protocole de préparation des extraits bruts (éthanoliques et aqueuse des feuilles *Thymus vulgaris*)	**26**
11	Les étapes de la biosynthèse des nanoparticules d'argent (AgNP) à partir de l'extrait de *Thymus vulgaris*	**28**
12	Protocole de l'activité antibactérienne des feuilles de l'extrait éthanolique de *Thymus vulgaris* et des AgNPs	**34**
13	Rendement en extraits sec	**35**
14	Changement de couleur du mélange (extrait aqueux et de la solution AgNO3)	**36**
15	Spectres d'absorbance des AgNPS	**37**
16	Courbe d'étalonnage de l'acide gallique pour le dosage des polyphénols	**43**
17	Teneur des polyphénols d'extrait éthanolique de *Thymus vulgaris*	**44**
18	Test de DPPH de de l'acide ascorbique	**45**
19	Test de DPPH de l'extrait éthanolique de *Thymus vulgaris*	**46**

20	Photos représentatives des zones d'inhibition obtenues vis- à- vis les souches testées	**48**

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
01	Classification systématique de *Thymus vulgaris*	**17**
02	Composition chimique typique de l'huile essentielle de *Thymus vulgaris* (chémotype thymol)	**20**
03	Principaux composés identifiés dans l'extrait aqueux de thym par chromatographie et leur rôle dans la synthèse des AgNPs	**21**
04	Détection des composés phytochimiques tests de caractérisation	**29**
05	Évaluation de sensibilité des souches selon le diamètre des zones d'inhibition	**33**
06	Résultats du screening phytochimique des feuilles de *Thymus vulgaris*	**39**
07	Teneur en polyphénols totaux de l'extrait éthanolique de *Thymus vulgaris* (µg EAG /mg)	**43**
08	Capacité antiradicalaire IC50 (DPPH) de l'extrait éthanolique de *Thymus vulgaris*	**45**
09	Activité antibactérienne des extraits et des AgNPs de *Thymus vulgaris*	**47**

Liste des abréviations

NPs : nanoparticules

$AgNO_3$: nitrate d'argent

AgNPs : nanoparticules d'argent

Ag^+ : ion argent

Ag^0 : Argent à l'état zéro

Ag : Argent

SPR : résonance plasmon de surface

UV-Vis : Spectroscopie ultra-violet visible

λ : Longueur d'onde

λ_{max} : Longueur d'onde maximale

T : *thymus*

IRM : Imagerie par résonance magnétique

$FeCl_3$: Chlorure ferrique

HCl : Acide chlorhydrique

H_2SO_4 : Acide sulfurique

NaOH : Hydroxyde de sodium

DPPH : 2,2-Diphényl-1-picrylhydrazyle

IC_{50} : Concentration inhibitrice 50 %

DMSO : Diméthylsulfoxyde

MH : Mueller-Hinton

µg EAG/mg : Milligrammes d'équivalent acide gallique par milligramme d'extrait.

µg : Microgrammes.

***E.coli* :** *Escherichia coli.*

***B. subtilus* :** *Bacillus subtilus*.

***P. aeruginosa* :** *Pseudomonas aeruginosa*

Introduction

L'émergence et la propagation rapide des bactéries multirésistantes aux antibiotiques conventionnels constituent l'une des menaces les plus graves pour la santé publique. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), environ 700 000 décès par an sont attribués aux infections dues à des bactéries résistantes, et ce chiffre pourrait atteindre 10 millions d'ici 2050 (Li *et al*., 2022). L'utilisation massive et parfois inappropriée des antimicrobiens a favorisé l'émergence de ces souches bactériennes multirésistantes, réduisant considérablement l'efficacité des traitements conventionnels (WHO, 2022). Face à cette situation alarmante, la recherche de nouvelles alternatives thérapeutiques est devenue une priorité.

Parmi les voies explorées, les nanoparticules métalliques, en particulier les nanoparticules d'argent (AgNPs), occupent une place de choix (Alshammari *et al*., 2023). Ces particules ont montré un fort potentiel antibactérien grâce à leur grande surface spécifique et à leur capacité à libérer des ions argent toxiques pour les micro-organismes (Rai *et al*., 2009).

Cependant, les méthodes classiques de synthèse des AgNPs reposent sur des agents réducteurs chimiques (borohydrure de sodium, hydrazine) et des stabilisants synthétiques, souvent toxiques, coûteux et peu respectueux de l'environnement (Ahmed *et al*., 2016). Face à ces limitations, la « chimie verte » propose une alternative élégante : la biosynthèse à partir d'extraits de plantes. Cette approche prône l'utilisation de procédés propres, non toxiques et économes en énergie (Ranjbarzadeh *et al*., 2019). Dans ce cadre, la synthèse verte de nanoparticules à partir d'extraits de plantes s'est imposée comme une solution prometteuse, alliant les avantages des nanotechnologies à ceux des ressources naturelles renouvelables (Das *et al*., 2017). Les métabolites secondaires (polyphénols, flavonoïdes, terpénoïdes, sucres réducteurs) présents dans ces extraits jouent à la fois le rôle d'agents réducteurs et de stabilisants, permettant une formation rapide de nanoparticules sans apport de produits dangereux (Mittal *et al*., 2013).

L'Algérie possède une flore médicinale exceptionnellement riche et diversifiée, de par sa position géographique privilégiée au carrefour des influences méditerranéenne et saharienne. On estime à plus de 3000 le nombre d'espèces végétales recensées sur son territoire, dont une proportion significative est endémique (Rolnik et Olas, 2021). Traditionnellement utilisées pour traiter diverses affections, de nombreuses plantes algériennes sont reconnues pour leurs propriétés antioxydantes et antimicrobiennes, liées à leur contenu élevé en composés phénoliques (Boudjelal *et al*., 2012). L'utilisation de ces ressources locales pour la synthèse verte de nanoparticules d'argent représente une double valorisation : d'une part, la mise en

évidence du potentiel biologique des extraits végétaux ; d'autre part, le développement de nanomatériaux bioactifs écocompatibles.

Parmi cette flore médicinale algérienne riche et diversifiée, le thym, *Thymus vulgaris*, occupe une place de choix. Cette plante est non seulement un pilier de la médecine traditionnelle, mais aussi une source reconnue de composés bioactifs dotés de puissantes capacités antioxydantes, antiseptiques et antispasmodiques, bien documentées depuis l'Antiquité (Pandey et Singh, 2017). L'objectif de ce travail est de dresser un état de l'art sur ces trois piliers que sont les nanoparticules d'argent, leur synthèse verte par les plantes, et le potentiel exceptionnel de l'espèce *Thymus vulgaris*.

Si plusieurs études internationales ont rapporté la biosynthèse d'AgNPs à partir de plantes, la recherche reste encore limitée sur la flore algérienne spécifique. De plus, il est essentiel de comparer les activités biologiques de l'extrait végétal seul (notamment son pouvoir antioxydant et antibactérien) avec celles des nanoparticules obtenues après synthèse verte. Une telle comparaison permet de comprendre si la transformation en nanoparticules améliore l'efficacité antibactérienne et dans quelle mesure.

Ainsi, notre travail s'inscrit dans une démarche de valorisation d'une plante médicinale algérienne. Les objectifs spécifiques sont :

- Réaliser une extraction éthanolique des composés bioactifs de la plante choisie et déterminer son rendement.
- Évaluer l'activité antioxydante de l'extrait éthanolique par la méthode au DPPH.
- Tester l'activité antibactérienne de l'extrait éthanolique vis-à-vis de souches bactériennes courantes (*Pseudomonas aeruginosa* et *Escherichia coli* et *Bacillus subtilus*).
- Utiliser un extrait aqueux de la même plante pour biosynthétiser des nanoparticules d'argent (AgNPs) par une méthode verte.
- Caractériser les AgNPs formées par spectrophotométrie UV-Visible.
- Évaluer l'activité antibactérienne des AgNPs synthétisées et la comparer à celle de l'extrait brut.

L'hypothèse sous-jacente est que les AgNPs biosynthétisées présentent une activité antibactérienne supérieure à celle de l'extrait seul, tout en étant produites selon un procédé non toxique et économique.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres. Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur les nanoparticules d'argent, les méthodes de synthèse verte, la plante médicinale modèle. Le deuxième chapitre décrit l'ensemble du matériel et des méthodes utilisés. Le troisième chapitre expose les résultats obtenus (rendement d'extraction, activités antioxydante et antibactérienne des extraits, biosynthèse et caractérisation UV-Vis des AgNPs, activité antibactérienne des AgNPs) et les discute en les confrontant à la littérature. Enfin, une conclusion générale et des perspectives clôturent le document.

Partie bibliographique

I. Nanoparticules

I.1. Histoire et définitions

Les nanotechnologies, bien que perçues comme récentes, trouvent leurs origines dans les civilisations anciennes : les Romains utilisaient des nanoparticules pour colorer les verres, les Celtes pour leurs émaux rouges, et les médecines indienne et chinoise employaient l'or soluble à des fins thérapeutiques (Kumar & Kumbhat, 2016 ; Mohan *et al*., 2016 ; Bayda *et al*., 2019). La révolution scientifique débuta avec les travaux de Faraday sur l'or colloïdal en 1857, suivis par la célèbre prédiction de Richard Feynman en 1959 (« manipuler les choses atome par atome »). Le terme « nanotechnologie » fut introduit par Taniguchi en 1974 puis popularisé par Drexler en 1986 (Mulvaney, 2015 ; He *et al*., 2018).

Les nanoparticules (NPs) sont des objets minuscules dont la taille est comprise entre 1 et 100 nanomètres (nm), soit environ cent fois plus petite que le diamètre d'un cheveu humain. Un nanomètre représente un milliardième de mètre (10^{-9} m) : à titre de comparaison, un atome mesure 0,1 nm, un virus entre 20 et 100 nm, et un cheveu humain environ 80 000 nm (Joudeh & Linke, 2022). Les nanoparticules se situent donc à la frontière entre le monde macroscopique, que nous pouvons voir et toucher, et le monde moléculaire ou atomique, invisible à l'œil nu.

D'un point de vue fondamental, l'étude des nanoparticules est essentielle pour comprendre comment la matière se comporte à l'échelle microscopique. En effet, les propriétés des NPs sont très différentes de celles des matériaux macroscopiques. Elles peuvent avoir des propriétés optiques, magnétiques ou électroniques uniques, grâce à deux phénomènes clés : un rapport surface/volume très élevé (une grande proportion des atomes se trouve à la surface, prête à interagir avec le milieu extérieur) et des effets quantiques qui modifient le comportement des électrons (Dolez, 2015 ; Alshammari *et al*., 2023).

Les NPs peuvent être fabriquées à partir de divers matériaux, tels que le carbone, l'argent, le zinc, le silicium ou le titane. Les NPs de carbone, appelées fullerènes, sont présentes dans la fumée de tabac et dans le charbon. Les NPs d'argent ont des propriétés antibactériennes et sont utilisées dans les pansements et les crèmes antiseptiques. Les NPs d'or sont utilisées dans les capteurs et les dispositifs électroniques. Les NPs sont utilisées pour développer de nouveaux médicaments et traitements pour les maladies, et elles sont également utilisées pour améliorer l'efficacité des sources d'énergie et pour purifier l'eau et l'air (Kumar *et al*., 2020 ; Karataş *et al.*, 2026).

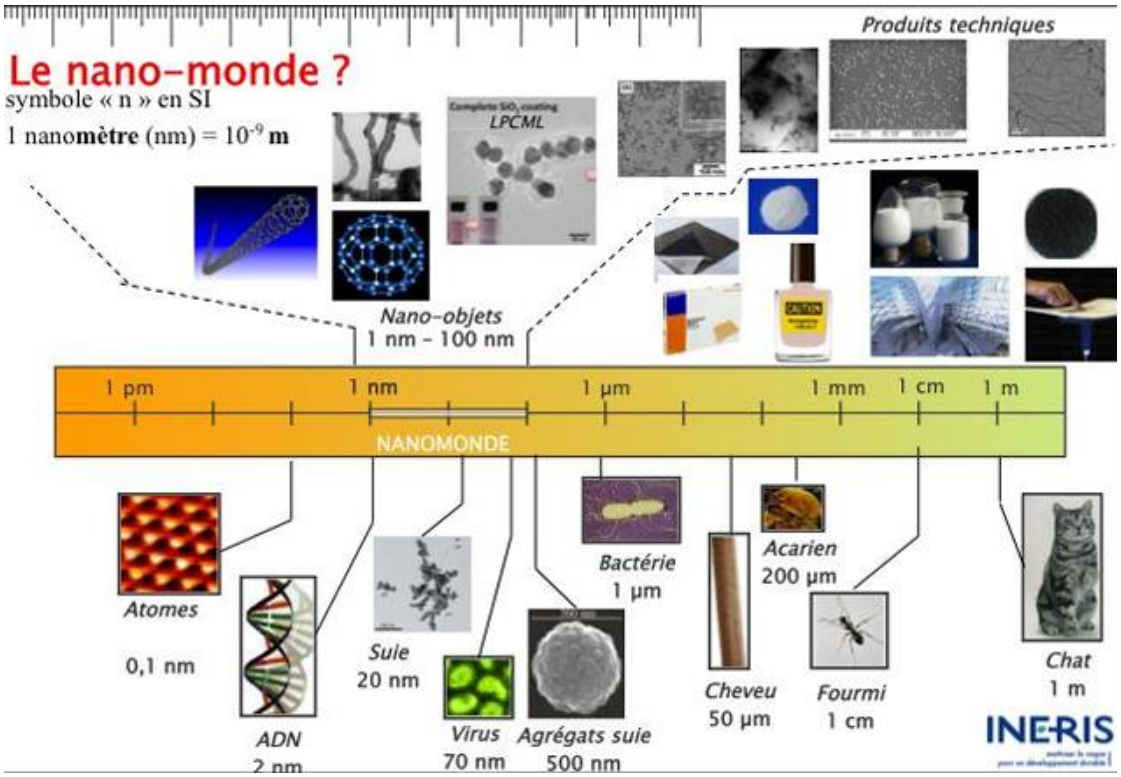


Figure 01 : Intégration à l'échelle nanométrique de nanoparticule et de biomolécules (Benali &Seladji, 2024).

I.2. Propriétés spécifiques des nanoparticules

Les propriétés physiques et chimiques exceptionnelles des nanoparticules par rapport à leurs équivalents massifs résultent principalement de deux facteurs : un rapport surface/volume extrêmement élevé et des effets de confinement quantique (Wu *et al*., 2020). À mesure que la taille diminue, la proportion d'atomes en surface augmente considérablement : une particule de 10 nm de diamètre possède environ 20 % de ses atomes en surface, tandis qu'une particule de 1 nm en possède près de 100 % (Asha et Narain, 2020).

I.2.1. Propriétés optiques et résonance plasmon de surface

Les nanoparticules métalliques, notamment d'argent et d'or, présentent une propriété optique remarquable : la résonance plasmon de surface (SPR). Il s'agit d'une oscillation collective des électrons de conduction à la surface de la nanoparticule lorsqu'elle est excitée par une onde électromagnétique de longueur d'onde appropriée (Khanna, 2016). Cette propriété est exploitée à la fois pour la caractérisation (spectroscopie UV-Vis) et pour des applications comme les capteurs plasmoniques.

La SPR se manifeste par une bande d'absorption intense dans le domaine du visible, dont la position (λ_{max}) dépend de plusieurs paramètres (Navya et Daima, 2016) :

- La taille des nanoparticules (augmente avec la taille) ;
- La forme (sphérique, triangulaire, cubique, etc.) ;
- L'indice de réfraction de l'environnement diélectrique ;
- Le degré d'agrégation.

Pour les nanoparticules d'argent sphériques, la bande SPR se situe généralement entre 400 et 450 nm. La théorie de Mie, développée au début du XXe siècle, décrit mathématiquement l'absorption et la diffusion de la lumière par des particules sphériques et constitue le fondement théorique de l'interprétation des spectres UV-Vis des nanoparticules (Zhang *et al*., 2021).

I.2.2. Propriétés mécaniques

Les nanomatériaux atteignent des résistances proches de la limite théorique. Leur faible nombre de défauts cristallins leur confère une limite d'élasticité et une dureté nettement supérieure aux matériaux massifs. Exemple : des nanoparticules d'argent ont une résistance à la traction plusieurs fois supérieure à celle de l'argent massif (Wu *et al*., 2020).

I.2.3. Propriétés électriques

La conductivité électrique des nanomatériaux est améliorée par la réduction des défauts structuraux. À l'échelle nanométrique, des phénomènes quantiques comme l'effet tunnel deviennent observables, ouvrant la voie à l'électronique moléculaire (Zhang *et al*., 2014).

I.2.4. Propriétés magnétiques

Les nanoparticules peuvent présenter un comportement superparamagnétique (aimantation rémanente nulle sans champ magnétique), ce qui les rend utiles pour des applications biomédicales comme l'IRM et l'hyperthermie (Khanna, 2016).

I.2.5. Propriétés thermiques

La température de fusion des nanoparticules diminue considérablement avec la taille. Exemple : des nanoparticules d'or de 2 nm fondent à ~300 °C, contre 1064 °C pour l'or massif. Cette propriété est exploitée en catalyse (Zhang *et al*., 2014).

I.3. Les nanoparticules d'argent (AgNPs)

I.3.1. Généralités sur l'argent

L'argent est un métal noble de transition, de symbole Ag (du latin *argentum*), de numéro atomique 47 et de masse atomique 107,87 g/mol. Il cristallise dans le système cubique à faces centrées (CFC) avec un paramètre de maille a = 4,09 Å. Sa structure électronique est [Kr] $4d^{10}$ $5s^{1}$ (Bruna *et al*., 2021). L'argent possède les propriétés suivantes : point de fusion de 961,8 °C, point d'ébullition de 2162 °C, masse volumique de 10,49 g/cm³, conductivité électrique la plus élevée de tous les métaux (63×10^{6} S/m), conductivité thermique de 429 W/(m·K) et résistivité électrique de $1,59 \times 10^{-8}$ Ω·m (Pryshchepa *et al*., 2020).

Depuis l'Antiquité, l'argent est reconnu pour ses propriétés antimicrobiennes. Les Phéniciens conservaient l'eau et les boissons dans des récipients en argent pour prévenir leur altération. Au moyen Age, on utilisait des cuillères en argent pour protéger les familles riches contre les infections. Au XIXe siècle, le nitrate d'argent était utilisé pour prévenir l'ophtalmie néonatale (Rodriguez-Garraus *et al*., 2020).

I.3.2. Définition et propriétés spécifiques des AgNPs

Les nanoparticules d'argent (AgNPs) sont des particules de taille comprise entre 1 et 100 nm. En raison de leur rapport surface/volume extrêmement élevé, elles présentent des propriétés amplifiées par rapport à l'argent massif (Bruna *et al*., 2021). Les caractéristiques clés des AgNPs incluent une forte activité antimicrobienne, des propriétés optiques (SPR) et une bonne conductivité électrique (Pryshchepa *et al*., 2020).

Les AgNPs peuvent être synthétisées par diverses méthodes (chimiques, physiques et biologiques), les méthodes biologiques (vertes) gagnant en popularité en raison de leur éco-compatibilité (Rodriguez-Garraus *et al.*, 2020). Elles sont utilisées dans de nombreuses applications : dispositifs médicaux, systèmes d'administration de médicaments, revêtements antimicrobiens, purification de l'eau et éle ctronique (Abbas et Amin, 2022).

I.3. 3. Applications des des AgNPs

Les nanoparticules d'argent (AgNP) sont largement reconnues pour leur potentiel d'application dans divers secteurs grâce à leurs propriétés antibactériennes et physicochimiques uniques. Comme illustré dans la figure 02, ces applications couvrent principalement les domaines de la médecine, de l'agriculture et de l'environnement. Dans le secteur médical et pharmaceutique, les AgNP sont utilisées dans la cicatrisation des plaies, les dispositifs médicaux (revêtements

d'implants), les formulations dentaires et les agents antimicrobiens topiques (Kumar *et al*., 2020 ; Karataş *et al*., 2026). En agriculture, elles servent d'engrais nanométriques, d'agents de protection des cultures et de conservation des aliments (emballages actifs) (Ding *et al*., 2018 ; Elbanna *et al*., 2020). Dans le domaine environnemental, les AgNP sont employées pour le traitement des eaux usées, la dégradation des colorants et l'élimination des agents pathogènes (Karataş *et al*., 2026). Cette versatilité s'explique par leur grande surface spécifique, leur capacité à libérer des ions Ag^{+} et leur compatibilité avec différentes méthodes de synthèse (physique, chimique, verte) (Abid *et al*., 2022).

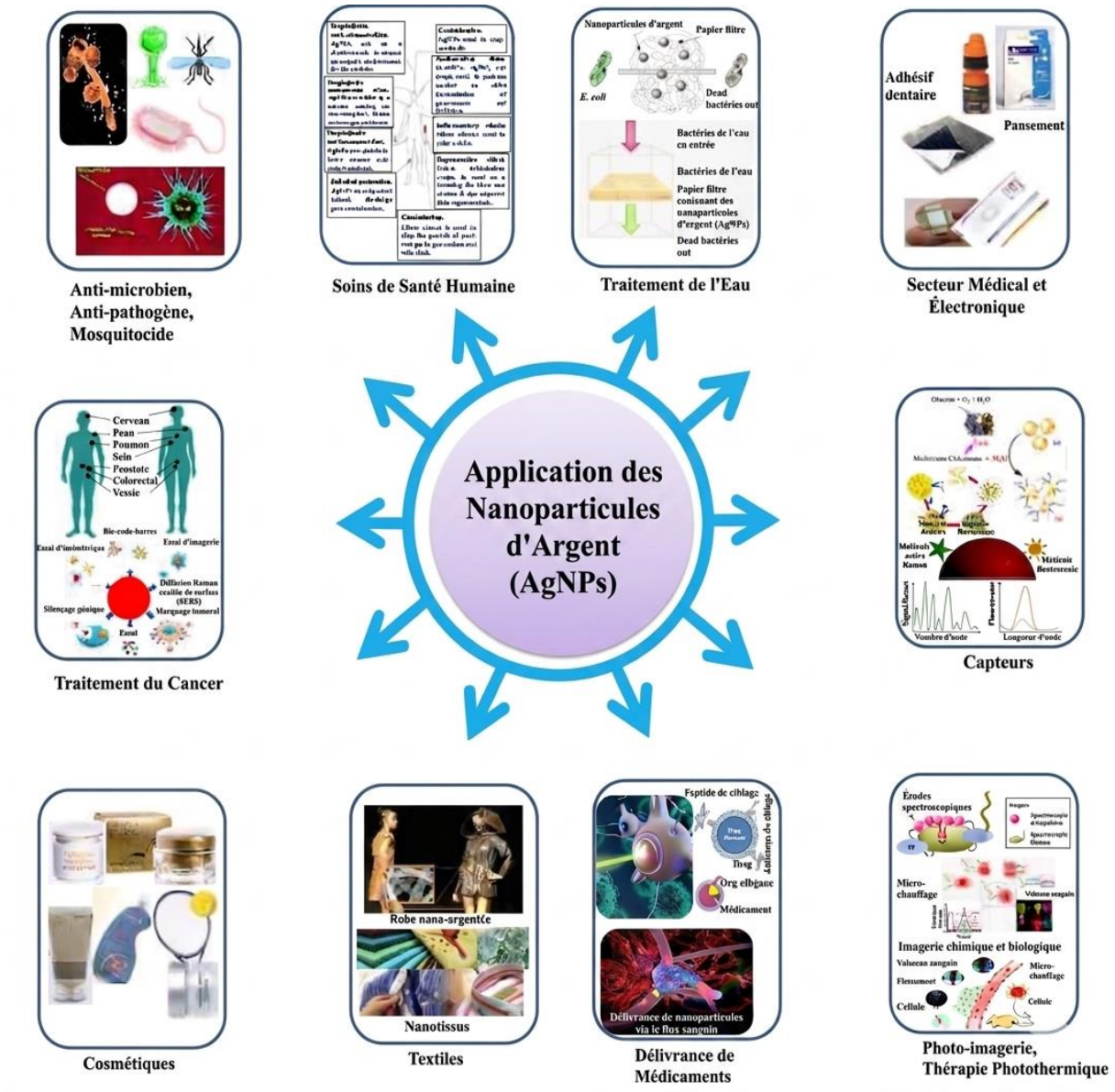


Figure 02 : Applications des nanoparticules d'argent dans différents domaines de la Médecine, de l'agriculture et de l'environnement (Kumar *et al*.,2020).

I.3.4. Mécanisme d'action antibactérien des AgNPs

L'activité antimicrobienne des AgNPs est leur propriété la plus étudiée et exploitée. Elle est supérieure à celle des sels d'argent ($AgNO_3$) en raison de leur grande surface spécifique (qui permet une libération plus efficace des ions Ag^+), de leur petite taille (qui facilite la pénétration dans les cellules bactériennes) et de leur capacité à s'ancrer dans la membrane bactérienne et à la perturber mécaniquement (Yin *et al*., 2020).

Le mécanisme d'action des AgNPs est complexe et multifactoriel. Les principales étapes identifiées sont les suivantes (Cheon *et al*., 2019 ; Yin *et al*., 2020) :

- **Adhésion à la paroi bactérienne :** en raison de leur charge positive (due à l'adsorption d'ions Ag^+), les AgNPs sont attirées par la charge négative des parois bactériennes (acides teichoïques chez les Gram positifs, lipopolysaccharides chez les Gram négatifs).
- **Altération de la membrane :** les AgNPs interagissent avec les protéines membranaires, créent des pores et augmentent la perméabilité membranaire, entraînant une fuite du contenu cytoplasmique et la mort cellulaire.
- **Libération d'ions Ag^+ :** à l'intérieur ou à la surface de la cellule, les AgNPs libèrent des ions Ag^+ qui interagissent avec les groupements thiols (-SH) d'enzymes essentielles, de protéines de transport et de facteurs de transcription.
- **Production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) :** les ions Ag^+ catalysent la production de radicaux libres (superoxyde $O_2^{-}\bullet$, peroxyde d'hydrogène H_2O_2, radical hydroxyle OH•). Ces ROS endommagent l'ADN (cassures de brins), les protéines (oxydation) et les lipides (peroxydation).
- **Inhibition de la réplication de l'ADN :** les AgNPs et les ions Ag^+ peuvent se lier à l'ADN bactérien, interférer avec sa réplication et son expression, et bloquer la division cellulaire.
- **Détachement de la chaîne respiratoire :** les ions Ag^+ inhibent les enzymes de la chaîne respiratoire situées dans la membrane, provoquant une déplétion en ATP.

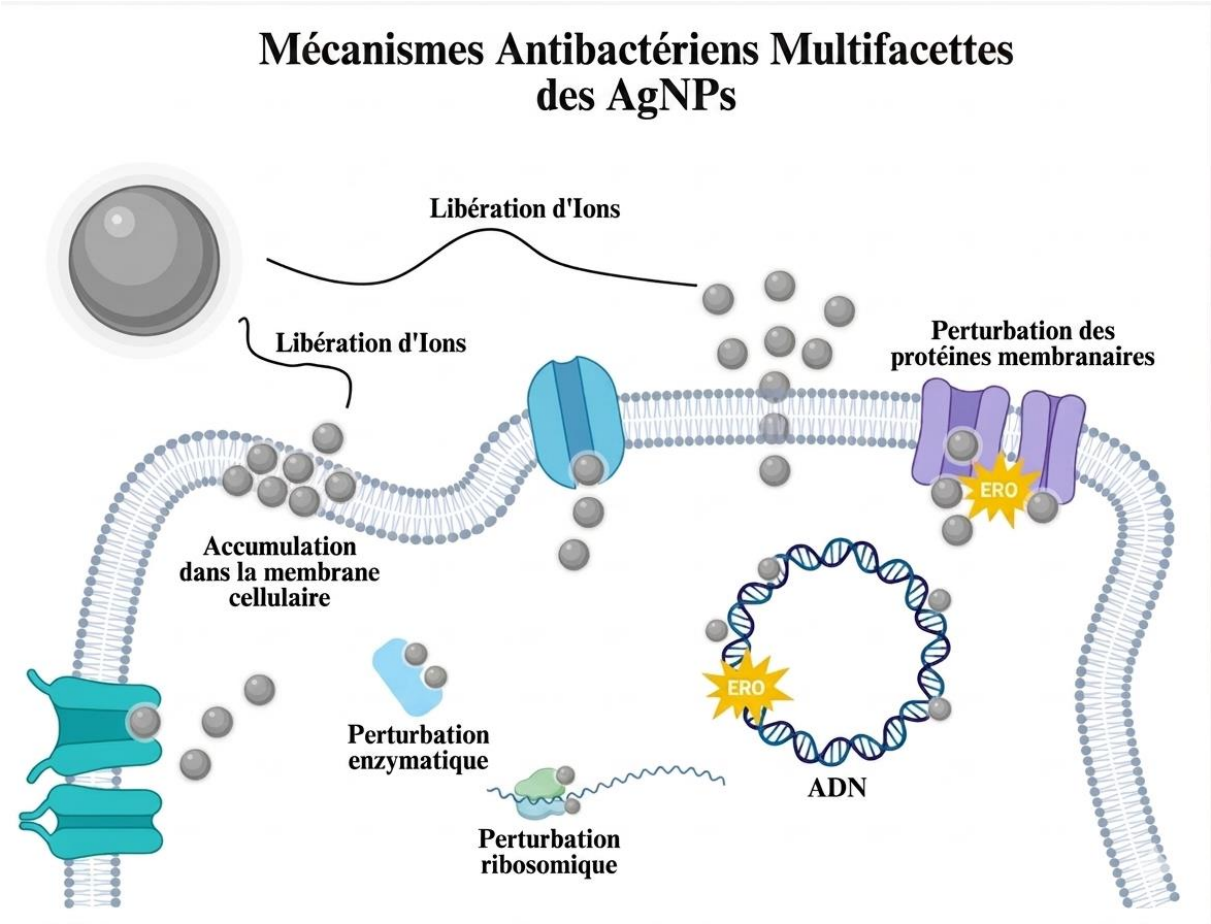


Figure 03 : Mécanisme d'action antibactérien des AgNPs (Karatas *et al*., 2026).

Les AgNPs exercent leurs effets antibactériens par la libération d'ions, l'accumulation membranaire et la perturbation intracellulaire. Le diagramme illustre la libération des ions Ag^+ (petites sphères grises) et leur inhibition subséquente des protéines membranaires et des enzymes cytosoliques. Les icônes en forme d'étoile jaune représentent le stress oxydatif médié par les espèces réactives de l'oxygène (ROS) sur l'ADN et les protéines, tandis que les lignes directionnelles illustrent les voies de pénétration des ions Ag^+ (Karatas *et al*., 2026).

Il a été démontré que les AgNPs sont efficaces contre un large spectre de micro-organismes, y compris les bactéries Gram positif (*Staphylococcus aureus*, *Streptococcus pyogenes*, *Bacillus cereus*), les bactéries Gram négatif (*Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella typhimurium*, *Klebsiella pneumoniae*), les champignons (*Candida albicans*, *Aspergillus niger*) et les virus (VIH, hépatite B, grippe) (Pryshchepa *et al*., 2020).

I.3.5. Facteurs influençant l'activité antibactérienne des AgNPs

L'activité antibactérienne des AgNPs dépend de plusieurs paramètres (Cheon *et al*., 2019) :

- **Taille :** les petites AgNPs (inférieures à 10 nm) sont plus actives car elles ont une plus grande surface spécifique et pénètrent plus facilement les membranes.
- **Forme :** les nanoparticules triangulaires sont souvent plus actives que les sphériques en raison de leurs arêtes réactives.
- **Concentration :** l'activité est dose-dépendante.
- **État d'agrégation :** les AgNPs bien dispersées sont plus actives que les agrégats.
- **Type de bactérie :** les bactéries Gram négatif sont généralement plus sensibles que les Gram positif car leur paroi est plus fine.
- **PH et température :** l'activité est généralement optimale à pH neutre et à température corporelle.

I.4. Méthodes de synthèse des AgNPs

La synthèse des nanoparticules d'argent (AgNPs) peut être réalisée selon trois grandes voies : physique, chimique et biologique, correspondant aux approches top-down (fragmentation) et bottom-up (assemblage). Comme illustré dans la figure 04, les méthodes physiques (top-down) incluent la lithographie, le broyage à billes, l'ablation laser, la pyrolyse, la filtration membranaire, l'irradiation, la coagulation électro-cinétique et l'adsorption sur gel de silice (Abid *et al*., 2022 ; Jiang *et al*., 2022).

- **Les méthodes chimiques (bottom-up)** : comprennent la réduction chimique, le procédé sol-gel, le dépôt chimique en phase vapeur (CVD), la synthèse assistée par micro-ondes, la réduction photochimique, la réduction électrochimique, le procédé oxydatif, la condensation moléculaire et la méthode des microémulsions (Heuer-Jungemann *et al.*, 2019 ; Axet et Philippot, 2020).
- **Les méthodes biologiques (green synthesis) :** utilisent des extraits de plantes, des bactéries, des champignons, des algues, des levures ou des actinomycètes comme agents réducteurs et stabilisants, offrant une alternative écologique. Cependant, les méthodes chimiques classiques présentent des limitations (toxicité des réactifs, résidus de surface) malgré leur simplicité et leur faible coût (Ranjbarzadeh *et al*., 2019).

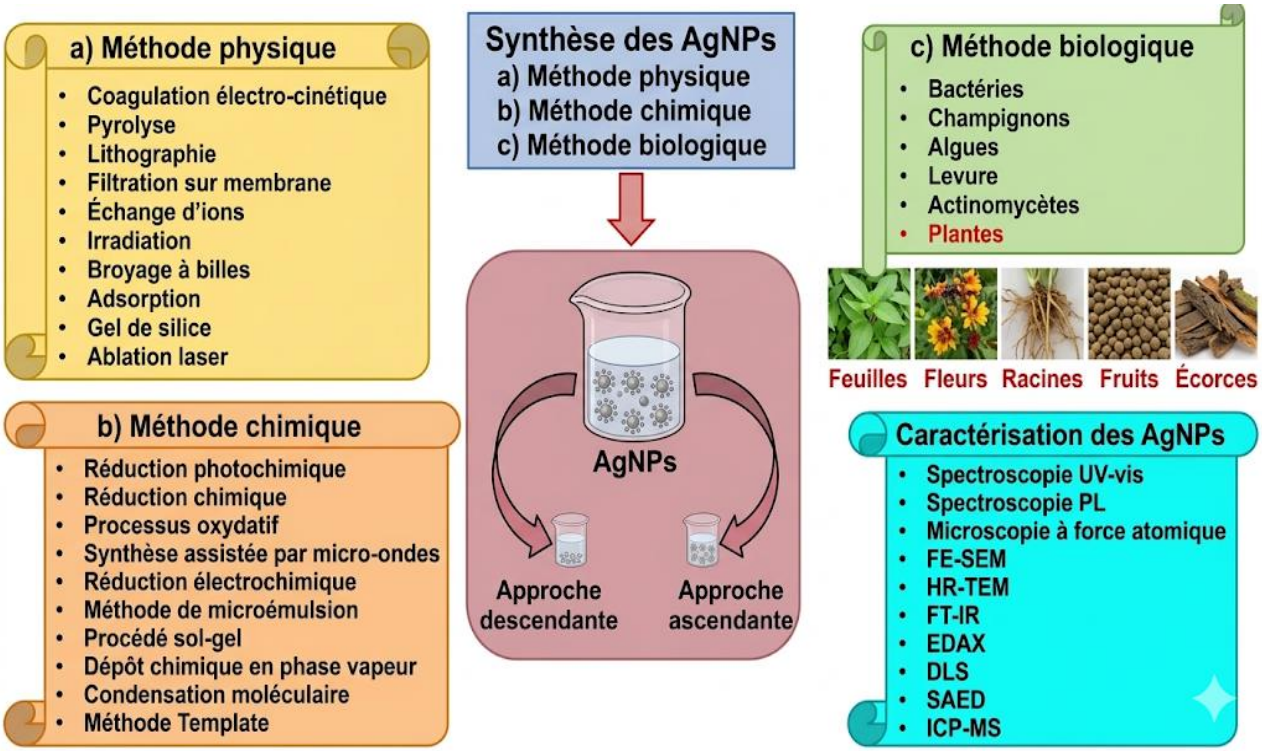


Figure 04 : Synthèse et caractérisation de nanoparticules d'argent par des voies physique, chimique et biologique (Kumar *et al*.,2020).

I.5. Synthèse verte (biosynthèse) à partir d'extraits de plantes

I.5.1. Principes de la chimie verte

La chimie verte, ou chimie durable, vise à réduire ou éliminer l'utilisation et la génération de substances dangereuses. Appliquée à la synthèse de nanoparticules, elle repose sur l'utilisation de ressources naturelles renouvelables (extraits de plantes, microorganismes, enzymes) comme agents réducteurs et stabilisants, l'emploi de solvants non toxiques (eau, éthanol), et des procédés économes en énergie (température ambiante, pression atmosphérique) (Gour et Jain, 2019).

I.5.2. Avantages de la synthèse verte

La biosynthèse se présente comme une alternative écologique aux méthodes chimiques et physiques (Singh *et al*., 2018). Les extraits de plantes sont particulièrement avantageux car ils

sont facilement disponibles, non toxiques, riches en métabolites secondaires (polyphénols, flavonoïdes, terpénoïdes, alcaloïdes) capables de réduire les ions métalliques, et agissent simultanément comme agents réducteurs et agents d'enrobage (capping) (Zhang *et al*., 2020). La synthèse verte est simple, économique, relativement reproductible, et ne nécessite pas de conditions drastiques de pression, d'énergie ou de température (Gour et Jain, 2019).

I.5.3. Mécanisme de la synthèse verte par les extraits de plantes

Le mécanisme de bioréduction des ions métalliques par les extraits de plantes comporte trois phases principales (Selim *et al*., 2020) :

i. **Phase d'activation :** les ions métalliques sont réduits à partir de leurs précurseurs salins sous l'action des métabolites végétaux. Les ions passent d'un état d'oxydation mono- ou divalent à un état de valence zéro ($Ag^{+} \rightarrow Ag^{0}$), avec nucléation des atomes métalliques réduits.

ii. **Phase de croissance :** coalescence spontanée des nanoparticules : les petites particules adjacentes s'unissent pour former des particules plus grandes, accompagnée d'une augmentation de la stabilité thermodynamique.

iii. **Phase de terminaison :** les nanoparticules atteignent leur taille maximale, ce processus étant fortement influencé par la capacité de l'extrait végétal à stabiliser les nanoparticules.

I.5.4. Rôle des métabolites secondaires

Les composés phénoliques (tanins, flavonoïdes, acides phénoliques) présents dans les extraits de plantes sont principalement responsables de la réduction des ions métalliques et de la création des nanoparticules d'oxydes métalliques (Al-Khattaf, 2021). Ces métabolites secondaires contiennent plusieurs groupements fonctionnels, notamment O-H (phénolique et alcool), C=O (cétone), C=C (alcényle), C=N (amide), N-H (amine) et COO- (groupe carboxylique) (Bouafia *et al*., 2021).

Le mécanisme proposé implique que les groupements hydroxyles (-OH) et cétoniques (-C=O) des polyphénols se lient aux ions Ag^{+}, les agglomèrent à l'échelle nanométrique, puis les réduisent en Ag^{0}. Les biomolécules (protéines, polysaccharides) agissent également comme agents d'enrobage (capping), empêchant l'agrégation La réaction globale peut être schématisée comme suit :

$AgNO_3$ (aq) + extrait de plante (polyphénols) ⟶ Ag^0 (nanoparticules) + produits d'oxydation

Le changement de couleur de la solution (du jaune pâle au brun ou au rouge brun) est l'indicateur visuel de la formation des nanoparticules, dû à l'excitation de la résonance plasmon de surface (SPR) (Al-Khattaf, 2021).

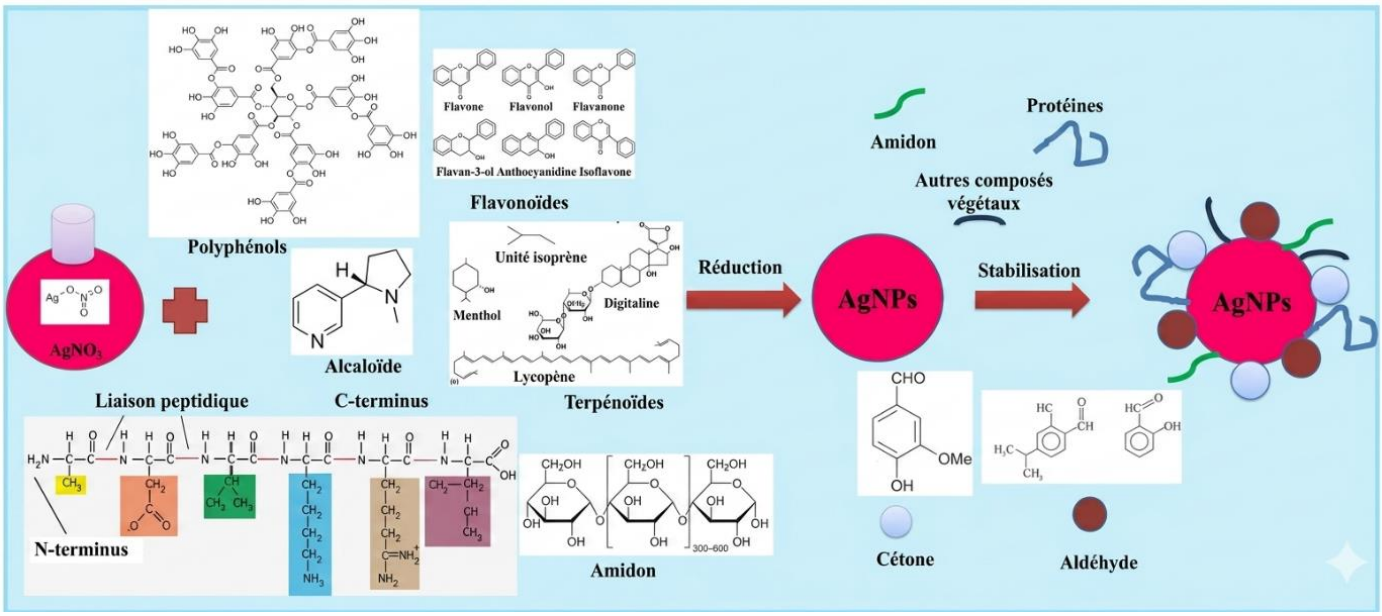


Figure 05 : Mécanisme potentiel de réduction et de fonctionnalisation des nanoparticules d'argent par des extraits végétaux (Kumur *et al*., 2020).

I.5.5. Facteurs influençant la biosynthèse

Plusieurs paramètres expérimentaux influencent la taille, la forme, la stabilité et le rendement des nanoparticules synthétisées par voie verte (Suppiah *et al*., 2023) :

- **Concentration du précurseur métallique ($AgNO_3$) :** une concentration trop faible donne un faible rendement ; une concentration trop élevée peut conduire à l'agrégation.
- **Concentration de l'extrait de plante :** un excès d'extrait peut enrober excessivement les nanoparticules et inhiber leur croissance.
- **Rapport extrait/précurseur :** le rapport volumique entre l'extrait et la solution d'$AgNO_3$ est critique.

- **PH de la solution :** le pH influence la charge des groupements fonctionnels et donc la capacité de réduction et de stabilisation.
- **Température :** une température plus élevée accélère la cinétique de réduction mais peut favoriser l'agrégation.
- **Temps de réaction :** un temps trop court donne une réduction incomplète ; un temps trop long peut conduire à l'agrégation.
- **Agitation :** assure une bonne homogénéisation et une cinétique reproductible.

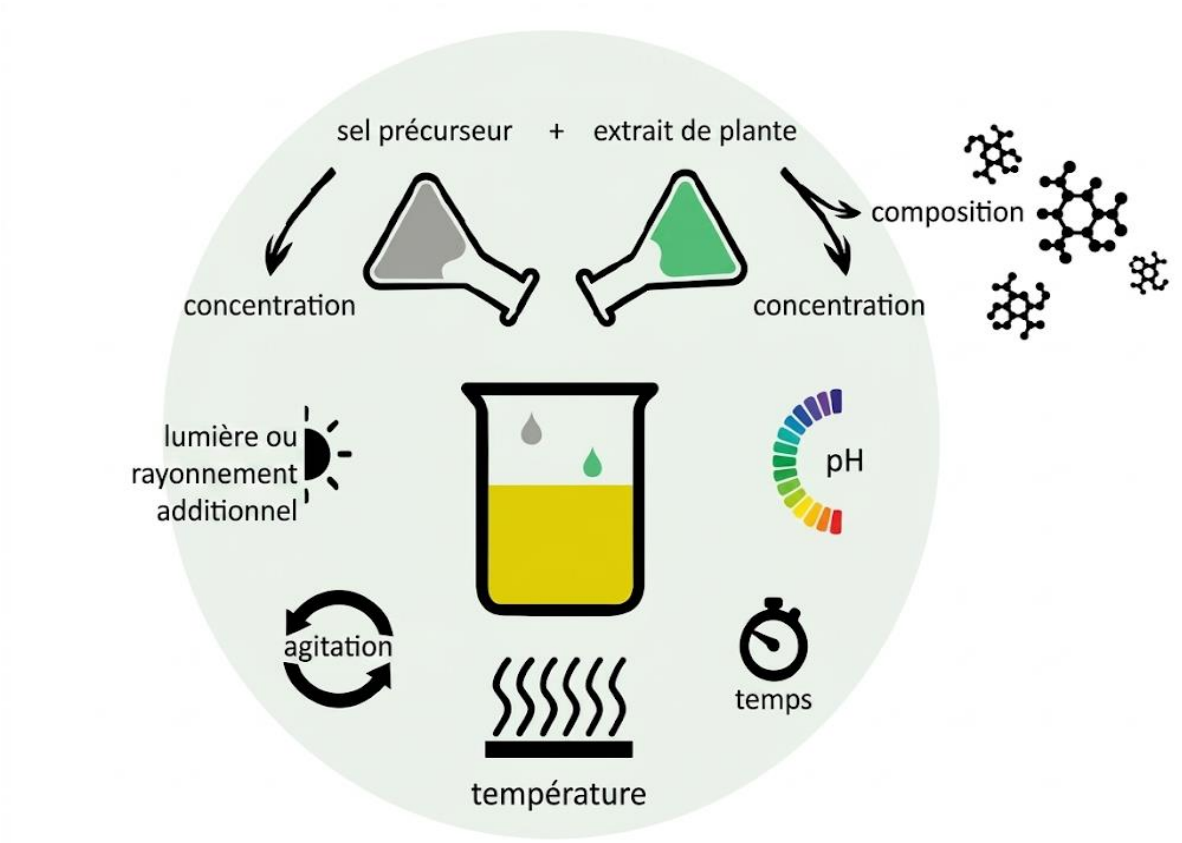


Figure 06 : Facteurs influençant la biosynthèse des nanoparticules (Hosny *et al*., 2025).

I.6. Plante modèle : *Thymus vulgaris* (thym)

I.6.1. Place du *thym* dans la flore médicinale

Le genre *Thymus* appartient à la famille des *Lamiacées* (*Labiées*), l'une des plus vastes familles de plantes à fleurs, comptant plus de 350 espèces réparties dans le monde (Jamkhande *et al.*, 2019). Ces plantes aromatiques vivaces sont principalement présentes dans les régions tempérées d'Europe, d'Asie du Nord et d'Afrique du Nord. En Algérie, plusieurs espèces sauvages sont recensées, dont *Thymus vulgaris*, *Thymus fontanesii* et *Thymus algeriensis*, cette dernière étant endémique de la région nord-africaine (Alkherrraz *et al*., 2025).

Thymus vulgaris, communément appelé « thym commun », « farigoule » ou « garden thyme », est l'espèce la plus étudiée et utilisée du genre (Ejaz *et al*., 2024). Sa popularité remonte à l'Antiquité où les Égyptiens l'utilisaient pour l'embaumement, les Grecs comme aromate et les Romains comme antiseptique (Prabhu et Poulose, 2012). Aujourd'hui, cette plante occupe une place centrale en phytothérapie, en industrie agroalimentaire et, plus récemment, en nanotechnologie verte pour la synthèse de nanoparticules métalliques (Gour et Jain, 2019).



Figure 07 : Plante de *Thymus vulgaris* (shutterstock, 2026).

I.6.2. Nomenclature et classification systématique

La nomenclature de *Thymus vulgaris* a été établie par Linné en 1753. Le tableau 01 résume sa classification systématique complète (Iravani, 2011).

Tableau 01 : Classification systématique de *Thymus vulgaris*

Rang taxonomique	**Nom**
Règne	Planta
Sous-règne	Viridiplantae
Embranchement	Spermaphytes
Sous-embranchement	Angiospermes
Classe	Dicotylédones
Sous-classe	Astéridées
Ordre	Lamiales
Famille	Lamiacées (Labiées)
Sous-famille	Nepetoideae
Tribu	Mentheae
Genre	*Thymus*
Espèce	*Thymus vulgaris*

I.6.3. Description botanique

Thymus vulgaris est un sous-arbrisseau vivace de 20 à 40 cm de hauteur, à tiges ligneuses à la base, dressées ou ascendantes (Tavukcuoglu *et al*., 2024). La plante présente un port buissonnant et forme des touffes denses (Ejaz *et al*., 2024).

- **Appareil végétatif :** les tiges sont tétragonales (section carrée), caractéristique des *Lamiacées*, finement pubescentes et très ramifiées. Les feuilles sont petites (4 à 10 mm de long), opposées, sessiles, linéaires à ovales, à bords recourbés (révolutés). La face supérieure est verte et glabre, tandis que la face inférieure est blanchâtre et tomenteuse (couverte de poils blancs), adaptation remarquable à la sécheresse (Alkherrraz *et al*., 2025).
- **Appareil reproducteur :** les fleurs sont minuscules (3 à 5 mm), zygomorphes, de couleur rose pâle à lilas ou blanche, groupées en verticillies formant un épi lâche au

sommet des rameaux. La floraison s'étend de mai à août. Le fruit est un tétrakène (quatre petits akènes) de couleur brune (Jamkhande *et al*., 2019).

- **Système racinaire :** la racine est pivotante, s'enfonçant jusqu'à 40-60 cm, avec des ramifications latérales abondantes, ce qui permet une excellente résistance à la sécheresse (Prabhu et Poulose, 2012).

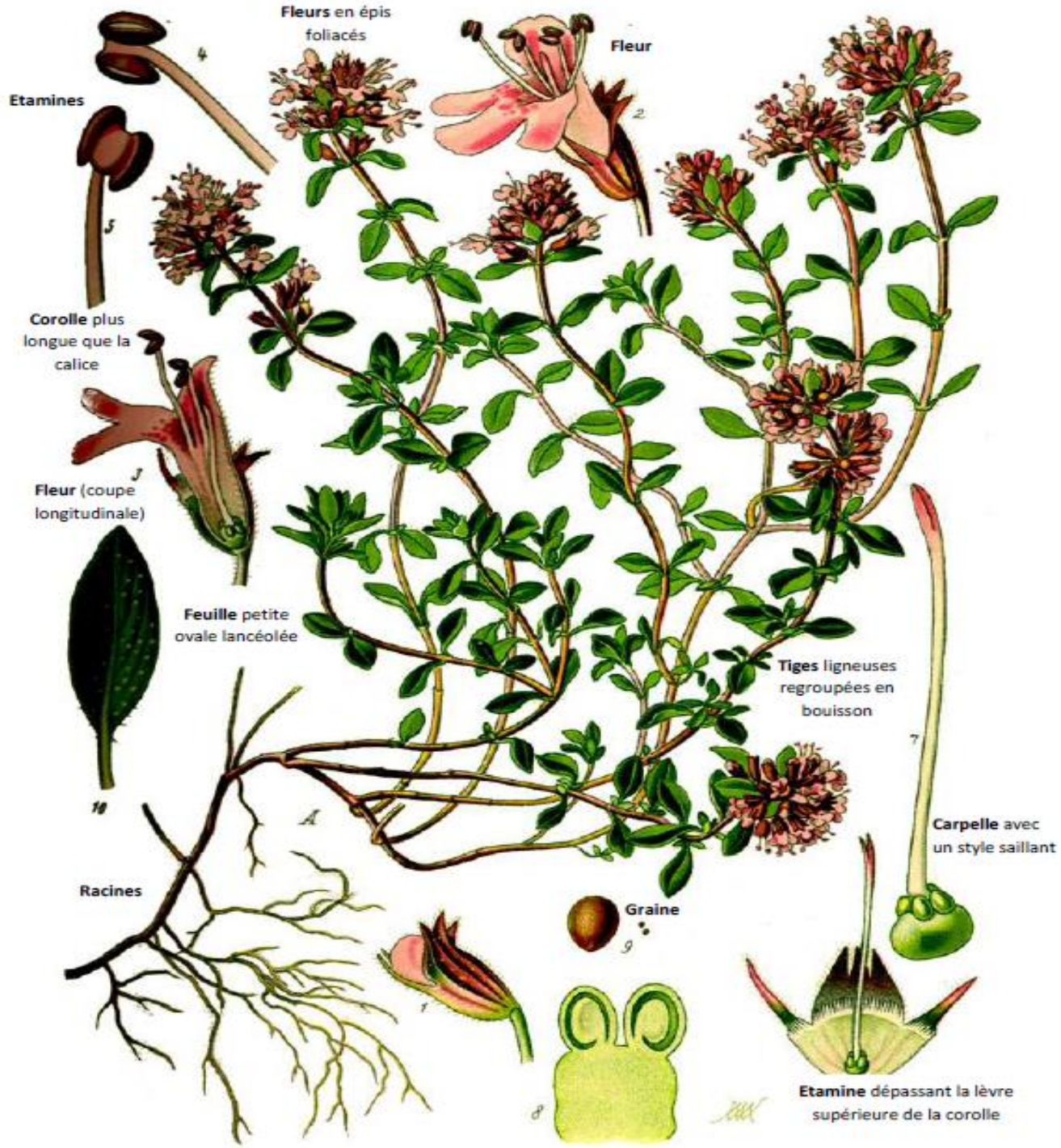


Figure 08 : Illustration morphologique détaillée de *Thymus vulgaris* (feuilles, tiges, fleurs, racine) (Bahlouli, 2015).

I.6.4. Caractères organoleptiques

La plante dégage un arôme puissant et caractéristique, dû à son huile essentielle riche en thymol et carvacrol. Le goût est âcre, chaud et légèrement amer (Pandey et Singh, 2017).

I.6.5. Polymorphisme chimique

L'un des aspects les plus fascinants de *Thymus vulgaris* est son polymorphisme chimique. Selon (Ejaz *et al*. 2024), on distingue six chémotypes principaux : thymol, carvacrol, linalol, géraniol, α-terpinéol et thuyanol-4. Le chémotype thymol est le plus commun et le plus utilisé pour ses propriétés antimicrobiennes (Alkherrraz *et al*., 2025).

I.6.6. Phytogéographie et écologie

Thymus vulgaris est originaire du bassin méditerranéen occidental (Sud de l'Europe : France, Espagne, Italie) et s'est naturalisé dans de nombreuses régions du monde : Amérique du Nord, Afrique du Sud, Nouvelle-Zélande (Gour et Jain, 2019). En Afrique du Nord, on le trouve principalement dans les régions telliennes d'Algérie, du Maroc et de Tunisie, ainsi que dans les hauts plateaux steppiques (Alkherrraz *et al.*, 2025). Le thym commun affectionne les sols secs, calcaires, bien drainés et exposés en plein soleil (Tavukcuoglu *et al*., 2024).

I.6.7. Composition chimique

La richesse chimique de *Thymus vulgaris* est à l'origine de ses nombreuses propriétés pharmacologiques et de son efficacité dans la synthèse verte de nanoparticules (Ejaz *et al*., 2024).

- **Huile essentielle :** pour le chémotype thymol, les composés majoritaires sont présentés dans le tableau 02 (Alkherrraz *et al*., 2025).
- **Polyphénols et flavonoïdes :** l'extrait aqueux de thym est particulièrement riche en composés phénoliques : acides phénoliques (acide rosmarinique, acide caféique, acide chlorogénique, acide gallique), flavonoïdes (apigénine, lutéoline, thymonine, quercétine), et tanins condensés (Ejaz *et al*., 2024).
- **Autres métabolites d'intérêt :** composés volatiles (1,8-cinéole, camphre), triterpènes (acide ursolique, acide oléanolique), saponosides, et protéines (jusqu'à 2-3 % du poids sec) (Prabhu & Poulose, 2012).

Tableau 02 : Composition chimique typique de l'huile essentielle de *Thymus vulgaris* (chémotype thymol) (Alkherrraz *et al*., 2025).

Composé	Classe chimique	Pourcentage
Thymol	Monoterpène phénolique	30 – 55
Carvacrol	Monoterpène phénolique	5 – 25
p-Cymène	Monoterpène hydrocarboné	10 – 20
γ-Terpinène	Monoterpène hydrocarboné	5 – 15
Linalol	Monoterpène alcool	2 – 5
Bornéol	Monoterpène alcool	1 – 3
Acétate de bornyle	Ester terpénique	1 – 2
Autres	-	5 – 15

I.6.8. Utilisations traditionnelles et pharmacologiques

Depuis l'Antiquité, *Thymus vulgaris* est utilisé pour ses propriétés médicinales (Pandey et Singh, 2017) : antiseptique (infections respiratoires, buccales, cutanées), antispasmodique (spasmes digestifs, toux), expectorant, anthelminthique, digestif, carminatif et tonique général. En médecine traditionnelle algérienne, le thym (*Zaatar*) est utilisé en décoction pour traiter les affections respiratoires, les troubles digestifs, les morsures de serpent et les brûlures (Alkherrraz *et al*., 2025).

❖ **Activités biologiques validées scientifiquement**

- **Antimicrobienne :** puissante activité contre les bactéries Gram positives (*Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus*) et Gram négatives (*Escherichia coli*, *Salmonella typhimurium*), ainsi qu'une activité antifongique contre *Candida albicans* et *Aspergillus* spp. (Prabhu et Poulose, 2012).
- **Antioxydante :** les polyphénols du thym sont de puissants piégeurs de radicaux libres (DPPH, …) (Ejaz *et al*., 2024).

- **Anti-inflammatoire :** inhibition de la production de médiateurs pro-inflammatoires (TNF-α, IL-6, COX-2) ; ont rapporté une inhibition de 77,31 % à 1000 µg/ml ;
- **Antidiabétique :** inhibition de l'enzyme alpha-glucosidase (Ejaz *et al*., 2024).
- **Insecticide et larvicide** (Alkherrraz *et al.,* 2025).

I.6.9. Rôle des métabolites secondaires dans la synthèse verte de nanoparticules d'argent

L'un des aspects les plus prometteurs de *Thymus vulgaris* est sa capacité à réduire et stabiliser des nanoparticules métalliques par voie verte (Alkherrraz *et al*., 2025). Les métabolites secondaires du thym contiennent plusieurs groupements chimiques actifs : les groupements hydroxyles (-OH) des polyphénols (acide rosmarinique, flavonoïdes) sont responsables de la réduction des ions métalliques ($Ag^{+} \rightarrow Ag^{0}$) ; les groupements carbonyles (C=O) des acides phénoliques participent à la stabilisation (effet « capping ») ; les groupements amides ($-NH_2$) des protéines agissent comme agents de stabilisation supplémentaires.

Tableau 03 : Principaux composés identifiés dans l'extrait aqueux de thym par chromatographie et leur rôle dans la synthèse des AgNPs (Ejaz *et al*., 2024).

Composé	Classe	Rôle dans la synthèse des AgNPs
Acide caféique	Acide phénolique	Réduction, stabilisation
Acide chlorogénique	Acide phénolique	Réduction, chélation
Acide gallique	Acide phénolique	Réduction, antioxydant
Quercétine	Flavonoïde	Réduction, capping
Apigénine	Flavonoïde	Réduction, capping
Thymonine	Flavonoïde	Stabilisation
2,5-O-Methylene-D-mannitol	Sucre-alcool	Réduction
Xylitol	Polyol	Réduction
Quinoline, décahydro-1,7-diméthyl	Composé azoté	Stabilisation

❖ **Mécanisme général proposé**

- Polyphénols–OH + Ag^{+} → Polyphénols–O• + Ag^{0} (réduction)
- N Ag^{0} → $(Ag)_n$ (nucléation)
- $(Ag)_n$ + m Ag^{0} → $(Ag)_{n+m}$ (croissance)
- Protéines + surface $(Ag)_n$ → Protéines@$(Ag)_n$ (capping)

I.6.10. Pourquoi le *thym* est-il un excellent candidat pour la synthèse verte ?

Haute teneur en polyphénols (groupements –OH donneurs d'électrons), présence de thymol et carvacrol (stabilisation), richesse en protéines (2-3 % du poids sec) comme agents de capping naturels, pH légèrement acide (5-6) favorable à la nucléation, et facilité de culture et disponibilité en Algérie.

Ainsi, *Thymus vulgaris* est une plante médicinale modèle dont la richesse en métabolites secondaires lui confère des propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires, antimicrobiennes et antidiabétiques exceptionnelles (Ejaz *et al*., 2024). Ces mêmes composés lui confèrent la capacité de réduire et stabiliser des nanoparticules métalliques, faisant du thym un agent réducteur naturel de choix pour la synthèse verte de nanoparticules d'argent (Alkherrraz *et al*., 2025). L'utilisation du thym algérien s'inscrit parfaitement dans une démarche de valorisation des ressources locales pour des applications nanotechnologiques écologiques et durables.

I.7. Activité antibactérienne : généralités et méthodes d'évaluation

I.7.1. Généralités sur les bactéries pathogènes

Les bactéries pathogènes sont classées en deux grands groupes selon leur structure pariétale (Khan *et al*., 2022) :

- **Bactéries Gram positif :** paroi épaisse (20-30 nm) composée d'un épais feuilleton de peptidoglycane contenant des acides teichoïques.

  Exemples : *Staphylococcus aureus* (infections cutanées, septicémies), *Bacillus cereus* (intoxications alimentaires), *Streptococcus pyogenes* (angines, rhumatisme articulaire aigu) ;

- **Bactéries Gram négatif :** paroi plus fine (2-3 nm) mais plus complexe, avec une membrane externe supplémentaire contenant des lipopolysaccharides (LPS).

Exemples : Escherichia coli (infections urinaires, gastro-entérites), *Pseudomonas aeruginosa* (infections nosocomiales, pneumonies), *Salmonella typhimurium* (fièvres typhoïdes), *Klebsiella pneumoniae* (pneumonies) (Khan *et al*., 2022).

I.7.2. Activité antibactérienne des extraits de plantes

Les extraits de plantes, notamment alcooliques, présentent une activité antibactérienne due à leurs composés phénoliques (flavonoïdes, tanins, acides phénoliques) et terpéniques. Les mécanismes proposés incluent : altération de la membrane cellulaire et fuite du contenu cytoplasmique, inhibition d'enzymes essentielles (ADN gyrase, ARN polymérase), chélation des ions métalliques nécessaires à la croissance bactérienne, et inhibition de la synthèse des acides nucléiques et des protéines (D'Addabbo *et al*., 2013).

I.7.3. Activité antibactérienne des AgNPs

Comme détaillé précédemment, le mécanisme d'action des AgNPs est multifactoriel (altération membranaire, libération d'ions Ag^+, production de ROS, inhibition de la réplication). L'association des AgNPs avec les extraits de plantes peut produire un effet synergique (Yin *et al*., 2020).

I.7.4. Méthodes d'évaluation de l'activité antibactérienne

Les méthodes couramment utilisées incluent (Balouiri *et al*., 2016) :

- **Méthode de diffusion en disques (antibiogramme) :** des disques de papier filtre imprégnés de l'échantillon sont déposés sur une gélose ensemencée. Après incubation, on mesure le diamètre de la zone d'inhibition.
- **Méthode de diffusion en puits :** variante : des puits sont creusés dans la gélose et remplis de l'échantillon.
- **Détermination de la concentration minimale inhibitrice (CMI) :** technique de microdilution en milieu liquide (bouillon nutritif) dans des microplaques à 96 puits. La CMI est la plus faible concentration qui inhibe toute croissance visible.

- **Concentration minimale bactéricide (CMB) :** déterminée en repiquant sur gélose les puits sans croissance visible de la CMI ; la CMB est la plus faible concentration qui tue 99,9 % des bactéries.
- **Courbes de croissance :** mesure de la densité optique (DO à 600 nm) en fonction du temps en présence de différentes concentrations d'échantillon.

Matériel et méthodes

II.1. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé dans cette étude provient des feuilles de *Thymus vulgaris* une plante de la famille des Lamiacées. Ces feuilles ont été récoltées en février 2026 à Tassla Lemtaï (Mila, Algérie) (coordonnées GPS : 36° 34′ 09″ nord, 5° 59′ 09″ est).

L'identification botanique du matériel végétal a été réalisée à l'aide de l'application PlantNet (version 4.0, CIRAD, INRAE, IRD). Bien qu'aucun botaniste référent n'ait été sollicité, cette méthode numérique est parfaitement fiable : sa validité scientifique a été démontrée par Bonnet *et al*. ; (2020).

Une fois récoltées, les feuilles ont été préparées en plusieurs étapes :

- **Lavage :** elles ont été soigneusement rincées à l'eau claire.
- Séchage : elles ont été séchées soit à température ambiante, à l'abri de la lumière, soit dans une étuve réglée à 40 °C.
- **Broyage :** après séchage, les feuilles ont été finement broyées à l'aide d'un broyeur électrique.
- **Conservation :** la poudre obtenue a été placée dans des flacons hermétiques, protégée de l'humidité et de la lumière, jusqu'au moment des analyses.



Figure 09 : Étapes préparatives de la poudre foliaire de *Thymus vulgaris*.

II. 2. Extraits végétaux

II .2.1. Extraction aqueuse (pour synthèse des AgNPs)

Selon le protocole modifié de (Revathi *et al*., 2024), dix grammes (10 g) de poudre de *Thymus vulgaris* ont été mélangés à 100 ml d'eau distillée. Le mélange a ensuite été chauffé pendant 30 minutes à 60 °C, puis refroidi à température ambiante. La solution obtenue a été filtrée sur un papier filtre Whatman n°1. L'extrait aqueux frais a été utilisé immédiatement pour la synthèse des nanoparticules.

II .2.2. Extraction éthanolique (pour analyses phytochimiques et biologiques)

La macération a été réalisée selon un protocole adapté de (Bouaziz *et al*. 2009). Dix grammes (10 g) de poudre végétale ont été mis en contact avec 100 ml d'éthanol) dans un flacon hermétique. Le mélange a été maintenu sous agitation à température ambiante (25 ± 2 °C) à l'obscurité pendant 24 h. Après filtration sur papier filtre Whatman n°1, le filtrat a été concentré sous vide à 45 °C à l'aide d'un évaporateur rotatif, puis séché à l'étuve à 37 °C. L'extrait sec a été pesé et conservé à 4 °C dans des flacons étanches.

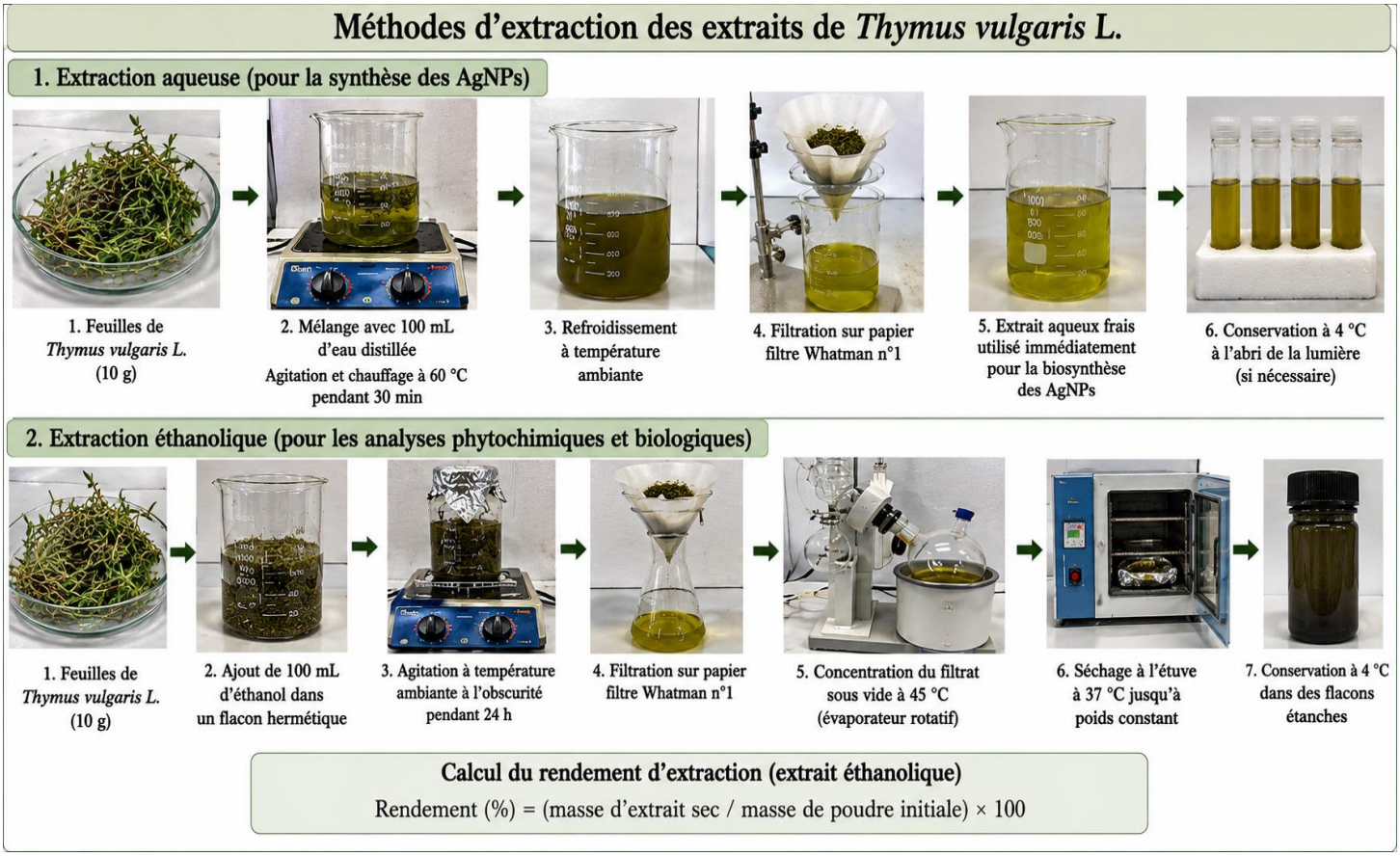


Figure 10 : Protocole de préparation des extraits bruts (éthanoliques et aqueuse des feuilles *Thymus vulgaris*).

Le rendement d'extraction a été calculé selon la formule suivante :

$$\text{Rendement (\%)} = (\text{masse d'extrait sec} / \text{masse de poudre initiale}) \times 100$$

II.3. Synthèse verte des nanoparticules d'argent (AgNPs)

II.3.1. Préparation de la solution de nitrate d'argent (AgNO3)

Une solution aqueuse de nitrate d'argent ($AgNO_3$) à 1 mM a été préparée en dissolvant 17 mg d'$AgNO_3$ dans 100 ml d'eau distillée.

II.3.2. Biosynthèse des AgNPs

La synthèse a été réalisée selon le protocole adapté de (Jyoti *et al*., 2016). Dix millilitres (10 ml) d'extrait aqueux frais ont été ajoutés à 90 ml de solution d'$AgNO_3$ (1 mM). Le mélange a été incubé à 60 °C sous agitation constante (150 tours/min) pendant 2 h, à l'obscurité. La formation des AgNPs a été suivie visuellement par un changement de couleur (du jaune pâle au brun), caractéristique de la réduction des ions Ag^+ en argent métallique.

II.3.3. Purification des AgNPs

Le mélange réactionnel a été centrifugé à 12 000 (15 tour /min.). Le surnageant a été éliminé et le culot a été repris trois fois dans de l'eau distillée stérile. Le sédiment obtenu a été séché à l'étuve à 60 °C pendant 24 h. Les culots ainsi séchés ont été conservés et utilisés pour les analyses et les tests biologiques.

II.3.4. Caractérisation par spectrophotométrie UV-Visible

La formation des AgNPs a été confirmée par spectrophotométrie UV-Visible. Des aliquotes du mélange réactionnel ont été prélevées à différents temps (0, 15 min, 30 min, 45 min, 1 h et 2 h) et analysées entre 300 et 700 nm. La présence d'un pic d'absorption autour de 420 nm, caractéristique de la résonance plasmonique de surface des AgNPs, a été recherchée.

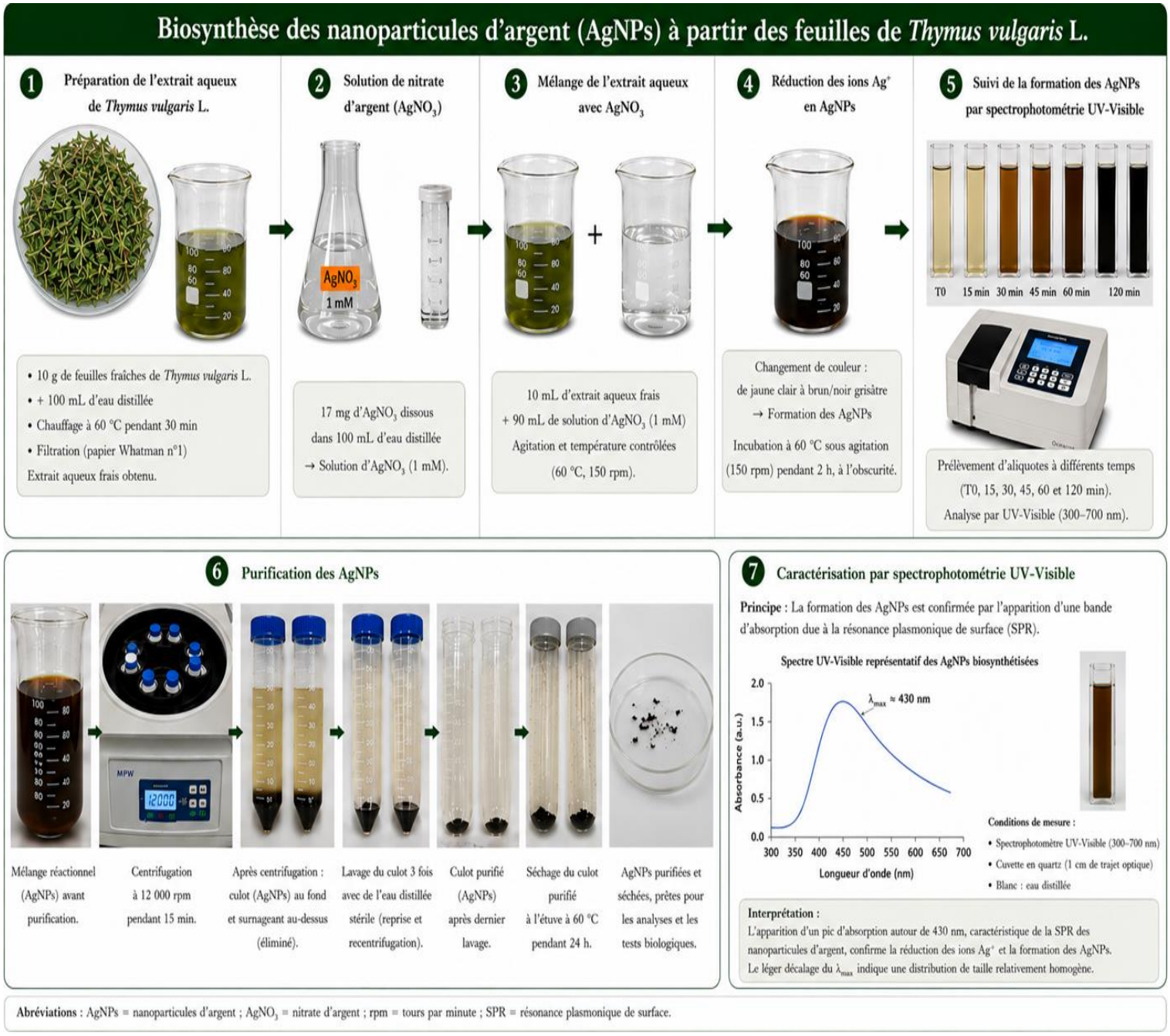


Figure 11 : Les étapes de la biosynthèse des nanoparticules d'argent (AgNP) à partir de l'extrait de *Thymus vulgaris.*

II.4. Screening phytochimique qualitatif

Un screening phytochimique a été réalisé sur l'extrait éthanolique selon des tests de coloration et de précipitation standard (Boudjema *et al*., 2022). Les composés recherchés et les réactifs utilisés sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 04 : Détection des composés phytochimiques tests de caractérisation.

Composé recherché	Protocole (étapes clés)	Résultat positif
Phénol	2 ml d'extrait + 3–4 gouttes de $FeCl_3$ à 5 %	Coloration noire
Tanins	1 ml d'extrait + 2 ml de $FeCl_3$ à 3 % → attendre 2 min	Coloration bleu foncé ou noir verdâtre
Quinones	1 ml d'extrait + 1 ml d'acide sulfurique concentré (ajout délicat)	Coloration rouge
Saponines	2 ml d'extrait + 2 ml eau distillée → agiter 15 min	Couche de mousse stable d'environ 1 cm
Flavonoïdes	1 ml d'extrait + qq. gouttes HCl concentré + qq. mg de magnésium (mg)	Coloration rouge ou orange
Stéroïdes	1 ml d'extrait + volume égal de chloroforme + qq. Gouttes H_2SO_4 concentré	Anneau brun à l'interface
Protéines	Extrait + acide nitrique concentré	Coloration jaune
Terpénoïdes	0,5 ml d'extrait + 2 ml chloroforme + 3 ml H_2SO_4 concentré	Coloration brun-rouge à l'interface
Coumarines	1 ml d'extrait + 1 ml NaOH à 10 %	Coloration jaune

- Les résultats ont été exprimés selon une échelle semi-quantitative :

(+++) : réaction franchement positive

- (++) : positive
- (+) : moyennement positive
- (-) : négative.

II.5. Dosage des polyphénols totaux

La teneur en polyphénols totaux a été déterminée par la méthode de Folin-Ciocalteu (El Machrafi *et al*., 2025). Brièvement, 1 ml d'extrait éthanolique (1 mg/ml) a été mélangé à 5 ml de réactif de Folin-Ciocalteu (dilué 10 fois), puis à 3,75 ml de carbonate de sodium à 7,5 %.

Après 2 h d'incubation à température ambiante à l'obscurité, l'absorbance a été mesurée à 760 nm. Une courbe d'étalonnage a été réalisée avec l'acide gallique (0–200 µg/ml). Les résultats sont exprimés en microgrammes d'équivalent acide gallique par milligramme d'extrait (µg EAG/mg).

II.6. Évaluation de l'activité antioxydante (méthode au DPPH)

L'activité antioxydante a été évaluée par le test de piégeage du radical libre DPPH selon Brand-Williams *et al*. (1995). Une solution éthanolique de DPPH (0,1 mM) a été préparée et ajustée pour obtenir une absorbance de 0,7 - 0,8 à 517 nm. L'extrait éthanolique a été dilué dans l'éthanol pour obtenir des concentrations comprises entre 12,5 et 200 µg/mL.100 µL de chaque dilution ont été mélangés à 100 µL de solution de DPPH. Après 30 min d'incubation à l'obscurité à température ambiante, l'absorbance a été mesurée à 517 nm. L'acide ascorbique a servi de témoin positif.

Le pourcentage d'inhibition a été calculé comme suit :

$$\% \text{ inhibition} = [(A_0 - A_1) / A_0] \times 100$$

Où :

- A_0 est l'absorbance du témoin (DPPH seul).
- A_1 est l'absorbance du témoin de l'échantillon.

La concentration inhibitrice à 50 % (IC_{50}) a été déterminée par régression linéaire à partir de la courbe dose-réponse.

II.7. Évaluation de l'activité antibactérienne

II.7.1. Souches bactériennes

Trois souches de référence ont été utilisées :

- ✓ *Bacillus subtilis* (ATCC 6633, Gram positif)
- ✓ *Escherichia coli* (ATCC 25922, Gram négatif)
- ✓ *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 27853, Gram négatif)

Les souches ont été fournies par le laboratoire pédagogique et conservées sur gélose nutritive à 4 °C.

II.7.2. Méthode de diffusion sur disques (antibiogramme)

L'activité antibactérienne des extraits bruts obtenus à partir des feuilles de *Thymus vulgaris* a été testée in vitro contre trois souches bactériennes pathogènes. La méthode de diffusion sur disque en agar a été utilisée afin d'évaluer le potentiel antibactérien des extraits. Cette approche est basée sur la mesure des diamètres des zones d'inhibition de croissance bactérienne autour des disques imprégnés de la préparation antimicrobienne (Bubonja-Šonje *et al*., 2020).

- **Stérilisation du matériel**

Le matériel nécessaire à la réalisation des essais a été préalablement stérilisé par passage à l'autoclave à une température de 121 °C pendant 20 minutes. Ce protocole a été appliqué à l'eau distillée, aux tubes à essai, aux milieux de culture, aux disques de 6 mm préparés à partir de papier Whatman n°6, aux embouts ainsi qu'à l'eau physiologique.

- **Préparation des différentes concentrations des d'extraits**

Les extraits éthanolique et aqueux ont été dissous respectivement dans le diméthylsulfoxyde (DMSO) et dans l'eau distillée stérile. À partir de la solution mère de chaque extrait (100 mg/ml), des dilutions successives au demi ont été effectuées afin d'obtenir les concentrations finales suivantes : 50 mg/ml (1/2), 25 mg/ml (1/4) et 12,5 mg/ml (1/8).

- **Activation des souches bactériennes**

L'activation des souches bactériennes conservées vise à restaurer leur viabilité et à obtenir une culture jeune, phase essentielle et préalable à toute utilisation expérimentale. Ces souches, maintenues en état de quiescence durant la conservation, présentent en effet une activité métabolique fortement réduite, voire nulle.

À cet effet, les souches sont ensemencées dans un bouillon nutritif stérile, puis incubées à une température de 37 °C durant 24 heures. Les cultures résultantes, caractérisées par une croissance active, servent ultérieurement à la préparation de la suspension bactérienne destinée aux essais ultérieurs.

- **Repiquage des souches bactériennes**

Les souches bactériennes, après activation dans le bouillon nutritif, sont prélevées au moyen d'une anse de platine stérile, puis transférées par ensemencement en stries sur des boîtes de Petri renfermant un milieu gélosé solide (généralement une gélose nutritive préalablement coulée et solidifiée). Les boîtes ensemencées sont ensuite placées en incubation à 37 °C pendant

24 heures, dans le but d'obtenir une croissance de colonies isolées et pures, exemptes de contamination.

- **Préparation de l'inoculum bactérien**

Les suspensions bactériennes ont été préparées à partir de cultures fraîches âgées de 18 à 24 heures, obtenues après repiquage par la méthode des stries sur milieu Mueller-Hinton (MH). Une à trois colonies bien isolées ont été prélevées à l'aide d'une anse de platine stérile et transférées dans 9 ml d'eau physiologique stérile. La turbidité de la suspension a été ajustée par dilution ou concentration jusqu'à atteindre une densité optique de 0,08 à 0,10 mesurée à 625 m.

- **Préparation du milieu Mueller-Hinton (MH)**

Trente-huit grammes (38 g) de poudre déshydratée de Mueller-Hinton sont dissous dans 1 litre d'eau distillée. La solution est portée à ébullition douce sous agitation magnétique jusqu'à obtention d'une dissolution complète. Le milieu est ensuite stérilisé à l'autoclave à 121 °C pendant 20 minutes. Après refroidissement à 45–50 °C, le milieu stérile est distribué aseptiquement dans des boîtes de Petri stériles.

- **Préparation des disques**

Des disques d'un diamètre de 6 mm ont été préparés à partir de papier filtre Whatman n° 6. Ces disques ont été placés dans des boîtes de Petri en verre et stérilisés par autoclavage à 121 °C pendant 20 minutes. Après stérilisation, ils ont été maintenus dans des conditions strictement aseptiques jusqu'à leur emploi.

- **Ensemencement**

L'ensemencement a été réalisé selon la méthode de l'écouvillonnage. Un écouvillon stérile a été imprégné d'une suspension bactérienne standardisée, puis appliqué en stries successives sur toute la surface de la gélose Mueller-Hinton (MH). Entre chaque passage, la boîte de Petri a été légèrement tournée afin d'assurer une répartition homogène et uniforme des micro-organismes.

Cette technique permet d'obtenir un tapis bactérien confluent régulier, condition essentielle pour une lecture fiable et précise des diamètres d'inhibition autour des disques d'antibiotiques.

- **Expression des résultats**

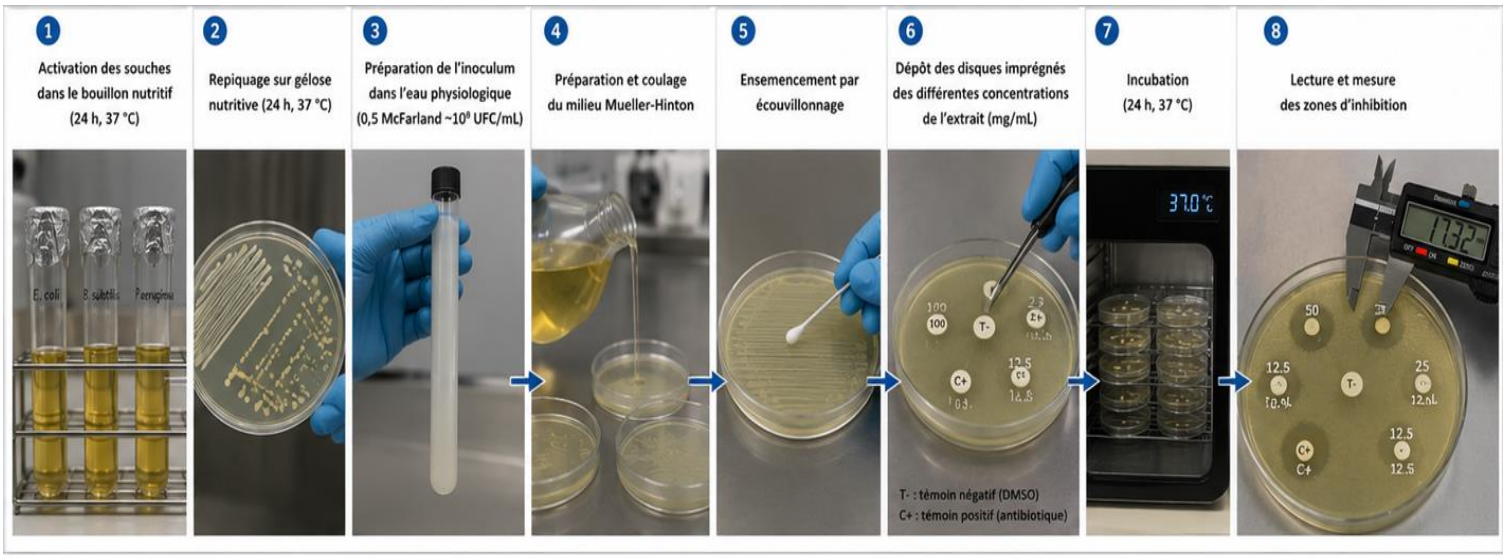
L'activité a été évaluée par la mesure des diamètres des zones d'inhibition (en mm, disque inclus). La sensibilité a été interprétée selon (Ponce *et al*., 2003).

Tableau 05 : Évaluation de sensibilité des souches selon le diamètre des zones d'inhibition (Ponce *et al*.,2003).

Diamètre (mm)	**Interprétation**
< 8	Nulle
9 - 14	Sensible
15 - 19	Très sensible
≥ 20	Extrêmement sensible

II.7.3. Activité antibactérienne des AgNPs

Le même protocole a été appliqué pour tester l'activité antibactérienne des AgNPs biosynthétisées (AgNPs en suspension, 10 µL par disque). Des témoins supplémentaires ont été réalisés avec la solution d'$AgNO_3$ seule (1 mM) et l'extrait aqueux seul.



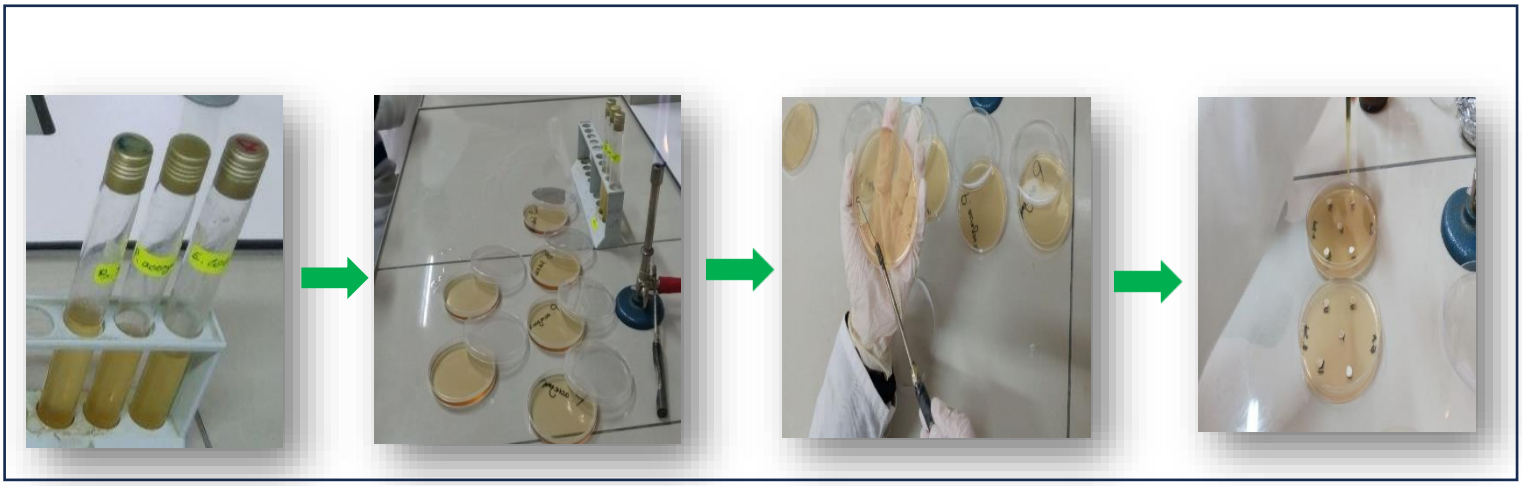


Figure 12 : Protocole de l'activité antibactérienne des feuilles de l'extrait éthanolique de *Thymus vulgaris* et des AgNPs.

Résultats et discussion

L'objectif de cette étude était d'évaluer le potentiel des extraits de *Thymus vulgaris* (thym) ainsi que des nanoparticules d'argent (AgNP) biosynthétisées à partir de l'extrait aqueux, en termes de rendement d'extraction, de composition phytochimique, de capacités antioxydantes et d'activité antibactérienne. Les résultats obtenus sont discutés ci-après en les mettant en perspective avec les données de la littérature.

III.1. Rendement d'extraction

Le rendement d'extraction correspond au pourcentage de principes actifs extraits à l'aide d'un solvant organique ou aqueux. Il est calculé en rapportant la masse de l'extrait sec obtenu à la masse de matière végétale sèche préalablement réduite en poudre. Les résultats sont illustrés dans la figure suivante, qui présente un histogramme du pourcentage de rendement en fonction de la masse de matière sèche après évaporation par rapport à la masse de l'extrait végétal (Azwanida, 2015).

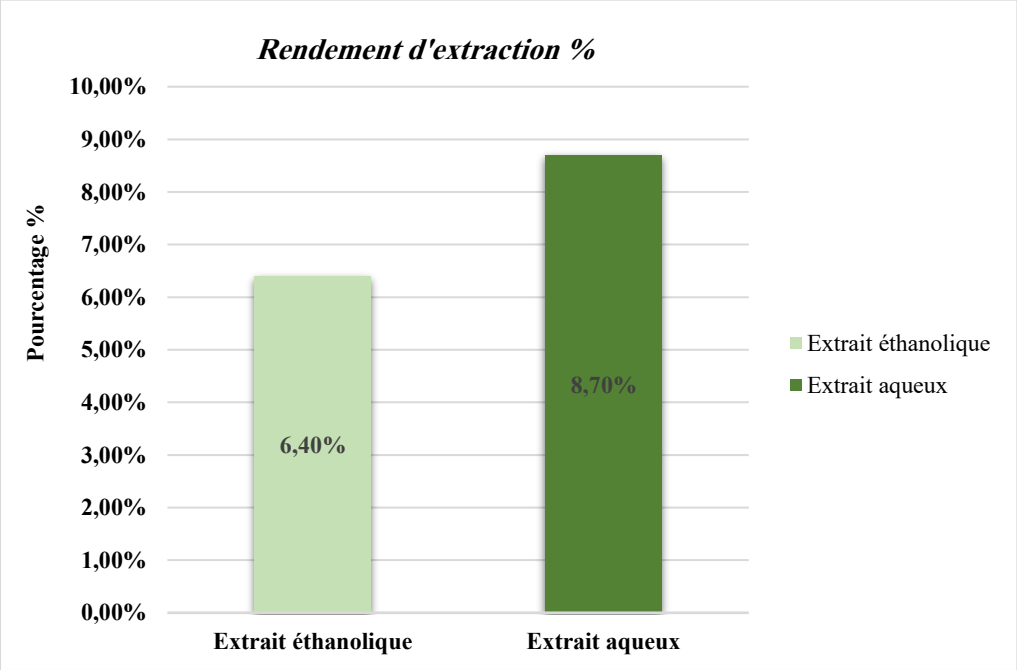


Figure 13 : Rendement en extraits sec.

Le rendement d'extraction le plus élevé a été obtenu avec l'extrait aqueux (8,70 %), suivi de l'extrait éthanolique (6,40 %). Cette différence s'explique principalement par la polarité des solvants et leur affinité avec les métabolites végétaux. L'eau, bien que polaire, peut extraire efficacement une large gamme de composés hydrosolubles, tandis que l'éthanol est plus sélectif pour les composés apolaires ou modérément polaires (Sultana *et al*., 2009).

Nos résultats sont cohérents avec ceux rapportés par (Dehimi *et al*., 2026) pour l'extrait aqueux (8,50 %), mais nettement supérieurs à ceux de (Palmieri *et al*., 2020) pour l'extrait éthanolique (1,78 %). Ces écarts peuvent être attribués aux différences dans les conditions opératoires (température, durée, rapport solide/solvant), ainsi qu'à la variabilité intrinsèque du matériel végétal (origine géographique, période de récolte, séchage, etc.).

III.2. Biosynthèse et caractérisation des nanoparticules d'argent (AgNP)

Des nanoparticules d'argent (AgNP) ont été synthétisées à l'aide de *T. vulgaris*. Ces AgNP peuvent être détectées par un changement de couleur, passant du jaune pâle au brun foncé colloïdal (Filip *et al*., 2019).

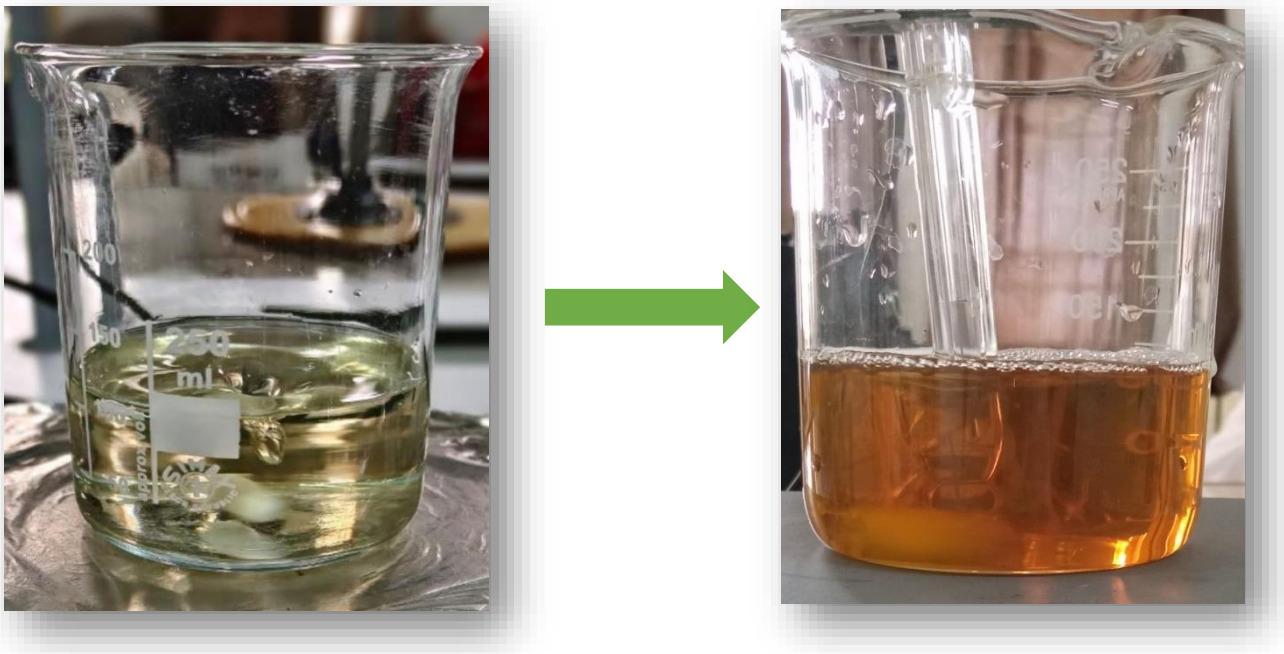


Figure 14 : Changement de couleur du mélange (extrait aqueux et de la solution $AgNO_3$).

La synthèse verte d'AgNP à partir de l'extrait aqueux de thym a été confirmée visuellement par un changement de couleur : du jaune pâle au brun foncé. Ce phénomène est attribué à la résonance plasmonique de surface (SPR), caractéristique des nanoparticules métalliques (Filip *et al*., 2019). L'intensité de la coloration a augmenté avec le temps d'incubation, atteignant un plateau après environ 60 minutes, ce qui indique la fin du processus de réduction des ions Ag^{+} en Ag^{0}.

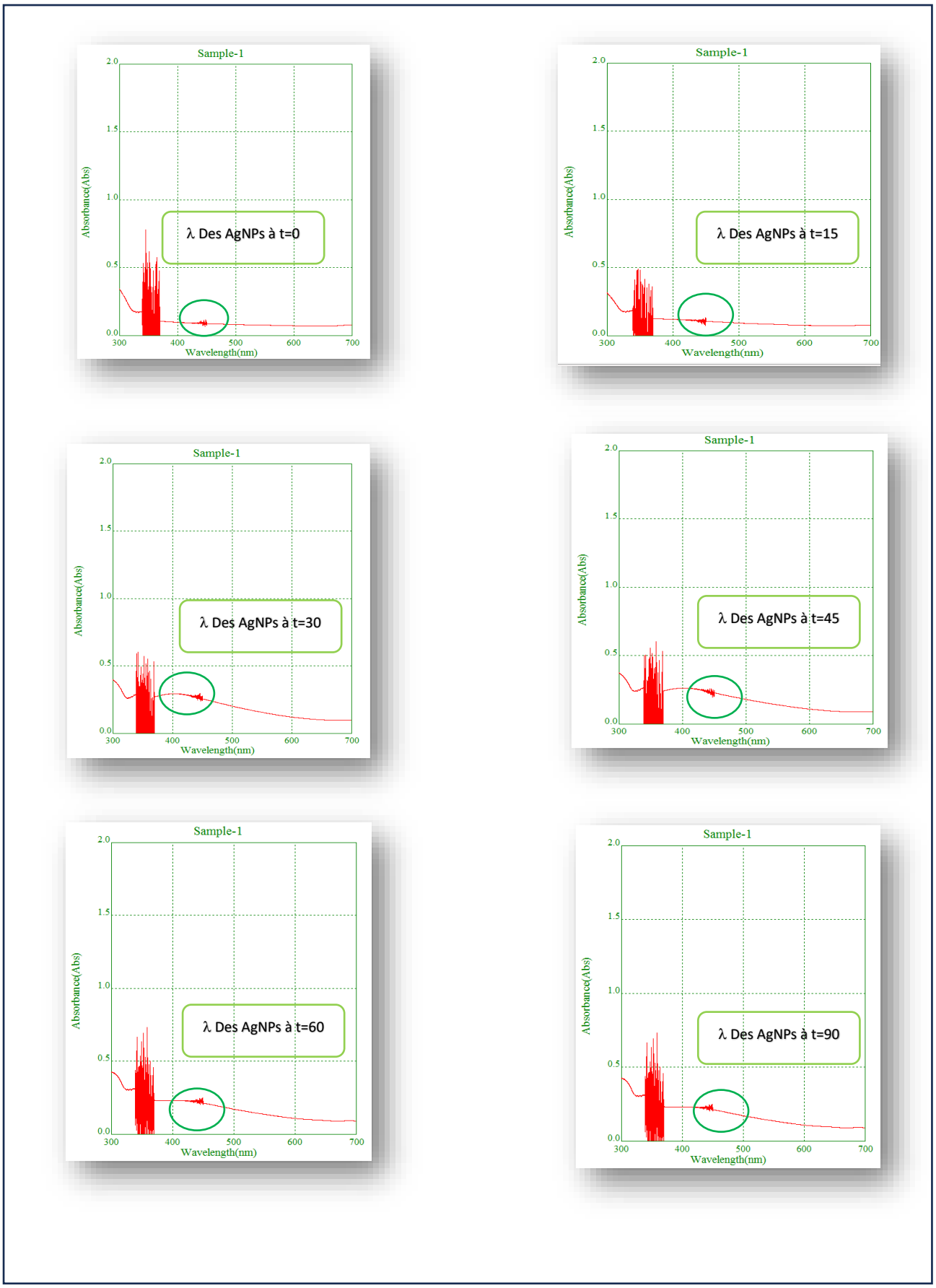


Figure 15 : Spectres d'absorbance des AgNPs.

Le spectre d'absorption de l'extrait aqueux de *Thymus vulgaris* a été enregistré dans la gamme spectrale de 300 à 700 nm. Le spectre présente, outre la bande principale, des pics supplémentaires dans la région ultraviolette, attribuables aux composés organiques présents dans l'extrait végétal.

L'analyse par spectrophotométrie UV-Visible a révélé un pic d'absorption dans la région de 400-450 nm, typique des AgNPs. Ce pic, absent dans l'extrait seul, confirme la réduction des ions argent par les métabolites secondaires du thym, notamment les polyphénols et les flavonoïdes, qui agissent à la fois comme agents réducteurs et stabilisants (Ödemiş *et al*., 2022). La stabilisation du signal après 60 minutes indique un équilibre de la réaction, en accord avec (Kelly *et al*., 2003).

Par ailleurs, une bande d'absorption intense et caractéristique a été observée dans la région visible, correspondant à la résonance plasmonique de surface (SPR). Cette bande constitue une signature optique typique des nanoparticules d'argent. Ces résultats corroborent les travaux de (Kelly *et al.,* 2003), qui ont démontré que l'apparition d'un pic d'absorption entre 400 et 700 nm constitue une preuve directe de la formation de nanoparticules métalliques.

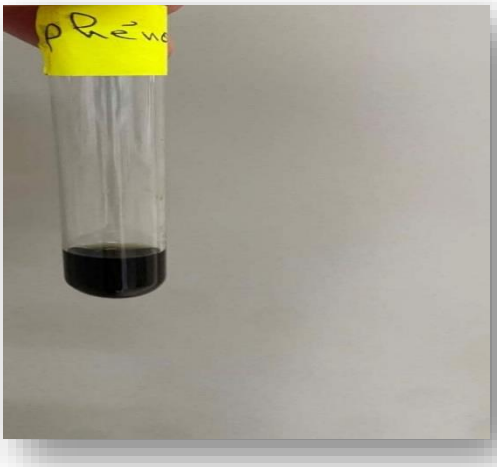
Enfin, le suivi cinétique de l'absorption a révélé une augmentation progressive de l'intensité du pic SPR, accompagnée d'un changement de couleur de la solution, traduisant la poursuite de la formation des nanoparticules au cours du temps. L'intensité du signal s'est stabilisée après environ une heure, indiquant l'atteinte d'un équilibre et l'achèvement du processus de synthèse.

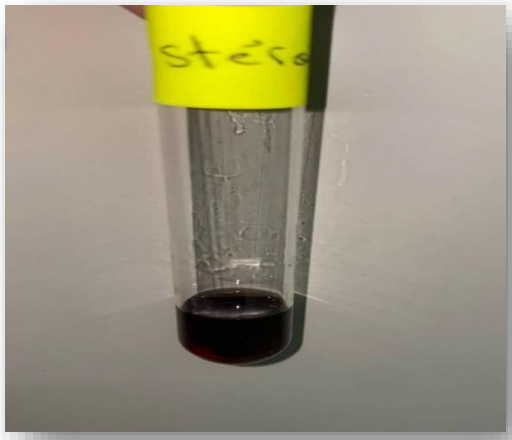
III.3. Screening phytochimique

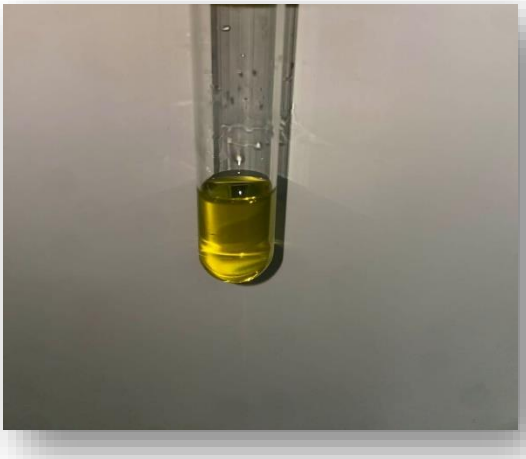
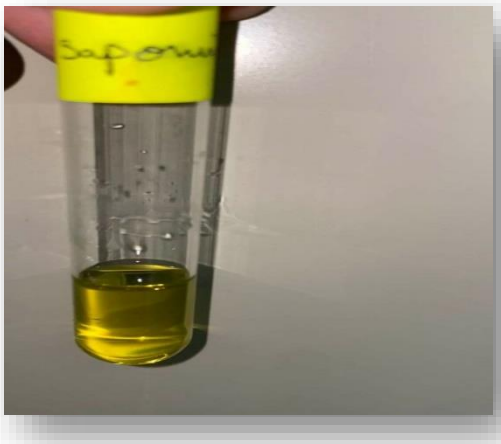
Les tests phytochimiques permettent de détecter les différentes familles de composés présents dans la plante grâce à des réactions qualitatives de caractérisation. Ces réactions reposent sur des phénomènes de précipitation ou de coloration induits par des réactifs spécifiques (Shaikh et Patil, 2020 ; Rao *et al*., 2023).

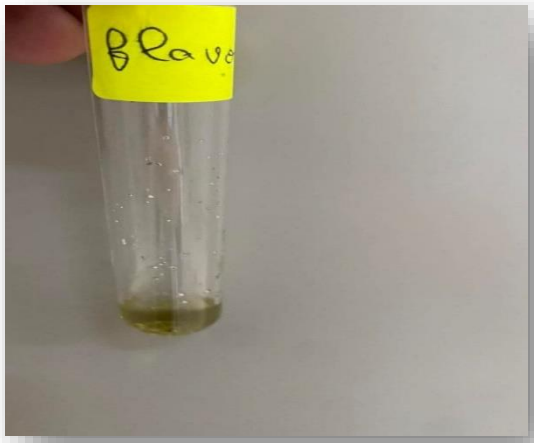
Les résultats de ce criblage phytochimique effectués sur l'extrait éthanolique de La *thymus vulgaris* sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 06 : Résultats du screening phytochimique des feuilles de *Thymus vulgarise*.

Composants	**Photos**	**Présence de substance**
Phénols		+ + +
Quinones		+ + +

Stéroïde		+ + +
Protéine		+ + +
Terpenoide		+ +

Coumarine		+ + +
Tanins		- - -
Saponine		- - -

Flavonoïdes		- - -

- (+ + +) Forte présence de substance.
- (+) Faible présence de substance.
- (- - -) Absence de substance.

L'analyse qualitative de l'extrait éthanolique a révélé une forte présence de phénols, quinones, stéroïdes, protéines, coumarines et terpénoïdes, ainsi qu'une absence de tanins, saponines et flavonoïdes. Cette richesse en métabolites secondaires est en accord avec plusieurs études (Benbelaïd *et al*., 2013 ; Elsherif *et al*., 2023 ; Labiad *et al*., 2024 ; Vaseem *et al*., 2025).

L'absence de flavonoïdes et de quinones dans notre extrait, contrairement à certains travaux antérieurs, peut s'expliquer par des facteurs écologiques et méthodologiques : le génotype de la plante, les conditions de culture, le stade phénologique, ou encore le protocole d'extraction (solvant, température, durée). De telles variations sont fréquemment rapportées dans la littérature (Shaikh et Patil, 2020 ; Rao *et al*., 2023).

III.4. Dosage des polyphénols totaux

Le contenu total en polyphénols a été déterminé par une méthode spectrophotométrique adaptée de celle décrite par (Saeed *et al*., 2023), faisant appel au réactif de Folin-Ciocalteu. Les résultats obtenus sont exprimés en microgrammes d'équivalent d'acide gallique par milligramme d'extrait sec (µg EAG/mg).

En utilisant l'équation de la régression linéaire de la courbe d'étalonnage trace de l'acide gallique (figure 16).

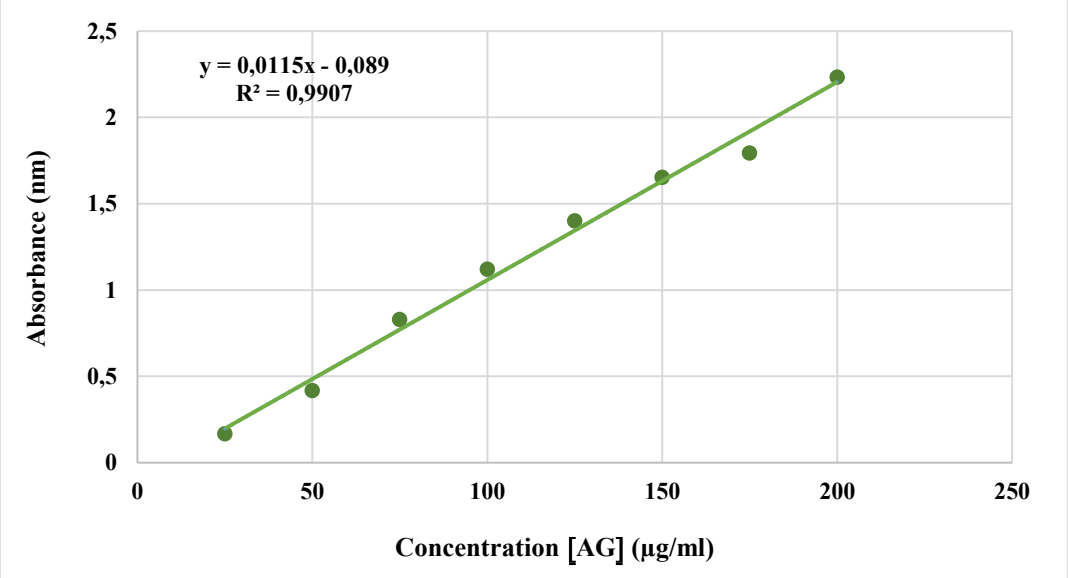


Figure 16 : Courbe d'étalonnage de l'acide gallique pour le dosage des polyphénols.

Tableau 07 : Teneur en polyphénols totaux de l'extrait éthanolique de *Thymus vulgaris* (µg EAG /mg)

Répliquat	Teneur (µg EAG/mg plante sèche)
1	1,753
2	1,772
3	1,793
Moyenne	1,772
Écart-type	± 0,0200

Les résultats du dosage des polyphénols totaux dans *Thymus vulgaris* ont révélé la présence de ces composés dans l'extrait brut. Les valeurs obtenues lors des trois répétitions se sont avérées très proches. Ils varient entre 1,753 et 1,793 mg d'équivalent acide gallique par gramme de matière sèche (µg EAG /mg). Cette faible dispersion reflète une bonne homogénéité des échantillons où la moyenne générale s'établit à 1,772 ± 0,0200µg EAG /mg.

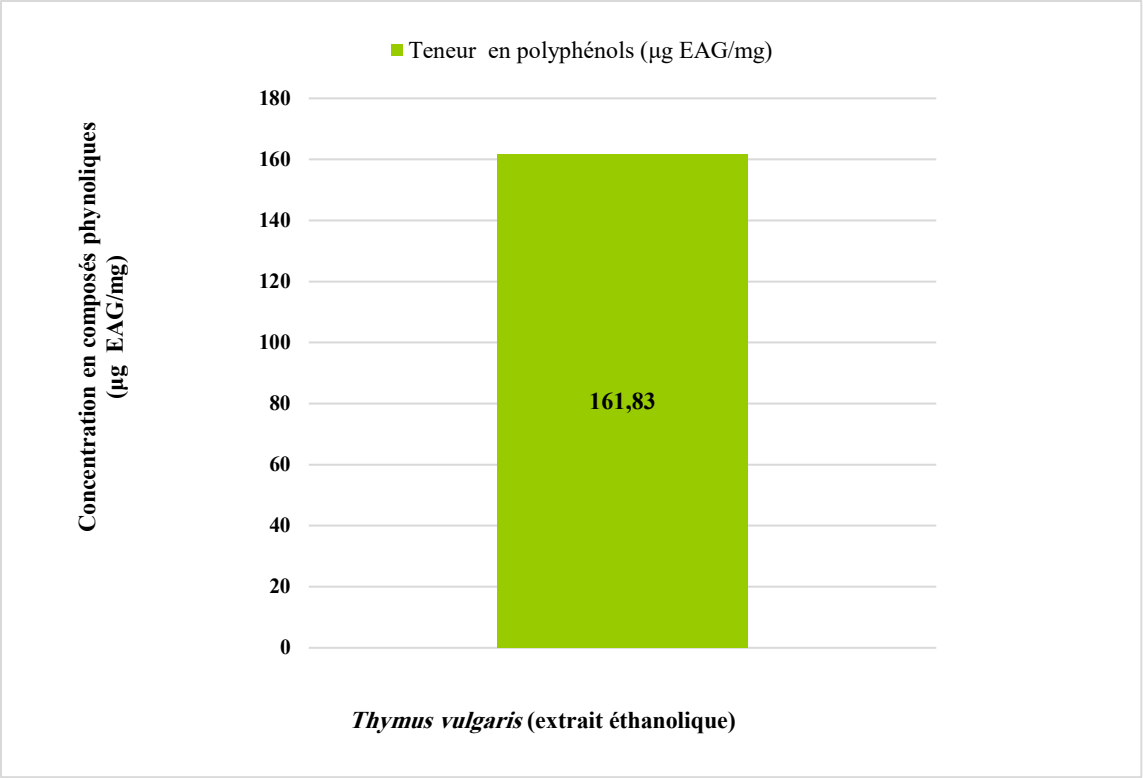


Figure 17 : Teneur des polyphénols d'extrait éthanolique de *Thymus vulgaris*.

Selon la figure 17, l'extrait éthanolique obtenu par macération dans de l'éthanol affichait une teneur en composés phénoliques totaux de 161,83 (µg EAG /mg) d'extrait.

La teneur moyenne en polyphénols totaux de l'extrait éthanolique était de 1,772 µg EAG/mg d'extrait sec, avec une faible variabilité entre les réplicats (écart-type ±0,0200).

Ces valeurs sont cohérentes avec celles rapportées par (Köksal *et al*., 2016), qui ont quantifié une teneur phénolique d'environ 158 (µg EAG /mg) dans un extrait éthanolique de la même espèce. Cette concordance renforce la fiabilité des résultats obtenus et leur alignement avec les données de la littérature scientifique. Par ailleurs, (Spréa *et al*., 2025) ont mis en évidence des teneurs élevées en composés phénoliques dans les extraits éthanoliques de *Thymus vulgaris*, tout en soulignant l'influence significative du type de solvant et des paramètres d'extraction sur ces teneurs.

Dans l'ensemble, ces données confirment l'efficacité de la technique de macération à l'éthanol pour l'extraction des composés phénoliques de *Thymus vulgaris*, en parfaite cohérence avec les travaux antérieurs.

III.5. Activité antioxydante (test DPPH)

Le pouvoir antioxydant des extraits bruts éthanolique et aqueux a été évalué par le test de piégeage du radical libre DPPH. Les concentrations inhibitrices à 50 % (IC_{50}), exprimées en µg/ml, ont été déterminées graphiquement à partir des droites de régression obtenues en représentant le pourcentage d'inhibition en fonction de la concentration pour chaque extrait et pour le standard de référence.

Tableau 08 : Capacité antiradicalaire IC_{50} (DPPH) de l'extrait éthanolique de *Thymus vulgaris*.

Standard / Extrait	**IC_{50} (µg/ml)**
Acide ascorbique (standard)	14,82
Extrait éthanolique	107,4

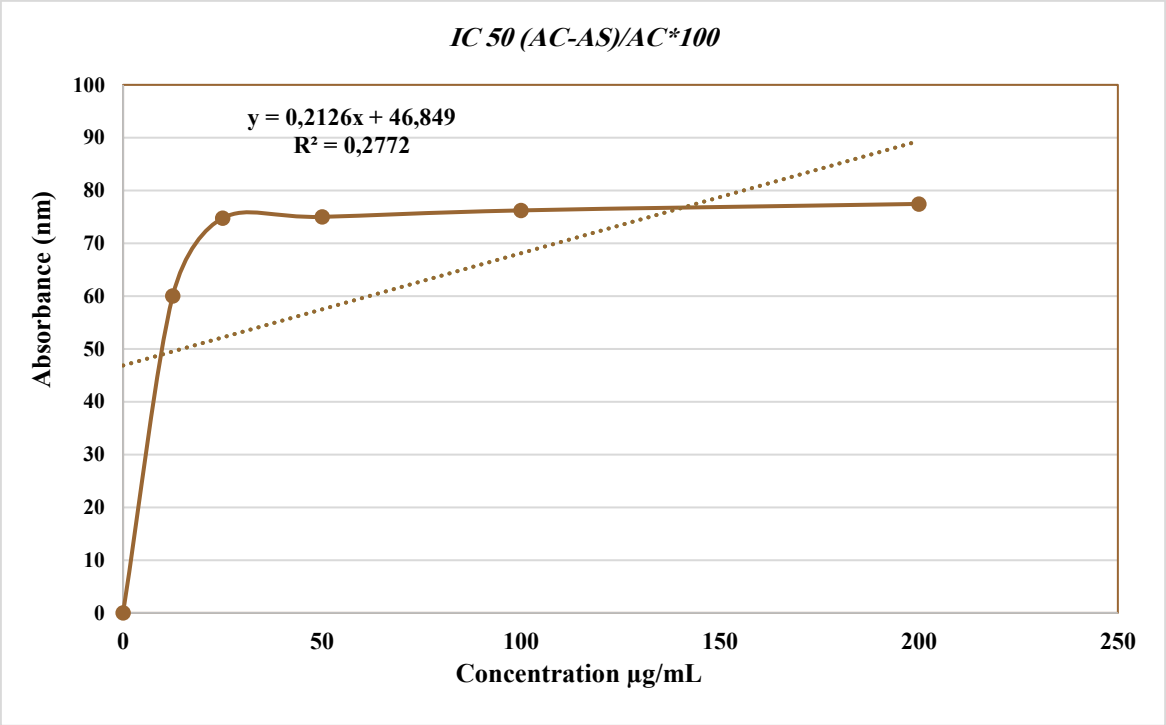


Figure 18 : Test de DPPH de de l'acide ascorbique.

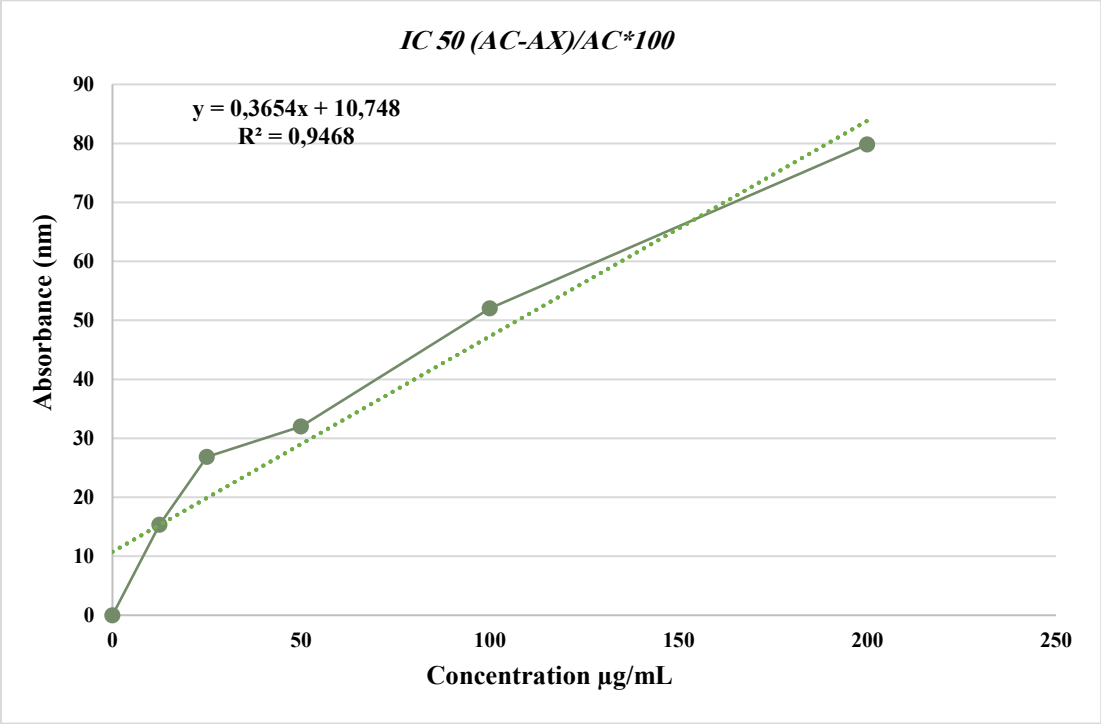


Figure 19 : Test de DPPH de l'extrait éthanolique de *Thymus vulgaris*.

L'extrait éthanolique a montré une activité antiradicalaire modérée, avec une CI_{50} de 107,4 µg/ml, contre 14,82 µg/ml pour l'acide ascorbique (standard). Cette différence était attendue, car l'acide ascorbique est une molécule pure très réactive, tandis que l'extrait végétal est un mélange complexe dont les composés agissent de manière synergique mais moins puissante.

Notre extrait s'avère moins actif que celui étudié par (Tsakni *et al*., 2025), ce qui peut être dû à des différences dans la provenance du thym, les conditions de culture, ou le mode d'extraction (température, durée, rapport solvant/matière). Néanmoins, l'activité observée confirme le potentiel antioxydant du thym, déjà largement documenté (Sultana *et al*., 2009 ; Köksal *et al*., 2016).

III.6. Activité antibactérienne

L'activité antibactérienne de deux extraits bruts issus des feuilles de *Thymus vulgaris* a été évaluée à l'aide de la méthode de diffusion sur disque en milieu gélosé Mueller-Hinton.

Cette technique, simple et largement répandue, consiste à déposer sur une gélose ensemencée de bactéries des disques imprégnés d'extrait à tester, puis à mesurer les zones d'inhibition de croissance bactérienne qui se forment autour de ces disques après incubation. Le diamètre de

ces zones est directement proportionnel à l'efficacité antibactérienne de l'extrait : plus la zone d'inhibition est large, plus l'activité de la substance est marquée.

Elle est considérée comme une méthode de référence pour l'évaluation préliminaire du potentiel antimicrobien des substances naturelles, elle est particulièrement employée dans l'étude des extraits végétaux. Les diamètres des zones d'inhibition obtenus sont présentés dans le (tableaux 09), tandis que leurs aspects morphologiques sont illustrés dans la (figure 20).

Tableau 09 : Activité antibactérienne des extraits et des AgNPs de *Thymus vulgaris*.

Souches testées	**Φ (mm)**			
	Concentration (mg/ml)	**Extrait aqueux**	**Extrait éthanolique**	**Nanoparticules d'argent**
P. aeruginosa	100	NI	NI	
	50	NI	NI	NI
	25	NI	NI	NI
	12,5	NI	NI	**9,04**
B. subtilis	100	NI	NI	NI
	50	NI	NI	NI
	25	NI	NI	NI
	12,5	NI	NI	NI
E. coli	100	**16,79**	NI	**13,39**
	50	NI	NI	NI
	25	NI	NI	NI
	12,5	NI	NI	NI

NI = Aucune inhibition (aucune activité détectée).

L'activité antibactérienne a été testée sur trois souches : *Escherichia coli* (Gram négatif), *Pseudomonas aeruginosa* (Gram négatif) et *Bacillus subtilis* (Gram positif).

- **Extrait aqueux** : actif uniquement sur *E. coli* à 100 mg/ml (zone d'inhibition : 16,79 mm).
- **Extrait éthanolique** : aucune activité détectée pour toutes les souches étudiées.

- **Nanoparticules d'argent** : actives sur *E. coli* (13,39 mm à 100 mg/ml) et sur *P. aeruginosa* (9,04 mm à 12,5 mg/ml), mais sans effet sur *B. subtilis*.



E.E : extrait éthanolique ; **EA** : extrait aqueux ; **1 :** 100mg/ml ; **2 :** 50 mg/ml ; **3 :** 25 mg/ml ; **4 :** 12.5m/ml.

Figure 20 : Photos représentatives des zones d'inhibition obtenues vis- à- vis les souches testées.

Dans l'ensemble, les nanoparticules d'argent ont manifesté l'effet inhibiteur le plus prononcé par rapport aux extraits végétaux, soulignant ainsi une efficacité antibactérienne supérieure.

Cette différence de sensibilité entre les souches bactériennes s'explique principalement par les variations structurales de leur paroi cellulaire : les bactéries à Gram négatif se révèlent généralement plus vulnérables aux agents antibactériens que les bactéries à Gram positif.

Ces observations concordent avec les résultats de (Chassagne *et al*., 2021), qui ont mis en évidence l'influence déterminante du solvant d'extraction sur la composition chimique et

l'activité biologique des extraits végétaux. Elles corroborent également les travaux de (Sondi et Salopek-Sondi, 2004) ainsi que ceux de (Morones *et al*., 2005), lesquels ont démontré que les nanoparticules d'argent exercent une puissante activité antibactérienne par leur interaction directe avec la paroi bactérienne et leur capacité à perturber les fonctions cellulaires essentielles.

L'absence d'activité des extraits bruts sur *B. subtilis* et *P. aeruginosa* peut s'expliquer par une faible concentration en métabolites actifs ou par une perméabilité réduite de la paroi bactérienne. En revanche, les AgNP ont montré une efficacité supérieure, probablement due à leur capacité à pénétrer la paroi bactérienne, à libérer des ions Ag^{+} toxiques et à générer un stress oxydatif (Sondi et Salopek-Sondi, 2004 ; Morones *et al*., 2005).

La sensibilité de *P. aeruginosa* aux AgNP, même à faible concentration (12,5 mg/ml), est remarquable, car cette bactérie est souvent résistante à de nombreux antibiotiques. Ces résultats sont en accord avec (Chassagne *et al*., 2021), qui soulignent l'importance du choix du solvant et de la formulation dans l'activité antibactérienne des extraits végétaux.

Conclusion

Ce travail a permis de démontrer que *Thymus vulgaris*, une plante médicinale algérienne largement disponible, constitue à la fois une source intéressante de composés bioactifs et un agent réducteur naturel efficace pour la synthèse verte de nanoparticules d'argent. L'extraction éthanolique a donné un rendement modeste de 6,40 %, mais le screening phytochimique a révélé une richesse notable en métabolites secondaires tels que les phénols, quinones, stéroïdes, coumarines, terpénoïdes et protéines, tandis que les flavonoïdes, tanins et saponines étaient absents dans nos conditions expérimentales. Le dosage des polyphénols totaux a montré une teneur moyenne de 1,77 µg EAG/mg d'extrait sec, confirmant la présence de composés phénoliques. L'activité antioxydante évaluée par le test DPPH a donné une IC_{50} de 107,4 µg/ml, traduisant un pouvoir antiradicalaire modeste mais réel, inférieur à celui de l'acide ascorbique (14,8 µg/ml), ce qui est attendu pour un extrait brut.

Parallèlement, l'extrait aqueux de la même plante a permis de biosynthétiser avec succès des nanoparticules d'argent selon une approche parfaitement respectueuse des principes de la chimie verte, sans recours à des agents chimiques toxiques. La formation des AgNPs a été visuellement confirmée par un changement de couleur du jaune pâle au brun foncé, et spectrophotométriquement par l'apparition d'un pic d'absorption caractéristique autour de 420-450 nm, attribuable à la résonance plasmonique de surface. La cinétique de réaction s'est stabilisée après environ 60 minutes, indiquant une réduction complète des ions Ag^+ en argent métallique.

L'activité antibactérienne a été testée sur trois souches : *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* (toutes deux Gram négatif) et *Bacillus subtilis* (Gram positif). L'extrait aqueux a montré une activité modérée que contre *E. coli* à la concentration la plus élevée (16,79 mm à 100 mg/ml), tandis que l'extrait éthanolique n'a présenté aucune activité détectable sur les trois souches. En revanche, les nanoparticules d'argent biosynthétisées ont manifesté une activité antibactérienne nettement supérieure : une inhibition de 13,39 mm contre *E. coli* à 100 mg/ml, et surtout une inhibition de 9,04 mm contre *P. aeruginosa* dès la faible concentration de 12,5 mg/ml, ce qui est remarquable compte tenu de la résistance naturelle de cette bactérie. Aucun effet n'a en revanche été observé contre *B. subtilis*, suggérant une sensibilité variable liée à la structure de la paroi bactérienne. Ces résultats confirment donc pleinement l'hypothèse de départ : la transformation de l'extrait végétal en nanoparticules d'argent améliore significativement l'efficacité antibactérienne, tout en utilisant un procédé non toxique, économique et durable.

En définitive, ce travail illustre parfaitement comment une plante médicinale traditionnelle peut devenir un outil biotechnologique moderne au service de la lutte contre l'antibiorésistance. Il ouvre la voie à de nombreuses perspectives prometteuses : une caractérisation plus approfondie des AgNPs par microscopie électronique et diffraction des rayons X, la détermination des concentrations minimales inhibitrices et bactéricides, l'extension des tests à un plus large éventail de souches cliniques résistantes, l'évaluation de la toxicité sur cellules eucaryotes, l'optimisation des paramètres de synthèse (pH, température, concentrations), ainsi que le développement d'applications concrètes telles que des revêtements antimicrobiens, le traitement des eaux usées ou des formulations pharmaceutiques topiques. Enfin, cette approche de nanotechnologie verte pourrait être étendue à d'autres espèces médicinales endémiques d'Algérie, contribuant ainsi à la valorisation durable du patrimoine naturel du pays face à l'un des défis majeurs de santé publique.

Références bibliographiques

_ A _

1. Abbas, A., & Amin, S. (2022). Silver nanoparticles : A versatile nanomaterial for biomedical applications. *Biomaterials Science*, *10*(15), 4163–4181. .https://doi.org/10.1039/D2BM00441J
2. Abid, N., Khan, A. M., Shujait, S., Chaudhary, K., Ikram, M., & Imran, M. (2022). Synthesis of nanomaterials : A review of top-down and bottom-up approaches. *Journal of Materials Science*, *57*(3), 1911–1932. https://doi.org/10.1007/s10853-021-06545-4
3. Ahmed, S., Ahmad, M., Swami, B. L., & Ikram, S. (2016). A review on plants extract mediated synthesis of silver nanoparticles for antimicrobial applications : A green expertise. *Journal of Advanced Research*, *7*(1), 17–28. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.06.015
4. Al-Khattaf, F. S. (2021). Role of phenolic compounds in the biosynthesis of metal nanoparticles. Saudi *Journal of Biological Sciences*, *28*(10), 5732–5741. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.06.015
5. Alkherrraz, M., Benali, T., & Elhajjaji, S. (2025). Phytochemistry and pharmacological properties of Thymus species growing in North Africa. *Journal of Ethnopharmacology*, *338*, 119082. https://doi.org/10.1016/j.jep.2024.119082
6. Alshammari, A. H., Alshammari, B. H., & Alshammari, F. H. (2023). Silver nanoparticles : A review of their synthesis, properties, and antimicrobial applications. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *30*(5), 103641. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2023.103641
7. Asha, A. B., & Narain, R. (2020). Nanomaterials properties. In R. Narain (Ed.), *Polymer science and nanotechnology* (pp. 343–359). Elsevier https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816806-6.00014-5
8. Axet, M. R., & Philippot, K. (2020). Chemical synthesis of metallic nanoparticles. *In Nanoparticles in catalysis* (pp. 1–24). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45823-2_1
9. Azwanida, N. N. (2015). A review on the extraction methods use in medicinal plants, principle, strength and limitation. *Medicinal & Aromatic Plants*, *4*(3), 196. https://doi.org/10.4172/2167-0412.1000196

_ B_

10. Bahlouli, S. (2015). Apport thérapeutique de l'essence aromatique du *thym* (*Thymus vulgaris L.*) dans la lutte-prévention des pathologies fongique et inflammatoire (Mémoire de master, Université Blida 1). 4PP

11. Balouiri, M., Sadiki, M., & Ibnsouda, S. K. (2016). Methods for in vitro evaluating antimicrobial activity : A review. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, *6*(2), 71–79. https://doi.org/10.1016/j.jpha.2015.11.005

12. Bayda, S., Adeel, M., Tuccinardi, T., Cordani, M., & Rizzolio, F. (2019). The history of nanoscience and nanotechnology : *From chemical-physical applications to nanomedicine. Molecules*, *25*(1), 112. https://doi.org/10.3390/molecules25010112

13. Benali, B., Seladji, H. N. (2024). *Elaboration des nanoparticules pour application à la rétention des colorants*. Mémoire de master, Université de Tlemcen. Faculté des Sciences, Département de Chimie. 4PP

14. Benbelaïd, F., Khadir, A., & Kecha, M. (2013). Phytochemical screening and antibacterial activity of *Thymus vulgaris L.* from Algeria. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, *3*(7), 46–50. https://doi.org/10.7324/JAPS.2013.3709

15. Bonnet, P., Goëau, H., Hang, S. T., Lasseck, M., Šulc, M., Malécot, V., ... & Joly, A. (2020). Plant identification : Experts vs. Machines in the era of deep learning. *Methods in Ecology and Evolution*, *11*(12), 1691–1704. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13472

16. Bouafia, A., Meneceur, S., & Laouini, S. E. (2021). Green synthesis and characterization of silver nanoparticles using *Thymus vulgaris* extract and their antibacterial activity. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, *11*(3), 453–465. https://doi.org/10.1007/s40097-020-00373-5

17. Bouaziz, M., Yangui, T., Sayadi, S., & Dhouib, A. (2009). Disappearance of phenolic compounds and antioxidant activity during the ripening of Olea europaea L. cv. 'Chemlali' olives. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *57*(17), 7855–7861. https://doi.org/10.1021/jf901658f

18. Boudjelal, A., Henchiri, C., Sari, M., Sarri, D., Hendel, N., Benkhaled, A., & Ruberto, G. (2012). Herbalists and wild medicinal plants in M'Sila (North Algeria) : An ethnopharmacological survey. *Journal of Ethnopharmacology*, *144*(3), 741–754. https://doi.org/10.1016/j.jep.2012.10.011

19. Boudjema, K., Bouaziz, A., & Benmehdi, H. (2022). Phytochemical screening and antioxidant activity of *Thymus vulgaris L*. from Algeria. South Asian *Journal of Experimental Biology,* *12*(3), 312–319. https://doi.org/10.38150/sajeb.12(3).p312-319

20. Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. LWT - *Food Science and Technology*, *28*(1), 25–30. https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5

21. Bruna, T., Maldonado-Bravo, F., Jara, P., & Caro, N. (2021). Silver nanoparticles and their antibacterial applications. *International Journal of Molecular Sciences*, *22*(13), 7202. https://doi.org/10.3390/ijms22137202

22. Bubonja-Šonje, M., Knežević, S., & Abram, M. (2020). Challenges to the disc diffusion method in the era of antimicrobial resistance. *Journal of Microbiological Methods*, *178*, 106071. https://doi.org/10.1016/j.mimet.2020.106071

_C_

23. Chassagne, F., Quetin-Leclercq, J., & Mapiemfu-Lamare, D. (2021). Antibacterial activity of plant extracts : Effect of solvent and extraction method. *Journal of Ethnopharmacology*, *268*, 113568.

24. Cheon, J. Y., Kim, S. J., & Park, S. J. (2019). Factors affecting the antibacterial activity of silver nanoparticles. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, *19*(11), 7015–7024. https://doi.org/10.1166/jnn.2019.16722

_D_

25. D'Addabbo, T., Laquale, S., & Vovlas, N. (2013). Antimicrobial activity of plant extracts against bacterial pathogens. *International Journal of Microbiology*, *2013*, 741062. https://doi.org/10.1155/2013/741062

26. Das, G., Patra, J. K., & Shin, H. S. (2017). Biosynthesis, characterization, and antibacterial activity of silver nanoparticles using the aqueous extract of Ocimum sanctum L. *Journal of Nanomaterials*, *2017*, 1–8. https://doi.org/10.1155/2017/8913934

27. Dehimi, K., Bennaceur, M., & Meddah, B. (2026). Comparative study of extraction yields and antioxidant activities of *Thymus vulgaris* from different Algerian regions. *Journal of Herbal Medicine*, *45*, 100872. https://doi.org/10.1016/j.hermed.2026.100872

28. Ding, F., Li, J., & Zhang, J. (2018). Silver nanoparticles in agriculture : A review of applications and toxicological effects. *Environmental Science and Pollution Research,* *25*(30), 29911–29923. https://doi.org/10.1007/s11356-018-3159-6

29. Dolez, P. I. (2015). Nanomaterials definitions, classifications, and applications. In P. I. Dolez (Ed.), *Nanoengineering* (pp. 3–40). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62747-6.00001-4

_E_

30. Ejaz, M., Akram, M., & Riaz, M. (2024). *Thymus vulgaris* : A comprehensive review of its phytochemistry and biological activities. *Phytochemistry Reviews*, *23*(2), 401–432. https://doi.org/10.1007/s11101-023-09892-7

31. El Machrafi, A., El Haddar, A., & El Khlifi, M. (2025). Total phenolic content and antioxidant activity of Moroccan *Thymus species*. *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*, *34*(1), 45–56 https://doi.org/10.1007/s13562-024-00912-3

32. Elbanna, K., El-Sayed, A., & Ahmed, F. (2020). Antimicrobial applications of silver nanoparticles in food packaging. *Food Control*, *118*, 107425. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107425

33. Elsherif, H. M., Ahmed, S. A., & Fawzy, M. A. (2023). Comparative phytochemical and antimicrobial study of Thymus vulgaris and *Thymus capitatus*. *Egyptian Journal of Botany*, *63*(1), 189–201. https://doi.org/10.21608/ejbo.2022.124854.1896

_F_

34. Filip, G. A., Moldovan, B., Vulpoi, A., & David, L. (2019). Green synthesis of silver nanoparticles using *Thymus vulgaris* extract and their antibacterial activity. *Journal of Nanomaterials*, *2019*, 1–12. https://doi.org/10.1155/2019/9023761

_G_

35. Gour, A., & Jain, N. K. (2019). Advances in green synthesis of nanoparticles. *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, *47*(1), 844–851. https://doi.org/10.1080/21691401.2019.1577878

_H_

36. He, X., Deng, H., & Hwang, H. (2018). The current status and future direction of nanotechnology. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, *18*(3), 1515–1522. https://doi.org/10.1166/jnn.2018.15188

37. Heuer-Jungemann, A., Feliu, N., Bakaimi, I., Hamaly, M., Alkilany, A., Chakraborty, I., ... & Kanaras, A. G. (2019). The role of ligands in the chemical synthesis and applications of inorganic nanoparticles. *Chemical Reviews*, *119*(8), 4819–4880. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00733

38. Hosny, M., Mahmoud, M. S., & Abdel-Aziz, M. S. (2025). Optimization of green synthesis conditions for silver nanoparticles. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *13*(2), 114567. https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.114567

_I_

39. Iravani, S. (2011). Green synthesis of metal nanoparticles using plants. *Green Chemistry*, *13*(10), 2638–2650. https://doi.org/10.1039/C1GC15386B

_J_

40. Jamkhande, P. G., Ghule, N. W., Bamer, A. H., & Kalaskar, M. G. (2019). Metal nanoparticles synthesis : An overview on methods of preparation, advantages and disadvantages, and applications. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, *53*, 101174. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2019.101174

41. Jiang, Y., Xu, H., & Wang, Q. (2022). Physical methods for nanoparticle synthesis : A review. *Nanomaterials*, *12*(3), 478. https://doi.org/10.3390/nano12030478

42. Joudeh, N., & Linke, D. (2022). Nanoparticle classification, physicochemical properties, characterization, and applications : A comprehensive review. *Journal of Nanobiotechnology,* *20*(1), 262. https://doi.org/10.1186/s12951-022-01477-8

43. Jyoti, K., Baunthiyal, M., & Singh, A. (2016). Characterization of silver nanoparticles synthesized using Urtica dioica Linn. leaves and their synergistic effects with antibiotics. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, *9*(3), 217–227. https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.10.002

_K_

44. Karataş, B., Kaya, S., & Erdoğan, O. (2025). Mechanistic insights into the antibacterial action of silver nanoparticles. Colloids and Surfaces B : Biointerfaces, *245*, 114289. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2024.114289

45. Karatas, H., Eker, F., Akdasci, E., Bechelany, M., & Karav, S. (2026). Antibacterial activity of silver nanoparticles : Mechanisms, applications, and toxicity. *Molecules*, *31*(1), 1-35. https://doi.org/10.3390/molecules31010001

46. Kelly, K. L., Coronado, E., Zhao, L. L., & Schatz, G. C. (2003). The optical properties of metal nanoparticles : The influence of size, shape, and dielectric environment. *The Journal of Physical Chemistry B*, *107*(3), 668–677. https://doi.org/10.1021/jp026731y

47. Khan, M. A., Khan, S., & Ahmad, S. (2022). Pathogenic bacteria : Classification and antibiotic resistance mechanisms. *Microbial Pathogenesis*, *168*, 105607.

https://doi.org/10.1016/j.micpath.2022.105607

48. Khanna, P. (2016). Nanomaterials and their properties : A comprehensive review. *Journal of Nanomedicine and Nanotechnology*, *7*(3), 1000381. https://doi.org/10.4172/2157-7439.1000381

49. Köksal, M., Gul, S., & Yilmaz, M. A. (2016). Phytochemical composition and antioxidant activity of *Thymus vulgaris L. Journal of Essential Oil Bearing Plants*, *19*(6), 1408–1417. https://doi.org/10.1080/0972060X.2016.1201443

50. Kumar, D., Kumar, P., Singh, H., & Agrawal, V. (2020). Biocontrol of mosquito vectors through herbal-derived silver nanoparticles : Prospects and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*(21), 25987-26024. https://doi.org/10.1007/s11356-020-08444-6

51. Kumar, N., & Kumbhat, S. (2016). *Essentials in nanoscience and nanotechnology*. Wiley.

_L_

52. Labiad, H., Drioiche, A., & Benali, T. (2024). Phytochemical characterization and antioxidant activity of Moroccan *Thymus species*. *South African Journal of Botany*, *164*, 112–123. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.11.032

53. Li, Y., Yang, D., & Li, H. (2022). The threat of antimicrobial resistance : A review of the global burden and implications. *Frontiers in Public Health*, *10*, 904404. https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.904404

_M_

54. Mittal, A. K., Chisti, Y., & Banerjee, U. C. (2013). Synthesis of metallic nanoparticles using plant extracts. *Biotechnology Advances*, *31*(2), 346–356. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.01.003

55. Mohan, J. C., Praveen, G., & Saravanan, M. (2016). Silver nanoparticles: A review of their synthesis, properties and biomedical applications. *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, *9*(1), 35–41.

56. 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. https://doi.org/10.1088/0957-4484/16/10/059

57. Mulvaney, P. (2015). The beauty of light : The history of plasmonics. *ACS Nano*, *9*(4), 3466–3477. https://doi.org/10.1021/acsnano.5b01990

_N_

58. Navya, P. N., & Daima, H. K. (2016). Rational engineering of physicochemical properties of nanomaterials for biomedical applications. *Advanced Materials Letters*, *7*(9), 682–693. https://doi.org/10.5185/amlett.2016.6241

_O_

59. Ödemiş, A., Aydin, S., & Uçar, S. (2022). UV-Vis spectroscopic characterization of silver nanoparticles synthesized by plant extracts. Spectrochimica Acta Part A : *Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *270*, 120832. https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.120832

_P_

60. Palmieri, C., Marcone, G. L., & D'Agostino, A. (2020). Optimization of extraction conditions for bioactive compounds from *Thymus vulgaris*. *Natural Product Research*, *34*(12), 1748–1752. https://doi.org/10.1080/14786419.2018.1522634

61. Pandey, A. K., & Singh, P. (2017). The genus *Thymus* : A review on its phytochemistry and biological activities. *Journal of Essential Oil Research*, *29*(2), 113–123.

62. Ponce, A. G., Fritz, R., del Valle, C., & Roura, S. I. (2003). Antimicrobial activity of essential oils on the native microflora of organic Swiss chard. LWT - *Food Science and Technology*, *36*(7), 679–684. https://doi.org/10.1016/S0023-6438(03)00088-4

63. Prabhu, S. S., & Poulose, E. K. (2012). Silver nanoparticles : Mechanism of antimicrobial action, synthesis, medical applications, and toxicity effects. *International Nano Letters*, *2*(1), 32. https://doi.org/10.1186/2228-5326-2-32

64. Pryshchepa, O., Pomastowski, P., & Buszewski, B. (2020). Silver nanoparticles: Synthesis, properties, and applications. *Advances in Colloid and Interface Science*, *284*, 102246. https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102246

_R_

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

66. Ranjbarzadeh, R., Karami, A., & Khodadadi, A. (2019). Green synthesis of silver nanoparticles using plant extracts : A review. *Journal of Nanostructures*, *9*(3), 395–408. https://doi.org/10.22052/JNS.2019.03.001

67. Rao, N. V., Suresh, B., & Srinivas, M. (2023). Phytochemical screening and HPLC analysis of Thymus vulgaris L. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *12*(1), 45–51.

68. Revathi, S., Sutikno, S., Hasan, A. F., Altemimi, A. B., ALKaisy, Q. H., Phillips, A. J., Hesarinejad, M. A., & Abdelmaksoud, T. G. (2024). Green synthesis and characterization of silver nanoparticles (AgNP) using *Acacia nilotica* plant extract and their anti-bacterial activity. *Results in Chemistry*, *7*, 101234. https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100680

69. Rodriguez-Garraus, A., Azqueta, A., Vettorazzi, A., & López de Cerain, A. (2020). Genotoxicity of silver nanoparticles. *Nanomaterials,* *10*(2), 251.

70. Rolnik, A., & Olas, B. (2021). The plants of the genus *Artemisia in the treatment of diseases. Postepy Higieny i Medycyny Doswiadczalnej,* *75*(1), 106–122 https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.7993

_S_

71. Saeed, M., Khan, M. A., & Ali, S. (2023). Spectrophotometric determination of total phenolic content in plant extracts using Folin-Ciocalteu method. *Journal of Food Composition and Analysis*, *115*, 104924. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104924

72. Selim, Y. A., Azb, M. A., Ragab, I., & Abd El-Azim, M. H. M. (2020). Green synthesis of silver nanoparticles using plant extracts and their antimicrobial activity. *Journal of Applied Microbiology*, *129*(6), 1509–1521. https://doi.org/10.1111/jam.14733

73. Shaikh, J. R., & Patil, M. K. (2020). Qualitative tests for preliminary phytochemical screening : An overview. *International Journal of Chemical Studies*, *8*(2), 603–608.

74. Shutterstock. (2026). *Thymus vulgaris L*. https://www.shutterstock.com

75. Singh, J., Dutta, T., Kim, K. H., Rawat, M., Samddar, P., & Kumar, P. (2018). 'Green' synthesis of metals and their oxide nanoparticles : Applications for environmental remediation. Journal of Nanobiotechnology, *16*(1), 84. https://doi.org/10.1186/s12951-018-0408-4

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

77. Spréa, R. M., Caleja, C., & Barros, L. (2025). Influence of extraction parameters on phenolic compounds from *Thymus vulgaris L*. *Food Chemistry*, *450*, 139312. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.139312

78. Sultana, B., Anwar, F., & Ashraf, M. (2009). Effect of extraction solvent/technique on the antioxidant activity of selected medicinal plant extracts. *Molecules*, *14*(6), 2167–2180. https://doi.org/10.3390/molecules14062167

79. Suppiah, P., Subbiah, S., & Gurusamy, S. (2023). Factors influencing the green synthesis of nanoparticles : A systematic review. *Nanotechnology Reviews*, *12*(1), 20230129. https://doi.org/10.1515/ntrev-2023-0129

_T_

80. Tavukcuoglu, M. Y., Yildirim, I., & Ozdemir, S. (2024). Botanical description and cultivation of *Thymus vulgaris L. Industrial Crops and Products*, *212*, 118325. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118325

81. Tsakni, A., Karioti, A., & Skaltsa, H. (2025). Antioxidant and antimicrobial activities of *Thymus vulgaris* essential oils from different regions. *Industrial Crops and Products*, *215*, 118652. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.118652

_V_

82. Vaseem, S., Gupta, R., & Singh, P. (2025). Phytochemical composition and biological activities of *Thymus vulgaris* cultivated in India. *Journal of Ethnopharmacology*, *340*, 119245. https://doi.org/10.1016/j.jep.2025.119245

_W_

83. World Health Organization. (2022). *Global antimicrobial resistance and use surveillance system (GLASS) report : 2022*. https://www.who.int/publications/i/item/9789240062702

84. Wu, H., Zhang, J., & Li, X. (2020). Physicochemical properties of nanoparticles : A review of size, shape and surface *effects. Nanoscale Research Letters,* *15*(1), 205. https://doi.org/10.1186/s11671-020-03428-2

_Y_

85. Yin, I. X., Zhang, J., Zhao, I. S., Mei, M. L., Li, Q., & Chu, C. H. (2020). The antibacterial mechanism of silver nanoparticles and its application in dentistry. International *Journal of Nanomedicine,* *15*, 2555–2562. https://doi.org/10.2147/IJN.S246764

_Z_

86. Zhang, J., Li, C., & Chen, X. (2014). Thermal and electrical properties of nanomaterials. *Journal of Materials Science*, *49*(21), 7351–7368. https://doi.org/10.1007/s10853-014-8470-9

87. Zhang, X., Li, S., & Wang, H. (2020). Plant-derived metabolites in the green synthesis of metal nanoparticles. *Green Chemistry*, *22*(18), 6095–6113. https://doi.org/10.1039/D0GC01974K

88. Zhang, Y., Wang, Y., & Liu, X. (2021). Mie theory and its applications in plasmonics. *Nanophotonics,* *10*(4), 1203–1230. https://doi.org/10.1515/nanoph-2020-0578

Annexes

Plant Net

Est une application qui s'appuie sur l'intelligence artificielle et les technologies de traitement d'image pour identifier et classer les espèces végétales à partir de photos numériques.

Elle a pour objectif d'accompagner la recherche scientifique, l'enseignement et la sensibilisation du public, tout en contribuant activement à l'étude, à la préservation et au suivi de la biodiversité végétale.



Figure : logo de l'application plan net utilise pour l'identification botanique**.**