

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de l'Université A.MIRA-BEJAIA



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département de Biotechnologie

Réf:.....

Mémoire

Présenté par

BESSAH Sarah et BERKAINE Cylia

Pour l'obtention du diplôme de

Master Professionnel

Filière : Biotechnologie Spécialité: Biotechnologie et Santé

Thème

**Biosynthèse des nanoparticules d'argent à partir
*d'Opuntia stricta***

Soutenu le: **07/07/2025** Devant le Jury composé de:

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mme. KASMI S.	MCB	Présidente
Mme. ADJEROUD N.	MCA	Examinatrice
Mme. ZIDANE N.	MAA	Encadrant
M. ZEGHBIB W.	MAB	Co-encadrant

Année Universitaire : 2024-2025



Déclaration sur l'honneur

Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 Décembre 2020(*)
Fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : **Sarah**

Prénom : **BESSAH**

Matricule :

Spécialité et/ou Option : **Biotechnologie et Santé**

Département : **Biotechnologie**

Faculté : **Sciences de la Nature et de la Vie**

Année universitaire : **2024/2025**

Et chargé de préparer un mémoire de (*Licence, Master, Autres à préciser*) : **Master**

Intitulé : **Biosynthèse des nanoparticules d'argent à partir d'*Opuntia stricta*.**

Déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le 15/07/2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

.....



Déclaration sur l'honneur

Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 Décembre 2020(*)

Fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : **Cylia**

Prénom : **BERKAINE**

Matricule :

Spécialité et/ou Option : **Biotechnologie et Santé**

Département : **Biotechnologie**

Faculté : **Sciences de la Nature et de la Vie**

Année universitaire : **2024/2025**

Et chargé de préparer un mémoire de (*Licence, Master, Autres à préciser*) : **Master**

Intitulé : **Biosynthèse des nanoparticules d'argent à partir d'*Opuntia stricta*.**

Déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le 15/07/2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

.....

Remerciements

*Nous tenons à remercier le bon DIEU de nous avoir offert
l'opportunité de franchir ce stade de
Savoir, et de nous donner le courage et la détermination ainsi
que la patience de réaliser ce modeste travail*

*Un grand merci à nos familles, qui nous ont soutenus et
encouragés pendant nos études*

*Nous tenons à témoigner toute notre reconnaissance à notre
encadrante, Madame Zidane, ainsi qu'à notre co-encadrant,
Monsieur Zeghbib, pour leurs encadrements et leurs conseils
éclairés, et leurs patiences tout au long de l'élaboration de ce
mémoire. Leur accompagnement a été déterminant dans
l'aboutissement de ce travail.*

*Nous remercions chaleureusement les membres du jury Mme
Kasmi et Mme Adjeroud pour avoir accepté d'évaluer notre
travail, ainsi que tous ceux qui ont contribué, de près ou de
loin, à sa réalisation.*

*Une pensée particulière aux enseignants qui ont enrichi notre
formation, à M. Boudjouan pour ses précieux conseils, ainsi
qu'aux membres du département de biotechnologie.*

*Enfin, nous adressons une mention spéciale à nos amis et à
toutes les personnes qui, par leur aide directe ou indirecte, ont
participé à la concrétisation de ce projet.*



B.Sarah & B.Cylia -

Dédicaces

Je dédie ce travail :

*À mes parents LAHLOU et FATIHA, pour leur amour
inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien durant toutes
mes années d'étude.*

*À mes chères sœurs Kahina, Rosa, Nassima et à mon frère
Ammar, pour leur présence précieuse.*

*À la mémoire de ma grand-mère Nouara, pour son amour et sa
bienveillance.*

À mes adorables neveux Miria et Missy

*À mes proches et amis pour leur présence et leurs
encouragements.*

*Une pensée spéciale pour mes chers meilleurs amis Thiziri,
Lyes et Kamel, avec qui j'ai partagé mes plus beaux moments.*

*Et à ma binôme Cylia, avec qui j'ai partagé les doutes, les défis
et les joies de tout mon parcours universitaire.*

Cette réussite est la nôtre



B.Sarah -

Dédicaces

A mes parents, piliers de ma vie, dont l'amour, les sacrifices quotidiens, leurs patiences infinies et leurs prières silencieuses.

Vous avez été mes premiers guides, mes repères, et mes références dans la vie.

A mes frères et ma soeur, pour leur encouragement et leur soutien Leur présence à mes côtés m'a toujours été d'un grand réconfort.

A ma belle-soeur pour ses encouragements et son soutien toute au long de cette période.

A mon binôme avec qui j'ai partagé ce parcours main dans la main. Merci pour ta patience, ton soutien.

A toute ma famille ainsi que mes amis pour leurs présences réconfortantes et leur soutien.

Ce travail est l'aboutissement d'un chemin parcouru à vos côtés

 **B.Cyflia -**

Sommaire

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Sommaire

Liste d'abréviation

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction 1

Chapitre I

Etat de l'art

I.1. Généralité sur la nanotechnologie	3
I.2. Définition des nanomatériaux.....	3
I.3. Classification des nanomatériaux	4
I.4. Synthèse des nanomatériaux	5
I.5. Approches de synthèse des nanoparticules.....	5
I.6. Biosynthèse de nanoparticules	6
I.6.1. Nanoparticules d'argent.....	6
I.6.2. Biosynthèse des nanoparticules d'argent.....	8
I.6.3. Applications des nanoparticules d'argent.....	8
I.6.4. Effet antimicrobien des nanoparticules d'argent.....	9
I.6.5. Activité antioxydante	9
I.6.6. Activité antidiabétique	10
I.7. Définition et classification de <i>l'Opuntia</i>	11
I.7.1. Définition	11
I.7.2. Origines	11
I.7.3. Description de la plante.....	11
I.7.4. Classification taxonomique	12

Chapitre II

Matériel et méthodes

II.1. Matériel végétal.....	14
II.2. Préparation des extraits des graines et de pulpe de <i>l'Opuntia Stricta</i>	14
II.3. Biosynthèse des nanoparticules d'argent	14
II.4. Caractérisation par spectrophotométrie UV-visible.....	15
II.5. Caractérisation par spectrophotométrie FTIR.....	15
II.6. Dosage des composés phénoliques totaux	16

Sommaire

II.7. Dosage des flavonoïdes	16
II.8. Evaluation de l'activité antioxydants des nanoparticules d'argent	17
II.8.1. Détermination de l'activité antioxydants de l'extrait par la méthode ABTS.....	17
II.8.2. Le test de FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power)	17
II.8.3. Evaluation de l'activité d'oxyde nitrique (NO)	17
II.9. Evaluation de l'activité antimicrobienne des AgNPs	18
II.10. Activité antidiabétique	18
II.11. L'analyse statistique.....	19

Chapitre III

Résultats et discussion

III.1. Biosynthèse des nanoparticules d'argent.....	20
III.2. Caractérisation par spectroscopie UV-Visible.....	20
III.3. Caractérisation par spectroscopie infrarouge.....	21
III.4. Dosage des composés phénoliques totaux.....	22
III.5. Dosage des flavonoïdes.....	23
III.6. Activités antioxydants	23
III.6.1. Inhibition du radical ABTS.....	23
III.6.2. Test de FRAP	25
III.7. Activité antioxydante par le test NO (oxyde nitrique).....	26
III.8. Activité antidiabétique.....	27
III.9. Activité antimicrobienne	28
Conclusion	31

Références bibliographiques

Annexes

Liste d'abréviation

ABTS : 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)

ABTS⁺ : Radical cation

ADN : Acide désoxyribonucléique

AgNPs : nanoparticules d'argent

ASTM : Société Américaine des Matériaux d'essai

BAUA : Office fédéral de la protection du travail et la médecine du travail

BSI : Institution britannique de normalisation

DNS : Acide 3,5 Dinitrosalicylique

EAG : Equivalent Acide Gallique

EG : Extrait brut des Graines

EP : Extrait brut de la Pulpe

Fe²⁺ : L'ion ferreux

Fe³⁺ : L'ion ferrique

FRAP: Ferric Reducing Antioxidant Power

FTIR : Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier

ISO : Organisation International de Normalisation

MS : Matière Sèche

NIOSH : Institut national de la Sécurité et de la santé au travail

NO : Oxyde nitrique

NPs : Nanoparticules

NPs G : Nanoparticules d'argent issus des graines

NPs G C : Nanoparticules d'argent issus des graines calcinées

NPs P : Nanoparticules d'argent issus de la pulpe

NPs P C : Nanoparticules d'argent issus de la pulpe calciné

O. Stricta: Opuntia stricta

pH : potentiel Hydrogène

ROS : Espèces réactives de l'oxygène

SCCP : Comité des produits de consommation

SNP : Nitroprussiate de sodium

TPTZ : Tripyridyltriazine

UV : Ultraviolet

Liste des tableaux

Tableau I : Définitions des nanoparticules selon diverses organisations (Yezhelyev et al. 2006).....	3
Tableau II : Caractéristique des nano particules d'argent (AgNPs).....	7
Tableau III : Attribution des bandes FTIR des nano particules et des extraits bruts d' <i>Opuntia stricta</i>	21
Tableau IV : Comparaison des zones d'inhibition (mm) contre <i>E. coli</i> (Gram-), <i>S. aureus</i> (Gram+) et <i>C. albicans</i>	29

Liste des figures

Liste des figures

Figure 1 : Classification des nanoparticules de (Dhaka et <i>al.</i> , 2023).	5
Figure 2 : Classification taxonomique des espèces d' <i>Opuntia</i> (Zeghibib et <i>al.</i> , 2022).	13
Figure 3 : Schéma de la préparation des extraits de graines et de la pulpe et la procédure de la biosynthèse des nanoparticules d'argent	15
Figure 4 : Spectres UV-visible des NPsP et NPsG.....	21
Figure 5 : Spectres FTIR des NPs P et NPs G et des extraits bruts de la pulpe et des graines.	22
Figure 6 : Histogramme de teneur en composés phénoliques (a) des NPs calcinées et non calcinées ; (b) de l'extrait brut de graine et de pulpe d' <i>Opuntia stricta</i>	23
Figure 7 : Concentrations de l'activité antioxydante (ABTS) (a) des NPs d'argent (b) de l'extrait brut de la pulpe et des graines d' <i>Opuntia stricta</i>	24
Figure 8 : Taux d'inhibition du radical libre ABTS (a) par les NPs d'argent(b)par l'extrait brut de la pulpe et des graines d' <i>Opuntia stricta</i>	25
Figure 9 : Concentration de l'activité antioxydante (test FRAP) (a) des NPs d'argent (b) des extraits bruts de la pulpe et des graines d' <i>Opuntia stricta</i>	26
Figure 10 : Histogramme de l'activité antioxydante (test NO) des NPs d'argent.....	27
Figure 11 : Histogramme de taux d'inhibition du radical libre oxyde nitrique par l'extrait brut de graine et de pulpe d' <i>Opuntia stricta</i>	27
Figure 12 : Activité d'inhibition d'enzyme α -amylase par les NPs d'argent	28
Figure 13 : Diamètre des zones d'inhibition de <i>C. albicans</i> , <i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i> des AgNPs et des extraits bruts d' <i>O. stricta</i>	29

Introduction

Introduction

La nanotechnologie est un domaine de recherche très actif, grâce aux multiples applications des nanoparticules en médecine, électronique, capteurs et catalyse. Ces dernières décennies, leur synthèse a beaucoup progressé, avec un intérêt croissant pour les méthodes vertes (biologiques), en utilisant des agents naturels de réduction, de coiffage (capping agents), et de stabilisation, et en évitant les produits chimiques nocifs et la consommation d'énergie élevée (Khan et *al.*, 2022) Elle concerne la fabrication de particules de taille nanométrique, variant de 1 à 100 nm, en utilisant diverses stratégies de synthèse, ainsi que l'étude de la structure des particules et de la modification de leur taille (Chandrasekaran et *al.*, 2022).

Les nanoparticules métalliques, en particulier les nanoparticules d'argent (AgNPs), suscitent un vif intérêt en raison de leurs propriétés uniques, notamment leur activité antimicrobienne, leur conductivité électrique et leur capacité à catalyser diverses réactions chimiques (Yusuf, 2019 ; Krishnamoorthy et al. 2023).

La synthèse chimique conventionnelle des AgNPs repose souvent sur l'utilisation de réducteurs chimiques (comme le borohydrure de sodium) et de solvants organiques, ce qui pose des problèmes de toxicité, coût élevé et impact environnemental. Face à ces inconvénients, la synthèse verte est apparue comme une alternative écologique et durable. Elle repose sur l'utilisation d'extraits végétaux riches en métabolites secondaires (flavonoïdes, alcaloïdes, tanins, etc.) agissant à la fois comme agents réducteurs et stabilisants (Karunakaran et *al.*, 2023) .

Cette étude a pour objectif de synthétiser biologiquement des nanoparticules d'argent à partir des graines et de la pulpe d'*Opuntia ficus stricta* (figue de barbarie sauvage), puis d'évaluer leurs activités biologiques antioxydantes, antidiabétiques et antibactériennes. Au mieux de nos connaissances, aucun travail n'a été fait sur la biosynthèse des NPs d'argent sur les deux parties du fruit (graines et pulpe).

Face à l'augmentation des résistances bactériennes et à la recherche de moyens plus sûrs et durables pour traiter les infections, l'exploitation de solutions naturelles, en particulier les extraits végétaux riches en composés bioactifs, devient une option prometteuse. Ces agents antimicrobiens naturels présentent l'avantage d'être moins toxiques et plus respectueux de l'environnement, offrant ainsi une alternative efficace pour combattre les agents pathogènes et renforcer la lutte contre les infections.

Introduction

Ce mémoire est structuré comme suit : la première partie est consacrée à l'état de l'art sur les nanoparticules d'argent et leur biosynthèse. La seconde détaille les matériaux et méthodes utilisés. Enfin, la dernière section présente les résultats expérimentaux, leur discussion et les conclusions qui en découlent.

Chapitre I
Etat de l'art

Généralité sur la nanotechnologie

I.1. La nanotechnologie est une discipline innovante qui s'est imposée dans divers secteurs tels que la médecine, l'agriculture et l'industrie agroalimentaire. En tant que domaine multidisciplinaire, elle s'intéresse à la conception, la manipulation et l'exploitation de matériaux à l'échelle atomique et moléculaire. Lorsque les matériaux sont réduits à une taille comprise entre 1 et 100 nanomètres, leurs propriétés physico-chimiques changent de manière significative par rapport à leurs équivalents à l'échelle macroscopique. Ces caractéristiques particulières confèrent aux nanomatériaux des avantages considérables dans plusieurs domaines scientifiques, notamment la science des matériaux, la chimie, la physique, la biologie et la médecine (H. Mohammad et *al.*, 2022).

Selon Lin et *al.*, (2025) les nanomatériaux et la nanotechnologie sont de plus en plus intégrés dans les dispositifs médicaux, avec un marché en pleine expansion et des applications cliniques déjà établies. Haleem et *al.*, (2023) soulignent par ailleurs que la nanotechnologie regroupe l'ensemble des sciences et techniques exploitant les phénomènes à l'échelle nanométrique, afin de concevoir, caractériser, fabriquer et utiliser des matériaux, structures, dispositifs et systèmes aux fonctionnalités avancées.

I.2. Définition des nanomatériaux

Le terme « nano », issu du grec *nanos*, désigne une taille extrêmement petite ou un objet minuscule. Dans le système international d'unités, le préfixe « nano » représente un milliardième d'une unité et des matériaux dont la composition ou les dimensions de surface se situent à l'échelle nanométrique (1 à 100 nm) (Mekuye et Abera 2023).

Tableau I : Définitions des nanoparticules selon diverses organisations (Yezhelyev et *al.*, 2006).

L'organisation	Définition
Organisation Internationale de Normalisation (ISO)	Une particule s'étendant sur 1-100nm (diamètre).
Société Américaine des Matériaux d'essai (ASTM)	Particule ultrafine dont la longueur en 2 ou 3 dimensions est de 1 à 100nm
Institut National de la Sécurité et de la Santé au	Particule avec un diamètre compris entre 1 et 100nm ou fibre couvrant la gamme 1-100nm.

Travail (NIOSH)

Comité des produits de Au moins un côté est à l'échelle nano métrique.

Consommation (SCCP)

Institution Britannique de Tous les champs ou diamètres sont dans l'échelle nano métrique.

Normalisation (BSI)

Office Fédéral de la Tous les champs ou diamètres son dans l'échelle nanométrique.
Protection du Travail et la
Médecine du Travail
(BAUA)

Classification des nanomatériaux

- I.3. Les nanomatériaux se classent selon leur dimension et leur composition dont ils se divisent en organiques (liposomes, dendromètres), inorganiques (nanoparticules métalliques), à base de carbone (graphène, fullerènes) et leur dimension définit leurs propriétés : points quantiques (0D), nanotubes (1D), nano feuilles (2D) ou nano composites (3D) comme présentée dans la figure 01. Ces matériaux présentent des caractéristiques uniques (optiques, mécaniques, catalytiques) dues à leur haute surface spécifique et effets quantiques, offrant des applications en nanotechnologie, médecine et électronique (Neha et *al.*, 2020).

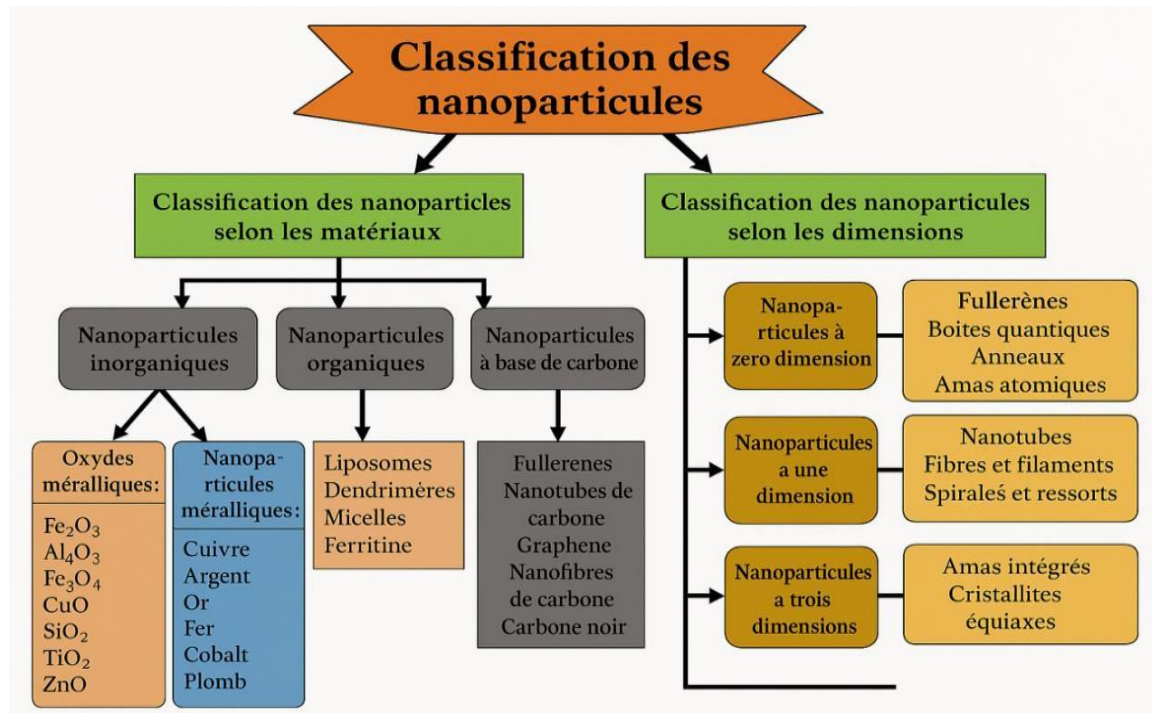


Figure 1 : Classification des nanoparticules de (Dhaka et *al.*, 2023).

I.4. Synthèse des nanomatériaux

Selon Huston et *al.*, (2021) la synthèse des nano matériaux se divise en deux catégories principales : les méthodes traditionnelles et les méthodes vertes. Les méthodes traditionnelles offrent un contrôle précis sur les nanoparticules, mais présentent des risques pour la santé et l'environnement, en raison de l'utilisation de solvants organiques et de conditions extrêmes (haute pression et haute température, générant des vapeurs dangereuses et du CO₂), ce qui soulève des préoccupations en matière de sécurité sanitaire et d'impact environnemental. En revanche, les méthodes vertes, qui exploitent des microorganismes comme les bactéries et les plantes, permettent une production plus écologique des nanomatériaux, avec des avantages supplémentaires comme des propriétés antimicrobiennes et réductrices, tout en réduisant les impacts environnementaux et sanitaires des méthodes traditionnelles.

I.5.

Approches de synthèse des nanoparticules

Il existe deux principales méthodes pour la synthèse des nanoparticules : l'approche descendante, qui réduit des matériaux en petites particules, et l'approche ascendante, qui assemble des atomes pour former des structures nanoparticulaires. L'approche descendante

consiste à fragmenter des matériaux à l'aide de méthodes physiques et chimiques, mais elle présente des coûts élevés liés à la consommation d'énergie. En revanche, l'approche ascendante, qui repose sur l'autoassemblage d'atomes ou de molécules, permet un meilleur contrôle de la taille, de la forme et de la composition des nanoparticules, en plus d'être économique (Sharma et al. 2019; Habibullah et al. 2021 ; Karunakaran et al. 2023).

Biosynthèse de nanoparticules

I.6. La biosynthèse constitue une méthode écologique pour la production de nanoparticules non toxiques et biodégradables. Elle repose sur l'utilisation de bactéries, d'extraits végétaux ainsi que de précurseurs afin de générer des nanoparticules, remplaçant ainsi les produits chimiques. Cette approche permet la biosynthèse des nanoparticules dans une optique respectueuse de l'environnement (Kuppusamy et *al.*, 2016).

En règle générale, la synthèse des nanoparticules (NPs) consiste à mélanger la biomasse végétale ou son extrait avec une solution de sel métallique, en ajustant la température et le pH selon les conditions souhaitées. La formation des nanoparticules peut être confirmée par un changement de couleur de la solution (Dikshit et *al.*, 2021).

I.6.1. Divers composants végétaux, tels que les fruits, les feuilles, les racines, les tiges, et leurs extraits, sont utilisés comme sources pour la production des nanoparticules métalliques. Ce processus inclut généralement la réduction des sels métalliques à l'aide d'agents réducteurs et stabilisants présents dans les plantes. Ces agents peuvent être des protéines, des acides aminés, des enzymes, des acides organiques, des vitamines, ainsi que des métabolites secondaires tels que les alcaloïdes, les flavonoïdes, les composés hétérocycliques, les polyphénols, les terpénoïdes et les polysaccharides (Salem et *al.*, 2022 ; R. Singh et *al.*, 2023).

Nanoparticules d'argent

Parmi les nanoparticules métalliques, celles d'argent (AgNP) se distinguent par leurs propriétés biologiques exceptionnelles. Leurs effets bénéfiques sur les plantes sont multiples, elles améliorent la germination des graines et stimulent la croissance végétale (Sayed Ahmed et *al.*, 2021).

Selon Dhaka et *al.*, (2023) les nanoparticules (NPs) sont produites de manière écologique et économique à partir de différentes parties des plantes (feuilles, tiges, racines, fleurs), en raison de leur disponibilité naturelle, de leur formation rapide, de leur efficacité,

Ces végétaux contiennent naturellement des composés actifs comme les saponines, les terpénoïdes, les flavonoïdes, les alcaloïdes, les acides aminés, les composés phénoliques, les vitamines, les protéines et les polysaccharides qui agissent comme agents réducteurs, stabilisants et coiffants pour la biosynthèse des NPs.

D'après les travaux de Syafiuddin et *al.*, (2017) les nanoparticules d'argent (AgNPs) présentent diverses caractéristiques d'intérêt, telles que leur morphologie, taille, structure cristalline, ainsi que leurs propriétés optiques, électriques, catalytiques et leur toxicité potentielle (voir Tableau II).

Tableau II : Caractéristique des nano particules d'argent (AgNPs)

Morphologie et Taille	Formes variées : Sphères, cubes, triangles, bâtonnets
	Taille : 1–100 nm (les plus efficaces : 1–10 nm)
Structure Cristalline	Effets : Petites tailles (meilleure activité antibactérienne).
	Formes non sphériques (triangles) plus efficaces contre les bactéries.
Propriétés Optiques	Cubique à faces centrées (CFC) avec pics de diffraction à : 38° (plan 111), 44° (200), 64° (220), 77° (311)
	Absorption plasmonique : 380–450nm (visible). Sphères : 400–420 nm.
Activité Antimicrobienne	Applications : Capteurs, détection colorimétrique.
	Mécanismes : Libération d'ions Ag ⁺ (endommagent les membranes bactériennes). Production d'espèces réactives oxygénées (stress oxydatif).
Toxicité	Effets indésirables :
	Cytotoxicité (cellules humaines), stress oxydatif. Risques environnementaux (libération de puis les textiles/cosmétiques). Dépend de : Taille, dose, revêtement.

Biosynthèse des nanoparticules d'argent

I.6.2. La bio-réduction des ions argent (Ag^+) en nanoparticules (AgNPs) s'effectue naturellement grâce aux composés actifs présents dans les extraits végétaux. Les protéines et molécules végétales capturent d'abord les ions Ag^+ par interactions électrostatiques, puis les réduisent en argent métallique (Ag), formant ainsi des noyaux initiaux. Ces noyaux formés se développent successivement par incorporation continue d'autres ions argent réduits. Parallèlement, les biomolécules végétales jouent un double rôle en assurant à la fois la réduction des ions et la stabilisation des nanoparticules formées en se fixant à leur surface. Ce processus élimine le besoin d'ajouter des agents réducteurs ou stabilisants synthétiques (Rajeshkumar et Bharath 2017).

Applications des nanoparticules d'argent

I.6.3. Plusieurs organismes de certification ont approuvé l'utilisation de produits fabriqués à partir de nanoparticules d'argent (AgNPs). Grâce à leur biocompatibilité et à leur facilité de fonctionnalisation, les AgNPs sont employés dans divers produits, leur conférant notamment des propriétés de stérilisation (Nie et *al.*, 2023).

Les nanoparticules d'argent (AgNPs) sont largement utilisées pour leurs propriétés antimicrobiennes dans divers secteurs industriels et médicaux. Elles jouent un rôle important contre les bactéries résistantes aux antibiotiques et sont employées pour la purification de l'eau, la délivrance ciblée de médicaments, ainsi que dans la lutte contre les moustiques et les agents pathogènes agricoles. Dans l'industrie alimentaire, elles contribuent à la conservation des produits grâce aux emballages antimicrobiens. En médecine, les AgNPs sont intégrées dans des dispositifs tels que les pansements, tandis qu'en cosmétique, elles aident à limiter la contamination microbienne et offrent des propriétés anti-inflammatoires (Mustapha et *al.*, 2022).

Pulit-Prociak et Banach (2016) soulignent l'utilisation des AgNPs dans des matériaux de construction où elles offrent des propriétés biocides, ainsi que dans les filtres à air pour éliminer les microbes, notamment dans les usines de transformation alimentaire. Ces multiples applications montrent le vaste potentiel des AgNPs dans divers secteurs industriels et médicaux.

Effet antimicrobien des nanoparticules d'argent

I.6.4. Les nanoparticules d'argent (AgNPs) exercent leur activité antibactérienne par le biais de plusieurs mécanismes d'action complémentaires. Elles libèrent des ions argent (Ag^+) capables de perturber l'intégrité de la paroi cellulaire et de la membrane cytoplasmique des bactéries. Ces ions s'interagissent également avec les ribosomes, entraînant l'inhibition de la synthèse des protéines, et désactivent certaines enzymes de la chaîne respiratoire, compromettant ainsi la production d'ATP. En parallèle, les dommages causés à la chaîne de transport d'électrons conduisent à la génération d'espèces réactives de l'oxygène (ROS), qui accentuent la dégradation membranaire. Ces ROS, ainsi que les ions Ag^+ , peuvent se lier à l'ADN bactérien, perturbant la réplication et inhibant la division cellulaire. De plus, les AgNPs elles-mêmes peuvent provoquer la dénaturation de la membrane plasmique et créer des pores, entraînant la fuite des composants cellulaires internes (Yin et *al.*, 2020).

Par ailleurs, plusieurs études récentes sont mises en évidence le fort potentiel antibactérien des AgNPs obtenues par voie verte. En particulier, les travaux de Gudimalla et *al.*, (2021) et Yassin et *al.*, (2022) ainsi que Koohestani et *al.*, (2025) ont démontré l'efficacité significative des AgNPs biosynthétisées à partir d'extraits végétaux contre un large spectre de souches bactériennes, confirmant leur intérêt comme agents antimicrobiens naturels.

I.6.5.

Activité antioxydante

Le stress oxydatif est un phénomène qui peut être défini comme un déséquilibre dans la cellule entre la défense antioxydants de la cellule et un excès des oxydants. Les antioxydants sont des substances, naturelles ou synthétiques, qui protègent les cellules contre les dommages causés par les oxydants tels que les radicaux libres. Pour être efficaces, ils doivent agir à faible concentration, neutraliser les espèces réactives sans produire de composés toxiques, et cibler des molécules précises (Bedlovičová et *al.*, 2020). Les radicaux libres sont des espèces réactives de l'oxygène, jouent un rôle important dans de nombreuses réactions cellulaires chez les eucaryotes. Cependant, un excès de radicaux libres, souvent induit par le stress, peut provoquer des dommages oxydatifs affectant les lipides, les protéines et les acides nucléiques, contribuant ainsi au développement de diverses pathologies. Des stratégies thérapeutiques basées sur des antioxydants ont été développées pour lutter contre des maladies comme le cancer, la maladie d'Alzheimer et le diabète. Ces dernières années, la recherche d'antioxydants naturels a un développement remarquable, notamment dans les industries alimentaire, cosmétique et médicale pour remplacer les

antioxydants synthétiques qui sont limités en raison de leur cancérogénicité. En conséquence, les nanoparticules d'argent bio synthétisé à partir d'extraits de plantes pourraient être des antioxydants efficaces pour les applications alimentaires, cosmétiques et médicales (Erenler et *al.*, 2023).

L'oxyde nitrique NO est une molécule essentielle qui régule de nombreuses fonctions biologiques dans l'organisme. Tels que la réponse immunitaire, la transmission du signal neuronal, le contrôle de la pression artérielle et la régulation de la vasodilatation, les AgNPs biosynthétisés ont démontré une activité de piégeage dépendante de la concentration dans les tests réalisés par Bhakya et *al.*, (2016) Le test (Ferric Reducing Antioxidant Power) FRAP est une méthode couramment utilisée pour évaluer le pouvoir antioxydant, basée sur la capacité des antioxydants à réduire le complexe ferrique (Fe^{3+}) en complexe ferreux (Fe^{2+}), de couleur bleu intense, dans un environnement acide. L'activité antioxydante est quantifiée par l'augmentation de l'absorbance à 593 nm, et les résultats sont exprimés en équivalence à un standard ; le pH acide sert à la réduction du potentiel d'ionisation, favorise le transfert d'électrons, augmente le potentiel redox et le test FRAP original utilise la tripyridyltriazine (TPTZ) comme ligand de liaison à l'ion fer (Munteanu et Constantin 2021). La méthode ABTS repose sur l'interaction entre les composés antioxydants et le radical ABTS⁺. Ce radical, caractérisé par un centre azoté une couleur vert bleuâtre, il se réduit par les antioxydants, ce qui entraîne une décoloration progressive vers une forme incolore. Cette diminution de la coloration est proportionnelle à l'activité antioxydante (Kusumorini et *al.*, 2022).

I.6.6.

Activité antidiabétique

Selon Krishnamoorthy et *al.*, (2023) les nanoparticules d'argent (AgNPs) ont suscité un grand intérêt en raison de leur capacité à réguler les enzymes impliquées dans le métabolisme des glucides, avec des applications prometteuses pour le contrôle de la glycémie. Ces nanoparticules possèdent des propriétés inhibitrices significatives vis-à-vis de la α -amylase et de la α -glucosidase, deux enzymes essentielles dans la dégradation des glucides complexes. L'inhibition de ces enzymes par les AgNPs pourrait ralentir la dégradation des glucides et améliorer l'absorption du glucose, offrant ainsi une meilleure gestion de la glycémie.

Définition et classification de *l'Opuntia*

Définition

Les cactus, forment un groupe de plantes diversifié. Parmi eux, le genre *Opuntia* (communément appelé figuier de Barbarie) se distingue par sa large distribution, avec près de 300 espèces signalées à ce jour. Ce genre est particulièrement connu pour ses fruits comestibles et ses cladodes nutritifs, utilisés comme légumes. *L'Opuntia spp.* Occupe une place importante en médecine traditionnelle, où il est employé pour traiter divers troubles de santé, tels que brûlures, œdèmes, plaies, diarrhées, indigestions et hémorroïdes. Ces propriétés thérapeutiques potentielles s'expliquent par la richesse de cette plante en métabolites primaires et secondaires, bénéfiques pour la santé humaine. Parmi ces composés figurent des vitamines, des protéines, des polysaccharides, des acides gras polyinsaturés, des caroténoïdes, des bétalaïnes et des composés phénoliques (Zeghib et al., 2024).

Origines

I.7.2. Originaire des Caraïbes, du sud des États-Unis, du Mexique et du nord de l'Amérique du Sud, l'*Opuntia* a été introduite dans diverses régions du monde à des fins agricoles, elles se caractérisent par leurs tiges segmentées en cladodes (raquettes plates et épineuses) et leurs fruits comestibles (les figues de barbarie) ; sont adaptés aux environnements arides et chauds grâce à des mécanismes comme la photosynthèse qui optimise la conservation de l'eau. Les espèces les plus répandues incluent *Opuntia stricta*, *O. monacantha* et *O. ficus-indica* (Talia et al., 2022).

I.7.3.

Description de la plante

L'*Opuntia* est un cactus résistant, capable de s'adapter à une grande variété de sols, et parmi les espèces les plus répandues on retrouve l'*Opuntia ficus-indica*. Cette plante fut utilisée traditionnellement pour ses propriétés médicinales. Des recherches ont mis en évidence ses propriétés antidiabétiques, anti-inflammatoires, anti oxydantes et cytotoxiques et sur le plan nutritionnel, les cladodes sont riches en vitamines (A, C, E), en fibres, en huiles essentielles et en composés phytochimiques. Ils contiennent également des niveaux élevés de calcium, surpassant même certains légumes et fruits. Les fruits, quant à eux, sont une source de protéines, de minéraux (calcium, magnésium, zinc, sodium) et de vitamines. La pulpe contient de l'acide ascorbique, du phosphate, du glucose et du fructose tandis que le jus de fruit peut servir de colorant alimentaire naturel grâce à ses pigments bêta-cyanines. Les graines sont particulièrement riches en protéines, huiles, fibres et caroténoïdes,

dépassant souvent la pulpe en concentration. Les écorces de fruits, bien qu'elles représentent les deux tiers du fruit, sont souvent sous-utilisées malgré leur richesse en composés bioactifs. Ces propriétés en font une ressource prometteuse pour des applications biomédicales et nutritionnelles (Affi et *al.*, 2024).

En Tunisie, *Opuntia stricta* est couramment utilisée comme plante ornementale dans les espaces publics et les jardins. Ce cactus épineux, pouvant atteindre 2 mètres de haut, produit des fruits rouge pourpre et des tiges caractéristiques plates et allongées. Traditionnellement employée pour traiter diverses affections, cette plante possède des propriétés médicinales remarquables confirmées par la science : anti-inflammatoire, antivirale, analgésique et même anticancéreuse. Ces effets bénéfiques proviennent de sa richesse en composés bioactifs, notamment des bétacyanines (pigments antioxydants), des polyphénols, des flavonoïdes et des polysaccharides. Des études ont également démontré l'efficacité antimicrobienne de son huile essentielle, particulièrement contre certaines bactéries et champignons pathogènes, grâce à sa teneur en thymol. Ces multiples atouts font d'*O. stricta* une ressource naturelle prometteuse pour des applications pharmaceutiques et cosmétiques (Ines 2023).

I.7.4. **Classification taxonomique**

Le genre *Opuntia* présente une taxonomie complexe en raison de sa grande variabilité intraspécifique (couleur, forme des cladodes, épines), influencée par l'hybridation, la plasticité phénotypique, la polyploïdie et la domestication (Boudjouan et al. 2022) Deux systèmes de classification coexistent : le système traditionnel classe *Opuntia* parmi les Cactacées (ordre Cactales), tandis que les classifications phylogénétiques modernes l'intègrent dans l'ordre des Caryophyllales. La transition des Angiospermes aux Magnoliophytes reflète l'adoption de critères moléculaires, bien que les anciennes terminologies persistent dans certains contextes. Cette complexité taxonomique s'explique par l'absence de barrières reproductives strictes entre espèces, favorisant les hybridations naturelles (Madrid et *al.*, 2025).

Le schéma ci-dessous (Figure2) représente la classification taxonomique des espèces *Opuntia*.

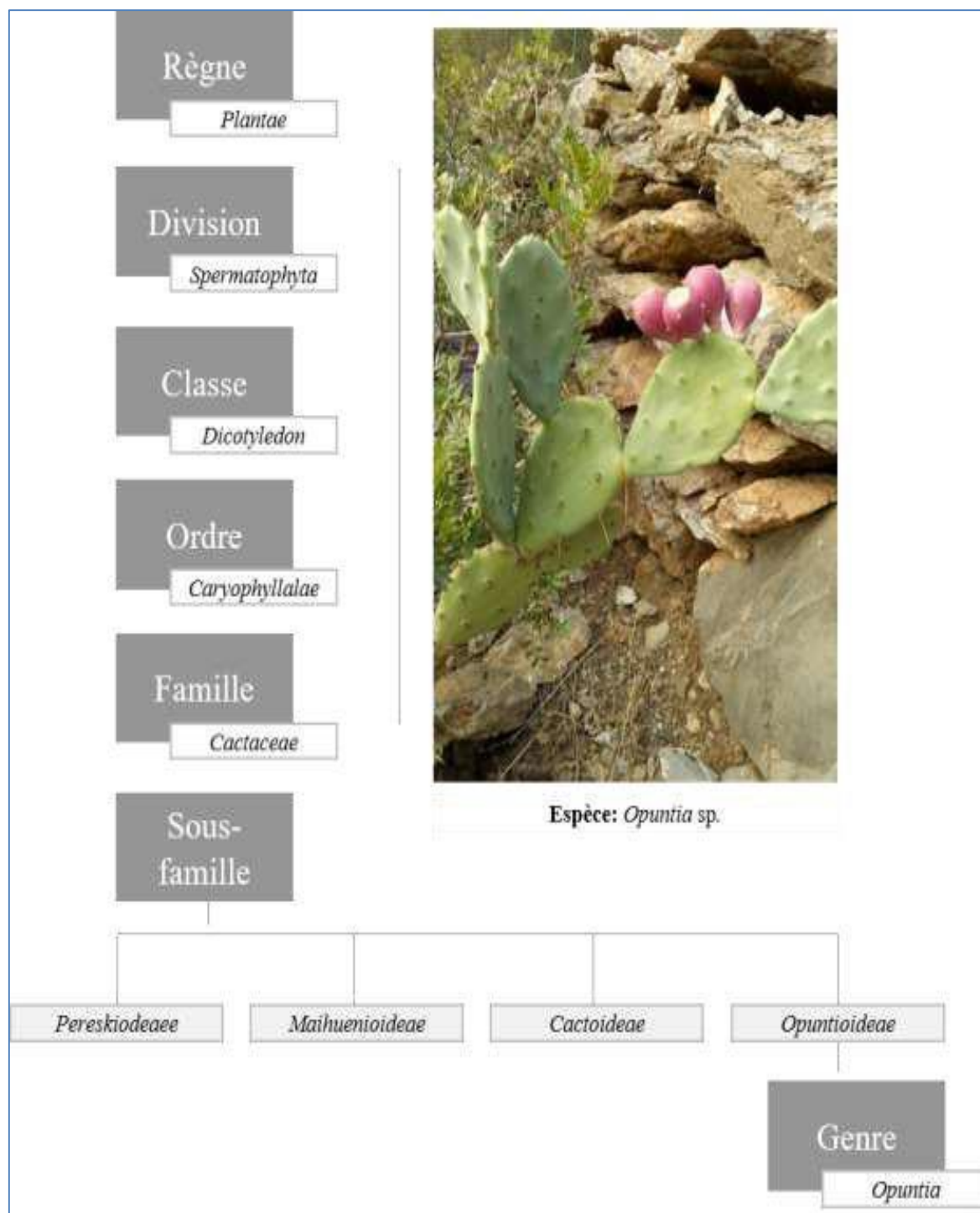


Figure 2 : Classification taxonomique des espèces d'*Opuntia* (Zeghib et al., 2022).

Chapitre II
Matériel et méthodes

Matériel végétal

- II.1. Le fruit de l'espèce sauvage *Opuntia stricta* a été récolté en octobre 2018, durant sa période de maturité, dans la région de Bejaïa (Algérie). Cette espèce, communément désignée par son nom scientifique *Opuntia stricta* (OS), est une variété sauvage qui pousse naturellement dans des zones montagneuses situées sur les côtes de la ville de Bejaïa. Le site de récolte se trouve à une altitude de 235 mètres, aux coordonnées géographiques de 36, 766° de latitude Nord et 5, 103° de longitude et une fois récoltés, les fruits sont d'abord lavés à l'eau courante pour éliminer toute saleté, puis pelés. La pulpe est ensuite filtrée pour isoler les graines. Celles-ci sont récupérées, séchées, puis moulues jusqu'à l'obtention d'une poudre fine

Préparation des extraits des graines et de pulpe de l'*Opuntia Stricta*

- II.2. Une extraction par décoction a été réalisée à partir des graines et de la pulpe selon le protocole décrit par Zeghib et *al.*, (2022). En résumé, 1g de chaque échantillon a été ajouté séparément à 100ml d'eau distillée, puis les mélange ont été chauffé à 90°C sous agitation constante à l'aide d'un agitateur magnétique (VELP Scientifica, Italie) pendant 30 minutes. Après chauffage, les solutions ont été filtré à l'aide d'un papier filtré de type Wattman. Les extraits obtenus ont ensuite été conservés au congélateur à -20°C en vue d'une utilisation ultérieure.

II.3.

Biosynthèse des nanoparticules d'argent

Dans le cadre de cette étude, la synthèse des nanoparticules d'argent (AgNPs) a été réalisée par voie biologique à l'aide des extraits de graines et de pulpe d'*Opuntia stricta*. Pour ce faire, 50ml d'extrait végétal ont été mélangés à 50ml d'une solution de nitrate d'argent (AgNO₃) à 1% (m/v). Le mélange a été maintenu sous agitation continue (VELP Scientifica, Italie) à 600rpm et à une température de 70°C pendant 3 heures. À l'issue de la réaction, le pH de la solution a été ajusté à 12,5. Les suspensions obtenues ont ensuite été placées dans une étuve à 50°C jusqu'à évaporation complète du solvant. Enfin, les nanoparticules sèches ont été calcinées à 300°C pendant 3heures à l'aide d'un four programmable (Nabertherm GmbH, Allemagne), le protocole suivi est illustré dans la **Figure 03**.

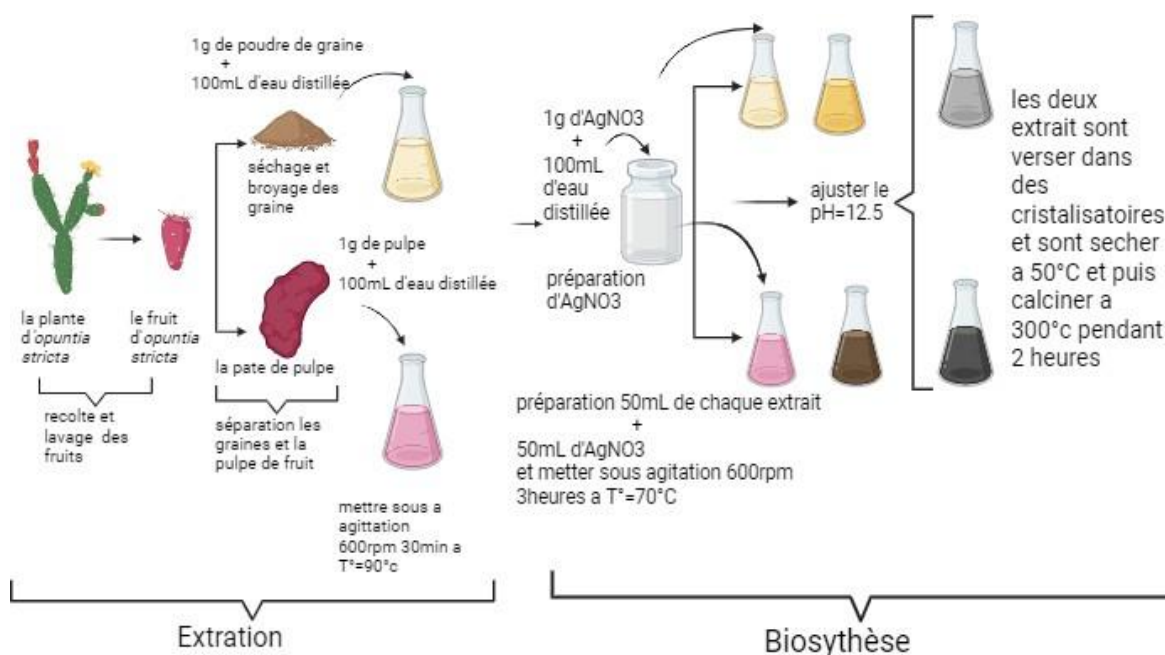


Figure 3 : Schéma de la préparation des extraits de graines et de la pulpe et la procédure de la biosynthèse des nanoparticules d'argent

II.4. Caractérisation par spectrophotométrie UV-Visible

La spectroscopie UV-Visible est une méthode clé pour confirmer la formation des nanoparticules d'argent (AgNPs) grâce à l'apparition d'un pic caractéristique lié à la résonance plasmonique de surface. Dans cette étude, un spectrophotomètre (Rayleigh/UV-1800) a été utilisé pour analyser des échantillons redispersés dans l'eau d'une concentration (1mg/ml) sur une plage de 200 à 800nm. L'apparition d'un pic d'absorption dans la zone visible (400-450) valide la réduction des ions Ag^+ et la formation des AgNPs (Al-Zaban et

II.5. al. 2021 ; Vijayaram et al. 2024).

Caractérisation par spectrophotométrie FTIR

L'analyse FTIR a été réalisée pour déterminer les constituants chimiques essentiels responsables de la synthèse et de la stabilisation des nanoparticules.

La spectroscopie FTIR permet principalement d'identifier les acides phénoliques et les groupes fonctionnels des alcaloïdes, qui agissent comme agents de revêtement pour les nanoparticules d'argent, facilitant ainsi leur formation. Le spectre enregistré a révélé plusieurs pics, mettant en évidence la complexité des composants biologiques impliqués (Farooq et al., 2023). Les AgNPs biosynthétisées ont été analysées à l'aide d'un spectrophotomètre FTIR (Shimadzu /UV-2000, Japon). Pour cela des pastilles ont été

préparées en mélangeant les nano particules avec du bromure de potassium (KBr) dans un rapport massique de (2 : 98). Le mélange a ensuite été compressé à l'aide d'une presse hydraulique à une pression de 60KDa pendant 2 minutes. La pastille obtenue a été placée dans le porte-échantillon du spectrophotomètre, et l'analyse a été effectuée dans la plage spectrale de 4000 à 400 cm^{-1} , avec une vitesse de balayage de 1 $\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$.

Dosage des composés phénoliques totaux

Les composés phénoliques sont les métabolites secondaires les plus répandus chez les plantes. Ils vont de petites molécules simples à des polyphénols complexes, souvent liés à des sucres ou des acides organiques, ils jouent un rôle essentiel dans la croissance, la défense, la signalisation et la coloration des organes végétaux (Zeghib et *al.*, 2022).

Le dosage des composés phénoliques totaux a été réalisé selon la méthode de (Zeghib, Boudjouan, et Bachir-bey 2022). Pour cela, 200 μL d'extrait (extrait brute et les nanoparticules synthétisés à partir des deux extraits dissous dans de l'eau distillée à une concentration de 1 mg/ml) sont mélangés à 1 ml de réactif de Folin-Ciocalteu (0, 1 N). Après une incubation de 5 minutes, 0, 8 ml d'une solution de carbonate de sodium à 7, 5% est ajoutée. Le mélange est ensuite incubé à 50°C pendant 5 minutes.

L'absorbance est finalement mesurée à 760 nm à l'aide d'un spectrophotomètre, l'acide gallique est utilisé comme standard (voir annexe), et les résultats ont été exprimé en mg équivalent d'acide gallique par gde nanoparticule ou de matières sèches (mg EAG/g NPs ou mg EAG/g MS), la réaction se déroule entre les composés phénoliques présents dans les échantillons et le réactif folin-ciocalteu en cédant des électrons aux métaux qu'il contient (molybdène, tungstène).

Dosage des flavonoïdes

Le protocole suivi est de Zeghib, Boudjouan, Vasconcelos, et *al.*, (2022) qui consiste à mélanger 125 μL d'extrait avec 375 μL d'éthanol. On ajoute ensuite 25 μL de chlorure d'aluminium (10%, *m/v*) et 25 μL d'acétate de potassium 1M. Le volume final est ajusté à 750 μL avec de l'eau distillée. Le mélange est ensuite agité et incubé pendant 40 minutes à l'obscurité. Finalement, l'absorbance de la solution est mesurée à 415nm. Le standard utilisé est la quercétine (voir annexe) ; et les résultats ont été exprimé en mg équivalent quercétine par g de nanoparticule ou de matières sèches (mg EQ/g NPs ou mg EQ/g MS).

Evaluation de l'activité antioxydants des nanoparticules d'argent

L'activité antioxydante des nanoparticules d'argent biosynthétisées a été testé par les méthodes ABTS, FRAP, et NO.

Détermination de l'activité antioxydants de l'extrait par la méthode

II.8. ABTS

La méthode ABTS de Re et *al.*, (1999) repose sur la réduction du radical libre ABTS^{•+} (acide 2, 2'-azino-bis-3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonique) pour cela les nanoparticules synthétisé sont été solubilisés à une concentration de 1 mg/ml, puis 100 µL d'extrait sont mélangés avec 1 ml de la solution ABTS, le mélange est incubé pendant 7 minutes, puis l'absorbance est mesurée à 734nm ; une courbe d'étalonnages (voir annexe) était faite pour convertir les absorbances en terme de mg équivalent trolox (un analogue hydro soluble de la vitamine E); et les résultats ont été exprimé en mg équivalent trolox par g de nanoparticule ou de matières sèches (mg E trolox/g NPs ou mg E trolox/g MS).

Le test de FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power)

II.8.2.

La méthode FRAP (Ferric Reducing Antioxydant Power) repose sur la réduction des complexes Fe³⁺-TPTZ, formés à partir de 2, 4, 6-tripyridyl-s-triazine (TPTZ) et de chlorure ferrique hexahydraté (FeCl₃·6H₂O). Initialement incolores ou légèrement brunâtres, ces complexes se transforment en composés ferreux (Fe²⁺) bleu intense après réduction, permettant ainsi la quantification du pouvoir antioxydant (Ruttkay-Nedecký et al. 2018).

Le protocole utilisé est de Benzie et Strain (1999) qui consiste à mélanger 950 µL de solution FRAP (préparée à partir de 10 ml de solution de TPTZ (10Mm), 10 ml de FeCl₃ (20Mm) et 100 ml de tampon acétate (300Mm) à pH 3, 6). L'absorbance est mesurée à 593 nm pour déterminer l'activité antioxydante des nanoparticules d'argent ; l'étalon de référence utilisé est le Trolox (voir annexe) et les résultats ont été exprimé en mg équivalent trolox par g de nanoparticule ou de matières sèches (mg E trolox/g NPs ou mg E trolox/g MS).

Evaluation de l'activité d'oxyde nitrique (NO)

Les radicaux NO•, générés à partir de nitro-prussiate de sodium en solution aqueuse à pH physiologique, réagissent avec l'oxygène moléculaire pour former des ions nitrite (Bhakya et *al.*, 2016) Le protocole d'inhibition de l'oxyde nitrique (NO) de Lopes et *al.*, (2012) débute par la préparation d'un mélange réactionnel composé de 450 µl de SNP

(nitroprussiate de sodium, 6 mg/ml) dissous dans un tampon phosphate KH_2PO_4 (100mM, pH=7) et de 450 μL d'extrait. Ce mélange est ensuite incubé à température ambiante pendant 1h sous lumière. Après cette incubation, 450 μL de réactif de Gries sont ajoutés, et la solution est de nouveau incubée pendant 10 minutes, cette fois-ci à l'obscurité. Enfin, l'absorbance est mesurée à 562nm. Le pourcentage d'inhibition est exprimé par la formule suivante :

$$\text{Taux d'inhibition (\%)} = [(A(\text{contrôle}) - A(\text{Echantillon}) / A(\text{contrôle})) \times 100$$

Evaluation de l'activité antimicrobienne des AgNPs

II.9. L'activité antimicrobienne des AgNPs est testée sur trois types de différentes souches microbiennes incubées 2h à 4 °C : *Staphylococcus aureus* Gram (+) et *Escherichia coli* Gram (-) et *Candida albicans* (levure) et comme témoin on a utilisé AgNO_3 de concentration 10Mm.

II.10. L'évaluation de la sensibilité de trois souches bactériennes aux AgNPs a été réalisée par la méthode des puits sur milieu Mueller-Hinton. Après une culture de 18h à 37°C, les suspensions bactériennes ont été étalées sur des boîtes de Pétri. Pour chaque souche (*Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* et *Candida albicans*), deux boîtes ont été utilisées une pour les AgNPs dérivées des graines et l'autre pour celles dérivées de la pulpe, comportant quatre puits recevant respectivement : 50 μL d'extrait brut (100 mg/ml), d'AgNPs non calcinées, d'AgNPs calcinées et d' AgNO_3 (1 mg/ml, témoin). La lecture des résultats (diamètres d'inhibition et profil des sensibilités) a été réalisée après incubation des boites pendant 24h à 37°C.

Activité antidiabétique

Pour évaluer l'effet inhibiteur des nanoparticules d'argent sur l' α -amylase, une enzyme clé du métabolisme glucidique, en utilisant la méthode colorimétrique DNS. Ce teste a été réalisé selon le protocole de Miller (1959), 200 μL d'extrait (AgNPs) sont mélangés à 200 μL d'amidon, puis incubés 10 minutes à température ambiante à l'obscurité. Après cette étape, 200 μL d'enzyme sont ajoutés et le mélange est incubé 10 minutes supplémentaires à 37°C. On ajoute ensuite 400 μL de réactif DNS avant de placer la solution au bain-marie à 100°C pendant 5 minutes. Après refroidissement, 200 μL de la solution sont prélevés et dilués avec 800 μL d'eau distillée. L'absorbance du mélange est finalement mesurée à 540 nm. Les résultats sont exprimés par pourcentage d'inhibition. Le pourcentage d'inhibition est exprimé par la formule suivante :

$$\text{Taux d'inhibition (\%)} = [(A(\text{contrôle}) - A(\text{Echantillon}) / A(\text{contrôle})] \times 100$$

L'analyse statistique

L'analyse statistique des résultats a été réalisée à l'aide du test de comparaison de moyennes LSD (Least Significant Difference), appliqué aux données organisées à l'aide du logiciel (statistica).

II.11.

.

Chapitre III
Résultats et discussion

Biosynthèse des nanoparticules d'argent

III.1. La synthèse des nanoparticules d'argent (AgNPs) à partir de la pulpe d'*O.stricta* a été confirmée visuellement par un changement de couleur caractéristique du milieu réactionnel, passant d'un rose foncé à un brun trouble après trois heures d'agitation continue à température contrôlée. Cette coloration s'est intensifiée pour devenir brun foncé après l'ajustement du pH en milieu basique.

Dans les mêmes conditions de température, d'agitation et de durée, l'extrait de graines d'*Opuntia stricta* a également montré une formation de nanoparticules d'argent, traduite par un changement de couleur du milieu initialement transparent vers un jaune pâle après l'ajout du nitrate d'argent (AgNO_3), puis vers un gris foncé après ajustement du pH. Cette évolution de couleur est généralement considérée comme le premier indicateur visuel d'une biosynthèse réussie des AgNPs, comme l'ont rapporté (Padilla-Camberos et al., 2021).

La biosynthèse des nanoparticules métalliques débute par la dissociation du sel en ions métalliques, qui sont ensuite réduits en particules élémentaires grâce à des composés réducteurs issus des extraits végétaux. Ces extraits contiennent des biomolécules actives telles que les flavonoïdes, acides phénoliques ou protéines, riches en groupes fonctionnels ($-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{COOH}$), capables à la fois de réduire les ions métalliques et de stabiliser les nanoparticules formées, sous l'effet de la température, ces molécules facilitent la nucléation, puis contrôlent la croissance et la forme des nanoparticules. En se fixant à leur surface, elles empêchent leur agglomération et assurent leur stabilité colloïdale. Ce mécanisme naturel permet d'obtenir des nanoparticules bien dispersées, de taille contrôlée, sans recourir à des agents chimiques toxiques (Marslin et al., 2018).

Caractérisation par spectroscopie UV-Visible

L'analyse par spectroscopie UV-Visible a permis de confirmer la formation des AgNPs (**Figure 4**). Pour les extraits de pulpe, le maximum d'absorption est observé à environ 434nm, tandis que celui des extraits de graines se situe légèrement plus bas, autour de 426nm. Cette différence de position du pic peut être liée à des variations de taille, de forme ou de distribution des nanoparticules formées, influencées par la nature biochimique des extraits utilisés. Ces résultats sont en accord avec les observations des travaux antérieurs de (Anandalakshmi et al., 2016).

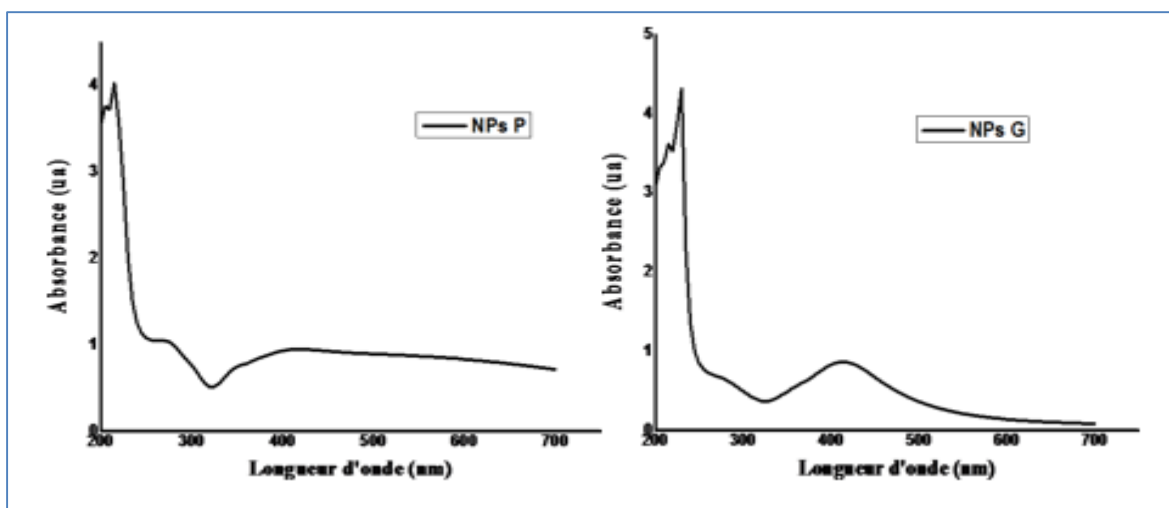


Figure 4 : Spectres UV-visible des NPsP et NPsG.

Caractérisation par spectroscopie infrarouge

III.3. Les résultats des spectres infrarouges des échantillons de nanoparticules d'argent et des extraits de graine et de pulpe ; ont été récupérés en mode transmittance qui se trouvent dans le tableau III et la **Figure 05**.

Tableau III : Attribution des bandes FTIR des nano particules et des extraits bruts d'*Opuntia stricta*

Les bandes observées (Cm-1)	L'attribution
3344cm ⁻¹ , 3344cm ⁻¹ 3404cm ⁻¹ , 3370cm ⁻¹	Correspondent à la vibration d'étirement de-OH (groupe hydroxyle) indiquent la présence de groupes fonctionnels O-H peut être attribuée à la liaison O-H des saponines et des tanins (Bonnia et <i>al.</i> , 2016).
2930cm ⁻¹ , 2927cm ⁻¹ 2900cm ⁻¹	Sont associées aux vibrations d'étirement de l'alkyle C-C (V. Singh et <i>al.</i> , 2015).
1600cm ⁻¹ , 1650cm ⁻¹	Dus à la vibration d'étirement de C=O (groupe carbonyle) indique les liaisons amide des protéines qui sont les ligands de coiffage des nanoparticules (Marukurti et <i>al.</i> , 2025).
1300cm ⁻¹	La bande observée peut être liée à la vibration d'étirement de C-O- (ester Aromatique) (Ronak Kumar et <i>al.</i> , 2023).
1000cm ⁻¹	Est attribué aux vibrations de flexion de l'as ² C-H de salcènes et des cycles aromatiques (Yousefbeyk et <i>al.</i> , 2022).

582cm ⁻¹ , 600cm ⁻¹	Le spectre infrarouge des AgNPs présente une forte similitude avec leurs extraits bruts, bien que de légers décalages dans les positions des bandes a été observé et une nouvelle bande apparait qui est attribuée à la formation des nanoparticules (Hashmi et <i>al.</i> , 2024).
---	---

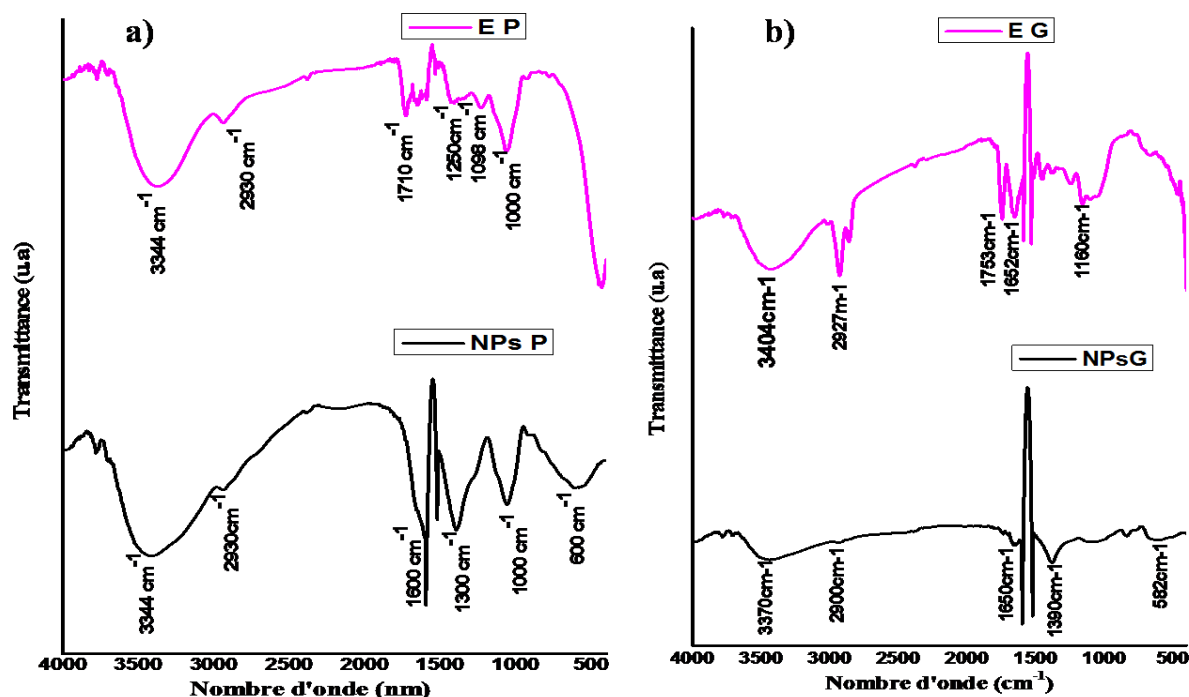


Figure 5 : Spectres FTIR des NPs P et NPs G et des extraits bruts de la pulpe et des graines.

III.4.

Dosage des composés phénoliques totaux

Les résultats obtenus pour les extraits bruts et les nanoparticules synthétisés à partir d'*Opuntia stricta* sont illustrés dans la **Figure 06**. En comparant les différents échantillons, il apparaît que les nano particules issues de la pulpe (NPs P et NPs P C) présentent une teneur en composés phénoliques plus élevée que celles obtenues à partir des graines (NPs G et NPs G C). Cette différence peut être directement reliée à la richesse phénolique de l'extrait végétal d'origine. En effet, comme le montre l'histogramme de la **Figure 6b**, l'extrait brut de pulpe (E P) contient une concentration de 20,59 mg EAG/g MS, contre seulement 1,49 mg EAG/g MS pour l'extrait de graine (E G), différence qui s'est avérée statistiquement significative.

D'un autre côté, la comparaison entre les nanoparticules calcinées et non calcinées révèle une augmentation de la teneur en composés phénoliques après calcination, aussi bien

pour les échantillons issus de la pulpe (NPs P C > NPs P) que pour ceux issus des graines (NPs G C > NPs G). Cette observation suggère que le traitement thermique pourrait favoriser la fixation ou la stabilisation des biomolécules à la surface des nanoparticules, réduisant leur perte ou leur dégradation.

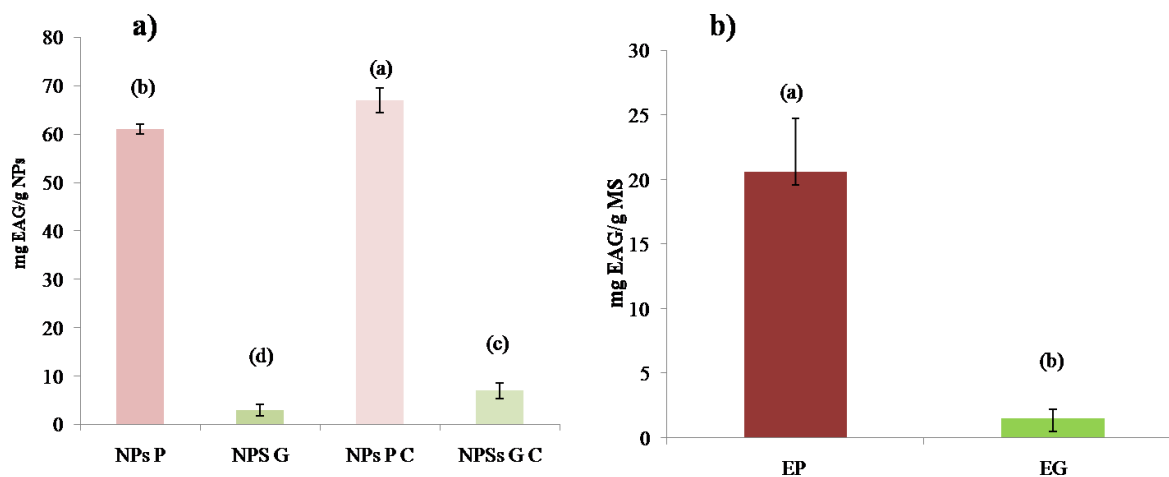


Figure 6 : Histogramme de teneur en composés phénoliques (a) des NPs calcinées et non calcinées ; (b) de l'extrait brut de graine et de pulpe d'*Opuntia stricta*

III.5. Dosage des flavonoïdes

La quantité en flavonoïde dans l'extrait d'*Opuntia stricta* est déterminée à l'aide de l'équation de régression établis à partir de la courbe d'étalonnage réalisée avec la quercitrine montre que l'extrait brut et les nanoparticules biosynthétisées ne contiennent pas de flavonoïdes détectables.

III.6.1.

Activités antioxydants

Inhibition du radical ABTS

La capacité antioxydante des extraits bruts et des nanoparticules d'argent synthétisées à partir d'*Opuntia stricta* a été évaluée par le test ABTS. Les concentrations sont calculées à l'aide d'une équation de régression obtenue à partir d'une courbe d'étalonnage réalisée avec le Trolox. Les résultats, exprimés en mg équivalent Trolox/g de matière sèche (mg ET/g MS), sont présentés dans la **Figure 07**. L'analyse des extraits bruts montre que l'extrait de pulpe (E P) possède une capacité antioxydante supérieure à celle de l'extrait des graines (E G), avec des concentrations respectives de 5,31 et 2,44 mg ET/g MS. Cette différence, bien que modérée, est statistiquement significative.

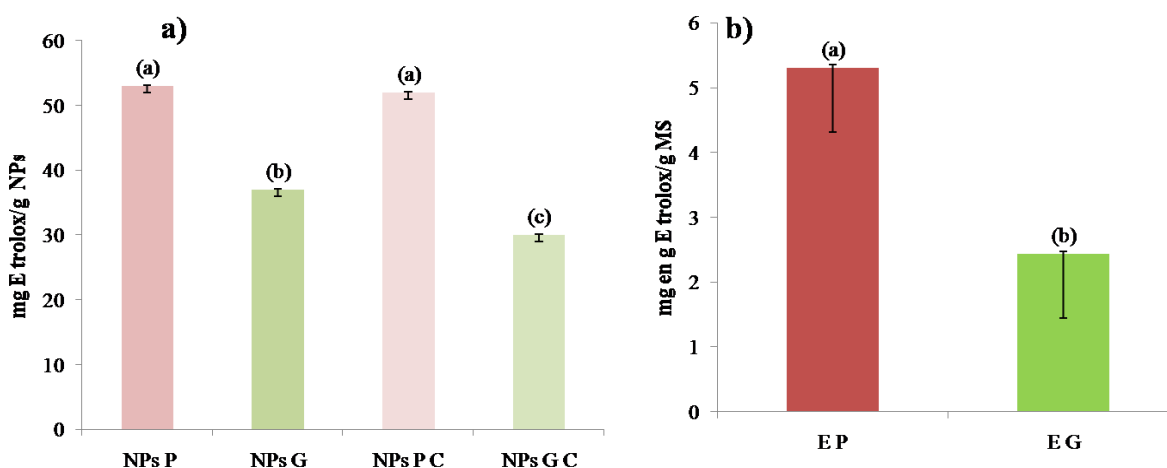


Figure 7 : Concentrations de l'activité antioxydante (ABTS) (a) des NPs d'argent (b) de l'extrait brut de la pulpe et des graines d'*Opuntia stricta*.

En termes de pourcentage d'inhibition du radical $ABTS^{\bullet+}$, la **Figure 08** a illustré que les NPs P (pulpe calcinée et non calcinée) présentent l'activité antioxydante la plus élevée. Du côté des nanoparticules issues des graines, les NPsGC (calcinées) montrent une activité antioxydante supérieure à celle des NPsG (non calcinées), bien que globalement inférieure à celle des nanoparticules issues de pulpe. Ces différences sont statistiquement significatives.

Concernant les extraits bruts, l'extrait de pulpe (EP) se distingue par un fort pouvoir inhibiteur du radical $ABTS^{\bullet+}$, tandis que l'extrait de graine (EG) présente une faible activité antioxydants, comme le confirme l'analyse statistique.

Ces observations concordent avec les résultats rapportés par Erenler et *al.*, (2021) qui ont attribué l'activité antioxydants de certains extraits végétaux à la présence de composés phytochimiques, notamment les saponines stéroïdiennes. Ces dernières sont reconnues pour leur capacité à donner des électrons, jouant ainsi un rôle clé dans le piégeage des radicaux libres. Leur action pourrait être renforcée par un effet synergique avec les propriétés redox des nanoparticules d'argent (AgNPs), augmentant leur efficacité antioxydante.

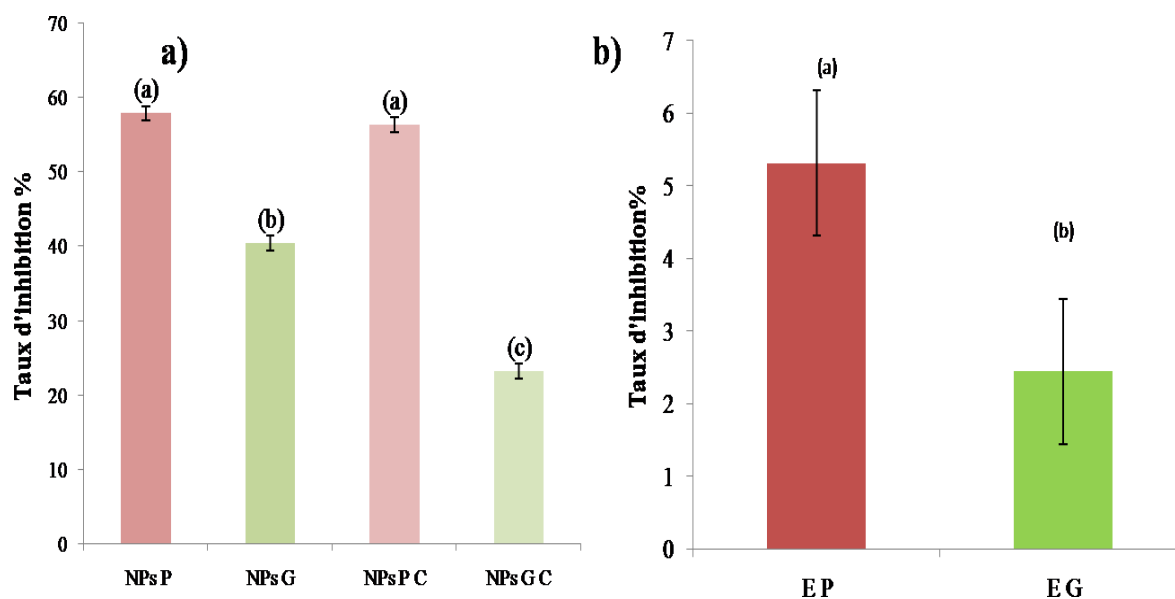


Figure 8 : Taux d'inhibition du radical libre ABTS (a) par les NPs d'argent(b)par l'extrait brut de la pulpe et des graines d'*opuntia stricta*.

Test de FRAP

III.6.2.

L'évaluation de l'activité antioxydante FRAP des extraits bruts et des nanoparticules d'*Opuntia stricta* a été déterminée à l'aide d'une courbe d'étalonnage établie avec le Trolox. Les résultats sont exprimés en mg équivalents Trolox par gramme de matière sèche (mg E Trolox/g MS).

L'histogramme présenté en **Figure 09** illustre la capacité réductrice des nanoparticules vis-à-vis du fer ferrique. Il en ressort que les nanoparticules issues de la pulpe (NPs P et NPs P C) présentent une activité antioxydants similaire, indépendamment de la calcination. De manière comparable, les nanoparticules dérivées des graines (NPs G et NPs G C) affichent également des valeurs voisines entre échantillons calcinés et non calcinés. Ces observations sont validées par l'analyse statistique, qui ne montre pas de différences significatives entre les conditions de calcination au sein d'un même type d'extrait.

En revanche, la comparaison entre les nanoparticules de pulpe et de graine révèle une activité FRAP nettement plus élevée pour les échantillons issus de la pulpe, suggérant une meilleure efficacité réductrice.

Par ailleurs, l'histogramme de la **Figure 09b** présente les concentrations en équivalents Trolox des extraits bruts. Contrairement aux résultats observés pour les nanoparticules, l'extrait brut de graine (EG) affichent une teneur antioxydants plus élevée que celui de la

pulpe (EP). Cette différence est statistiquement significative, indiquant que les composés antioxydants présents dans l'extrait de graines soient plus nombreux ou plus réactifs, bien qu'ils ne soient pas nécessairement transférés de manière optimale à la surface des nanoparticules au cours de la biosynthèse.

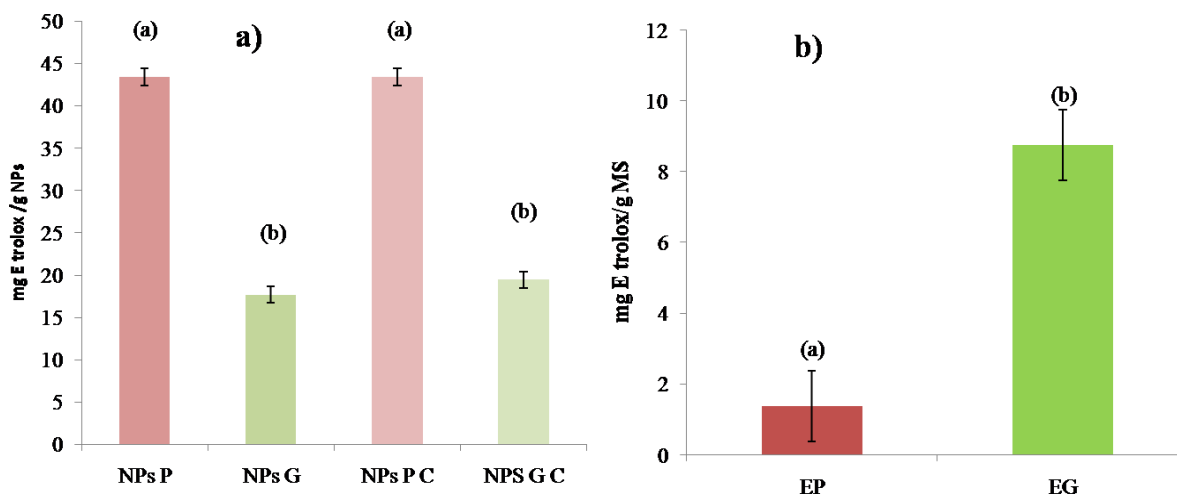


Figure 9 : Concentration de l'activité antioxydante (test FRAP) (a) des NPs d'argent (b) des extraits bruts de la pulpe et des graines d'*Opuntia stricta*.

III.7. **Activité antioxydante par le test NO (oxyde nitrique)**

L'histogramme présenté en **Figure 10** illustre le pourcentage d'inhibition du radical libre de l'oxyde nitrique en fonction des différents types de nanoparticules issues de la pulpe et des graines d'*Opuntia stricta*. En comparant les nanoparticules issues de la pulpe, il apparaît que les NPs non calcinées (NPs P) présentent un taux d'inhibition plus élevé, légèrement supérieur à celui des NPs calcinées (NPs P C). Du côté des nanoparticules dérivées des graines, une tendance inverse est observée, les NPs calcinées (NPs G C) affichent un taux d'inhibition nettement plus faible que les NPs non calcinées (NPs G). Ces observations sont confirmées par l'analyse statistique, soulignant l'impact de la calcination sur l'activité antioxydante des nanoparticules, en particulier dans le cas des extraits de graines.

L'histogramme présenté en **Figure 10** met en évidence le pourcentage d'inhibition du radical libre de l'oxyde nitrique par les extraits bruts de graine et de pulpe d'*Opuntia stricta*. Il en ressort que l'extrait de graine (E G) présente un taux d'inhibition significativement plus élevé que celui de l'extrait de pulpe (E P), comme le confirme l'analyse statistique.

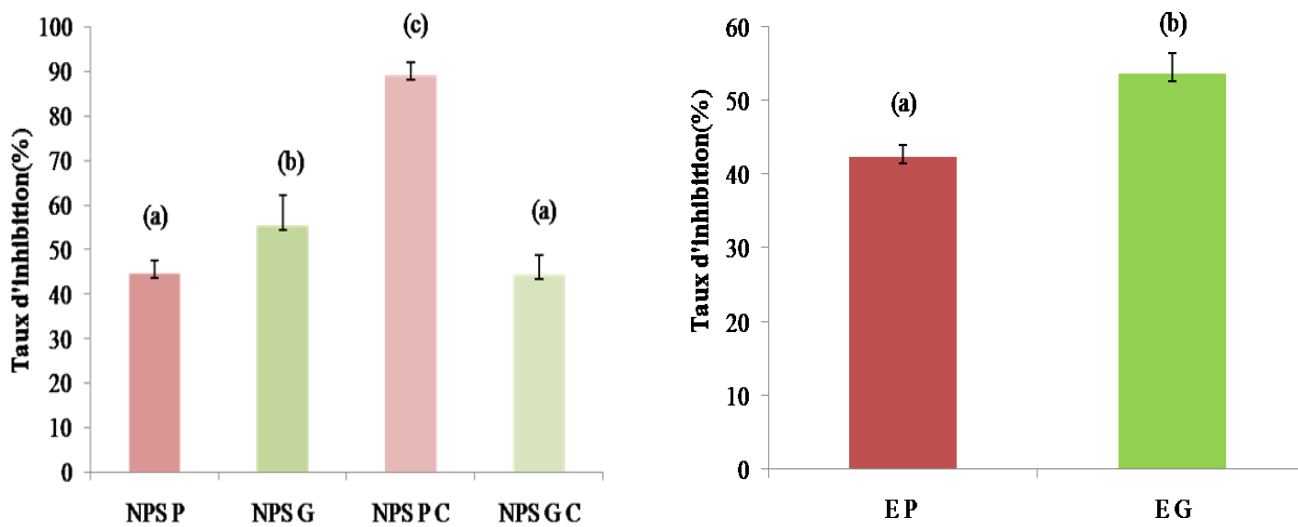


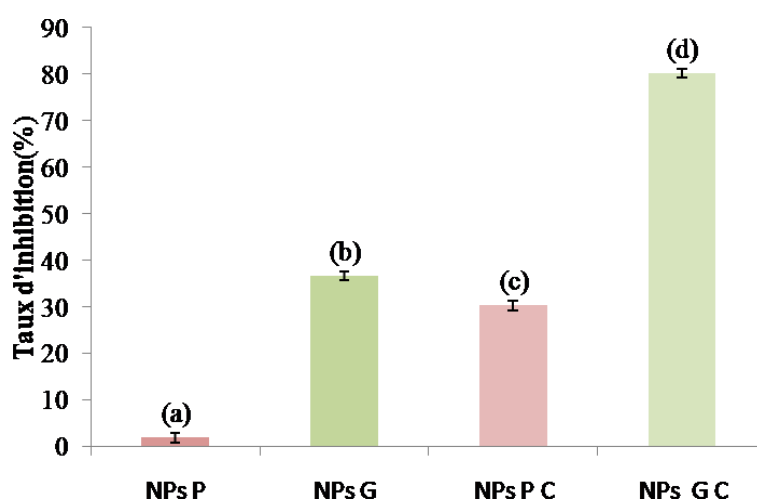
Figure 10 : Histogramme de l'activité antioxydante (test NO) des NPs d'argent

Figure 11 : Histogramme de taux d'inhibition du radical libre oxyde nitrique par l'extrait brut de graine et de pulpe d'*Opuntia stricta*.

III.8. Activité antidiabétique

L'histogramme illustré dans la **Figure 12** présente le taux d'inhibition de l'enzyme α -amylase par les nanoparticules d'argent (AgNPs) synthétisées à partir des extraits de pulpe et de graine d'*Opuntia stricta*. Les résultats révèlent que les nanoparticules de graine calcinées (NPs G C) affichent le plus fort pourcentage d'inhibition, surpassant significativement les NPs G non calcinées. En comparaison, les nanoparticules issues de la pulpe présentent une activité inhibitrice plus modeste, bien que les NPs P C (calcinées) se montrent plus actives que les NPs P non calcinées. Ces différences sont statistiquement significatives, suggérant que la calcination améliore le potentiel inhibiteur, et donc l'activité antidiabétique potentielle, des nanoparticules, en particulier celles issues des graines.

Les résultats de l'étude de Abbigeri et *al.*, (2025) indiquent que les AgNPs présentent une activité significative d'inhibition de la α -amylase. L'étude démontre que les AgNPs inhibent l'activité de la α -amylase plus efficacement avec des taux d'inhibition allant de 35,94 % à 78,42 %. Elles améliorent également l'absorption du glucose par les cellules de levure, et agissent en inhibant les enzymes digestives, en activant les voies de signalisation de l'insuline et en réduisant le stress oxydatif. Les AgNPs ont démontré une inhibition significative de la α -amylase. Ces résultats indiquent que les nanoparticules synthétisées pourraient constituer des agents antidiabétiques supérieurs pour le contrôle des enzymes digestives des glucides, ce qui pourrait donner un nouveau traitement efficace contre le diabète.



III.9. **Figure 12 :** Activité d'inhibition d'enzyme α -amylase par les NPs d'argent

Activité antimicrobienne

Les nanoparticules d'argent (AgNPs) synthétisées à partir d'*Opuntia stricta* montrent une activité antibactérienne significative contre les souches testées dont on a remarqué un meilleur effet pour les AgNPs synthétisées à partir de la pulpe, et particulièrement la pulpe calcinée dont on a observé des zones d'inhibitions plus importantes que celles des graines, ces résultats indiquent clairement que les AgNPs synthétisés ont des propriétés antimicrobiennes en agissant contre plusieurs microorganismes : le champignon *Candida albicans* et les bactéries (*S. aureus*) Gram+ et (*E. coli*) Gram- .

Les tests démontrent que les nanoparticules d'argent (AgNPs) sont plus efficaces contre les bactéries Gram- (*E. coli*) que les bactéries Gram+ (*S. aureus*) et les champignons (*C. albicans*) voir le **Tableau IV** et la **Figure 13** :

Tableau IV : Comparaison des zones d'inhibition (mm) contre *E. coli* (Gram-), *S. aureus* (Gram+) et *C. albicans*.

Agent Testé	Bactérie Gram- (<i>E. coli</i>)	Bactérie Gram+ (<i>S. aureus</i>)	Champignon (<i>C. albicans</i>)
NPs P (non calcinées)	25 mm	22 mm	22 mm
NPs P C (calcinées)	29 mm	27 mm	27 mm

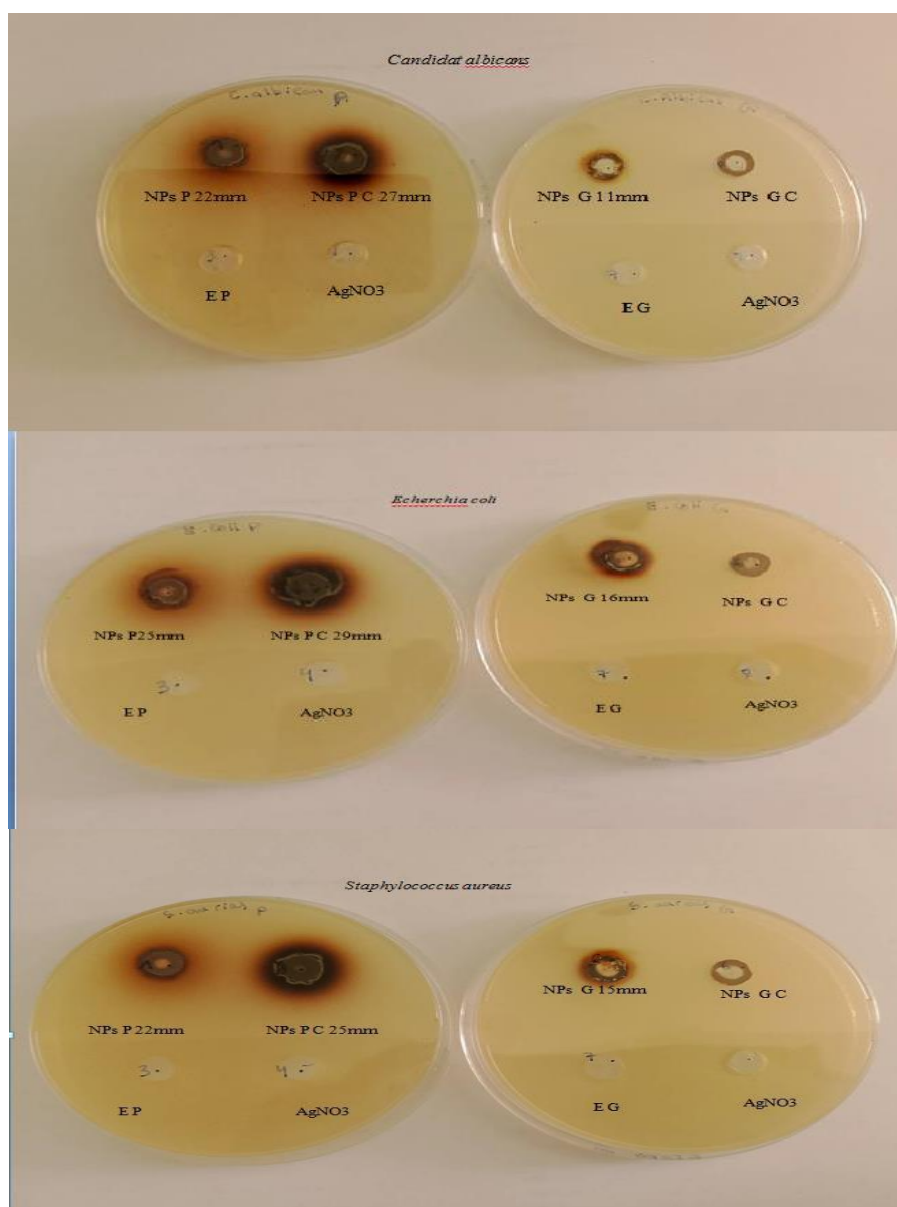


Figure 13 : Diamètre des zones d'inhibition de *C. albicans*, *S. aureus*, *E. coli* des AgNPs et des extraits bruts d'*O. stricta*

Ces résultats vont dans le même sens que la littérature selon Yousefbeyk et *al.*, (2022) les nanoparticules d'argent (AgNPs) présentent une forte activité antibactérienne grâce à leur petite taille et leur distribution homogène, qui leur permettent de pénétrer facilement les parois bactériennes et d'altérer leurs fonctions vitales. Leur action est renforcée par la génération d'espèces réactives de l'oxygène (ROS), les AgNPs agissent mieux sur les bactéries à paroi fine (Gram négatif) que sur celles à paroi épaisse (Gram positif), qui résistent plus. Les mécanismes d'action impliquent principalement la libération d'ions Ag^+ qui se fixent aux charges négatives des parois cellulaires, dénaturent les protéines membranaires et provoquent la lyse cellulaire. Ils interagissent avec les groupes soufrés des protéines et les composés phosphorés de l'ADN, causant des dommages irréversibles. D'autres effets incluent l'inhibition des enzymes respiratoires, la perturbation de la division cellulaire et l'induction d'un stress oxydatif via la production de ROS, contribuant ainsi à leur puissant effet bactéricide polyvalent.

Il a été prouvé que les AgNPs provoquent une dégradation des membranes cellulaires, prolongeant la phase de croissance et altérant ainsi le processus de bourgeonnement chez *C. albicans* (Nagime et *al.*, 2024).

Conclusion

Conclusion

Dans cette étude, des nanoparticules d'argent (AgNPs) ont été synthétisées par voie verte à partir des extraits de pulpe et de graines d'*Opuntia stricta*, selon une approche écoresponsable et respectueuse de l'environnement.

Les caractérisations par UV-Visible et FTIR ont confirmé la formation et la stabilisation des nanoparticules, tandis que les analyses biologiques ont mis en évidence leur forte activité antioxydante, notamment par les tests FRAP, ABTS et NO, ainsi que leur capacité d'inhibition de l'enzyme α -amylase avec un pourcentage de 80% par les nanoparticules des graines, suggérant un potentiel antidiabétique important. Par ailleurs, ces AgNPs ont démontré une activité antibactérienne significative contre des pathogènes tels que *S. aureus*, *E. coli* et *C. albicans*, renforçant leur potentiel en applications antimicrobiennes.

Les résultats montrent également que la source (pulpe ou graines) et le processus de calcination influencent l'efficacité biologique des nanoparticules, ce qui ouvre la voie à une optimisation future en fonction des applications ciblées.

En conclusion, les résultats obtenus soulignent l'efficacité de la biosynthèse des AgNPs à partir d'*Opuntia stricta*, tant sur le plan structural que biologique. Ces nanoparticules présentent un fort potentiel pour des applications biomédicales, notamment en tant qu'agents antioxydants et antidiabétiques naturels ainsi que antimicrobien, tout en valorisant une ressource végétale locale.

Les perspectives futures de cette étude incluent l'optimisation des conditions de biosynthèse pour obtenir des AgNPs avec une taille, une morphologie et une stabilité améliorées, maximisant ainsi leurs propriétés biologiques, ainsi que la réalisation d'études *in vivo* pour évaluer leur efficacité thérapeutique, leur biodistribution et leur sécurité. Il serait utile d'évaluer leur efficacité contre d'autres bactéries pathogènes plus résistantes, afin de mieux définir leur spectre d'action. Par ailleurs, leur potentiel dans le domaine cosmétique mérite d'être exploré, en évaluant leur stabilité et leur innocuité dans des formulations de soins. La capacité des AgNPs à agir contre des cellules cancéreuses pourrait aussi être étudiée pour envisager des applications anticancéreuses innovantes. Enfin, leur activité sur d'autres enzymes telles que la lipase pourrait ouvrir de nouvelles avenues dans la gestion du

Conclusion

métabolisme lipidique et la santé métabolique.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Abbigeri, Megha B., Bothe Thokchom, Sapam Riches Singh, Santosh Mallikarjun Bhavi, B. P. Harini, et Ramesh Babu Yarajarla. 2025. « Antioxidant and anti-diabetic potential of the green synthesized silver nanoparticles using *Martynia annua* L. root extract ». *Nano TransMed* 4: 100070. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2790676025000019>.

Affi, Wissal, Abdalla A. Mohamed, Neji Gharsallah, Iryna Smetanska, et Lazhar Zourgui. 2024. « Phytochemicals, antioxidant, and antimicrobial activities of *Opuntia stricta* fruits peel ». *Open Veterinary Journal* 14 (10): 2642-50. <https://doi.org/10.5455/OVJ.2024.v14.i10.14>.

Al-Zaban, Mayasar I., Mohamed A. Mahmoud, et Maha A. AlHarbi. 2021. « Catalytic degradation of methylene blue using silver nanoparticles synthesized by honey ». *Saudi Journal of Biological Sciences* 28 (3): 2007-13. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319562X21000036>.

Anandalakshmi, K., J. Venugobal, et V. Ramasamy. 2016. « Characterization of Silver Nanoparticles by Green Synthesis Method Using *Petalium Murex* Leaf Extract and Their Antibacterial Activity ». *Applied Nanoscience* 6 (3): 399-408. <https://doi.org/10.1007/s13204-015-0449-z>.

Bedlovičová, Zdenka, Imrich Strapáč, Matej Baláž, et Aneta Salayová. 2020. « A Brief Overview on Antioxidant Activity Determination of Silver Nanoparticles ». *Molecules* 25 (14): 14. <https://doi.org/10.3390/molecules25143191>.

Benzie, Iris F. F., et J. J. Strain. 1999. « [2] Ferric reducing/antioxidant power assay: Direct measure of total antioxidant activity of biological fluids and modified version for simultaneous measurement of total antioxidant power and ascorbic acid concentration ». In *Methods in Enzymology*, vol. 299. Oxidants and Antioxidants Part A. Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99005-5](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99005-5).

Bhakya, S., S. Muthukrishnan, M. Sukumaran, et M. Muthukumar. 2016. « Biogenic Synthesis of Silver Nanoparticles and Their Antioxidant and Antibacterial Activity ». *Applied Nanoscience* 6 (5): 755-66. <https://doi.org/10.1007/s13204-015-0473-z>.

Bonnia, N. N., M. S. Kamaruddin, M. H. Nawawi, S. Ratim, H. N. Azlina, et E. S.

Références bibliographiques

Ali. 2016. « Green Biosynthesis of Silver Nanoparticles Using ‘Polygonum Hydropiper’ and Study its Catalytic Degradation of Methylene Blue ». *Procedia Chemistry*, 5th International Conference on Recent Advances in Materials, Minerals and Environment (RAMM) & 2nd International Postgraduate Conference on Materials, Mineral and Polymer (MAMIP), vol. 19 (janvier): 594-602. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.058>.

Boudjouan, Fares, Walid Zeghibib, João Carneiro, et al. 2022. « Comparison Study on Wild and Cultivated Opuntia sp.: Chemical, Taxonomic, and Antioxidant Evaluations ». <https://www.mdpi.com/2077-0472/12/11/1755>.

Chandrasekaran, Senthilkumar, Shanmugam Anusuya, et Venkattappan Anbazhagan. 2022. « Anticancer, anti-diabetic, antimicrobial activity of zinc oxide nanoparticles: A comparative analysis ». *Journal of Molecular Structure* 1263 (septembre): 133139. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.133139>.

Dhaka, Anita, Suresh Chand Mali, Sheetal Sharma, et Rohini Trivedi. 2023. « A review on biological synthesis of silver nanoparticles and their potential applications ». *Results in Chemistry* 6 (décembre): 101108. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.101108>.

Dikshit, Pritam Kumar, Jatin Kumar, Amit K. Das, et al. 2021. « Green Synthesis of Metallic Nanoparticles: Applications and Limitations ». *Catalysts* 11 (8): 8. <https://doi.org/10.3390/catal11080902>.

Erenler, Ramazan, Radia Chaoui, Ilyas Yildiz, et al. 2023. « Biosynthesis, Characterisation, and Antioxidant Activity of Silver Nanoparticles using Schinus molle L. » *Trends in Sciences* 20 (10): 6105-6105. <https://tis.wu.ac.th/index.php/tis/article/view/6105>.

Erenler, Ramazan, Esma Nur Geçer, Nusret Genç, et Dürdane Yanar. 2021. « Antioxidant Activity of Silver Nanoparticles Synthesized from Tagetes Erecta L. Leaves ». *International Journal of Chemistry and Technology* 5 (2): 2. <https://doi.org/10.32571/ijct.1005275>.

Farooq, Umar, Ahmad Kaleem Qureshi, Hadia Noor, et al. 2023. « Plant extract-based fabrication of silver nanoparticles and their effective role in antibacterial,

Références bibliographiques

anticancer, and water treatment applications ». *Plants* 12 (12): 2337. <https://www.mdpi.com/2223-7747/12/12/2337>.

Gudimalla, Apparao, Jiya Jose, Rajendran Jose Varghese, et Sabu Thomas. 2021. « Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using *Nymphae Odorata* Extract Incorporated Films and Antimicrobial Activity ». *Journal of Polymers and the Environment* 29 (5): 1412-23. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01959-6>.

H. Mohammad, Zahra, Faizan Ahmad, Salam A. Ibrahim, et Sadaf Zaidi. 2022. « Application of nanotechnology in different aspects of the food industry | Discover Food ». <https://link.springer.com/article/10.1007/S44187-022-00013-9>.

Habibullah, Giyaullah, Jitka Viktorova, et Tomas Ruml. 2021. « Current Strategies for Noble Metal Nanoparticle Synthesis ». *Nanoscale Research Letters* 16 (1): 47. <https://doi.org/10.1186/s11671-021-03480-8>.

Haleem, Abid, Mohd Javaid, Ravi Pratap Singh, Shanay Rab, et Rajiv Suman. 2023. « Applications of nanotechnology in medical field: a brief review ». *Global Health Journal* 7 (2): 70-77. <https://doi.org/10.1016/j.glohj.2023.02.008>.

Hashmi, Syeda Safia, Muhammad Ibrahim, Muhammad Adnan, et al. 2024. « Green Synthesis of Silver Nanoparticles from *Olea Europaea* L. Extracted Polysaccharides, Characterization, and Its Assessment as an Antimicrobial Agent against Multiple Pathogenic Microbes ». *Open Chemistry* 22 (1): 20240016. <https://doi.org/10.1515/chem-2024-0016>.

Huston, Matthew, Melissa DeBella, Maria DiBella, et Anisha Gupta. 2021. « Green Synthesis of Nanomaterials ». *Nanomaterials* 11 (8): 8. <https://doi.org/10.3390/nano11082130>.

Ines, El Mannoubi. 2023. « Impact of different solvents on extraction yield, phenolic composition, in vitro antioxidant and antibacterial activities of deseeded *Opuntia stricta* fruit | Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences ». <https://link.springer.com/article/10.1007/s43994-023-00031-y>.

Karunakaran, Gopalu, Kattakgoundar Govindaraj Sudha, Saheb Ali, et Eun-Bum Cho. 2023. « Biosynthesis of Nanoparticles from Various Biological Sources and Its

Références bibliographiques

Biomedical Applications ». *Molecules* 28 (11): 11.
<https://doi.org/10.3390/molecules28114527>.

Khan, Faryad, Mohammad Shariq, Mohd Asif, Mansoor Ahmad Siddiqui, Pieter Malan, et Faheem Ahmad. 2022. « Green Nanotechnology: Plant-Mediated Nanoparticle Synthesis and Application ». *Nanomaterials* 12 (4): 673.
<https://doi.org/10.3390/nano12040673>.

Koohestani, Hassan, Maryam Nabilu, et Ali Balooch. 2025. « Biosynthesis and investigation of antibacterial properties of green silver nanoparticles using fruit extracts of *Wild barberry*, *Medlar (Mespilus germanica L.)*, and *Hawthorn* ». *Food Chemistry Advances* 6 (mars): 100850. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100850>.

Krishnamoorthy, Kalaiselvi, Selvaraj Jayaraman, Rajapandiyan Krishnamoorthy, et al. 2023. « Green synthesis and evaluation of anti-microbial, antioxidant, anti-inflammatory, and anti-diabetic activities of silver nanoparticles from *Argyrea nervosa* leaf extract: An invitro study ». *Journal of King Saud University - Science* 35 (10): 102955. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102955>.

Kuppusamy, Palaniselvam, Mashitah M. Yusoff, Gaanty Pragas Maniam, et Natanamurugaraj Govindan. 2016. « Biosynthesis of metallic nanoparticles using plant derivatives and their new avenues in pharmacological applications – An updated report ». *Saudi Pharmaceutical Journal* 24 (4): 473-84.
<https://doi.org/10.1016/j.jsps.2014.11.013>.

Kusumorini, Nindya, Akhmad Kharis Nugroho, Suwijiyo Pramono, et Ronny Martien. 2022. « Determination of The Potential Antioxidant Activity of Isolated Piperine from White Pepper Using DPPH, ABTS, and FRAP Methods ». *Majalah Farmaseutik* 18 (4): 4. <https://doi.org/10.22146/farmaseutik.v18i4.70246>.

Lin, Chubing, Xin Huang, Yueguang Xue, et al. 2025. « Advances in medical devices using nanomaterials and nanotechnology: Innovation and regulatory science ». *Bioactive Materials* 48 (juin): 353-69.
<https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2025.02.017>.

Lopes, Graciliana, Carla Sousa, Luís R. Silva, et al. 2012. « Can Phlorotannins Purified Extracts Constitute a Novel Pharmacological Alternative for Microbial

Références bibliographiques

Infections with Associated Inflammatory Conditions? » *PLOS ONE* 7 (2): e31145.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0031145>.

Madrid, Diana Marcela Torres, Blanca Mildred Martínez Núñez, Luisa Patricia, et Uranga Valencia. 2025. « Morphological description of *Opuntia* spp.: Generalities ». *Opuntia spp.: Superfood of the Future and its Biotechnological Potential*, 1. https://www.researchgate.net/profile/Sandra-Perez-Alvarez-2/publication/391106698_Opuntia_spp_Superfood_of_the_Future_and_its_Biotechnological_Potential/links/680abcd2bd3f1930dd63e54c/Opuntia-spp-Superfood-of-the-Future-and-its-Biotechnological-Potential.pdf#page=8.

Marslin, Gregory, Karthik Siram, Qaisar Maqbool, et al. 2018. « Secondary metabolites in the green synthesis of metallic nanoparticles ». *Materials* 11 (6): 940. <https://www.mdpi.com/1996-1944/11/6/940>.

Marukurti, Abhinash, Alavala Matta Reddy, Silpa Rani Medapalli, et al. 2025. « Evaluation of anti-vibriocidal, antioxidant properties and cytotoxicity of bio fabricated/green synthesized silver nanoparticles using *Euphorbia hitra* L. leaf extract ». *Next Materials* 7 (avril): 100355. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2024.100355>.

Mekuye, Bawoke, et Birhanu Abera. 2023. « Nanomaterials: An Overview of Synthesis, Classification, Characterization, and Applications ». *Nano Select* 4 (8): 486-501. <https://doi.org/10.1002/nano.202300038>.

Miller, G. L. 1959. « Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar ». *Analytical Chemistry* 31 (3): 426-28. <https://doi.org/10.1021/ac60147a030>.

Munteanu, Irina Georgiana, et Apetrei Constantin. 2021. « Analytical methods used in determining antioxidant activity: A review ». *International journal of molecular sciences* 22 (7): 3380. <https://www.mdpi.com/1422-0067/22/7/3380>.

Mustapha, Tijjani, Norashiqin Misni, Nur Raihana Ithnin, Abdullahi Muhammad Daskum, et Ngah Zasmay Unyah. 2022. « A Review on Plants and Microorganisms Mediated Synthesis of Silver Nanoparticles, Role of Plants Metabolites and Applications ». *International Journal of Environmental Research and Public Health*

Références bibliographiques

19 (2): 2. <https://doi.org/10.3390/ijerph19020674>.

Nagime, Pooja V., Nishat M. Shaikh, Sohel B. Shaikh, et al. 2024. « Facile Synthesis of Silver Nanoparticles Using Calotropis Procera Leaves: Unraveling Biological and Electrochemical Potentials ». *Discover Nano* 19 (1): 139. <https://doi.org/10.1186/s11671-024-04090-w>.

Neha, Srivastava, Srivastava Manish, Mishra P. K., et Gupta Vijai Kumar. 2020. « Recent Advances on Classification, Properties, Synthesis, and Characterization of Nanomaterials - Green Synthesis of Nanomaterials for Bioenergy Applications - Wiley Online Library ». <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119576785.ch3>.

Nie, Penghui, Yu Zhao, et Hengyi Xu. 2023. « Synthesis, applications, toxicity and toxicity mechanisms of silver nanoparticles: A review ». *Ecotoxicology and Environmental Safety* 253: 114636. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651323001409>.

Padilla-Camberos, Eduardo, Ivan Moises Sanchez-Hernandez, Omar Ricardo Torres-Gonzalez, et al. 2021. « Biosynthesis of silver nanoparticles using *Stenocereus queretaroensis* fruit peel extract: Study of antimicrobial activity ». *Materials* 14 (16): 4543. <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/16/4543>.

Pulit-Prociak, Jolanta, et Marcin Banach. 2016. « Silver nanoparticles – a material of the future...? » *Open Chemistry* 14 (1): 76-91. <https://doi.org/10.1515/chem-2016-0005>.

Rajeshkumar, S, et L.V Bharath. 2017. « Mechanism of plant-mediated synthesis of silver nanoparticles – A review on biomolecules involved, characterisation and antibacterial activity - ScienceDirect ». <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0009279717304799>.

Re, Roberta, Nicoletta Pellegrini, Anna Proteggente, Ananth Pannala, Min Yang, et Catherine Rice-Evans. 1999. « Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay ». *Free Radical Biology and Medicine* 26 (9): 1231-37. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3).

Références bibliographiques

Ronak Kumar, Chaudhari, A. Shah Priyanka, et S. Shrivastav Pranav. 2023. « Green synthesis of silver nanoparticles using Adhatoda vasica leaf extract and its application in photocatalytic degradation of dyes | Discover Nano ». <https://link.springer.com/article/10.1186/s11671-023-03914-5>.

Ruttkay-Nedecký, Branislav, Michaela Dočekalová, Božena Hosnedlová, et al. 2018. *Antioxidant Activity of Silver Nanoparticles Prepared by Green Synthesis*. octobre 19. <https://rgu-repository.worktribe.com/output/235650/antioxidant-activity-of-silver-nanoparticles-prepared-by-green-synthesis>.

Salem, Salem S., Eman N. Hammad, Asem A. Mohamed, et Wagdi El-Dougdoug. 2022. « A comprehensive review of nanomaterials: Types, synthesis, characterization, and applications ». *Biointerface Res. Appl. Chem* 13 (1): 41. <https://www.academia.edu/download/79906341/BRIAC131.041.pdf>.

Sayed Ahmed, Hanan I., Doaa E. Elsherif, Adel R. El-Shanshory, Ashraf S. Haider, et Reda M. Gaafar. 2021. « Silver Nanoparticles and Chlorella Treatments Induced Glucosinolates and Kaempferol Key Biosynthetic Genes in Eruca Sativa ». *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences* 10 (1): 52. <https://doi.org/10.1186/s43088-021-00139-2>.

Sharma, Gaurav, Amit Kumar, Shweta Sharma, et al. 2019. « Novel development of nanoparticles to bimetallic nanoparticles and their composites: A review ». *Journal of King Saud University - Science* 31 (2): 257-69. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2017.06.012>.

Singh, Rajesh, Shradha Dutt, Priyanka Sharma, et al. 2023. « Future of Nanotechnology in Food Industry: Challenges in Processing, Packaging, and Food Safety ». *Global Challenges* 7 (4): 2200209. <https://doi.org/10.1002/gch2.202200209>.

Singh, V., A. Shrivastava, et N. Wahi. 2015. « Biosynthesis of Silver Nanoparticles by Plants Crude Extracts and Their Characterization Using UV, XRD, TEM and EDX ». *African Journal of Biotechnology* 14 (33): 33. <https://doi.org/10.5897/AJB2015.14692>.

Syafiuddin, Achmad, Salmiati, Mohd Razman Salim, Ahmad Beng Hong Kueh,

Références bibliographiques

Tony Hadibarata, et Hadi Nur. 2017. « A Review of Silver Nanoparticles: Research Trends, Global Consumption, Synthesis, Properties, and Future Challenges ». *Journal of the Chinese Chemical Society* 64 (7): 732-56. <https://doi.org/10.1002/jccs.201700067>.

Talia, Humphries, Campbell Shane, et Florentine Singarayer. 2022. « Challenges Inherent in Controlling Prickly Pear Species; a Global Review of the Properties of *Opuntia stricta*, *Opuntia ficus-indica* and *Opuntia monacantha* ». <https://doi.org/10.3390/plants11233334>.

Vijayaram, Seerengaraj, Hary Razafindralambo, Yun-Zhang Sun, et al. 2024. « Applications of Green Synthesized Metal Nanoparticles — a Review ». *Biological Trace Element Research* 202 (1): 360-86. <https://doi.org/10.1007/s12011-023-03645-9>.

Yassin, Mohamed Taha, Ashraf Abdel-Fattah Mostafa, Abdulaziz Abdulrahman Al-Askar, et Fatimah O. Al-Otibi. 2022. « Facile green synthesis of silver nanoparticles using aqueous leaf extract of *Origanum majorana* with potential bioactivity against multidrug resistant bacterial strains ». *Crystals* 12 (5): 603. <https://www.mdpi.com/2073-4352/12/5/603>.

Yezhelyev, Maksym V., Xiaohu Gao, Yun Xing, Ahmad Al-Hajj, Shuming Nie, et Ruth M. O'Regan. 2006. « Emerging Use of Nanoparticles in Diagnosis and Treatment of Breast Cancer ». *The Lancet Oncology* 7 (8): 657-67. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(06\)70793-8](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(06)70793-8).

Yin, Iris Xiaoxue, Zhang ,Jing, Zhao ,Irene Shuping, Mei ,May Lei, Li ,Quanli, et Chun Hung and Chu. 2020. « The Antibacterial Mechanism of Silver Nanoparticles and Its Application in Dentistry ». *International Journal of Nanomedicine* 15 (avril): 2555-62. <https://doi.org/10.2147/IJN.S246764>.

Yousefbeyk, Fatemeh, Dabirian ,Sara, Ghanbarzadeh ,Saeed, Eghbali Koohi ,Diba, Yazdizadeh ,Parisa, et Saeed and Ghasemi. 2022. « Green synthesis of silver nanoparticles from *Stachys byzantina* K. Koch: characterization, antioxidant, antibacterial, and cytotoxic activity ». *Particulate Science and Technology* 40 (2): 219-32. <https://doi.org/10.1080/02726351.2021.1930302>.

Références bibliographiques

Yusuf, Mohd. 2019. « Silver Nanoparticles: Synthesis and Applications ». In *Handbook of Ecomaterials*, édité par Leticia Myriam Torres Martínez, Oxana Vasilievna Kharissova, et Boris Ildusovich Kharisov. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68255-6_16.

Zeghibib, Walid, Fares Boudjouan, et Mostapha Bachir-bey. 2022. « Optimization of Phenolic Compounds Recovery and Antioxidant Activity Evaluation from *Opuntia Ficus Indica* Using Response Surface Methodology ». *Journal of Food Measurement and Characterization* 16 (2): 1354-66. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-01241-w>.

Zeghibib, Walid, Fares Boudjouan, João Carneiro, et al. 2024. « LC-ESI-UHR-QqTOF-MS/MS profiling and anti-inflammatory potential of the cultivated *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. and the wild *Opuntia stricta* (Haw.) Haw. fruits from the Algerian region ». *Food Chemistry* 460 (décembre): 140414. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140414>.

Zeghibib, Walid, Fares Boudjouan, Vitor Vasconcelos, et Graciliana Lopes. 2022. « Phenolic Compounds' Occurrence in *Opuntia* Species and Their Role in the Inflammatory Process: A Review ». *Molecules* 27 (15): 15. <https://doi.org/10.3390/molecules27154763>.

Annexes

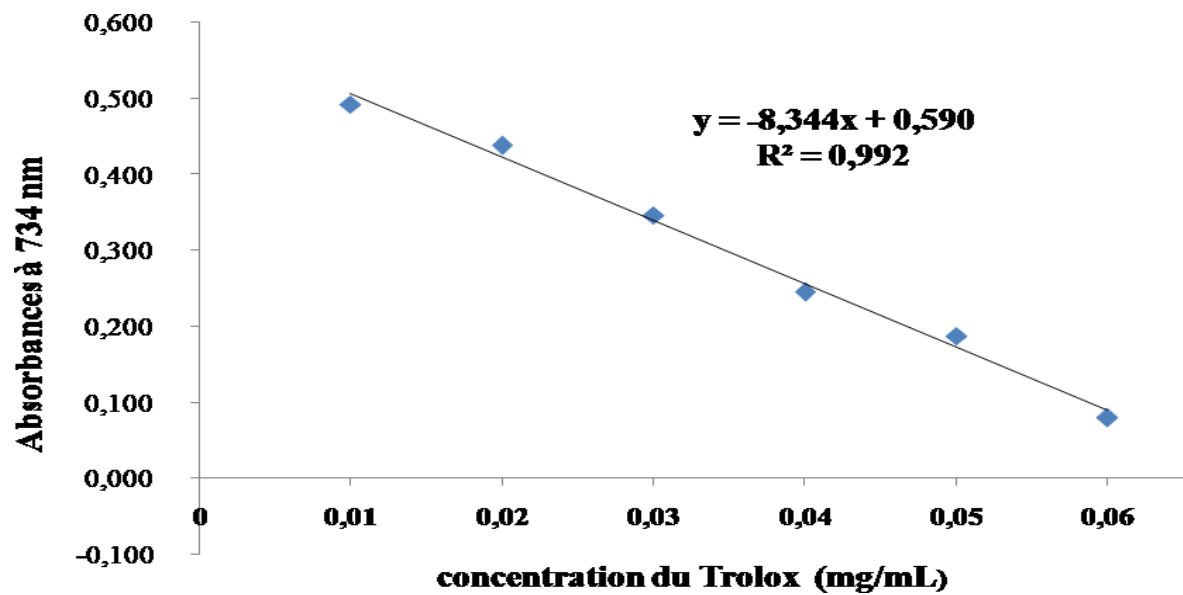


Figure01: La courbe d'étalonnage du trolox en mg du pouvoir antioxydant du radical libre ABTS

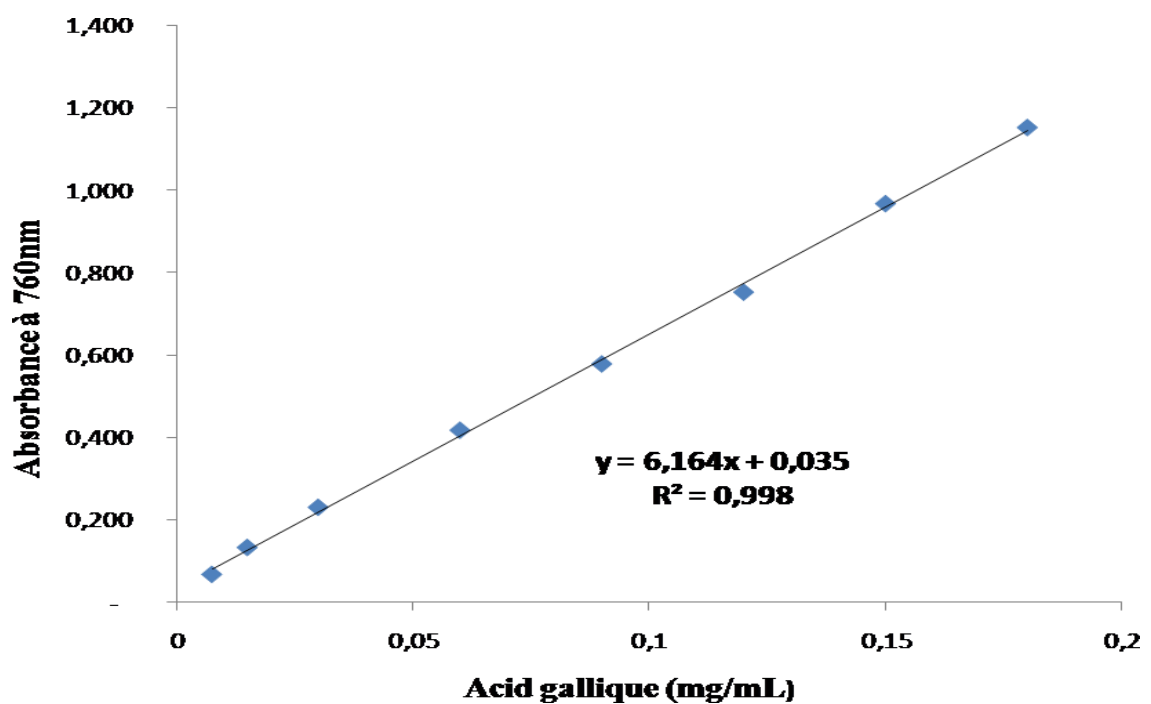


Figure 02: La courbe d'étalonnage d'acide gallique en mg du dosage des composés phénoliques totaux

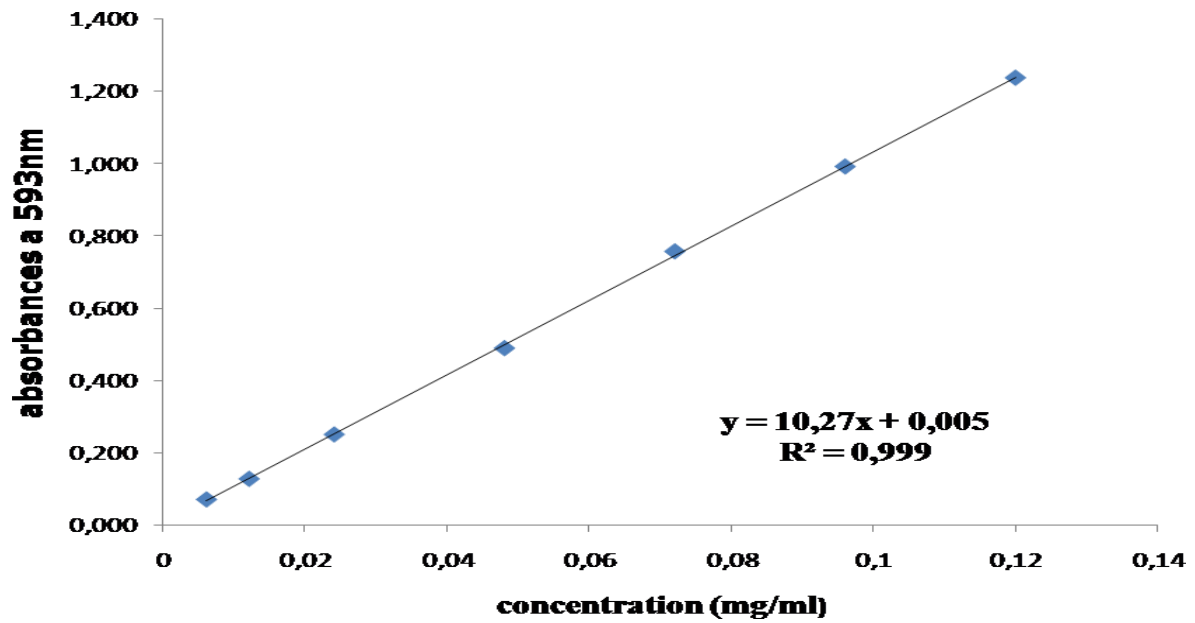


Figure03: Lacourbed'étalonnage de TROLOX en mg de l'activité antioxydants FRAP

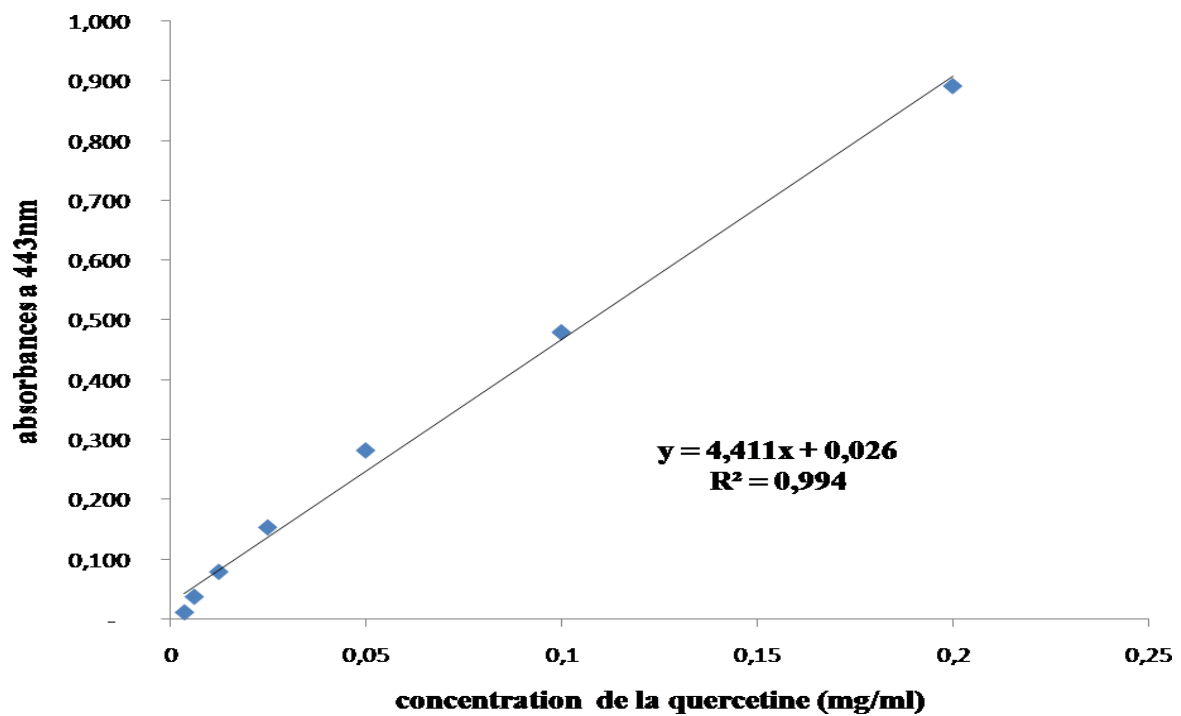


Figure 04: La courbe d'étalonnage de la quercitrine en mg du dosage des flavonoïdes.

Résumé

Ce mémoire présente une étude sur la biosynthèse des nanoparticules d'argent (AgNPs) à partir de pulpe et des graines de fruit d'*Opuntia stricta*, une plante végétale riche en composés phytochimiques. La synthèse des AgNPs est réalisée par réduction des ions argent (Ag^+) sous l'effet des biomolécules présentes dans les extraits de pulpe et de graines, notamment les composés phénoliques. La caractérisation par spectrophotométrie UV-visible confirme la formation des nanoparticules par l'apparition d'un pic d'absorption spécifique. Une caractérisation FTIR confirme la participation des agents phytochimiques de la plante dans la stabilisation des AgNPs. L'étude analyse également leurs propriétés biologiques, notamment leur activité antioxydante, évaluée par les tests FRAP, ABTS et NO, ainsi que leur capacité inhibitrice de α -amylase, ce qui leur confère un potentiel antidiabétique. Les résultats montrent que les AgNPs ont une activité antioxydante élevée.

Par ailleurs, ces nanoparticules possèdent une activité antibactérienne contre les agents pathogènes comme *Staphylococcus aureus* et *Escherichia coli*, le Champignon *Candida albicans* soulignant leur potentiel antimicrobiens. L'ensemble de ces résultats souligne que la plante *Opuntia stricta* est une source prometteuse pour la synthèse de nanoparticules d'argent avec des propriétés biologiques intéressantes, notamment pour des applications médicales et environnementales durables.

Mots clés : AgNPs ; *Opuntia Stricta* ; Activité antidiabétique ; Activité antioxydante ; activité antibactérienne.

Abstract

This dissertation focuses on the biosynthesis of silver nanoparticles (AgNPs) from pulp and fruit seeds of *Opuntia stricta*, a plant rich in phytochemicals. The synthesis of AgNPs is carried out by reducing silver ions (Ag) under the effect of biomolecules present in pulp and seed extracts, notably phenolic compounds. The characterization by UV-visible spectrophotometry confirms the formation of nanoparticles by the appearance of a specific absorption peak. An FTIR characterization confirms the involvement of plant phytochemicals in the stabilization of AgNPs.

The study also analysis their biological properties, notably their antioxidant activity, evaluated by FRAP, ABTS and NO tests, as well as their α -amylase inhibitory capacity, which gives the antidiabetic potential. The results show that AgNPs have a high antioxidant activity. More over, these nanoparticles possess an antibacterial activity against pathogens such as *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*, with the fungus *Candida albicans* highlighting their antimicrobial potential. All these results highlight that the plant *Opuntia stricta* is a promising source for the synthesis of silver nanoparticles with interesting biological properties, notably for sustainable medical and environmental applications.

Key words: AgNPs; *Opuntia Stricta*; Antidiabetic activity; Antioxidant activity; antibacterial activity.

المخلص

يَقَدِّمُ هذا البحث دراسة حول التخليق الحيوي لجزيئات الفضة النانوية (AgNPs) انطلاقًا من لب وبذور فاكهة نبات (*Opuntia stricta*)، وهو نبات غني بالمركبات الفيتوكيميائية، يتم تحضير جزيئات الفضة النانوية من خلال اختزال أيونات الفضة (Ag^+) تحت تأثير الجزيئات الحيوية الموجودة في مستخلصات اللب والبذور، لاسيما المركبات الفينولية. وقد أكدت تقنية التحليل الطيفي بالأشعة فوق البنفسجية - المرئية تكون الجزيئات النانوية من خلال ظهور ذروة امتصاص مميزة. كما أكد تحليل (FTIR) مشاركة المركبات الفيتوكيميائية للنبات في تثبيت جزيئات الفضة النانوية.

تتناول الدراسة أيضًا خصائص هذه الجزيئات البيولوجية، خصوصًا نشاطها المضاد للأوكسدة الذي تم تقييمه من خلال اختبارات (FRAP و ABTS و NO)، إضافة إلى قدرتها على تثبيط إنزيم (α -) أميلاز، مما يُظهر إمكاناتها كمضاد لمرض السكري، وتُبين النتائج أن جزيئات (AgNPs) تُظهر نشاطًا مضادًا للأوكسدة عاليًا.

من جهة أخرى، تمتلك هذه الجزيئات النانوية نشاطًا مضادًا للبكتيريا ضد الممرضات مثل (*Staphylococcus aureus*) و (*Escherichia coli*)، وكذلك ضد الفطر (*Candida albicans*)، مما يُبرز إمكاناتها كمضاد ميكروبي، تُظهر هذه النتائج مجتمعة أن نبات (*Opuntia stricta*) يُعد مصدرًا واعدًا لتخليق جزيئات الفضة النانوية ذات الخصائص البيولوجية المهمة، وذات تطبيقات واعدة في المجالات الطبية والبيئية المستدامة.

الكلمات المفتاحية: جزيئات الفضة النانوية (AgNPs)؛ نبات (*Opuntia stricta*)؛ النشاط المضاد لمرض السكري؛ النشاط المضاد للأوكسدة؛ النشاط المضاد للبكتيريا.