



Caractérisation de nanoparticules d'argent biosynthétisées à partir des feuilles de *Moringa oleifera* Lam. et évaluation de leurs applications photocatalytiques et antibactériennes

[Green Synthesis and Characterization of Silver Nanoparticles Using *Moringa oleifera* Lam. Leaves Extract: Evaluation of Their Photocatalytic and Antibacterial Properties]

Gérard Niasa Mata^{1*}, Denis Bilasi Musengele^{1,2}, Trésor Ndonganzadi^{1,2}, Elie Biayi Mweze¹, Fifi Mulangala Muderhwa¹, Prince Bulola Iyambe³, Paul Kavuna Mahuku^{1,4}, Odon Nkole Mukonkole¹, Didier Makinga Kandongo⁵, Louis Komanda Kalabo Kikontwe⁶, Joseph K'Ekuboni Malongwe¹, Pascal Maziana Disa-Disa¹, Jérémie Lunguya Muswema¹, Omer Muamba Mvele¹ & Gracien Bakambo Ekoko¹

¹ Département de Chimie et Industries, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Kinshasa, Kinshasa, République Démocratique du Congo

² Département de Chimie-Physique, Institut Supérieur Pédagogique de Kikwit, République Démocratique du Congo

³ Université Médicale de Vienne, Ecole de Santé Publique, Spilalgasse 23, 1090, Vienne, Autriche.

⁴ Département des Sciences de Base, Faculté de Polytechniques, Université de Kinshasa, Kinshasa, République Démocratique du Congo

⁵ Faculté de Médecine Dentaire, Université de Kinshasa, Kinshasa, République Démocratique du Congo.

⁶ Faculté de Médecine physique et Réadaptation, Université de Kinshasa, Kinshasa, République Démocratique du Congo.

Résumé

Cette étude porte sur la biosynthèse verte de nanoparticules d'argent (AgNPs) à partir de l'extrait aqueux des feuilles de *Moringa oleifera* Lam. et sur l'évaluation de leurs propriétés physicochimiques, photocatalytiques et antibactériennes. L'analyse phytochimique a révélé des teneurs élevées en polyphénols totaux (3035,22 mg EAG/100 g MS) et en flavonoïdes (782,12 mg EQ/100 g MS), susceptibles d'intervenir dans la réduction et la stabilisation des nanoparticules. La formation des AgNPs a été confirmée par les analyses UV-Visible, DRX, FTIR, MEB, EDX et DSC/TGA. Le diffractogramme DRX a mis en évidence une structure cristalline cubique à faces centrées caractéristique de l'argent métallique. Les observations MEB ont révélé des nanoparticules majoritairement sphériques dont la taille varie entre 15 et 32 nm. Le spectre UV-Visible a présenté une bande de résonance plasmonique de surface à 446 nm. Les essais photocatalytiques ont montré une dégradation d'environ 94 % du bleu de méthylène après 5 min d'irradiation lumineuse, témoignant d'une forte activité photocatalytique. Les AgNPs ont également présenté une activité antibactérienne contre *Escherichia coli* (12 mm) et *Pseudomonas aeruginosa* (10 mm), confirmant leur potentiel antimicrobien. Ces résultats démontrent le potentiel des nanoparticules d'argent biosynthétisées pour des applications environnementales et antimicrobiennes. Toutefois, des études complémentaires portant sur la cinétique photocatalytique, la distribution granulométrique et la détermination des paramètres microbiologiques sont nécessaires pour confirmer pleinement leurs performances.

Mots-clés : biosynthèse verte ; nanoparticules d'argent ; *Moringa oleifera* Lam. ; photocatalyse ; bleu de méthylène ; activité antibactérienne.

Abstract

This study investigates the green biosynthesis of silver nanoparticles (AgNPs) using aqueous leaf extract of *Moringa oleifera* Lam. Leaves and evaluates their physicochemical, photocatalytic, and antibacterial properties. Phytochemical analysis revealed high contents of total polyphenols (3035.22 mg GAE/100 g DW) and flavonoids (782.12 mg QE/100 g DW), which are likely involved in the reduction and stabilization of silver nanoparticles. AgNP formation was confirmed by UV-Visible spectroscopy, X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX), and DSC/TGA analyses. XRD results indicated a face-centered cubic crystalline structure characteristic of metallic silver. SEM observations revealed predominantly spherical nanoparticles ranging from 15 to 32 nm in size. The UV-Visible spectrum exhibited a characteristic surface plasmon resonance band at 446 nm. Photocatalytic experiments showed approximately 94% degradation of methylene blue after 5 minutes of light irradiation, indicating high photocatalytic efficiency. The synthesized AgNPs also exhibited antibacterial activity against *Escherichia coli* (12 mm inhibition zone) and *Pseudomonas aeruginosa* (10 mm inhibition zone), highlighting their antimicrobial potential. These findings suggest that biosynthesized silver nanoparticles derived from *Moringa oleifera* Lam. are promising materials for environmental remediation and antimicrobial applications. Nevertheless, further investigations involving photocatalytic kinetics, particle size distribution analysis, and advanced microbiological assessments are required to fully validate their potential.

Keywords: green synthesis; silver nanoparticles; *Moringa oleifera* Lam.; photocatalysis; methylene blue; antibacterial activity.

*Auteur correspondant: Gérard Niasa Mata (niasagerrard@gmail.com). Tél. : (+243) 817106779

Reçu le 18/05/2026 ; Révisé le 10/06/2026 ; Accepté le 03/07/2026

DOI: <https://doi.org/10.59228/rcst.026.v5.i3.306>

Copyright: ©2026 Mata et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License (CC-BY-NC-SA 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

1. Introduction

Aujourd'hui, la nanotechnologie figure parmi les secteurs les plus dynamiques de la recherche scientifique, du fait des caractéristiques spécifiques que possèdent les matériaux lorsqu'ils présentent des dimensions allant de 1 à 100 nm. À cette échelle, on constate une différence marquée entre les propriétés électroniques, optiques, catalytiques et biologiques par rapport à celles des matériaux massifs. Ceci ouvre la voie à de nombreuses applications dans des secteurs comme la médecine, l'environnement, l'agriculture et l'industrie (Bayda et al., 2020 ; Jeevanandam et al., 2018 ; Khan et al., 2021).

Les nanoparticules d'argent (AgNPs), connues pour leurs capacités extraordinaires dans les domaines antimicrobien, photocatalytique, anti-inflammatoire et optique, font partie des nanomatériaux les plus explorés (Almatroudi, 2020 ; Xu et al., 2020 ; Yaqoob et al., 2020). L'intérêt croissant pour l'élaboration de nouveaux agents antimicrobiens résulte de leur vaste champ d'action contre de nombreuses bactéries pathogènes, y compris certaines souches résistantes aux antibiotiques (More et al., 2023 ; Menichetti et al., 2023 ; Vasiliev et al., 2023).

Les méthodes conventionnelles de synthèse des nanoparticules reposent généralement sur des procédés chimiques ou physiques nécessitant l'utilisation de réactifs toxiques, de solvants organiques ou de conditions expérimentales énergivores (Gahlawat & Choudhury, 2019 ; Wadhwani et al., 2020). Dans le contexte actuel de développement durable, la biosynthèse verte apparaît comme une alternative plus respectueuse de l'environnement (Iravani, 2020 ; Ahmed et al., 2020 ; Kaabipour & Hemmati, 2021).

Cette approche utilise des extraits végétaux riches en métabolites secondaires capables d'assurer simultanément la réduction des ions métalliques et la stabilisation des nanoparticules formées. Les polyphénols, flavonoïdes, terpènes, protéines et sucres réducteurs jouent un rôle essentiel dans ces mécanismes de biosynthèse (Ahmed et al., 2022 ; Mustapha et al., 2022 ; Irfan et al., 2021).

Parmi les espèces végétales utilisées pour la synthèse verte des nanoparticules, *Moringa oleifera* Lam. occupe une place particulière en raison de sa richesse exceptionnelle en composés bioactifs (Leone et al., 2021 ; Vergara-Jimenez et al., 2023 ; Falowo et al., 2024). Ses feuilles contiennent des concentrations

élevées de polyphénols, flavonoïdes, acides phénoliques, vitamines et composés antioxydants susceptibles de favoriser la réduction des ions Ag^+ et la stabilisation des nanoparticules synthétisées (Gopalakrishnan et al., 2022 ; Mousa et al., 2021 ; Ashutosh et al., 2023).

En outre, les nanoparticules d'argent biosynthétisées à partir de *Moringa oleifera* Lam. ont montré un potentiel intéressant dans la dégradation photocatalytique des polluants organiques ainsi que dans la lutte contre diverses bactéries pathogènes (Kumar et al., 2017 ; Vanlalveni et al., 2021 ; Chandak & Nagime, 2025).

L'objectif de cette étude est donc de biosynthétiser des nanoparticules d'argent à partir d'un extrait aqueux de feuilles de *Moringa oleifera* Lam., de caractériser leurs propriétés physicochimiques et d'évaluer leurs activités photocatalytique et antibactérienne.

2. Matériel et méthodes

2.1. Matériel végétal

Les feuilles de *Moringa oleifera* Lam. ont été récoltées au Jardin botanique de la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université de Kinshasa (République Démocratique du Congo) entre les mois de mars et avril 2025.



Figure 1. Feuilles de *Moringa oleifera* Lam. fraîchement cueillies employées pour la confection de l'extrait aqueux.

Cette espèce est largement reconnue pour sa richesse en composés phénoliques, flavonoïdes et autres métabolites secondaires présentant un intérêt pour la biosynthèse verte des nanoparticules métalliques (Leone et al., 2021 ; Vergara-Jimenez et al., 2023 ; Falowo et al., 2024).

L'identification botanique a été réalisée par un botaniste du Département de Biologie de l'Université

de Kinshasa. Un spécimen de référence (voucher specimen) a été déposé à l'Herbier de l'Université de Kinshasa sous le numéro UNIKIN-MOL-2025-001.

Après récolte, les feuilles ont été lavées à l'eau courante puis rincées à l'eau distillée afin d'éliminer les impuretés. Elles ont ensuite été séchées à l'ombre pendant quatorze jours à température ambiante avant d'être broyées en poudre fine et conservées dans des flacons hermétiques. Cette méthode de préparation est couramment utilisée afin de préserver les composés bioactifs thermosensibles présents dans les plantes médicinales (Azwanida, 2021 ; Alara et al., 2021).

2.2. Préparation de l'extrait aqueux

Trente grammes (30 g) de poudre de feuilles ont été introduits dans 300 mL d'eau distillée. Le mélange a été chauffé à 80 °C sous agitation magnétique constante (500 tr.min⁻¹) pendant 1 h 45 min. Après refroidissement à température ambiante, l'extrait a été filtré successivement sur ouate hydrophile puis sur papier filtre Whatman n°1. Le filtrat obtenu a été conservé à 4 °C jusqu'à son utilisation.

L'extraction aqueuse est une méthode largement employée pour récupérer les composés phénoliques et flavonoïdes responsables des propriétés réductrices et antioxydantes des extraits végétaux (Azwanida, 2021 ; Alara et al., 2021 ; Fraga-Corral et al., 2021).

Le rendement d'extraction a été calculé selon l'équation :

$$R(\%) = \text{Me}/\text{Mi} \times 100 \quad (1)$$

où :

(Me) = masse de l'extrait sec (g) ;

(Mi) = masse initiale de poudre végétale (g).

2.3. Biosynthèse des nanoparticules d'argent

Une solution aqueuse de nitrate d'argent (AgNO₃) de concentration 1 mM a été préparée à partir de nitrate d'argent analytique.

Cinquante millilitres (50 mL) d'extrait aqueux ont été mélangés à 100 mL de solution d'AgNO₃ (1 mM), correspondant à un rapport volumique extrait/solution métallique de 1:2. Le mélange réactionnel a été maintenu sous agitation magnétique à 500 tr.min⁻¹ et chauffé à 80 °C pendant 60 minutes.

Le pH du milieu réactionnel a été ajusté entre 4,5 et 5,0 à l'aide d'une solution diluée d'acide nitrique (0,1 M) ou d'hydroxyde de sodium (0,1 M).

La formation des nanoparticules a été suivie visuellement par le changement de coloration du mélange réactionnel, passant du jaune clair au brun foncé, phénomène généralement associé à la résonance plasmonique de surface caractéristique des

nanoparticules d'argent (Ahmed et al., 2020 ; Irvani, 2020 ; Kaabipour & Hemmati, 2021).

Après incubation à l'obscurité pendant 18 h, le précipité obtenu a été récupéré, séché à 100 °C puis calciné à 400 °C pendant 2 h conformément aux résultats de l'analyse thermique. Les métabolites secondaires présents dans les extraits végétaux jouent simultanément le rôle d'agents réducteurs et stabilisants lors de la biosynthèse des nanoparticules métalliques (Ahmed et al., 2022 ; Mustapha et al., 2022 ; Kumar et al., 2022).

2.4. Dosage des polyphénols totaux

Les polyphénols totaux ont été déterminés selon la méthode de Folin-Ciocalteu, largement utilisée pour l'évaluation de la teneur phénolique des extraits végétaux (Everette et al., 2022 ; Bäerlocher et al., 2020).

Les absorbances ont été mesurées à 760 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible.

Les résultats ont été exprimés en mg d'équivalent acide gallique pour 100 g de matière sèche (mg EAG/100 g MS). Chaque mesure a été réalisée en triplicat (n = 3).

2.5. Dosage des flavonoïdes totaux

Les flavonoïdes ont été dosés selon la méthode colorimétrique utilisant le chlorure d'aluminium (AlCl₃). La quercétine a été utilisée comme standard de référence.

Les résultats ont été exprimés en mg d'équivalent quercétine pour 100 g de matière sèche (mg EQ/100 g MS). Les analyses ont été réalisées en triplicat.

Les flavonoïdes constituent l'un des principaux groupes de métabolites secondaires impliqués dans les mécanismes de réduction des ions métalliques lors de la synthèse verte des nanoparticules (Shahidi & Ambigaipalan, 2021 ; Ahmed et al., 2022).

2.6. Caractérisation des nanoparticules

Les nanoparticules synthétisées ont été caractérisées par :

- Spectroscopie UV-Visible ;
- Diffraction des rayons X (DRX) ;
- Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) ;
- Microscopie électronique à balayage (MEB) ;
- Analyse EDX ;
- Analyse thermique DSC/TGA.

Ces techniques sont couramment utilisées pour déterminer les propriétés optiques, structurales, morphologiques, élémentaires et thermiques des nanoparticules métalliques biosynthétisées (Dawadi et al., 2021 ; Almatroudi, 2020 ; Xu et al., 2020).

La spectroscopie XPS et la microscopie électronique en transmission (MET), initialement envisagées, n'ont pas pu être exploitées en raison de l'indisponibilité des données complètes. Elles ne sont donc pas discutées dans le présent travail.

2.7. Étude photocatalytique

L'activité photocatalytique a été évaluée par la dégradation du bleu de méthylène, un colorant organique fréquemment utilisé comme molécule modèle pour l'évaluation des performances photocatalytiques des nanomatériaux (Kumar et al., 2017 ; Singh et al., 2021 ; Verma et al., 2022).

Trente milligrammes (30 mg) de nanoparticules d'argent ont été ajoutés à une solution aqueuse de bleu de méthylène (1 mM). Le mélange a été soumis à une irradiation solaire. Des prélèvements ont été effectués à différents intervalles de temps et analysés par spectrophotométrie UV-Visible à 664 nm.

Le pourcentage de dégradation a été calculé selon :

$$\text{Taux Dégradation (\%)} = (C_0 - C_t) / C_0 \times 100 \quad (2)$$

où :

(C₀) = concentration initiale ;

(C_t) = concentration au temps (t).

La relation entre absorbance et concentration a été décrite par la loi de Beer-Lambert :

$$A = \epsilon \times l \times C \quad (3)$$

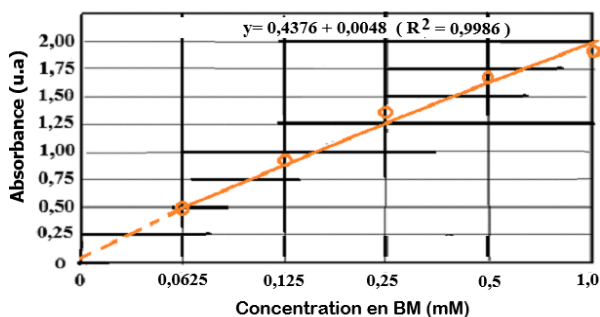


Figure 2. La courbe d'étalonnage du Bleu de Méthylène à $\lambda_{\text{max}} = 650 \text{ nm}$ ($\text{pH} = 4.8$).

2.8. Activité antibactérienne

L'activité antibactérienne a été évaluée contre *Escherichia coli* et *Pseudomonas aeruginosa*.

Ces deux bactéries Gram négatif sont fréquemment utilisées comme modèles microbiologiques en raison de leur importance clinique et de leur implication dans de nombreuses infections opportunistes (Jain et al., 2020 ; More et al., 2023).

Les essais ont été réalisés par diffusion sur gélose Mueller-Hinton conformément aux recommandations

du Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI, 2023). Les inoculums ont été ajustés à 0,5 McFarland. Des puits de 6 mm de diamètre ont été remplis avec 50 μL de suspension de nanoparticules. La ciprofloxacine a été utilisée comme contrôle positif tandis que l'eau distillée stérile a servi de contrôle négatif.

Après incubation à 37 °C pendant 24 h, les diamètres des zones d'inhibition ont été mesurés. Compte tenu des données disponibles, seules les zones d'inhibition ont été exploitées. Les déterminations de la concentration minimale inhibitrice (CMI) et de la concentration minimale bactéricide (CMB) feront l'objet d'études ultérieures.

L'utilisation des nanoparticules d'argent comme agents antimicrobiens est largement documentée en raison de leur capacité à perturber les membranes cellulaires bactériennes, générer des espèces réactives de l'oxygène et interagir avec l'ADN microbien (Dakal et al., 2016 ; Le Ouay & Stellacci, 2020 ; Yin et al., 2020 ; Menichetti et al., 2023).

3. Résultats

3.1 Composition phénolique de l'extrait de *Moringa oleifera* Lam.

L'analyse phytochimique de l'extrait aqueux des feuilles de *Moringa oleifera* Lam. a révélé une teneur importante en composés phénoliques susceptibles d'intervenir dans les mécanismes de réduction des ions Ag^+ et de stabilisation des nanoparticules d'argent biosynthétisées. Les polyphénols et les flavonoïdes sont reconnus comme des agents réducteurs naturels capables de transférer des électrons aux ions métalliques et de limiter l'agrégation des nanoparticules formées (Ahmed et al., 2022 ; Shahidi & Ambigaipalan, 2021 ; Mustapha et al., 2022).

Tableau I. Composition phénolique de l'extrait de *Moringa oleifera* Lam.

Paramètre	Valeur
Rendement d'extraction (%)	46,43
Polyphénols totaux (mg EAG/100 g MS)	3035,22
Flavonoïdes totaux (mg EQ/100 g MS)	782,12

Les résultats correspondent à la moyenne de trois déterminations indépendantes ($n = 3$).

Le rendement d'extraction de 46,43 % traduit une bonne capacité de solubilisation des métabolites polaires contenus dans les feuilles. Cette valeur est comparable à celles rapportées pour les extraits aqueux ou hydroalcooliques de *Moringa oleifera* dans la

littérature (Azwanida, 2021 ; Alara et al., 2021 ; Falowo et al., 2024).

La teneur en polyphénols totaux (3035,22 mg EAG/100 g MS) témoigne d'une forte capacité réductrice de l'extrait. Ces composés participent à la réduction des ions Ag^+ en argent métallique (Ag^0) et contribuent à la stabilité colloïdale des nanoparticules (Ahmed et al., 2022 ; Fraga-Corral et al., 2021 ; Mustapha et al., 2022).

La teneur en flavonoïdes (782,12 mg EQ/100 g MS) confirme également la richesse de l'extrait en molécules bioactives susceptibles d'intervenir dans les réactions d'oxydo-réduction. Ces résultats corroborent ceux rapportés par Leone et al. (2021) et Falowo et al. (2023), qui ont montré que les feuilles de *Moringa oleifera* constituent une source importante de composés phénoliques impliqués dans la biosynthèse verte des nanomatériaux. Des observations similaires ont également été rapportées par Mousa et al. (2021) et Vergara-Jimenez et al. (2023).

3.2. Biosynthèse et caractérisation des nanoparticules d'argent

La biosynthèse des nanoparticules d'argent a été confirmée par l'apparition progressive d'une coloration brun foncé du milieu réactionnel après addition de la solution de nitrate d'argent à l'extrait végétal.

Cette transformation visuelle est généralement attribuée au phénomène de résonance plasmonique de surface (*Surface Plasmon Resonance*, SPR) résultant de l'oscillation collective des électrons libres à la surface des nanoparticules d'argent (Almatroudi, 2020 ; Xu et al., 2020 ; Ahmed et al., 2020).

Les composés phénoliques présents dans l'extrait ont vraisemblablement assuré simultanément les fonctions de réduction des ions Ag^+ et de stabilisation des nanoparticules formées, conformément aux mécanismes décrits dans plusieurs études de biosynthèse végétale (Iravani, 2020 ; Kaabipour & Hemmati, 2021 ; Kumar et al., 2022).

3.2.1. Analyse structurale par diffraction des rayons X (DRX)

La figure 3 présente le diffractogramme DRX des nanoparticules synthétisées.

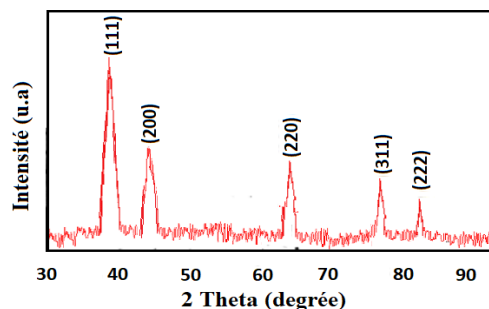


Figure 3. Spectres de diffraction des rayons X des nanopoudres d'argent métallique

Les pics observés à $2\theta = 38,3^\circ, 44,5^\circ, 64,6^\circ, 77,7^\circ$ et $81,8^\circ$ correspondent respectivement aux plans cristallographiques (111), (200), (220), (311) et (222) de l'argent métallique à structure cubique à faces centrées (CFC).

L'absence de pics secondaires importants suggère une bonne pureté cristalline du matériau obtenu.

Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par Dawadi et al. (2021), Vanlalveni et al. (2021), Kumar et al. (2022) et Chandak et Nagime (2025) pour des nanoparticules d'argent obtenues par voie biologique.

La finesse des pics de diffraction indique la formation de cristallites nanométriques, caractéristique fréquemment observée dans les nanoparticules biosynthétisées (Jeevanandam et al., 2018 ; Khan et al., 2021).

Toutefois, la taille moyenne des cristallites calculée par l'équation de Scherrer n'a pas pu être déterminée avec précision en l'absence des données complètes relatives à la largeur à mi-hauteur (FWHM) des pics.

3.2.2. Analyse FTIR

Le spectre FTIR (figure 4) met en évidence plusieurs bandes caractéristiques.

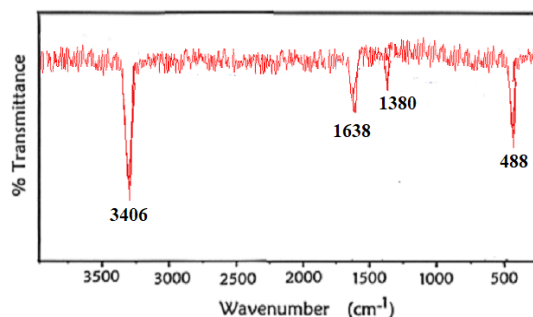


Figure 4. Spectre infrarouge enregistré pour la poudre d'argent synthétisée à partir des extraits de *Moringa oleifera* Lam.

Les principales bandes observées sont :

- 3406 cm^{-1} : vibration d'élongation O-H ;
- 1638 cm^{-1} : vibration C=O ;
- 1380 cm^{-1} : vibration N-O ;
- 488 cm^{-1} : vibration Ag-Ag.

La présence des bandes associées aux fonctions hydroxyles et carbonyles confirme l'implication des métabolites secondaires de *Moringa oleifera* dans les mécanismes de réduction et de stabilisation des nanoparticules (Ahmed et al., 2022 ; Mustapha et al., 2022).

Des observations similaires ont été rapportées par Asif et al. (2022), Kouamé et al. (2021), Gahlawat et Choudhury (2019) et Hussain et al. (2021) lors de la biosynthèse verte de nanoparticules d'argent à partir d'extraits végétaux.

Les groupements hydroxyles et carbonyles sont fréquemment impliqués dans les réactions de complexation et de réduction des ions métalliques au cours des processus de synthèse biologique (Irfan et al., 2021 ; Ahmed et al., 2022).

3.2.3. Analyse morphologique et élémentaire

Les images obtenues par microscopie électronique à balayage (MEB) montrent des nanoparticules principalement sphériques, relativement homogènes et faiblement agglomérées.

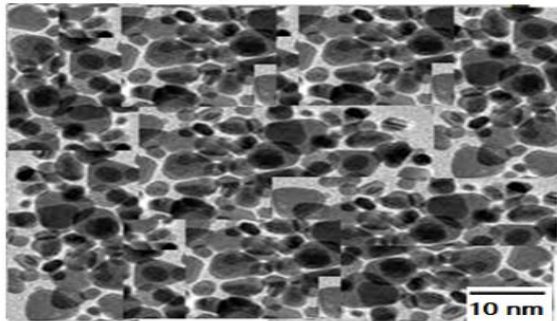


Figure 5. Images de microscopie électronique de particules d'argent métallique dispersées dans une solution de l'éthanol.

La taille observée varie entre 15 et 32 nm. Ces dimensions se situent dans l'intervalle généralement rapporté pour les AgNPs biosynthétisées à partir d'extraits végétaux (Dawadi et al., 2021 ; Vanlalveni et al., 2021 ; Chandak & Nagime, 2025).

La morphologie sphérique observée est particulièrement favorable aux applications photocatalytiques et antimicrobiennes en raison de l'augmentation de la surface spécifique disponible pour

les interactions de surface (Yaqoob et al., 2020 ; Singh et al., 2022).

Cependant, l'absence d'histogramme granulométrique et de traitement statistique des tailles constitue une limite de la présente étude et devra être prise en compte dans les travaux futurs.

L'analyse EDX révèle un signal intense autour de 3 keV, caractéristique de l'argent métallique.

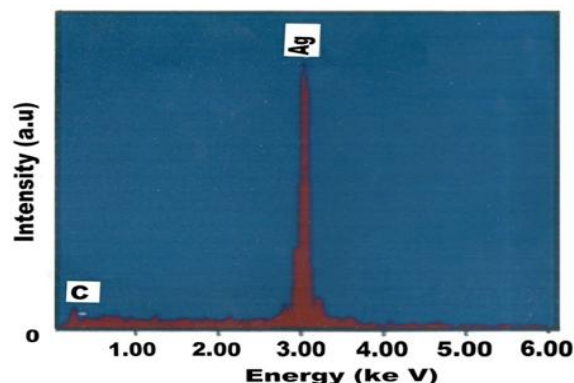


Figure 6. Analyse par Spectroscopie Dispersive en Energie des rayons X (EDX) de monocristaux d'argent réalisée simultanément à l'observation en microscopie électronique de balayage

Les faibles signaux de carbone et d'oxygène observés peuvent être attribués aux molécules organiques adsorbées à la surface des nanoparticules (Xu et al., 2020 ; Almatroudi, 2020).

Les résultats MEB-EDX confirment ainsi la formation effective de nanoparticules d'argent.

3.2.4. Analyse thermique

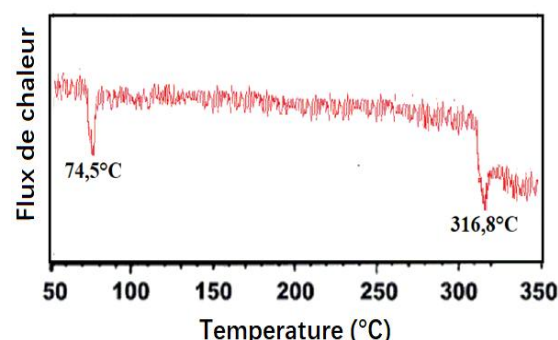


Figure 7. Courbe de la calorimétrie différentielle de balayage des nanoparticules d'argent synthétisées par notre méthode

Les courbes DSC/TGA (figure 7) montrent deux principales étapes de perte de masse :

- entre 50 et 100 °C : élimination de l'eau adsorbée ;

- entre 300 et 350 °C : décomposition des composés organiques résiduels.

Au-delà de 350 °C, aucune perte de masse importante n'est observée, ce qui indique une bonne stabilité thermique du matériau.

Ces résultats sont cohérents avec ceux rapportés par Rahmayenia et al. (2021) et Zhang et al. (2022), qui ont montré que les nanoparticules d'argent biosynthétisées présentent généralement une stabilité thermique élevée après élimination des molécules organiques adsorbées.

Cette stabilité thermique constitue un critère important pour les applications industrielles et environnementales des nanomatériaux (Keller et al., 2022).

Les résultats obtenus justifient le choix d'une calcination à 400 °C pendant 2 h, température suffisante pour éliminer les résidus organiques tout en préservant l'intégrité structurale des nanoparticules.

3.2.5. Analyse UV-Visible

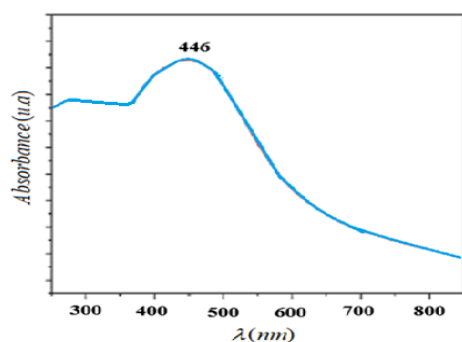


Figure 8. Spectre UV-visible de nanoparticules d'argent synthétisées

Le spectre UV-Visible présente une bande d'absorption intense centrée à 446 nm.

Cette bande est attribuée au phénomène de résonance plasmonique de surface des nanoparticules d'argent (Ecarnot, 2018 ; Almatroudi, 2020 ; Xu et al., 2020).

La position du maximum d'absorption est cohérente avec celle rapportée dans plusieurs travaux portant sur des AgNPs de taille comprise entre 10 et 40 nm (Ahmed et al., 2020 ; Dawadi et al., 2021 ; Kumar et al., 2022).

Cette observation confirme la formation de nanoparticules d'argent bien dispersées dans le milieu réactionnel et présentant une distribution de taille relativement homogène.

3.3. Activité photocatalytique

L'activité photocatalytique des nanoparticules d'argent a été évaluée par la dégradation du bleu de méthylène sous irradiation lumineuse.

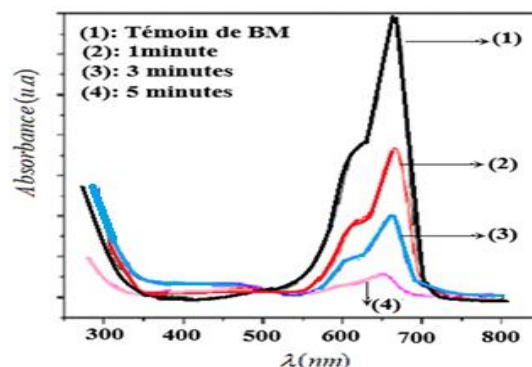


Figure 9. Spectres d'absorption d'une solution aqueuse de bleu de méthylène traitée avec 12 mg de NPs-Ag synthétisées en présence de l'extrait aqueux des feuilles de Moringa à différents intervalles de temps.

Une diminution progressive de la bande d'absorption du bleu de méthylène à 664 nm a été observée au cours du traitement, traduisant une dégradation progressive du colorant.

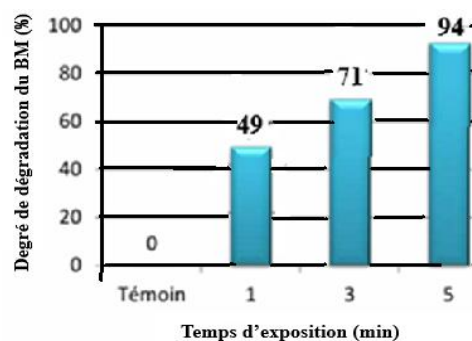


Figure 10. Dégradation du bleu de méthylène (%) par des nanoparticules d'argent synthétisées

Le pourcentage maximal de dégradation atteint environ 94 % après 5 minutes d'irradiation.

Ce résultat est comparable à ceux rapportés par Kumar et al. (2017), Rahman et al. (2021), Vanlalveni et al. (2021), Ahmed et al. (2023) et Verma et al. (2022), qui ont observé des rendements élevés lors de l'utilisation de nanoparticules métalliques biosynthétisées comme photocatalyseurs.

Le mécanisme photocatalytique peut être attribué à la génération d'espèces réactives de l'oxygène telles que les radicaux hydroxyles ($\bullet\text{OH}$) et les anions superoxydes ($\text{O}_2^{\bullet-}$). Ces espèces hautement oxydantes attaquent progressivement les groupements chromophores du bleu de méthylène jusqu'à leur

minéralisation (Singh et al., 2021 ; Verma et al., 2022 ; Yaqoob et al., 2020).

La petite taille des nanoparticules et leur forte surface spécifique favorisent les phénomènes d'adsorption du colorant et améliorent l'efficacité photocatalytique (Khan et al., 2021 ; Singh et al., 2022).

Toutefois, l'absence :

- d'essais témoins sans catalyseur ;
- d'essais avec extrait végétal seul ;
- d'essais avec AgNO₃ seul ;
- de détermination de la constante apparente de vitesse ;
- ne permet pas de conclure définitivement sur le mécanisme cinétique de dégradation.

Ces investigations devront être réalisées dans les études ultérieures afin de mieux comprendre les phénomènes réactionnels impliqués.

3.4. Activité antibactérienne

Les nanoparticules biosynthétisées ont montré une activité antibactérienne contre les deux souches Gram négatif étudiées.

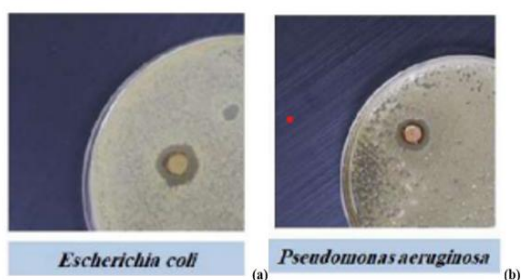


Figure 11. Deux souches bactériennes pathogène présentant l'activité antibactérienne des nanoparticules d'argent préparées

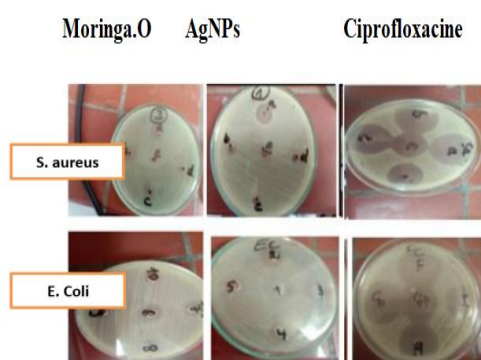


Figure 12. Zone d'inhibition des nanoparticules d'argent contre deux bactéries pathogènes

Tableau II. Activité antibactérienne des AgNPs *Moringa oleifera* Lam.

Souche bactérienne	Zone d'inhibition(mm)
<i>Escherichia coli</i>	12
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	10

Les diamètres d'inhibition observés indiquent une sensibilité plus importante de *Escherichia coli*.

L'activité antibactérienne des AgNPs est généralement attribuée à plusieurs mécanismes :

- Altération de la membrane cellulaire ;
- Génération d'espèces réactives de l'oxygène ;
- Interaction avec les protéines membranaires ;
- Inhibition de la réplication de l'ADN.

Ces mécanismes ont été largement décrits par Dakal et al. (2016), Le Ouay et Stellacci (2020), Yin et al. (2020), Menichetti et al. (2023) et Vasiliev et al. (2023).

La faible taille des nanoparticules favorise leur pénétration à travers l'enveloppe bactérienne et augmente leur surface de contact avec les cellules microbiennes, ce qui améliore leur efficacité biologique (More et al., 2023 ; Luceri et al., 2023).

Les zones d'inhibition obtenues sont comparables à celles rapportées dans plusieurs études utilisant des AgNPs issues de *Moringa oleifera* ou d'autres extraits végétaux (Baltazar-Encarnación et al., 2019 ; Irfan et al., 2021 ; Ghosh et al., 2023 ; Chandak & Nagime, 2025).

Cependant, l'absence de détermination expérimentale de la concentration minimale inhibitrice (CMI), de la concentration minimale bactéricide (CMB), ainsi que l'absence de comparaison quantitative détaillée avec un antibiotique de référence constituent des limites importantes de cette étude.

Par conséquent, les résultats présentés doivent être considérés comme une première indication du potentiel antibactérien des nanoparticules biosynthétisées. Des investigations complémentaires permettront de préciser leur efficacité microbiologique et leur éventuelle utilisation dans le développement de nouveaux agents antimicrobiens.

5. Conclusion

Cette étude a permis la biosynthèse verte de nanoparticules d'argent (AgNPs) à partir des feuilles de *Moringa oleifera* Lam. dont la richesse en composés phénoliques et flavonoïdes a favorisé la réduction et la stabilisation des ions argent confirmant ce que rapporte

la littérature (Leone et al., 2021 ; Falowo et al., 2024). Les analyses DRX, FTIR, MEB, EDX, DSC/TGA et UV-Visible ont confirmé la formation de nanoparticules cristallines, majoritairement sphériques, de taille comprise entre 15 et 32 nm (Dawadi et al., 2021 ; Kumar et al., 2022).

Les AgNPs obtenues ont présenté une activité photocatalytique élevée, avec une dégradation d'environ 94 % du bleu de méthylène, ainsi qu'une activité antibactérienne contre *Escherichia coli* et *Pseudomonas aeruginosa*, confirmant leur potentiel pour les applications environnementales et antimicrobiennes (Verma et al., 2022 ; Menichetti et al., 2023).

Toutefois, l'absence d'analyses granulométriques détaillées, de caractérisation XPS complète, d'études cinétiques de la photocatalyse et de détermination de la CMI et de la CMB constitue une limite de cette étude (Kaabipour & Hemmati, 2021 ; Hussain et al., 2021). Des études complémentaires portant sur l'optimisation des conditions de synthèse, l'évaluation d'autres polluants, l'approfondissement des paramètres microbiologiques ainsi que l'étude de la toxicité et de la biocompatibilité permettront de mieux valoriser ces nanomatériaux pour des applications environnementales et biomédicales (Xu et al., 2020 ; Keller et al., 2022).

Remerciements

Les auteurs remercient le Laboratoire de Chimie Nucléaire, Radiochimie et Photochimie Environnementales de la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université de Kinshasa pour l'assistance technique apportée dans la réalisation des analyses physicochimiques. Les remerciements sont également adressés au Département de Biologie pour l'identification botanique de *Moringa oleifera* Lam. et la conservation du spécimen de référence.

Financement

Aucun financement externe n'a été accordé à cette recherche.

Conflit d'intérêts

Les auteurs déclarent ne présenter aucun conflit d'intérêts susceptible d'influencer les résultats ou l'interprétation des données présentées dans cette étude.

Considérations éthiques

Cette étude a été réalisée *in vitro* sur deux modèles de polluants, bleu de méthylène et souches bactériennes, en n'impliquant aucun site d'épuration d'eau où les sujets humains ou animaux auraient accès.

De ce fait, l'autorisation d'un comité d'éthique n'était pas requise, conformément aux standards internationaux de diffusion scientifique.

ORCID des Auteurs

Mata N.G.: <https://orcid.org/0009-0009-0081-8359>;
 Iyambe B.P. : <https://orcid.org/0009-0006-0924-9787>;
 Kandongo M.D.: <https://orcid.org/0009-0008-9748-1950>;
 Kikontwe K.K.L. : <https://orcid.org/0000-0002-9493-8299>;
 Mahuku K.P. : <https://orcid.org/0009-0005-2704-0592>;
 Musengele B.D. : <https://orcid.org/0009-0009-5598-6931>;
 Malongwe KJ. : <https://orcid.org/0009-0003-0663-3925>;
 Ndonganzadi T. : <https://orcid.org/0009-0001-9151-2655>;
 Mweze B.E. : <https://orcid.org/0009-0008-4173-3661>;
 Muderhwa M.F. : <https://orcid.org/0009-0009-8795-9604>;
 Mukonkole N.O. : <https://orcid.org/0009-0000-4228-5946>;
 Muswema L.J. : <https://orcid.org/0000-0001-6929-3006>;
 Disadisa M.P. : <https://orcid.org/0009-0003-1035-5884>;
 Mvele M.O. : <https://orcid.org/0009-0008-4639-6932>;
 Ekoko B.G. : <https://orcid.org/0009-0003-1523-1471>.

Contribution des Auteurs

G.N.M. : a assuré la conception de l'étude, les analyses de photodégradation catalytique du bleu de méthylène, la revue de la littérature, l'interprétation des résultats et la rédaction initiale du manuscrit.

D.B.M. : a assuré la supervision scientifique, la coordination de l'équipe, la révision critique du manuscrit, l'amélioration des tableaux et la validation de la version finale.

T.N. : a contribué à la révision critique du manuscrit et à l'amélioration de la présentation des tableaux.

E.B.M. : a contribué à l'interprétation des spectres dans les résultats du travail.

F.M.M. : Contribution à la révision critique du manuscrit et à l'amélioration de l'interprétation des figures.

P.B.I. : a contribué à la méthodologie, à l'analyse des échantillons ainsi qu'à l'amélioration de la reproductibilité et de la fiabilité des résultats.

O.N.M. : a participé à l'analyse formelle des échantillons ainsi qu'à la discussion des résultats d'analyses.

D.M.K. : a contribué à la méthodologie, à l'analyse des échantillons liées à l'étude bactéricide des nanomatériaux appliquées.

L.K.K.K. : a contribué à la méthodologie, à l'analyse des échantillons liées à l'étude bactéricide des nanomatériaux appliquées en synergie avec les autres

J.K.M. : a participé à l'analyse formelle des échantillons ainsi qu'au calibrage et à la validation des méthodes analytiques.

P.M.D.-D. : a participé au renforcement méthodologique et analytique, à la rédaction initiale ainsi qu'au calibrage et à la validation des méthodes analytiques.

J.L.M. : a assuré le traitement des données de caractérisation, la correction du manuscrit, la révision critique et la validation de la version finale.

O.M.M. : a contribué à la correction, à la révision critique et à l'approbation de la version finale du manuscrit.

G.B.E. : a assuré la supervision, la correction du texte, l'amélioration du style, l'intégration des tableaux, l'interprétation des résultats et la révision substantielle du manuscrit.

Tous les auteurs ont examiné et validé la version finale du manuscrit et sont prêts à en porter la responsabilité scientifique.

Références bibliographiques :

Ahmed, S., Ahmad, M., Swami, B. L., & Ikram, S. (2020). Green synthesis of silver nanoparticles using plant extracts and their antimicrobial and catalytic applications: A review. *Journal of Nanobiotechnology*, 18, 193. <https://doi.org/10.1186/s12951-020-00690-8>

Ahmed, S., Ahmad, M., Swami, B. L., & Ikram, S. (2022). Green synthesis of metallic nanoparticles and their applications. *Journal of Materials Science & Technology*, 118, 1–18.

Ahmed, S., Khan, M., Ali, A., & Rehman, A. (2023). Green synthesis of silver nanoparticles using plant extracts and their photocatalytic and

antibacterial applications. *Journal of Nanomaterials Research*, 15(2), 115–128.

Alara, O. R., Abdurahman, N. H., & Ukaegbu, C. I. (2021). Soxhlet extraction of phenolic compounds from plant materials. *Journal of Food Science and Technology*, 58(3), 1–12.

Almatroudi, A. (2020). Silver nanoparticles: Synthesis, characterisation and biomedical applications. *Open Life Sciences*, 15(1), 819–839. <https://doi.org/10.1515/biol-2020-0094>

Aminath Fidèle Yacoubou, C. F. A. Salifou, Dougnon, V., Baba-Moussa, L. S., & Youssao, A. K. I. (2025). Synthèse verte des nanoparticules d'argent, leurs caractérisations et leurs applications : une revue de synthèse. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 45(4), 678–698.

Asif, M., Saleem, M., Saadullah, M., Yaseen, H. S., & Al Zarzour, R. (2022). COVID-19 and therapy with essential oils having antiviral, anti-inflammatory, and immunomodulatory properties. *Inflammopharmacology*, 30(2), 401–420. <https://doi.org/10.1007/s10787-021-00902-8>

Azwanida, N. N. (2021). A review on extraction methods used in medicinal plants: Principles, strengths and limitations. *Medicinal & Aromatic Plants*, 10(1), 1–10.

Baltazar-Encarnación, E., Escárcega-González, C. E., Vasto-Anzaldo, X. G., Cantú-Cárdenas, M. E., & Morones-Ramírez, J. R. (2019). Silver nanoparticles synthesized through green methods using *Escherichia coli* growth culture medium exhibit antimicrobial properties. *Journal of Nanomaterials*, 2019, 4585682. <https://doi.org/10.1155/2019/4585682>

Bäerlocher, F., Gessner, M. O., & Graça, M. A. S. (2020). Total phenolics. In *Methods to Study Litter Decomposition* (2nd ed., pp. 157–161).

Chandak, P., & Nagime, R. (2025). Eco-friendly synthesis of silver nanoparticles using medicinal plant extracts and evaluation of their biological activities. *Materials Today: Proceedings*, 89, 245–252.

CLSI. (2023). Performance standards for antimicrobial susceptibility testing. Clinical and Laboratory Standards Institute.

- Dakal, T. C., et al. (2016). Mechanistic basis of antimicrobial actions of silver nanoparticles. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1831.
- Dawadi, S., Katuwal, S., Gupta, A., Lamichhane, U., Thapa, R., Adhikari, N., & Parajuli, N. (2021). Current research on silver nanoparticles: Synthesis, characterization, and applications. *Journal of Nanomaterials*, 2021, 6687290. <https://doi.org/10.1155/2021/6687290>
- Ecarnot, A. (2018). Nano-pince optique intégrée contrôlée par plasmon de surface localisé pour le piégeage de nanoparticules (Thèse de doctorat). Université Paris-Saclay.
- Falowo, A. B., Mukumbo, F. E., Idamokoro, E. M., Afolayan, A. J., & Muchenje, V. (2023). Phytochemical constituents and antioxidant activities of *Moringa oleifera*: A review. *Plants*, 12(4), 756. <https://doi.org/10.3390/plants12040756>
- Falowo, A. B., Muchenje, V., Hugo, A., & Aiyegoro, O. A. (2024). Nutritional and medicinal significance of *Moringa oleifera*: A review. *Food Reviews International*, 40(2), 445–470.
- Fraga-Corral, M., et al. (2021). Traditional applications of polyphenols and future trends. *Foods*, 10(2), 231.
- Gahlawat, G., & Choudhury, A. R. (2019). A review on the biosynthesis of metal and metal oxide nanoparticles. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(3), 534–553.
- Ghosh, S., et al. (2023). Green synthesis of silver nanoparticles using medicinal plants and evaluation of their biological applications. *Materials Today Communications*, 35, 106025.
- Hussain, M. A., Raja, M. R., Shah, M. A., & Ali, S. (2021). Green synthesis of metallic nanoparticles and their biomedical applications: A review. *Journal of Nanobiotechnology*, 19, 1–25.
- Iravani, S. (2020). Green synthesis of metal nanoparticles using plants. *Green Chemistry*, 22(10), 313–335. <https://doi.org/10.1039/D0GC00023F>
- Irfan, M., Ahmad, T., Moniruzzaman, M., Abdullah, M., & Khan, Z. (2021). Green synthesis of silver nanoparticles using plant extracts: Mechanisms and applications. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 15, 100419.
- Jain, A., Bhargava, A., et al. (2020). Pathogenicity and clinical relevance of *Escherichia coli* and *Pseudomonas aeruginosa*: A review. *Microbial Pathogenesis*, 149, 104540.
- Kaabipour, S., & Hemmati, S. (2021). A review on the green and sustainable synthesis of silver nanoparticles and one-dimensional silver nanostructures. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 12, 102–136. <https://doi.org/10.3762/bjnano.12.9>
- Keller, A. A., et al. (2022). Global life cycle releases of engineered nanomaterials. *Journal of Nanoparticle Research*, 24(4), 1–19.
- Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. (2021). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 14(1), 101755. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.101755>
- Kouamé, K. B., N'Guessan, K. A., Yapi, H. F., & Kouassi, A. M. (2021). FTIR characterization of biosynthesized silver nanoparticles using medicinal plant extracts. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 252, 119512. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.119512>
- Kumar, B., Smita, K., Cumbal, L., Debut, A., & Angulo, Y. (2017). Phytosynthesis of silver nanoparticles and their photocatalytic degradation of methylene blue dye. *Green Processing and Synthesis*, 6(5), 439–445. <https://doi.org/10.1515/gps-2016-0154>
- Kumar, V., Yadav, S. K., & Yadav, S. C. (2022). Plant-mediated synthesis of silver nanoparticles and their biomedical applications. *Nanomaterials*, 12(5), 689. <https://doi.org/10.3390/nano12050689>
- Leone, A., Spada, A., Battezzati, A., Schiraldi, A., Aristil, J., & Bertoli, S. (2021). Cultivation, genetic, ethnopharmacology, phytochemistry and pharmacology of *Moringa oleifera* Leaves: An overview. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(3), 1234. <https://doi.org/10.3390/ijms22031234>
- Le Ouay, B., & Stellacci, F. (2020). Antibacterial activity of silver nanoparticles: A surface science insight. *Nano Today*, 30, 100803. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2019.100803>
- Luceri, A., et al. (2023). Silver nanoparticles: Review of antiviral properties, mechanism of action and applications. *Microorganisms*, 11(3), 629.
- Menichetti, A., Berti, D., & Caminati, G. (2023). Antibacterial mechanisms of silver nanoparticles: Recent advances and future perspectives.

- Nanomaterials*, 13(5), 812. <https://doi.org/10.3390/nano13050812>
- More, P. R., Patil, R. S., & Patil, P. D. (2023). Silver nanoparticles as antimicrobial agents against multidrug-resistant bacteria. *Microbial Pathogenesis*, 181, 106208. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2023.106208>
- Mousa, M. A., et al. (2021). Phytochemical composition and biological activities of *Moringa oleifera*: A review. *Food Chemistry*, 346, 128897.
- Rahmayenia, R., Nurhasni, N., & Santosa, S. J. (2021). Thermal stability and physicochemical characterization of biosynthesized silver nanoparticles. *Materials Chemistry and Physics*, 271, 124874. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124874>
- Shahidi, F., & Ambigaipalan, P. (2021). Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: Antioxidant activity and health effects. *Journal of Functional Foods*, 75, 104276.
- Singh, J., Dutta, T., Kim, K. H., Rawat, M., Samddar, P., & Kumar, P. (2021). Green synthesis of metals and their oxide nanoparticles: Applications for environmental remediation. *Materials Science and Engineering C*, 121, 111846.
- Singh, S., Arkoti, N. K., Verma, V., & Pal, K. (2022). Nanomaterials and their distinguishing features. In *Nanomaterials for Advanced Technologies* (pp. 1–25). https://doi.org/10.1007/978-981-19-1384-6_1
- Vanlalveni, C., Rajkumari, K., Biswas, A., Adhikari, P. P., Lalfakzuala, R., & Rokhum, L. (2021). Green synthesis of silver nanoparticles using plant extracts and their antimicrobial activities: A review. *Applied Organometallic Chemistry*, 35(7), e6238. <https://doi.org/10.1002/aoc.6238>
- Verma, S. K., et al. (2022). Photocatalytic degradation of organic dyes using metal nanoparticles: Mechanisms and applications. *Environmental Research*, 207, 112120.
- Vergara-Jimenez, M., Almatrafi, M. M., & Fernandez, M. L. (2023). Bioactive components in *Moringa oleifera* and their health-promoting properties. *Food Chemistry*, 405, 134767. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134767>
- Vasiliev, A. N., Ivanova, E. P., & Romanova, Y. M. (2023). Molecular mechanisms underlying the antibacterial activity of silver nanoparticles. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(11), 9521. <https://doi.org/10.3390/ijms24119521>
- Wadhwani, S. A., Shedbalkar, U. U., Singh, R., & Chopade, B. A. (2020). Biogenic nanoparticles: An emerging field. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104, 4767–4783.
- Xu, L., Wang, Y.-Y., Huang, J., Chen, C.-Y., Wang, Z.-X., & Xie, H. (2020). Silver nanoparticles: Synthesis, medical applications and biosafety. *Theranostics*, 10(20), 8996–9031. <https://doi.org/10.7150/thno.45413>
- Yaqoob, A. A., Ahmad, H., Parveen, T., Ahmad, A., Oves, M., Ismail, I. M. I., Qari, H. A., Umar, K., & Mohamad Ibrahim, M. N. (2020). Recent advances in metal decorated nanomaterials and their various biological applications: A review. *Frontiers in Chemistry*, 8, 341. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00341>
- 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.
- Zhang, X., Wang, Y., Liu, Y., & Chen, H. (2022). Thermal behavior and stability of biosynthesized nanoparticles. *Thermochimica Acta*, 707, 179188. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2021.179188>