

Synthèse verte des Nanoparticules d'argent, leurs caractérisations et leurs applications: Une revue de synthèse

[Green synthesis of Silver Nanoparticles, their characterisations and their applications: A review]

Aminath Fidèle Yacoubou¹, Chakirath Folakè Arikè Salifou², Dougnon Victorien³, Baba-Moussa Lamine Saïd⁴, and Youssao Abdou Karim Issaka²

¹PhD en Biochimie, Biologie Moléculaire, Cellulaire et Microbiologie à l'Ecole Doctorale des Sciences de la Vie et de la Terre de l'université de Abomey-Calavi, Bénin

²Laboratoire de Biotechnologie Animale et Technologie des Viandes, Département de Production et Santé Animale
Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, Université d'Abomey Calavi, Abomey Calavi, Bénin

³Unité de Recherche en Microbiologie Appliquée et Pharmacologie des Substances Naturelles, Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, Université d'Abomey-Calavi, Bénin

⁴Laboratoire de Biologie et de Typage Moléculaire en Microbiologie, Faculté des Sciences et Techniques, Université d'Abomey-Calavi, Bénin

Copyright © 2025 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Due to the emergence of nanoscience and technology, metallic silver nanoparticles (AgNPs) are used as antimicrobial agents and are synthesized following various protocols. Several methods (Physical and Chemical) are used to synthesize nanoparticles, but biological methods are preferred due to their environmental friendliness, cleanliness, safety, cost-effectiveness, ease and efficiency for high productivity and purity. Green synthesis of nanoparticles (NPs) is a promising new tool in the field of bio-nanotechnology. Intra- or extracellular biosynthesis of NPs can be achieved by a wide range of biological entities, including bacteria, fungi, yeast, algae, actinomycetes and plant extracts. Biosynthesized NPs are characterized using a variety of techniques, including UV-vis spectroscopy, X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and Fourier transform infrared (FTIR) analysis and zeta potential analyses. NPs synthesized using the green approach can be used in the food industry, smart agriculture and wastewater treatment. They can be incorporated into various biotechnological fields as antimicrobial agents, antioxidants and phytopathogen control agents. This review will focus on the role of biosynthesized AgNPs for their antimicrobial application, leading to improved health, environment and prevention of infectious diseases.

KEYWORDS: Silver Nanoparticles, Plants, Microorganisms, Biotechnological application, Antimicrobial.

RESUME: En raison de l'émergence de la nanoscience et de la technologie, les nanoparticules d'argent métalliques (AgNP) sont utilisées comme agents antimicrobiens et sont synthétisées en suivant divers protocoles. Plusieurs méthodes (Physique et chimique) sont utilisées pour synthétiser les nanoparticules, mais les méthodes biologiques sont préférées en raison de leur caractère respectueux de l'environnement, propre, sûr, rentable, facile et efficace pour une productivité et une pureté élevées. La synthèse verte de nanoparticules (NPs) est un outil prometteur et nouveau dans le domaine de la bio nanotechnologie. La biosynthèse intra- ou extracellulaire des NP peut être réalisée par de nombreuses entités biologiques, notamment des

bactéries, des champignons, des levures, des algues, des actinomycètes et des extraits de plantes. La caractérisation des NP biosynthétisées sont effectuées à l'aide de différentes techniques telles que la spectroscopie UV-vis, diffraction des rayons X (DRX), microscopie électronique à balayage (MEB) et analyse infrarouge à transformée de Fourier (FTIR). Les analyses du potentiel zêta, etc. Les NP synthétisées par l'approche verte peuvent être utilisées dans les industries alimentaires, l'agriculture intelligente et le traitement des eaux usées. Elles peuvent être incorporées dans différents domaines biotechnologiques en tant qu'agents antimicrobiens, antioxydants, en tant que contrôle des phytopathogènes. Cette revue mettra l'accent sur le rôle des AgNPs biosynthétisées pour leur application antimicrobienne, ce qui permettra d'améliorer la santé, l'environnement et la prévention des maladies infectieuses, l'environnement et la prévention des maladies infectieuses.

MOTS-CLEFS: Nanoparticules d'argent, Plantes, Microorganismes, Application biotechnologique, Antimicrobien.

1 INTRODUCTION

Les concepts à l'origine de la nanotechnologie ont été évoqués pour la première fois par le physicien Richard Feynman dans son exposé intitulé "There's Plenty of Room at the Bottom" [1] dans lequel il décrivait la possibilité de synthèse par manipulation directe des atomes. Le terme nanotechnologie fait référence à la production, à la caractérisation et à la manipulation de matériaux de taille nanométrique (moins de 100 nanomètres (nm) de diamètre, 1 nm étant un millionième de millimètre) qui contiennent de nouvelles propriétés [2]. La synthèse des nanoparticules (NP) implique généralement de nombreuses méthodes physiques et chimiques. De nos jours, les synthèses biologiques sont privilégiées car elles sont sûres, propres, économiques et facilement transposables à grande échelle pour la synthèse de NP à grande échelle. Les NP trouvent d'importantes applications dans divers domaines tels que les dispositifs magnétiques, les photo catalyseurs, les dispositifs microélectroniques, les revêtements anticorrosion, le biomédical et les électro catalyseurs, ainsi que dans la métallurgie des poudres. Les applications biotechnologiques des NP se développent de jour en jour grâce à leur caractère innovant, leur biocompatibilité, leur activité anti-inflammatoire et antimicrobienne, leur libération efficace de médicaments, leur bio-activité, leur biodisponibilité, leur ciblage tumoral et leur bio-absorption [3], [4]. En raison de ces caractéristiques, elles sont des candidats appropriés pour diverses applications commerciales et domestiques, qui incluent la catalyse, l'imagerie, les applications médicales, la recherche énergétique et les applications environnementales [5]. D'autre part, les NP peuvent être utilisées dans les domaines industriel et électronique comme catalyseurs et conducteurs dans les transistors et les appareils de détection du cancer [6]. Récemment, les NP magnétiques ont été utilisées dans des domaines multidisciplinaires tels que le traitement du cancer, l'administration de médicaments, la détection des tumeurs, l'imagerie par résonance magnétique et les procédés de séparation et l'emballage alimentaire [6]. Les activités biologiques des NP magnétiques pourraient être attribuées à leur petite taille, à leurs propriétés magnétiques, à leur biocompatibilité élevée et à la facilité de modification de leur surface [7]. La synthèse verte de NP à partir de différentes entités biologiques permet de surmonter de nombreux effets destructeurs des techniques physiques et chimiques. Celles-ci incluent la biosynthèse de NP à pH, pression et température modérés, sans substances toxiques ou dangereuses, et sans ajout d'agents réducteurs, coiffants et stabilisants externes [8]. Récemment, plusieurs études publiées ont énuméré différentes formes de nanoparticules métalliques, d'oxydes métalliques et de dioxydes, notamment les nanoparticules d'argent (Ag); les nanoparticules de cuivre (Cu); les nanoparticules d'oxyde de cuivre (CuO) [4]; les nanoparticules de zinc (Zn), d'oxyde de zinc (ZnO); les nanoparticules d'or (Au) [21], les nanoparticules enrobées de polymère; les nanoparticules d'oxyde de fer (FeO); les nanoparticules de dioxyde de titane (TiO₂) [9]. Chacune de ces nanoparticules possède ses propres caractéristiques et applications.

Cet article présente une synthèse bibliographique des nanoparticules, de leurs propriétés, de leurs méthodes de synthèse, de leur application, et des risques liés à leur utilisation dans l'industrie alimentaire.

2 GENERALITES

2.1 TERMINOLOGIE

Nanomètre: Un nanomètre (nm) correspond à un millionième de millimètre, soit environ un quatre-vingts millièmes de la largeur d'un cheveu humain [10].

Echelle nanométrique: échelle de longueur s'étendant approximativement de 1 à 100 nanomètres.

Nanoparticule: Les nanoparticules sont des particules de matière dont le diamètre varie généralement de 1 à 100 nm et qui possèdent des propriétés physicochimiques nettement différentes, par exemple des propriétés colloïdales, par rapport à celles

des microparticules ou des macro-particules [11], [5]. En termes simples, les nanoparticules sont des particules dont les dimensions et les tolérances sont comprises entre 1 et 100 nm. Les nanoparticules peuvent être de formes, de tailles et de structures différentes. Elles peuvent être sphériques, cylindriques, coniques, tubulaires, à noyau creux, en spirale, etc., ou irrégulières [12].

Nanotechnologie: La nanotechnologie est une science interdisciplinaire qui intègre plusieurs disciplines, notamment la biologie, l'ingénierie chimique, la mécanique et l'électronique, pour comprendre, manipuler et construire des dispositifs, et des systèmes dotés de fonctionnalités et de qualités remarquables aux niveaux atomique, moléculaire, supramoléculaire [13].

Nanomatériaux: Les nanomatériaux (NM) peuvent être définis comme « un matériau naturel, accessoire ou manufacturé contenant des particules, à l'état libre ou sous forme d'agrégat ou d'agglomérat et où, pour 50 % ou plus des particules dans la distribution granulométrique, une ou plusieurs dimensions externes sont comprises entre 1 et 100 nm » [14].

2.2 HISTOIRE DE LA NANOTECHNOLOGIE

2.2.1 ANTIQUITE

Les nanoparticules ont été utilisées par les Romains au IV^e siècle après J.-C., qui ont démontré l'un des exemples les plus intéressants de nanotechnologie du monde antique: la coupe de Lycurgue. Cette coupe, de la collection du British Museum, représente l'une des réalisations les plus remarquables de l'industrie du verre antique. C'est le plus ancien exemple célèbre de verre dichroïque. Le verre dichroïque décrit un type de verre, qui change de couleur dans certaines conditions d'éclairage. Cela signifie que la coupe de Lycurgue a deux couleurs différentes: le verre apparaît vert en lumière directe et rouge-violet lorsque la lumière brille à travers le verre (Figure 1).



Fig. 1. La coupe de Lycurgue

Le verre apparaît vert en lumière réfléchie (A) et rouge-violet en lumière transmise (B). Reproduit avec l'autorisation de la référence [15]

En 1990, les scientifiques ont analysé la coupe à l'aide d'une microscopie électronique à transmission (MET) pour expliquer le phénomène de dichroïsme. Le dichroïsme observé (deux couleurs) est dû à la présence d'alliage de nanoparticules argent-or (Ag-Au), de 50 à 100 nm de diamètre. Un effet de dichroïsme similaire est observé dans les vitraux des églises de la fin du Moyen Âge, qui brillent d'une couleur rouge et jaune lumineuse en raison de la fusion des nanoparticules d'Ag et d'Or dans le verre. La Figure 2 montre un exemple de l'effet de ces nanoparticules de différentes tailles sur les vitraux [16].

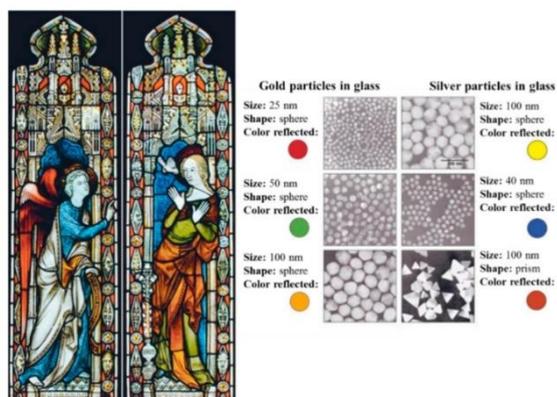


Fig. 2. Effet des nanoparticules sur les couleurs des vitraux [16]

Au cours des IXe et XVIIe siècles, les glaçures céramiques brillantes et scintillantes utilisées dans le monde islamique, puis plus tard en Europe, contenaient de l'argent ou du cuivre (Cu) ou d'autres nanoparticules. Les Italiens ont également utilisé des nanoparticules dans la création de poteries de la Renaissance au XVIe siècle. Au cours des XIIIe et XVIIIe siècles, les techniques ottomanes étaient utilisées pour produire des lames de sabre « Damas ». Cette technique consistait à utiliser des nanofils de cémentite et des nanotubes de carbone pour fournir résistance, résilience et capacité à conserver un bord tranchant. Ces couleurs et propriétés matérielles ont été produites intentionnellement pendant des centaines d'années. Les artistes et les forgerons médiévaux ont produits ces œuvres pendant des centaines d'années, sans connaître la cause des effets surprenants observés (couleurs et propriétés matériels possibles grâce aux nanomatériaux).

2.2.2 EPOQUE MODERNE

Bien que nous soyons conscients depuis longtemps de l'existence des entités de taille « nano » et que de nombreux chercheurs aient eu affaire à elles, la naissance historique de la nanotechnologie est généralement attribuée à Feynman. Les nanotechnologies ont connu des progrès depuis les premières idées de Feynman jusqu'en 1981, lorsque les physiciens Gerd Binnig et Heinrich Rohrer ont inventé un nouveau type de microscope au laboratoire de recherche IBM de Zurich, le microscope à effet tunnel (STM) [17]. Le STM utilise une pointe acérée qui, lorsqu'une tension est appliquée près d'une surface conductrice, les électrons « forment un tunnel » à travers l'espace vide de l'atome. En 1983, le groupe a publié la première image STM de la surface reconstruite de Si (111) 7×7 , qui peut aujourd'hui être imagée de manière routinière comme le montre la Figure 3 [16].

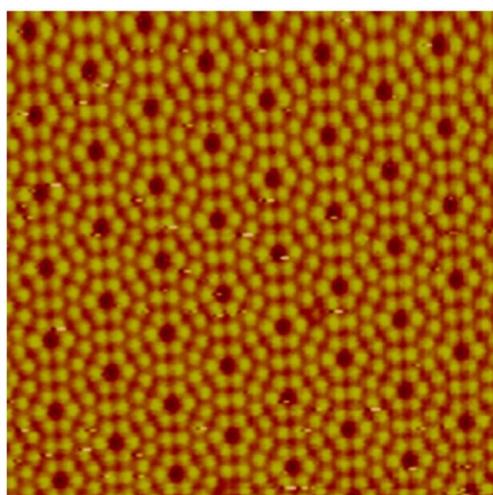


Fig. 3. Image STM de la surface reconstruite Si (111) 7×7 montrant la résolution à l'échelle atomique de la couche supérieure d'atomes de silicium [16]

L'invention du STM a été un événement clé de l'évolution de la nanotechnologie. Il a notamment été utilisé pour manipuler 35 atomes de xénon individuels par [18]. Le STM a aussi conduit au développement de deux instruments de choix des chercheurs en nanotechnologie de nos jours que sont: le Microscope à Force Atomique, et le Microscope à Sonde à Balayage [16].

Des recherches sur le carbone, ont permis la découverte de l'existence du carbone sous forme de sphères très stable (buckyballs) par [19], et aussi sous forme de nanotubes [20].

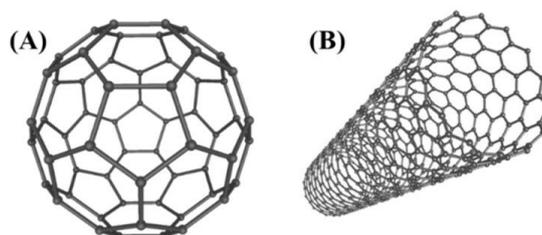


Fig. 4. Schéma d'un buckyball C60 (Fullerène) (A) et d'un nanotube de carbone (B) [16]

Depuis, la nanoscience a progressé dans d'autres domaines scientifiques comme l'informatique, la biologie et l'ingénierie. Au début du 21e siècle, l'intérêt pour les domaines des nanosciences et des nanotechnologies s'est accru. Récemment, un certain nombre d'études ont mis en évidence l'énorme potentiel des nanotechnologies en biomédecine pour le diagnostic et le traitement de nombreuses maladies humaines [21].

2.3 CLASSIFICATION

En fonction de leur composition, les nanoparticules sont généralement classées en trois classes: organiques, à base de carbone et inorganiques [12].

2.3.1 NP ORGANIQUES

Cette classe comprend des nanoparticules constituées de protéines, de glucides, de lipides, de polymères ou de tout autre composé organique [22]. Ces NP sont généralement non toxiques, biodégradables. Les NP organiques sont sensibles aux rayonnements thermiques et électromagnétiques tels que la chaleur et la lumière. De plus, elles sont souvent formées par des interactions intermoléculaires non covalentes, ce qui les rend plus labiles par nature et offre une voie d'élimination hors du corps.

Aujourd'hui, les NP organiques sont principalement utilisées dans le domaine biomédical pour l'administration ciblée de médicaments [23] et la thérapie contre le cancer [24].

Les exemples les plus marquants de cette classe sont les dendrimères, les liposomes, les micelles et les complexes protéiques tels que la ferritine (illustrés à la Figure 5).

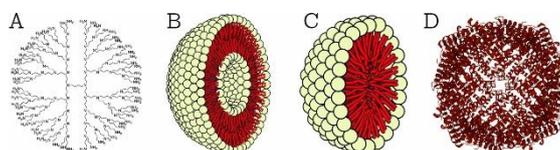


Fig. 5. Types de NP organiques. A Dendrimères; B liposomes; C micelles; et D ferritine [12]

2.3.2 NP A BASE DE CARBONE

Cette classe comprend des NP qui sont constituées uniquement d'atomes de carbone. Les NP à base de carbone réunissent les propriétés distinctives des liaisons carbones hybridées sp² avec les propriétés physicochimiques inhabituelles à l'échelle nanométrique.

Les nanoparticules à base de carbone sont utilisées dans une large gamme d'applications telles que l'administration de médicaments, le stockage d'énergie, la bio-imagerie, les dispositifs photovoltaïques et les applications de détection environnementale pour surveiller l'écologie microbienne ou détecter des agents pathogènes microbiens.

Les exemples célèbres de la classe des NP à base de carbone, sont les fullerènes, les NP de noir de carbone et les points quantiques de carbone (illustrés dans la Figure 6). Les fullerènes sont des molécules de carbone caractérisées par une structure symétrique en cage fermée d'un nombre donnée d'atomes de carbone. Les NP de noir de carbone sont des agrégats en forme de raisin de particules sphériques hautement fusionnées. Les points quantiques de carbone sont constitués de NP de carbone discrètes et quasi sphériques de tailles inférieures à 10 nm.

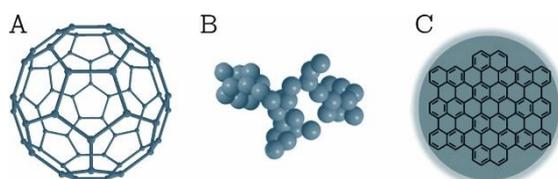


Fig. 6. Différents types de nanoparticules à base de carbone. A Fullerène C60; B nanoparticules de noir de carbone; et C points quantiques de carbone [12]

2.3.3 NP INORGANIQUES

Les nanoparticules inorganiques sont les NPs qui ne sont constituées ni de carbone ni de matériaux organiques. Les exemples typiques de cette classe sont les nanoparticules métalliques, céramiques et semi-conductrices.

Les nanoparticules métalliques sont constituées uniquement de précurseurs métalliques comme l'Argent et l'Or. Les NPs métalliques sont de plus en plus utilisés dans de nombreuses applications physiques, chimiques, biologiques, biomédicales et pharmaceutiques.

Les nanoparticules céramiques sont constituées de carbonates, de carbures, de phosphates et d'oxydes de métaux et de métalloïdes, tels que le titane et le calcium. Elles sont principalement utilisées dans les applications biomédicales en raison de leur grande stabilité et de leur capacité de charge élevée.

Les nanoparticules semi-conductrices sont constituées de matériaux semi-conducteurs, qui possèdent des propriétés entre les métaux et les non-métaux. Ces nanoparticules sont des matériaux importants dans la photocatalyse, l'optique et les dispositifs électroniques [12].

2.4 PROPRIETES

Les NP peuvent être utilisées dans une longue liste d'applications en raison de leurs propriétés physiques et chimiques uniques qui n'existent pas dans leurs plus grandes dimensions de mêmes matériaux.

2.4.1 PROPRIETES MECANIQUES

Les propriétés mécaniques désignent les caractéristiques mécaniques d'un matériau dans différentes conditions, environnements et diverses forces externes. Comme pour les matériaux traditionnels, les propriétés mécaniques des nanomatériaux se composent généralement de dix parties: résistance, fragilité, dureté, ténacité, résistance à la fatigue, plasticité, élasticité, ductilité, rigidité et limite d'élasticité. En raison des effets de surface et quantiques, les NP présentent des propriétés mécaniques différentes de celles des matériaux massifs [25].

Diverses forces d'interaction entre les NP ou entre les NP et leur surface, sont à l'origine de l'émergence de nouvelles propriétés mécaniques. Il existe différentes théories sur comment les forces d'interaction entre NP leur confèrent de nouvelles propriétés mécaniques [12].

2.4.2 PROPRIETES THERMIQUES

Les principaux composants des propriétés thermiques d'un matériau sont la conductivité thermique, le pouvoir thermoélectrique, la capacité thermique et la stabilité thermique. Le transfert de chaleur dans les NP dépend principalement de la conduction d'énergie due aux électrons ainsi qu'aux photons et aux effets de diffusion qui les accompagnent. La taille des NP a un impact direct sur sa conductivité électrique et thermique [26].

2.4.3 PROPRIETES MAGNETIQUES

Les propriétés magnétiques des matériaux changent à l'échelle nanométrique. Plusieurs matériaux deviennent magnétiques sous forme de nanoparticules en raison d'une distribution électronique inégale.

Dans les matériaux en vrac, les paramètres clés pour déterminer les propriétés magnétiques sont la composition, la structure cristallographique, l'anisotropie magnétique et les défauts de lacunes. Cependant, à l'échelle nanométrique, deux paramètres plus importants sont fortement impliqués, à savoir la taille et la forme.

Lorsque la taille des NP diminue, l'énergie d'anisotropie magnétique, qui est l'énergie qui maintient le moment magnétique dans une orientation particulière, par nanoparticule diminue.

Le deuxième paramètre clé pour déterminer les propriétés magnétiques des NP est la forme. En comparaison avec le paramètre de taille, il existe beaucoup moins de recherches sur l'effet de la forme sur les propriétés magnétiques des NP ayant le même volume [27].

2.4.4 PROPRIETES ELECTRONIQUES ET OPTIQUES

Les nanoparticules métalliques et semi-conductrices possèdent une absorption linéaire intéressante, une émission de photoluminescence et des propriétés optiques non linéaires en raison du confinement quantique et de l'effet de résonance plasmique de surface localisée (LSPR). En général, les propriétés optiques des NP dépendent de la taille, de la forme et de l'environnement diélectrique des nanoparticules [12], [28].

2.4.5 PROPRIETES CATALYTIQUES

La nano catalyse, c'est-à-dire l'utilisation de nanoparticules comme catalyseurs, est un domaine en évolution rapide au sein de la catalyse chimique. Des propriétés catalytiques considérablement améliorées ou nouvelles, telles que la réactivité et la sélectivité, ont été rapportées pour les catalyseurs à base de nanoparticules par rapport à leurs analogues en vrac. Les propriétés catalytiques des nanoparticules dépendent de la taille, de la forme, de la composition, de l'espacement interarticulaire, de l'état d'oxydation et du support des nanoparticules [29].

La dépendance de l'activité catalytique sur la taille des NP est bien étudiée. La relation est inverse, c'est-à-dire que plus les NP sont petites, plus elles sont actives sur le plan catalytique. Les chercheurs ont observé que les plus petites NP fournissaient les densités de courant normalisées les plus élevées [12].

Il est également connu que la forme affecte la réactivité et la sélectivité des NP.

En ce qui concerne la composition, plusieurs études ont montré que l'utilisation d'alliages dans les NP peut améliorer l'activité catalytique en raison de l'effet d'alliage provoquant des changements dans les propriétés électroniques du catalyseur, diminuant les effets d'empoisonnement et fournissant des sélectivités distinctes [29].

En plus des réactivités catalytiques améliorées, le support joue également un rôle important dans la stabilisation des NP, c'est-à-dire la stabilisation des NP contre le grossissement, la stabilisation des oxydes métalliques à la surface des NP et la stabilisation des espèces de réactions intermédiaires [29].

2.5 CARACTERISATION

Les propriétés des NP déterminent leurs applications potentielles. Par conséquent, différentes méthodes et techniques sont utilisées pour l'analyse et la caractérisation des diverses propriétés physico-chimiques des NP.

2.5.1 MORPHOLOGIQUE ET TOPOGRAPHIQUE

Les caractéristiques morphologiques et topographiques des NP présentent un grand intérêt car elles influencent la plupart des propriétés des NP décrites ci-dessus. Ces caractéristiques comprennent la taille, la forme, la dispersion, la localisation, l'agglomération/agrégation, la morphologie de surface, la surface et la porosité des nanoparticules.

La microscopie électronique [12], la diffusion dynamique de la lumière (DLS) [30] également appelée spectroscopie de corrélation de photons (PCS) [31], l'analyse de suivi des nanoparticules (NTA) [32], la méthode Brunauer-Emmett-Teller (BET) [5], et la méthode Barrett-Joyner-Halenda (BJH) [33] sont autant de méthodes de caractérisation morphologique et topographique.

2.5.2 STRUCTURAL ET CHIMIQUE

La caractérisation de la structure et de la composition des NP revêt d'une grande importance du fait de la grande influence de ces paramètres sur les propriétés physicochimiques.

Les techniques citées dans la suite de cette section, sont couramment utilisées pour l'analyse de la composition, de la phase, de la cristallinité, de la fonctionnalisation, de l'état chimique (oxydation), de la charge de surface, de la polarité, de la liaison et des propriétés électrochimiques des NP: l'analyse par diffraction des rayons X (DRX) [34], la spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (EDX) [35], l'imagerie annulaire à champ sombre à grand angle (HAADF) [36], la technique de spectroscopie de photoélectrons à rayons X (XPS) [5], la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) [37], [38], la technique de l'analyse du potentiel zêta [39], la Voltamétrie cyclique (CV) [40], [41], [42], et la spectroscopie Raman [5].

2.5.3 OPTIQUE, ELECTRONIQUE ET ELECTRIQUE

Outre la spectroscopie Raman et la spectroscopie SERS, d'autres techniques peuvent également être utilisées pour étudier et caractériser les propriétés optiques des nanoparticules. Ces techniques fournissent des informations sur les propriétés d'absorption, de réflectance, de fluorescence, de luminescence, d'état électronique, de bande interdite, de photo activité et de conductance électrique des nanoparticules: la spectroscopie ultraviolette-visible (UV-vis) [12], la spectroscopie de photoluminescence (PL) [43], la spectroscopie de réflectance diffuse UV-vis (DRS) [44], et l'ellipso métrie spectroscopique [5].

2.5.4 MAGNETIQUE

Les propriétés magnétiques des nanoparticules sont d'une grande importance, car elles leur confèrent potentiellement de grands avantages dans les domaines de la catalyse, de l'électronique et des applications médicales.

Plusieurs techniques ont été développées pour la détection et la quantification de petits moments magnétiques dans les nanoparticules: la microscopie à force magnétique (MFM) [45], la magnétométrie par échantillon vibrant (VSM) [46], la magnétométrie à interférence quantique supraconductrice (SQUID) [12], et la spectroscopie de résonance de spin électronique (ESR) [47].

2.5.5 THERMIQUE

Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour caractériser les propriétés thermiques des NP, telles que les points de fusion, les points de cristallisation et de transition de phase structurelle, la capacité thermique, la conductivité thermique et la stabilité thermique et oxydative: la calorimétrie différentielle à balayage (DSC), l'analyse thermique différentielle (ATD), l'analyse thermogravimétrique (ATG) [48], la méthode du fil chaud transitoire (THW) [12].

2.5.6 MECANIQUE

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour caractériser les propriétés mécaniques des NP, telles que les résistances à la traction et à la compression, l'élasticité, la viscoélasticité, la dureté et la rigidité: la tensiométrie, la méthode des essais d'indentation instrumentés, l'analyse mécanique dynamique (DMA) [12].

2.6 MECANISMES ANTIBACTERIENS

Le mécanisme exact des nanoparticules pour les espèces bactériennes n'a pas encore été entièrement élucidé, mais leur fonction est principalement due à l'induction d'un stress oxydatif dû à la formation de radicaux libres [49].

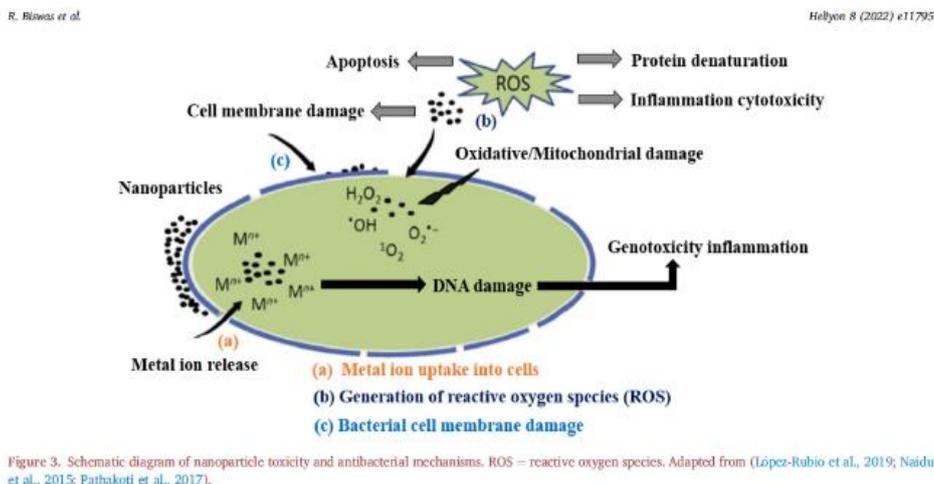


Fig. 7. Schéma de la toxicité des nanoparticules et des mécanismes antibactériens [50]

Néanmoins, on sait que les nanoparticules pénètrent à travers les trous et les creux présents sur la membrane cellulaire et endommagent ainsi la cellule. Les nanoparticules métalliques se fixent alors à la membrane cellulaire bactérienne et libèrent des ions métalliques qui modifient la perméabilité de la membrane cellulaire, provoquant la mort de la cellule bactérienne [51].

La destruction de la paroi cellulaire et l'extrusion du contenu présent dans le cytoplasme sont illustrées dans la Figure 8.

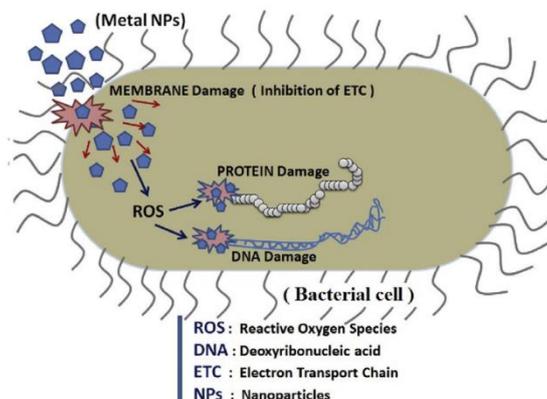


Fig. 8. L'interaction des nanoparticules métalliques avec les cellules bactériennes est illustrée dans la figure ci-dessus. Les ROS sont le principal facteur responsable des dommages cellulaires [49]

L'absorption d'ions métalliques dans les cellules, l'épuisement des cellules, la perturbation de la réplication de l'ADN, la libération d'ions métalliques et la génération de ROS, ainsi que l'accumulation et la dissolution de NP dans la membrane bactérienne, sont le mécanisme probable du fonctionnement des nanoparticules en tant qu'agent antibactérien, comme le montre la Figure 9 [49].

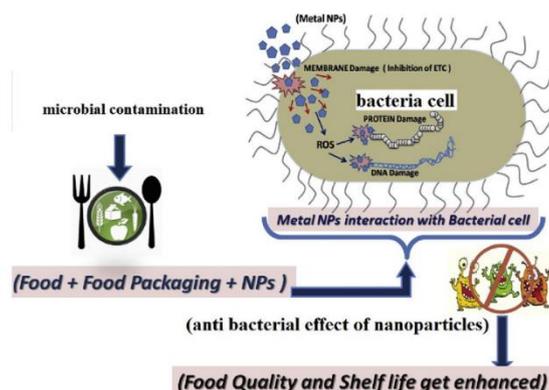


Fig. 9. Mécanisme proposé de l'activité antibactérienne des nanoparticules contre les cellules bactériennes pathogènes [49]

3 SYNTHÈSE DES NANOPARTICULES

3.1 APPROCHES DE SYNTHÈSE

Diverses méthodes peuvent être utilisées pour synthétiser des nanoparticules. Toutefois ces méthodes peuvent être regroupées en deux grandes approches: l'approche descendante « top-down » et l'approche ascendante « Bottom-up ». Ces approches se divisent en plusieurs sous-classes en fonction de l'opération, des conditions de réaction et des protocoles adoptés [5].

3.1.1 APPROCHE DESCENDANTE

L'approche descendante « top-down » est plus utilisée pour le traitement des matériaux inorganiques par des méthodes traditionnelles telles que le broyage, le tamisage et les réactions chimiques [52]. Cette méthode utilise une approche destructive. On part d'une molécule plus grosse, qui se décompose en unités plus petites, puis ces unités sont converties en NP adaptées (Khan, et al., 2019).

3.1.2 APPROCHE ASCENDANTE

L'approche ascendante « Bottom-up » est utilisée en sens inverse car les NP sont formées à partir de substances relativement plus simples. Cette approche est également appelée approche de construction. Des exemples de ce cas sont les techniques de sédimentation et de réduction. Cela comprend le sol-gel, la synthèse verte, le filage et la synthèse biochimique [53].

3.2 MÉTHODES DE SYNTHÈSE

Les propriétés physiques, chimiques et biologiques distinctives des nanoparticules les rendent idéales pour une variété d'applications dans diverses industries et secteurs biomédicaux [54]. Diverses méthodes chimiques, physiques et biologiques sont actuellement accessibles pour créer diverses variétés de nanoparticules [55].

3.2.1 MÉTHODES PHYSIQUES

Les nanoparticules sont traditionnellement produites à l'aide de méthodes physiques, qui utilisent l'énergie thermique, le rayonnement à haute énergie et la pression mécanique pour provoquer la condensation, l'évaporation, l'abrasion ou la fusion des matériaux. Les méthodes physiques sont supérieures aux approches chimiques en termes d'absence de contamination par solvant dans les films minces et d'homogénéité de la distribution des nanoparticules. Les méthodes physiques utilisent une approche descendante, sont sans solvant et produisent des nanoparticules monodisperses cohérentes.

L'ablation laser [56], la pyrolyse laser, le dépôt physique en phase vapeur, le broyage à billes à haute énergie [57] et la condensation de gaz inerte [58] font partie des méthodes physiques couramment utilisées pour générer des nanoparticules [55].

3.2.2 METHODES CHIMIQUES

La méthode chimique utilise des agents réducteurs organiques et inorganiques pour la synthèse des nanoparticules. Les agents réducteurs réduisent les ions, ce qui entraîne la formation de métal et son agglomération en amas oligomériques. Des particules colloïdales métalliques se forment à la suite de ces amas. Il est essentiel d'utiliser des agents protecteurs lors de la préparation de nanoparticules métalliques afin d'empêcher les nanoparticules de s'agglutiner et donc de stabiliser les nanoparticules dispersives [55].

Les méthodes chimiques utilisées pour créer des nanoparticules comprennent entre autres la synthèse hydrothermale, la méthode sol-gel, la synthèse par plasma et par vapeurs chimiques. Ces méthodes sont classées comme synthèse ascendante de nanoparticules.

3.2.3 METHODES BIOLOGIQUES

Bien que les méthodes chimiques et physiques soient plus couramment utilisées pour la synthèse des nanoparticules, leurs applications sont limitées en raison de l'utilisation de composés et de rendements toxiques. Les méthodes chimiques et physiques présentent certains inconvénients, notamment un temps de synthèse long, des coûts de production plus élevés, une purification difficile, ainsi que le rejet de sous-produits dangereux et nocifs. Les techniques de synthèse chimique peuvent également contribuer à l'apparition d'espèces chimiques dangereuses qui ont été adsorbées, ce qui peut entraîner des conséquences négatives dans les applications médicales [55].

En raison de la simplicité et de la polyvalence des procédures, le développement de méthodes de production biogénétique respectueuses de l'environnement devient de plus en plus populaire. La technique de biosynthèse des nanoparticules suit une méthode ascendante qui implique une réaction primaire (oxydation/réduction) [57].

Les méthodes biologiques de synthèse des nanoparticules peuvent être généralement classées en différentes catégories: Synthèse basée sur des biomolécules, Synthèse basée sur des micro-organismes et Synthèse basée sur des plantes.

Synthèse biologique de nanoparticules à l'aide de biomolécules: Les biomolécules sont des nanostructures sophistiquées, programmées par des informations de séquence et adaptées par l'évolution. Les virus, les diatomées, l'ADN, l'ARN et les protéines sont tous des outils puissants qui sont utilisés comme modèle (matrice) pour la synthèse de nanoparticules. Les filaments d'actine ont l'avantage de servir de modèle pour la formation de nanofils. L'ADN est considéré comme un modèle biomoléculaire admirable et un candidat prometteur avec une forte affinité pour les ions de métaux de transition. Les groupes fonctionnels d'acides aminés trouvés dans l'enzyme moléculaire pourraient fonctionner comme agent réducteur pour la synthèse de nanoparticules métalliques, tandis que la chaîne polypeptidique restante pourrait aider à stabiliser les nanoparticules [59].

Synthèse biologique de nanoparticules à l'aide de micro-organismes: c'est une méthode de chimie verte qui combine la nanotechnologie et la biotechnologie microbienne. Les microbes sont de petits organismes qui incluent les bactéries, les champignons et les virus. La synthèse microbienne de nanoparticules combine plusieurs disciplines, dont la biotechnologie, la microbiologie et la nanotechnologie, pour former un nouveau domaine connu sous le nom de nanobiotechnologie [60]. Les bactéries, les virus, les champignons, les algues, les levures et les actinomycètes sont tous couramment utilisés comme bioréacteurs dans la synthèse de nanoparticules [61].

Synthèse biologique de nanoparticules à partir de plantes: L'utilisation de plantes pour la synthèse de nanoparticules présente l'avantage d'être pratique, facile à manipuler et de contenir une variété de métabolites qui peuvent favoriser la réduction. Les propriétés médicinales des plantes sont connues depuis le début de la civilisation humaine. Les résultats de l'efficacité médicale des plantes ont déjà été testés par des ethno pharmacologues, des botanistes, des microbiologistes et des chimistes avec des produits naturels [55]. De nombreuses biomolécules naturelles des plantes jouent un rôle crucial dans la bio réduction, la formation, le coiffage et la stabilisation des nanoparticules [62]. Les plantes, en particulier, sécrètent des biomolécules fonctionnellement actives, réduisant les ions métalliques, rendant la synthèse de nanoparticules biologiques biocompatible. Les plantes sont utilisées pour fabriquer des nanoparticules car elles sont spontanées, peu coûteuses et ont un processus de biosynthèse en une seule étape [63]. Un certain nombre de plantes et leurs différentes parties (feuilles, racines, graines, écorces, fleurs, fruits) sont utilisées pour la biosynthèse de nanoparticules. De nombreux extraits de plantes différents ont été utilisés comme précurseurs dans la création de nanoparticules (NP) avec des applications potentielles [64], [65], [66], [67]. La synthèse biologique des nanoparticules à partir des plantes est aussi appelée **synthèse verte des nanoparticules**. La synthèse verte est un domaine émergent dans le domaine de la bio nanotechnologie et offre des avantages économiques et environnementaux en tant qu'alternative aux méthodes chimiques et physiques. Dans cette méthode, des réactifs sûrs, non toxiques et respectueux de l'environnement sont utilisés [68].

La procédure expérimentale pour la synthèse de NP à partir de biomasse végétale est illustrée dans la Figure 10.

Le pH du milieu solvant, la température, la concentration de sel, et le temps de réaction de réduction sont autant de facteurs qui peuvent influencer la synthèse des nanoparticules métalliques [62].

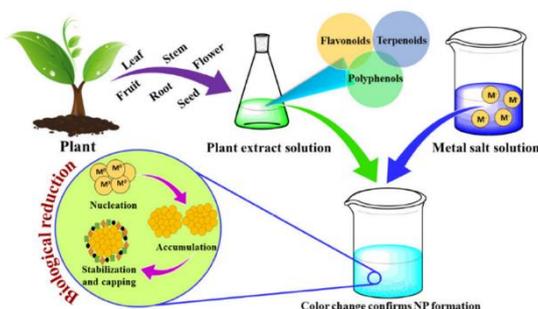


Fig. 10. Représentation schématique de la biosynthèse de nanoparticules médiée par les plantes [69]

4 APPLICATIONS

En raison de leurs propriétés physicochimiques uniques ou améliorées mentionnées plus haut, les NP sont utilisées dans une large gamme d'applications dans différents domaines. Nous présentons ici quelques domaines d'application des nanoparticules.

4.1 MEDECINE ET PHARMACIE

La recherche sur l'utilisation des nanoparticules dans la médecine pour le traitement du cancer a connu des progrès significatifs. En effet, il a été montré que les NP métalliques et semi-conductrices, en raison de leurs propriétés améliorées de diffusion et d'absorption de la lumière (effet LSPR), ont un énorme potentiel pour le diagnostic et le traitement du cancer. Par exemple, l'excellente capacité d'absorption de la lumière et sa reconversion en chaleur localisée, et les propriétés optiques uniques des NP Au, en font un excellent candidat pour la thérapie photo thermique sélective du cancer (mort des cellules cancéreuses par la chaleur générée dans le tissu tumoral) [70], [71], et pour la thérapie photo dynamique du cancer (l'utilisation d'un médicament activé par la lumière pour tuer les cellules cancéreuses) [72].

Des études sur les NP à base de Gd ont également montré de grandes capacités dans l'inhibition de la croissance tumorale [73], l'inhibition des métastases [74] et l'amélioration du contraste de résonance magnétique spécifique à la tumeur [75].

Par ailleurs des études ont également montré que les nanoparticules de ZnO et de Fe₃O₄ pouvaient être utilisées efficacement pour l'administration ciblée de médicaments et la destruction sélective de cellules tumorales [76], [77], [78]

Hormis le traitement du cancer, les nanoparticules ont montré du succès dans différentes applications médicales telles que l'imagerie cellulaire [79], ou dans les biocapteurs pour l'ADN, les glucides, les protéines et les ions de métaux lourds [80], [81], la détermination des niveaux de glucose sanguin [82] et pour les diagnostics médicaux pour détecter les bactéries [83] et les virus [84].

Dans le même temps, en raison de leurs activités antimicrobiennes et antibactériennes, les NP telles que TiO₂, ZnO, CuO et BiVO₄ sont de plus en plus utilisées dans divers produits médicaux tels que les cathéters [85], [86].

4.2 AGRICULTURE

Les nanoparticules sont principalement utilisées sous deux formes en agriculture, comme nanofertilisants et nanopesticides. Les nanoparticules ont le potentiel d'être bénéfiques pour le secteur agricole en fournissant de nouvelles solutions aux problèmes agricoles et environnementaux actuels. En effet, bien que l'application des engrais chimiques augmente la productivité des cultures, leur impact environnemental est accru par la quantité excessive nécessaire à appliquer pour obtenir des résultats [87].

En revanche, les nanofertilisants sont des composés qui sont appliqués en plus petites quantités que les engrais chimiques classiques mais qui ont pourtant une meilleure efficacité [88]. La différence d'efficacité vient du fait qu'ils sont capables de

libérer les nutriments, juste au moment et à l'endroit où les plantes en ont besoin. De cette façon, ils limitent la pollution atmosphérique et des eaux par les engrais [89].

Plusieurs nanoparticules ont été utilisées dans le développement d'engrais, notamment les nanoparticules de dioxyde de silicium (SiO₂), d'oxyde de Zinc (ZnO), d'oxyde de cuivre (CuO), de fer (Fe) et de magnésium (Mg). Ces nanofertilisants permettent aux plantes de mieux fixer l'azote, d'améliorer la germination des graines, de mieux résister au stress dû à la sécheresse, d'augmenter le poids des graines et d'augmenter la capacité de photosynthèse [90], [91].

Plusieurs nanofertilisants ont prouvé leurs activités antimicrobiennes, insecticides et nématicides, ce qui en font une alternative prometteuse aux pesticides chimiques et une alternative potentiellement moins chère aux biopesticides [69].

Par exemple, des études ont montré une puissante activité antimicrobienne des nanofertilisants de dioxyde de titane (TiO₂) contre *Xanthomonas perforans*, l'agent responsable de la maladie des taches de la tomate [92], une activité insecticide des nanofertilisants d'oxyde de cuivre (CuO) contre *Spodoptera littoralis*, connu sous le nom de ver africain du cotonnier [93], et une activité nématicide des nanofertilisants d'argent (Ag) contre *Meloidogyne spp.*, les nématodes à galles [94].

4.3 INDUSTRIE ALIMENTAIRE

Les NP, malgré les préoccupations toxicologiques, ont des applications importantes dans plusieurs processus liés à l'industrie alimentaire tels que la production, la conservation et l'emballage des aliments.

4.3.1 PRODUCTION DES ALIMENTS

L'intégration des NP dans les processus de production des aliments est de plus en plus grandissante. En termes de production alimentaire, l'utilisation des NP s'est beaucoup plus accentué sur l'amélioration de la qualité des aliments.

La contamination microbienne est la cause principale d'intoxication alimentaire qui constitue un problème de santé publique. De nouveaux nano-antimicrobiens ont montré des effets prometteurs sur la prévention de la détérioration des aliments, prolongeant ainsi leur durée de conservation. Un certain nombre de nanomatériaux métalliques et d'oxydes métalliques ont depuis longtemps été considérés efficaces en tant que antimicrobiens [95]. Les propriétés physicochimiques intrinsèques de ces nanomatériaux, permettent la formation excessive d'espèces réactives de l'oxygène (ROS), conduisant à un stress oxydatif et à des dommages cellulaires ultérieurs [96], [97]. La figure représente les mécanismes possibles de toxicité des nanomatériaux métalliques.

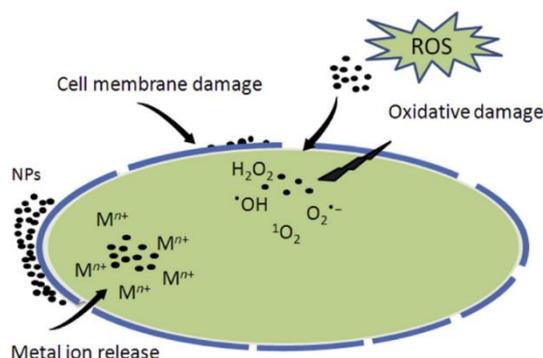


Fig. 11. Représentation schématique des mécanismes possibles de toxicité impliqués dans les nanomatériaux contenant du métal: (1) absorption d'ions métalliques dans les cellules, (2) génération d'espèces réactives de l'oxygène et (3) dommages à la membrane cellulaire bactérienne [98]

Des nanomatériaux moins réactifs pour provoquer un stress oxydatif sont aussi développés pour agir comme transporteurs d'antioxydants. Selon [99], les nanoparticules polymères conviennent à l'encapsulation de composés bioactifs (par exemple, des flavonoïdes et des vitamines) et à leur libération dans des environnements acides (c'est-à-dire, l'estomac). Aussi, des nanoparticules d'acide gallique SiO₂ en tant que nouveaux nano antioxydants sont développées et testées en fonction de leur capacité de piégeage des radicaux 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle [100].

Les NP sont aussi utilisés pour améliorer les propriétés physiques, telles que la couleur, la saveur des aliments. Certains produits à base de nanomatériaux ont actuellement été approuvés pour une utilisation comme additifs colorants alimentaires,

qui jouent un rôle essentiel dans l'attrait psychologique des produits de consommation. C'est le cas par exemple du TiO₂ qui a été approuvé par la FDA américaine comme additif colorant alimentaire [95].

Les arômes sont très importants dans la production des aliments, car ils permettent une perception sensorielle du goût et de l'odorat pour améliorer l'expérience culinaire globale. Par exemple, les techniques d'encapsulation ont été utilisées pour retenir et libérer de manière contrôlée les arômes [101].

4.3.2 EMBALLAGES ET PRESERVATION DES ALIMENTS

Les emballages alimentaires basés sur la nanotechnologie peuvent être divisés en trois catégories: la première est le système d'emballage amélioré, la deuxième est le système d'emballage actif et la troisième est le système d'emballage intelligent [49].

Les NP ont permis de modifier les matériaux d'emballage des aliments en améliorant entre autres leur barrière mécanique et leur efficacité antimicrobienne. Les systèmes de conservation des aliments avec emballage antimicrobien offrent des propriétés de barrière avancées aux aliments [102]. L'activité antimicrobienne photo catalytique des nanoparticules de TiO₂ en fait un matériau intéressant pour l'emballage alimentaire [103]. De plus, elles sont également utilisées dans les capteurs pour détecter les composés organiques volatils [104]. Les nanoparticules d'argent sont également prometteuses dans l'emballage alimentaire en raison de leur activité antimicrobienne. Elles jouent un rôle important dans la réduction du risque d'agents pathogènes et la prolongation de la durée de conservation des aliments [69].

La nanotechnologie offre une sécurité alimentaire en termes d'emballage pour assurer une durée de conservation plus longue des produits alimentaires en évitant la perte de nutriments [98]. Par exemple, le chlorure de polyvinyle dopé aux NP d'Ag a été évalué pour l'emballage de viande hachée à température de réfrigérateur (4 °C); les résultats ont montré que les AgNP ont contribué de manière significative à ralentir la croissance bactérienne, augmentant la durée de conservation de la viande hachée de 2 à 7 jours [105].

Les propriétés antioxydantes des nanomatériaux, ont permis quelques applications comme agents anti-brunissement dans l'emballage des fruits. L'utilisation d'emballage actif recouvert de nano-ZnO a permis de conserver l'apparence initiale des pommes « Fuji » fraîchement coupés, d'éviter l'indice de brunissement, et d'améliorer les propriétés de durée de conservation [95].

Outre les avantages mentionnés ci-dessus, les nanomatériaux ont également été constamment développés pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques des emballages en termes de résistance à la traction, de rigidité, de perméabilité aux gaz, de résistance à l'eau, de résistance aux flammes, etc [95].

4.3.3 COMPLEMENTS ALIMENTAIRES

Les applications potentielles de la nanotechnologie dans les aliments fonctionnels et la conception de compléments nutritionnels et de produits nutraceutiques contenant des ingrédients et des additifs de taille nanométrique tels que des vitamines, des antimicrobiens, des antioxydants et des conservateurs sont actuellement disponibles pour améliorer le goût, l'absorption et la biodisponibilité [106].

La nano encapsulation est le processus d'emballage de matériaux à l'échelle nanométrique à l'aide de nano capsules, et elle fournit une fonctionnalité du produit final qui comprend la libération contrôlée du noyau. Ainsi, les formes encapsulées d'ingrédients présentent plusieurs avantages, notamment une durée de conservation plus longue, une stabilité améliorée, la distribution consécutive de plusieurs ingrédients actifs et une libération contrôlée déclenchée par le pH [98].

L'utilisation de nanomatériaux comme systèmes de distribution pour améliorer la biodisponibilité de composés bioactifs en tant que compléments nutritionnels a été examinée dans certaines études [107].

Des ingrédients fonctionnels tels que des vitamines, des antioxydants, des probiotiques, des caroténoïdes, des conservateurs, des acides gras oméga, des protéines, des peptides et des lipides ainsi que des glucides sont incorporés dans un système de nano distribution.

La nano encapsulation est un domaine majeur de la nanotechnologie, qui est utilisée efficacement pour administrer des ingrédients et des additifs alimentaires sensibles. Les ingrédients et additifs alimentaires nano encapsulés sont utilisés dans une gamme de produits alimentaires tels que l'administration de microbes probiotiques vivants pour une fonction métabolique

saine [69]. Les probiotiques nano encapsulés peuvent être délivrés de manière sélective à certaines parties du tractus gastro-intestinal, où ils ont la capacité de moduler les réponses immunitaires [98].

5 RISQUES LIÉS À L'UTILISATION DES NANOPARTICULES DANS L'INDUSTRIE ALIMENTAIRE

Les diverses applications des nanoparticules et de la nanotechnologie offrent de nombreux avantages pour la qualité et la sécurité des aliments. De la ferme à l'assiette, la nanotechnologie a prouvé son impact à chaque étape de la fabrication des aliments, améliorant la durée de conservation, la nutrition, le contrôle de la qualité et l'emballage intelligent.

Cependant, les applications non réglementées des nanoparticules peuvent présenter des risques pour la santé humaine et l'environnement [69]. Lorsque les nanoparticules pénètrent dans le corps, elles entrent en contact avec diverses entités biologiques telles que les protéines, les lipides et les enzymes présents dans le liquide biologique. Ces biomolécules interagissent avec la surface des nanoparticules pour former une couche complexe appelée « couronne », sur les nanoparticules. La force de la couronne, faible ou forte, est déterminée par les propriétés physiques et chimiques des particules. Cette couronne protéique est responsable de divers effets toxiques [49].

La nano toxicité des NP est principalement médiée par la surproduction de ROS, ce qui entraîne l'induction d'un stress oxydatif et empêche ainsi les cellules de maintenir des fonctions physiologiques normales régulées par la redox. Ainsi, la nano toxicité peut entraîner des dommages à l'ADN, une signalisation cellulaire dérégulée, une modification de la motilité cellulaire, une cytotoxicité, une apoptose et l'initiation du cancer [96].

La libération massive de NP dans l'environnement par diverses industries entraîne la production de nanodéchets et s'avère dangereuse pour les organismes vivants et constitue une menace pour l'équilibre des écosystèmes. Ces NP peuvent persister dans l'air, le sol, l'eau ou les systèmes biologiques [108].

Les NP entraînent des conséquences néfastes sur la santé humaine et animale. Les NP peuvent pénétrer dans le corps humain ou animal par la peau, par voie orale ou par les voies respiratoires, puis se déplacer vers d'autres parties du corps. L'utilisation de NP a intensifié le risque de diverses maladies chez l'homme telles que le diabète, le cancer, l'asthme bronchique, les allergies, l'inflammation, etc [109]. Il a été constaté que l'exposition aux NP active les cytokines et les chimiokines pro-inflammatoires avec recrutement de cellules inflammatoires, ce qui affecte l'homéostasie du système immunitaire et peut conduire à des maladies auto-immunes, allergiques ou néoplasiques [108].

La nano encapsulation et les additifs alimentaires, favorisent le contact direct des NP avec les organes internes du corps humains, et peuvent s'accumuler. Une étude sur le TiO₂ contenu dans les chewing-gums enrobés de sucre a révélé que plus de 93 % du TiO₂ présent dans les chewing-gums est de taille nanométrique, et peut facilement être libéré, être avalé avec la salive et s'accumuler progressivement dans l'organisme [95]. Aussi, la consommation d'aliments contenant du E551, expose à une accumulation progressive dans l'organisme de NP de SiO₂ [110]. De plus, la nano encapsulation permet également le contact direct des nanomatériaux avec l'homme par ingestion orale.

Les revêtements comestibles à l'échelle nanométrique, qui sont apparus comme une alternative intéressante pour préserver la qualité des aliments, prolonger la durée de conservation et prévenir la détérioration microbienne, favorisent l'exposition directe des humains aux nanomatériaux [95].

L'utilisation des emballages alimentaires à base de NP, expose aussi directement les humains à la nano toxicité. En effet, des études ont montré la possibilité de migration des NP vers les aliments, qui seront ensuite consommés par les Hommes. Par exemple, les nanoparticules d'argent et d'oxyde de zinc peuvent migrer dans les aliments lorsqu'ils sont utilisés comme matériaux d'emballage, et des ions argent d'un niveau détectable ont été infiltrés dans les exsudats de viande (mais pas dans la viande elle-même); il a également été signalé que les ions métalliques d'argent et de zinc se sont infiltrés dans la substance alimentaire (jus d'orange), ce qui peut accélérer la dégradation de l'acide ascorbique [98]. La solubilité des nano-métaux augmente avec l'augmentation de la température et la diminution du pH, ce qui entraîne une accélération de la migration dans le système d'emballage [111]. L'utilisation des nanotechnologies n'a pas encore été étudiée en profondeur dans le contexte de sa toxicité. Le nombre de tests sur la migration des NP vers les aliments est encore largement limité et des recherches supplémentaires sont nécessaires avant d'appliquer largement ces matériaux. Il revêt d'une importance capitale qu'une évaluation des risques des applications des nanotechnologies dans le secteur alimentaire soit effectuée. Le grand défi consiste à associer les nanoparticules au système alimentaire. Par conséquent, des études supplémentaires doivent être menées pour évaluer la toxicité potentielle des nanomatériaux ou des nanostructures destinés à être utilisés dans les sciences alimentaires et les industries connexes.

6 CONCLUSION

Des études récentes ont accordé une grande attention aux nanotechnologies et aux nanoparticules. Les nanoparticules sont utilisées dans une variété d'applications. Dans l'industrie alimentaire, elles sont utilisées dans la production, le stockage et l'emballage des aliments, ainsi que dans la production des compléments alimentaires. Les nanoparticules sont des agents antibactériens prometteurs en raison de leur large activité contre les cellules bactériennes à Gram positif et à Gram négatif. Plusieurs techniques sont utilisées pour leur production mais la synthèse verte (technique biologique) demeure la plus attrayante. Malgré l'importance prouvée des nanoparticules, des risques sanitaires peuvent être associés à leur utilisation pour l'homme. Ce domaine mérite d'être davantage investigué.

REFERENCES

- [1] R. P. Feynman, « Plenty of Room at the Bottom », 1959.
- [2] K. Ramachandraiah, S. G. Han, et K. B. Chin, « Nanotechnology in Meat Processing and Packaging: Potential Applications — A Review », *Asian-Australas Journal of Animal Science*, vol. 28, n° 2, p. 290-302, 2015, doi: 10.5713/ajas.14.0607.
- [3] I. Dulinska-Molak *et al.*, « The influence of carbon-encapsulated iron nanoparticles on elastic modulus of living human mesenchymal stem cells examined by atomic force microscopy », *Micron*, vol. 108, p. 41-48, mai 2018, doi: 10.1016/j.micron.2018.02.006.
- [4] A. S. Elfeky *et al.*, « Multifunctional cellulose nanocrystal /metal oxide hybrid, photo-degradation, antibacterial and larvicidal activities », *Carbohydrate Polymers*, vol. 230, p. 115711, févr. 2020, doi: 10.1016/j.carbpol.2019.115711.
- [5] I. Khan, K. Saeed, et I. Khan, « Nanoparticles: Properties, applications and toxicities », *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 12, n° 7, p. 908-931, nov. 2019, doi: 10.1016/j.arabjc.2017.05.011.
- [6] S. S. Salem et A. Fouda, « Green Synthesis of Metallic Nanoparticles and Their Prospective Biotechnological Applications: an Overview », *Biol Trace Elem Res*, vol. 199, n° 1, p. 344-370, janv. 2021, doi: 10.1007/s12011-020-02138-3.
- [7] M. Emam *et al.*, « Green synthesis of silver nanoparticles from *Caesalpinia gilliesii* (Hook) leaves: antimicrobial activity and in vitro cytotoxic effect against BJ-1 and MCF-7 cells », *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, vol. 7, n° 8, p. 226-233, 2017, Consulté le: 16 novembre 2024.
[En ligne]. Disponible sur: https://japsonline.com/abstract.php?article_id=2395&sts=2.
- [8] S. A. David, K. M. Ponvel, M. A. Fathima, S. Anita, J. Ashli, et A. Athilakshmi, « Biosynthesis of silver nanoparticles by *Momordica charantia* leaf extract: Characterization and their antimicrobial activities », *J. Nat. Prod. Plant Resour*, vol. 4, n° 6, p. 1-8, 2014, Consulté le: 17 novembre 2024.
[En ligne]. Disponible sur: <https://www.academia.edu/download/59913016/JNPPR-2014-4-6-1-820190702-69414-dqrg87.pdf>
- [9] T. Guo *et al.*, « The Recent Advances of Magnetic Nanoparticles in Medicine », *Journal of Nanomaterials*, vol. 2018, n° 1, p. 7805147, 2018, doi: 10.1155/2018/7805147.
- [10] F. Parveen, B. Sannakki, M. V. Mandke, et H. M. Pathan, « Copper nanoparticles: Synthesis methods and its light harvesting performance », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 144, p. 371-382, janv. 2016. doi: 10.1016/j.solmat.2015.08.033.
- [11] L. Nahar et S. D. Sarker, « Chapter 7 - Nanotechnology and oral health », in *Advances in Nanotechnology-Based Drug Delivery Systems*, A. Das Talukdar, S. Dey Sarker, et J. K. Patra, Éd., in Nanotechnology in Biomedicine., Elsevier, 2022, p. 155-176. doi: 10.1016/B978-0-323-88450-1.00014-4.
- [12] N. Joudeh et D. Linke, « Nanoparticle classification, physicochemical properties, characterization, and applications: a comprehensive review for biologists », *Journal of Nanobiotechnology*, vol. 20, n° 1, p. 262, juin 2022. doi: 10.1186/s12951-022-01477-8.
- [13] E. Villena de Francisco et R. M. García-Esteva, « Nanotechnology in the agrofood industry », *Journal of Food Engineering*, vol. 238, p. 1-11, déc. 2018, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2018.05.024.
- [14] M. G. M. Berges, R. J. Aitken, S. A. K. Read, K. Savolainen, M. Luotamo, et T. Brock, « Chapter 8 - Risk Assessment and Risk Management », in *Handbook of Nanosafety*, U. Vogel, K. Savolainen, Q. Wu, M. van Tongeren, D. Brouwer, et M. Berges, Éd., San Diego: Academic Press, 2014, p. 279-326. doi: 10.1016/B978-0-12-416604-2.00008-1.
- [15] « drinking-cup | British Museum ». Consulté le: 29 janvier 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://www.britishmuseum.org/collection/object/H_1958-1202-1.
- [16] S. Bayda, M. Adeel, T. Tuccinardi, M. Cordani, et F. Rizzolio, « The History of Nanoscience and Nanotechnology: From Chemical–Physical Applications to Nanomedicine », *Molecules*, vol. 25, n° 1, p. 112, déc. 2019. doi: 10.3390/molecules25010112.

- [17] G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, et E. Weibel, « Tunneling through a controllable vacuum gap », *Applied Physics Letters*, vol. 40, n° 2, p. 178-180, janv. 1982, doi: 10.1063/1.92999.
- [18] D. M. Eigler et E. K. Schweizer, « Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope », *Nature*, vol. 344, n° 6266, p. 524-526, avr. 1990, doi: 10.1038/344524a0.
- [19] H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl, et R. E. Smalley, « C₆₀: Buckminsterfullerene », *Nature*, vol. 318, n° 6042, p. 162-163, nov. 1985, doi: 10.1038/318162a0.
- [20] S. Iijima, « Helical microtubules of graphitic carbon », *Nature*, vol. 354, n° 6348, p. 56-58, nov. 1991, doi: 10.1038/354056a0.
- [21] C. Kinnear, T. L. Moore, L. Rodriguez-Lorenzo, B. Rothen-Rutishauser, et A. Petri-Fink, « Form Follows Function: Nanoparticle Shape and Its Implications for Nanomedicine », *Chem Rev*, vol. 117, n° 17, p. 11476-11521, sept. 2017, doi: 10.1021/acs.chemrev.7b00194.
- [22] K. Pan et Q. Zhong, « Organic Nanoparticles in Foods: Fabrication, Characterization, and Utilization », *Annu Rev Food Sci Technol*, vol. 7, p. 245-266, 2016, doi: 10.1146/annurev-food-041715-033215.
- [23] S. Anu Mary Ealia et M. P. Saravanakumar, « A review on the classification, characterisation, synthesis of nanoparticles and their application », *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 263, n° 3, p. 032019, nov. 2017, doi: 10.1088/1757-899X/263/3/032019.
- [24] M. Gujrati, A. Malamas, T. Shin, E. Jin, Y. Sun, et Z.-R. Lu, « Multifunctional cationic lipid-based nanoparticles facilitate endosomal escape and reduction-triggered cytosolic siRNA release », *Mol Pharm*, vol. 11, n° 8, p. 2734-2744, août 2014, doi: 10.1021/mp400787s.
- [25] Q. Wu, W. Miao, Y. Zhang, H. Gao, et D. Hui, « Mechanical properties of nanomaterials: A review », *Nanotechnology Reviews*, vol. 9, n° 1, p. 259-273, janv. 2020, doi: 10.1515/ntrev-2020-0021.
- [26] R. A. Andrievski, « Review of thermal stability of nanomaterials », *Journal of Materials Science*, vol. 49, n° 4, p. 1449-1460, févr. 2014, doi: 10.1007/s10853-013-7836-1.
- [27] A. G. Kolhatkar, A. C. Jamison, D. Litvinov, R. C. Willson, et T. R. Lee, « Tuning the magnetic properties of nanoparticles », *Int J Mol Sci*, vol. 14, n° 8, p. 15977-16009, juill. 2013, doi: 10.3390/ijms140815977.
- [28] P. Kumbhakar, S. S. Ray, et A. L. Stepanov, « Optical Properties of Nanoparticles and Nanocomposites », *Journal of Nanomaterials*, vol. 2014, n° 1, p. 181365, 2014, doi: 10.1155/2014/181365.
- [29] B. R. Cuenya, « Synthesis and catalytic properties of metal nanoparticles: Size, shape, support, composition, and oxidation state effects », *Thin Solid Films*, vol. 518, n° 12, p. 3127-3150, avr. 2010, doi: 10.1016/j.tsf.2010.01.018.
- [30] Z. Li, Y. Wang, J. Shen, W. Liu, et X. Sun, « The measurement system of nanoparticle size distribution from dynamic light scattering data », *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 56, p. 94-98, mai 2014, doi: 10.1016/j.optlaseng.2013.12.004.
- [31] N. Raval, R. Maheshwari, D. Kalyane, S. R. Youngren-Ortiz, M. B. Chougule, et R. K. Tekade, « Chapter 10 - Importance of Physicochemical Characterization of Nanoparticles in Pharmaceutical Product Development », in *Basic Fundamentals of Drug Delivery*, R. K. Tekade, Éd., in *Advances in Pharmaceutical Product Development and Research.*, Academic Press, 2019, p. 369-400. doi: 10.1016/B978-0-12-817909-3.00010-8.
- [32] J. Gross, S. Sayle, A. R. Karow, U. Bakowsky, et P. Garidel, « Nanoparticle tracking analysis of particle size and concentration detection in suspensions of polymer and protein samples: Influence of experimental and data evaluation parameters », *Eur J Pharm Biopharm*, vol. 104, p. 30-41, juill. 2016, doi: 10.1016/j.ejpb.2016.04.013.
- [33] R. Bardestani, G. S. Patience, et S. Kaliaguine, « Experimental methods in chemical engineering: specific surface area and pore size distribution measurements—BET, BJH, and DFT », *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 97, n° 11, p. 2781-2791, 2019, doi: 10.1002/cjce.23632.
- [34] J. Epp, « 4 - X-ray diffraction (XRD) techniques for materials characterization », in *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods*, G. Hübschen, I. Altpeter, R. Tschuncky, et H.-G. Herrmann, Éd., Woodhead Publishing, 2016, p. 81-124. doi: 10.1016/B978-0-08-100040-3.00004-3.
- [35] R. Groarke, R. K. Vijayaraghavan, D. Powell, A. Rennie, et D. Brabazon, « 18 - Powder characterization—methods, standards, and state of the art », in *Fundamentals of Laser Powder Bed Fusion of Metals*, I. Yadroitsev, I. Yadroitsava, A. du Plessis, et E. MacDonald, Éd., in *Additive Manufacturing Materials and Technologies.*, Elsevier, 2021, p. 491-527. doi: 10.1016/B978-0-12-824090-8.00006-8.
- [36] S. Utsunomiya et R. C. Ewing, « Application of high-angle annular dark field scanning transmission electron microscopy, scanning transmission electron microscopy-energy dispersive X-ray spectrometry, and energy-filtered transmission electron microscopy to the characterization of nanoparticles in the environment », *Environ Sci Technol*, vol. 37, n° 4, p. 786-791, févr. 2003, doi: 10.1021/es026053t.
- [37] M. Deepty et al., « XRD, EDX, FTIR and ESR spectroscopic studies of co-precipitated Mn-substituted Zn-ferrite nanoparticles », *Ceramics International*, vol. 45, n° 6, p. 8037-8044, avr. 2019, doi: 10.1016/j.ceramint.2019.01.029.
- [38] J. Manor, E. S. Feldblum, M. T. Zanni, et I. T. Arkin, « Environment Polarity in Proteins Mapped Noninvasively by FTIR Spectroscopy », *J Phys Chem Lett*, vol. 3, n° 7, p. 939-944, mars 2012, doi: 10.1021/jz300150v.

- [39] A. Kumar et C. K. Dixit, « 3 - Methods for characterization of nanoparticles », in *Advances in Nanomedicine for the Delivery of Therapeutic Nucleic Acids*, S. Nimesh, R. Chandra, et N. Gupta, Éd., Woodhead Publishing, 2017, p. 43-58. doi: 10.1016/B978-0-08-100557-6.00003-1.
- [40] P. Chooto, « Cyclic Voltammetry and Its Applications », in *Voltammetry*, IntechOpen, 2019. doi: 10.5772/intechopen.83451.
- [41] E. N. Saw, V. Grasmik, C. Rurainsky, M. Epple, et K. Tschulik, « Electrochemistry at single bimetallic nanoparticles – using nano impacts for sizing and compositional analysis of individual AgAu alloy nanoparticles », *Faraday Discuss.*, vol. 193, n° 0, p. 327-338, déc. 2016, doi: 10.1039/C6FD00112B.
- [42] A. Testolin *et al.*, « Cyclic Voltammetry Characterization of Au, Pd, and AuPd Nanoparticles Supported on Different Carbon Nanofibers », *Surfaces*, vol. 2, n° 1, p. 205-215, mars 2019, doi: 10.3390/surfaces2010016.
- [43] S. Patel, P. Patel, S. B. Undre, S. R. Pandya, M. Singh, et S. Bakshi, « DNA binding and dispersion activities of titanium dioxide nanoparticles with UV/vis spectrophotometry, fluorescence spectroscopy and physicochemical analysis at physiological temperature », *Journal of Molecular Liquids*, vol. 213, p. 304-311, janv. 2016, doi: 10.1016/j.molliq.2015.11.002.
- [44] P. Zhang, R. Y. Hong, Q. Chen, et W. G. Feng, « On the electrical conductivity and photocatalytic activity of aluminum-doped zinc oxide », *Powder Technology*, vol. 253, p. 360-367, févr. 2014, doi: 10.1016/j.powtec.2013.12.001.
- [45] J. Claxton, N. Joudeh, A. Røyne, D. Linke, et P. Mikheenko, « Sequential Magnetic Mapping of Bacteria Loaded with Pd-Fe Nanoparticles », in *2020 IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)*, nov. 2020, p. 1-5. doi: 10.1109/NAP51477.2020.9309619.
- [46] B.R.Kirupakar, Dr.B.A.Vishwanath, M. P. Sree, et Deenadayalan, « Vibrating Sample Magnetometer and Its Application In Characterisation Of Magnetic Property Of The Anti Cancer Drug Magnetic Microspheres », *International Journal of Pharmaceutics and Drug Analysis*, p. 227-233, mai 2016.
- [47] Y. Flores-Arias, G. Vázquez-Victorio, R. Ortega-Zempoalteca, U. Acevedo-Salas, S. Ammar, et R. Valenzuela, « Magnetic phase transitions in ferrite nanoparticles characterized by electron spin resonance », *Journal of Applied Physics*, vol. 117, n° 17, p. 17A503, avr. 2015, doi: 10.1063/1.4916935.
- [48] L. Ajroudi, N. Mliki, L. Bessais, V. Madigou, S. Villain, et Ch. Leroux, « Magnetic, electric and thermal properties of cobalt ferrite nanoparticles », *Materials Research Bulletin*, vol. 59, p. 49-58, nov. 2014, doi: 10.1016/j.materresbull.2014.06.029.
- [49] P. Kumar, P. Mahajan, R. Kaur, et S. Gautam, « Nanotechnology and its challenges in the food sector: a review », *Materials Today Chemistry*, vol. 17, p. 100332, sept. 2020, doi: 10.1016/j.mtchem.2020.100332.
- [50] R. Biswas, M. Alam, A. Sarkar, M. I. Haque, Md. M. Hasan, et M. Hoque, « Application of nanotechnology in food: processing, preservation, packaging and safety assessment », *Heliyon*, vol. 8, n° 11, p. e11795, nov. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e11795.
- [51] A. Sirelkhatim *et al.*, « Review on Zinc Oxide Nanoparticles: Antibacterial Activity and Toxicity Mechanism », *Nano-Micro Lett.*, vol. 7, n° 3, p. 219-242, juill. 2015, doi: 10.1007/s40820-015-0040-x.
- [52] A. Cockburn *et al.*, « Approaches to the safety assessment of engineered nanomaterials (ENM) in food », *Food and Chemical Toxicology*, vol. 50, n° 6, p. 2224-2242, juin 2012, doi: 10.1016/j.fct.2011.12.029.
- [53] S. Iravani, « Green synthesis of metal nanoparticles using plants », *Green Chem.*, vol. 13, n° 10, p. 2638-2650, janv. 2011, doi: 10.1039/C1GC15386B.
- [54] S. Some *et al.*, « Biosynthesis of silver nanoparticles and their versatile antimicrobial properties », *Mater. Res. Express*, vol. 6, n° 1, p. 012001, oct. 2018, doi: 10.1088/2053-1591/aae23e.
- [55] S. Kumari *et al.*, « A comprehensive review on various techniques used for synthesizing nanoparticles », *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 27, p. 1739-1763, nov. 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.09.291.
- [56] M. Kim, S. Osone, T. Kim, H. Higashi, et T. Seto, « Synthesis of Nanoparticles by Laser Ablation: A Review », *KONA Powder and Particle Journal*, vol. 34, p. 80-90, 2017, doi: 10.14356/kona.2017009.
- [57] C. Dhand *et al.*, « Methods and strategies for the synthesis of diverse nanoparticles and their applications: a comprehensive overview », *RSC Adv.*, vol. 5, n° 127, p. 105003-105037, déc. 2015, doi: 10.1039/C5RA19388E.
- [58] C. Suryanarayana et B. Prabhu, « 2 - Synthesis of Nanostructured Materials by Inert-Gas Condensation Methods », in *Nanostructured Materials (Second Edition)*, C. C. Koch, Éd., Norwich, NY: William Andrew Publishing, 2007, p. 47-90. doi: 10.1016/B978-081551534-0.50004-X.
- [59] R. Raval, R. H. Rangnekar, et K. Raval, « Optimization of Chitosan Nanoparticles Synthesis and Its Applications in Fatty Acid Absorption », in *Materials, Energy and Environment Engineering*, R. Mohan B., G. Srinikethan, et B. C. Meikap, Éd., Singapore: Springer, 2017, p. 253-256. doi: 10.1007/978-981-10-2675-1_30.
- [60] A. Roychoudhury, « Yeast-mediated Green Synthesis of Nanoparticles for Biological Applications », *Indian Journal of Pharmaceutical and Biological Research*, vol. 8, n° 03, Art. n° 03, sept. 2020, doi: 10.30750/ijpbr.8.3.4.

- [61] A. Fariq, T. Khan, et A. Yasmin, « Microbial synthesis of nanoparticles and their potential applications in biomedicine », *Journal of Applied Biomedicine*, vol. 15, n° 4, p. 241-248, nov. 2017, doi: 10.1016/j.jab.2017.03.004.
- [62] P. Kuppusamy, M. M. Yusoff, G. P. Maniam, et N. Govindan, « Biosynthesis of metallic nanoparticles using plant derivatives and their new avenues in pharmacological applications – An updated report », *Saudi Pharmaceutical Journal*, vol. 24, n° 4, p. 473-484, juill. 2016, doi: 10.1016/j.jsps.2014.11.013.
- [63] M. A. Sabri, A. Umer, H. G. Awan, M. F. Hassan, et A. Hasnain, « Selection of Suitable Biological Method for the Synthesis of Silver Nanoparticles », *Nanomaterials and Nanotechnology*, n° 6, p. 29, 2016.
- [64] A. Adhikari, K. Chhetri, D. Acharya, B. Pant, et A. Adhikari, « Green Synthesis of Iron Oxide Nanoparticles Using Psidium guajava L. Leaves Extract for Degradation of Organic Dyes and Anti-microbial Applications », *Catalysts*, vol. 12, n° 10, Art. n° 10, oct. 2022, doi: 10.3390/catal12101188.
- [65] R. Govindasamy *et al.*, « Green Synthesis and Characterization of Cobalt Oxide Nanoparticles Using Psidium guajava Leaves Extracts and Their Photocatalytic and Biological Activities », *Molecules*, vol. 27, n° 17, p. 5646, sept. 2022, doi: 10.3390/molecules27175646.
- [66] P. Karthik *et al.*, « Green synthesis of MnO₂ nanoparticles from *Psidium guajava* leaf extract: Morphological characterization, photocatalytic and DNA/BSA interaction studies », *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 258, p. 128869, févr. 2024, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.128869.
- [67] S. Nagaraja *et al.*, « Green Synthesis and Characterization of Silver Nanoparticles of *Psidium guajava* Leaf Extract and Evaluation for Its Antidiabetic Activity », *Molecules*, vol. 27, n° 14, p. 4336, juill. 2022, doi: 10.3390/molecules27144336.
- [68] A. Mtibe, T. H. Mokhothu, M. J. John, T. C. Mokhena, et M. J. Mochane, « Chapter 8 - Fabrication and Characterization of Various Engineered Nanomaterials », in *Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications*, C. Mustansar Hussain, Éd., in Micro and Nano Technologies., Elsevier, 2018, p. 151-171. doi: 10.1016/B978-0-12-813351-4.00009-2.
- [69] P. Dikshit *et al.*, « Green Synthesis of Metallic Nanoparticles: Applications and Limitations », *Catalysts*, vol. 11, n° 8, p. 902-, 2021, doi: 10.3390/catal11080902.
- [70] X. Huang, P. K. Jain, I. H. El-Sayed, et M. A. El-Sayed, « Gold nanoparticles: interesting optical properties and recent applications in cancer diagnostics and therapy », *Nanomedicine (Lond)*, vol. 2, n° 5, p. 681-693, oct. 2007, doi: 10.2217/17435889.2.5.681.
- [71] I. H. El-Sayed, X. Huang, et M. A. El-Sayed, « Selective laser photo-thermal therapy of epithelial carcinoma using anti-EGFR antibody conjugated gold nanoparticles », *Cancer Lett*, vol. 239, n° 1, p. 129-135, juill. 2006, doi: 10.1016/j.canlet.2005.07.035.
- [72] N. Elahi, M. Kamali, et M. H. Baghersad, « Recent biomedical applications of gold nanoparticles: A review », *Talanta*, vol. 184, p. 537-556, juill. 2018, doi: 10.1016/j.talanta.2018.02.088.
- [73] C. Chen *et al.*, « Multihydroxylated [Gd@C82(OH)22] n nanoparticles: antineoplastic activity of high efficiency and low toxicity », *Nano Lett*, vol. 5, n° 10, p. 2050-2057, oct. 2005, doi: 10.1021/nl051624b.
- [74] H. Meng *et al.*, « Gadolinium metallofullerenol nanoparticles inhibit cancer metastasis through matrix metalloproteinase inhibition: imprisoning instead of poisoning cancer cells », *Nanomedicine*, vol. 8, n° 2, p. 136-146, févr. 2012, doi: 10.1016/j.nano.2011.08.019.
- [75] S. D. Swanson *et al.*, « Targeted gadolinium-loaded dendrimer nanoparticles for tumor-specific magnetic resonance contrast enhancement », *Int J Nanomedicine*, vol. 3, n° 2, p. 201-210, 2008.
- [76] J. W. Rasmussen, E. Martinez, P. Louka, et D. G. Wingett, « Zinc oxide nanoparticles for selective destruction of tumor cells and potential for drug delivery applications », *Expert Opin Drug Deliv*, vol. 7, n° 9, p. 1063-1077, sept. 2010, doi: 10.1517/17425247.2010.502560.
- [77] F. H. Chen, Q. Gao, et J. Z. Ni, « The grafting and release behavior of doxorubicin from Fe (3) O (4) @SiO (2) core-shell structure nanoparticles via an acid cleaving amide bond: the potential for magnetic targeting drug delivery », *Nanotechnology*, vol. 19, n° 16, p. 165103, avr. 2008, doi: 10.1088/0957-4484/19/16/165103.
- [78] B. Chertok *et al.*, « Iron oxide nanoparticles as a drug delivery vehicle for MRI monitored magnetic targeting of brain tumors », *Biomaterials*, vol. 29, n° 4, p. 487-496, févr. 2008, doi: 10.1016/j.biomaterials.2007.08.050.
- [79] E. Hutter et D. Maysinger, « Gold nanoparticles and quantum dots for bioimaging », *Microsc Res Tech*, vol. 74, n° 7, p. 592-604, juill. 2011, doi: 10.1002/jemt.20928.
- [80] K. Saha, S. S. Agasti, C. Kim, X. Li, et V. M. Rotello, « Gold nanoparticles in chemical and biological sensing », *Chem Rev*, vol. 112, n° 5, p. 2739-2779, mai 2012, doi: 10.1021/cr2001178.
- [81] S. Zeng, K.-T. Yong, I. Roy, X.-Q. Dinh, X. Yu, et F. Luan, « A Review on Functionalized Gold Nanoparticles for Biosensing Applications », *Plasmonics*, vol. 6, n° 3, p. 491-506, sept. 2011, doi: 10.1007/s11468-011-9228-1.
- [82] D. R. Bhumkar, H. M. Joshi, M. Sastry, et V. B. Pokharkar, « Chitosan reduced gold nanoparticles as novel carriers for transmucosal delivery of insulin », *Pharm Res*, vol. 24, n° 8, p. 1415-1426, août 2007, doi: 10.1007/s11095-007-9257-9.

- [83] R. L. Phillips, O. R. Miranda, C.-C. You, V. M. Rotello, et U. H. F. Bunz, « Rapid and efficient identification of bacteria using gold-nanoparticle-poly (para-phenyleneethynylene) constructs», *Angew Chem Int Ed Engl*, vol. 47, n° 14, p. 2590-2594, 2008, doi: 10.1002/anie.200703369.
- [84] B. A. Kairdolf, X. Qian, et S. Nie, « Bioconjugated Nanoparticles for Biosensing, in Vivo Imaging, and Medical Diagnostics», *Anal Chem*, vol. 89, n° 2, p. 1015-1031, janv. 2017, doi: 10.1021/acs.analchem.6b04873.
- [85] M. J. Hajipour *et al.*, « Antibacterial properties of nanoparticles», *Trends Biotechnol*, vol. 30, n° 10, p. 499-511, oct. 2012, doi: 10.1016/j.tibtech.2012.06.004.
- [86] H. R. Pant *et al.*, « Antibacterial and photocatalytic properties of Ag/TiO₂/ZnO nano-flowers prepared by facile one-pot hydrothermal process», *Ceramics International*, vol. 39, n° 2, p. 1503-1510, mars 2013, doi: 10.1016/j.ceramint.2012.07.097.
- [87] M. Usman *et al.*, « Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges and future opportunities», *Sci Total Environ*, vol. 721, p. 137778, juin 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137778.
- [88] G. N. Rameshaiah, J. Pallavi, et S. Shabnam, « Nano fertilizers and nano sensors—an attempt for developing smart agriculture», *Int J Eng Res Gen Sci*, vol. 3, n° 1, p. 314-320, 2015.
- [89] E. Mastronardi, P. Tsae, X. Zhang, C. Monreal, et M. C. DeRosa, « Strategic Role of Nanotechnology in Fertilizers: Potential and Limitations », M. Rai, C. Ribeiro, L. Mattoso, et N. Duran, Éd., Cham: Springer International Publishing, 2015, p. 25-67. doi: 10.1007/978-3-319-14024-7_2.
- [90] M. Delfani, M. Baradarn Firouzabadi, N. Farrokhi, et H. Makarian, « Some Physiological Responses of Black-Eyed Pea to Iron and Magnesium Nanofertilizers », *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, vol. 45, n° 4, p. 530-540, févr. 2014, doi: 10.1080/00103624.2013.863911.
- [91] C. O. Dimkpa, P. S. Bindraban, J. Fugice, S. Agyin-Birikorang, U. Singh, et D. Hellums, « Composite micronutrient nanoparticles and salts decrease drought stress in soybean», *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 37, n° 1, p. 5, 2017, doi: 10.1007/s13593-016-0412-8.
- [92] M. L. Paret, G. E. Vallad, D. R. Averett, J. B. Jones, et S. M. Olson, « Photocatalysis: effect of light-activated nanoscale formulations of TiO₂ on *Xanthomonas perforans* and control of bacterial spot of tomato », *Phytopathology*, vol. 103, n° 3, p. 228-236, mars 2013, doi: 10.1094/PHYTO-08-12-0183-R.
- [93] H. A. Ayoub, M. Khairy, S. Elsaid, F. A. Rashwan, et H. F. Abdel-Hafez, « Pesticidal Activity of Nanostructured Metal Oxides for Generation of Alternative Pesticide Formulations», *J Agric Food Chem*, vol. 66, n° 22, p. 5491-5498, juin 2018, doi: 10.1021/acs.jafc.8b01600.
- [94] W. A. Cromwell, J. Yang, J. L. Starr, et Y.-K. Jo, « Nematicidal Effects of Silver Nanoparticles on Root-knot Nematode in Bermudagrass», *J Nematol*, vol. 46, n° 3, p. 261-266, sept. 2014.
- [95] X. He et H.-M. Hwang, « Nanotechnology in food science: Functionality, applicability, and safety assessment», *Journal of Food and Drug Analysis*, vol. 24, n° 4, p. 671-681, oct. 2016, doi: 10.1016/j.jfda.2016.06.001.
- [96] P. P. Fu, Q. Xia, H.-M. Hwang, P. C. Ray, et H. Yu, « Mechanisms of nanotoxicity: Generation of reactive oxygen species», *Journal of Food and Drug Analysis*, vol. 22, n° 1, p. 64-75, mars 2014, doi: 10.1016/j.jfda.2014.01.005.
- [97] H. Wu, J.-J. Yin, W. G. Wamer, M. Zeng, et Y. M. Lo, « Reactive oxygen species-related activities of nano-iron metal and nano-iron oxides», *Journal of Food and Drug Analysis*, vol. 22, n° 1, p. 86-94, mars 2014, doi: 10.1016/j.jfda.2014.01.007.
- [98] K. Pathakoti, M. Manubolu, et H.-M. Hwang, « Nanostructures: Current uses and future applications in food science», *Journal of Food and Drug Analysis*, vol. 25, n° 2, p. 245-253, avr. 2017, doi: 10.1016/j.jfda.2017.02.004.
- [99] H. Pool *et al.*, « Antioxidant Effects of Quercetin and Catechin Encapsulated into PLGA Nanoparticles», *Journal of Nanomaterials*, vol. 2012, n° 1, p. 145380, janv. 2012, doi: 10.1155/2012/145380.
- [100] Y. Deligiannakis, G. A. Sotiriou, et S. E. Pratsinis, « Antioxidant and Antiradical SiO₂ Nanoparticles Covalently Functionalized with Gallic Acid», *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 4, n° 12, p. 6609-6617, déc. 2012, doi: 10.1021/am301751s.
- [101] K. Nakagawa, « Nano- and Microencapsulation of Flavor in Food Systems», in *Nano- and Microencapsulation for Foods*, John Wiley & Sons, Ltd, 2014, p. 249-271. doi: 10.1002/9781118292327.ch10.
- [102] Z. Assefa, « Development and Characterization of Antimicrobial Packaging Films », *J Food Process Technol*, vol. 04, n° 06, 2013, doi: 10.4172/2157-7110.1000235.
- [103] S. H. Othman, N. R. Abd Salam, N. Zainal, R. Kadir Basha, et R. A. Talib, « Antimicrobial Activity of TiO₂ Nanoparticle-Coated Film for Potential Food Packaging Applications», *International Journal of Photoenergy*, vol. 2014, p. 1-6, 2014, doi: 10.1155/2014/945930.
- [104] S. Cui, L. Yang, J. Wang, et X. Wang, « Fabrication of a sensitive gas sensor based on PPy/TiO₂ nanocomposites films by layer-by-layer self-assembly and its application in food storage», *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 233, p. 337-346, oct. 2016, doi: 10.1016/j.snb.2016.04.093.

- [105] S. S. Mahdi, R. Vadood, et R. Nourdahr, « Study on the Antimicrobial Effect of Nanosilver Tray Packaging of Minced Beef at Refrigerator Temperature », 2012.
- [106] J. Momin, C. Jayakumar, et J. Prajapati, « Potential of Nanotechnology in Functional Foods », *Emir. J. Food Agric*, vol. 25, n° 1, p. 10, 2013, doi: 10.9755/ejfa.v25i1.9368.
- [107] L. Salvia-Trujillo, O. Martín-Belloso, et D. J. McClements, « Excipient Nanoemulsions for Improving Oral Bioavailability of Bioactives », *Nanomaterials*, vol. 6, n° 1, Art. n° 1, janv. 2016, doi: 10.3390/nano6010017.
- [108] R. Roy, S. Kumar, A. Tripathi, M. Das, et P. D. Dwivedi, « Interactive threats of nanoparticles to the biological system », *Immunol Lett*, vol. 158, n° 1-2, p. 79-87, 2014, doi: 10.1016/j.imlet.2013.11.019.
- [109] R. K. Pandey et V. K. Prajapati, « Molecular and immunological toxic effects of nanoparticles », *Int J Biol Macromol*, vol. 107, n° Pt A, p. 1278-1293, févr. 2018, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.09.110.
- [110] J. Athinarayanan, V. S. Periasamy, M. A. Alsaif, A. A. Al-Warthan, et A. A. Alshatwi, « Presence of nanosilica (E551) in commercial food products: TNF-mediated oxidative stress and altered cell cycle progression in human lung fibroblast cells », *Cell Biol Toxicol*, vol. 30, n° 2, p. 89-100, avr. 2014, doi: 10.1007/s10565-014-9271-8.
- [111] J.-Y. Huang, X. Li, et W. Zhou, « Safety assessment of nanocomposite for food packaging application », *Trends in Food Science & Technology*, vol. 45, n° 2, p. 187-199, oct. 2015, doi: 10.1016/j.tifs.2015.07.002.