Machine Translated by Google

Journal des nanomatériaux et des biostructures, vol. 3, n° 3, septembre 2008, p. 115 - 122

NANOTECHNOLOGIE EN MÉDECINE ET EFFET ANTIBACTÉRIEN DE NANOPARTICULES D'ARGENT

MRITUNJAI SINGH, SHINJINI SINGH, S. PRASADa , Isgambhir
Département de médecine, Institut des sciences médicales, Université hindoue de Banaras, Varanasi, INDE-221005
aLaboratoire de biochimie et de biologie moléculaire, Département de zoologie, Université hindoue de Banaras, Varanasi, INDE-221005

La nanotechnologie devrait ouvrir de nouvelles perspectives pour lutter contre les maladies et les prévenir en utilisant des matériaux sur mesure à l'échelle atomique. La capacité de découvrir la structure et la fonction des biosystèmes à l'échelle nanométrique stimule la recherche conduisant à des améliorations en biologie, biotechnologie, médecine et soins de santé. La taille des nanomatériaux est similaire à celle de la plupart des molécules et structures biologiques ; par conséquent, les nanomatériaux peuvent être utiles pour la recherche et les applications biomédicales in vivo et in vitro. L'intégration des nanomatériaux avec la biologie a conduit au développement d'appareils de diagnostic, d'agents de contraste, d'analyses Les nanomatériaux antibactériens sont utilisés dans les applications de physiothérapie et dans les véhicules d'administration de médicaments. Parmi tous les nanomatériaux aux propriétés antibactériennes, les nanoparticules métalliques sont les meilleures. Les nanoparticules augmentent l'activité chimique en raison de la structure de surface cristallographique avec leur grand rapport surface/volume. L'importance de l'étude des nanomatériaux bactéricides est due à l'augmentation de nouvelles souches de bactéries résistantes à la plupart des antibiotiques puissants. Cela a favorisé la recherche sur l'activité bien connue des ions argent et des composés à base d'argent, y compris les nanoparticules d'argent. Cet effet dépendait de la taille et de la dose et était plus prononcé contre les bactéries à Gram négatif que contre les organismes à Gram positif.

(Reçu le 29 avril 2008; accepté le 29 mai 2008)

Mots clés : Nanotechnologie, Nanoparticules d'argent, Nanomédecine, Effet antibactérien, Cancer, Administration de médicaments, Maladie d'Alzheimer.

1. Introduction

La plupart des processus naturels se déroulent également à l'échelle nanométrique. Par conséquent, une confluence de nanotechnologie et de biologie peut résoudre plusieurs problèmes biomédicaux et peut révolutionner le domaine de la santé et de la médecine [1]. La nanotechnologie est actuellement utilisée comme outil pour explorer les avenues les plus sombres des sciences médicales de plusieurs manières, comme l'imagerie [2], la détection [3], l'administration ciblée de médicaments [4] et les systèmes d'administration de gènes [5] et les implants artificiels [6]. Les médicaments de la nouvelle ère sont des nanoparticules de polymères, de métaux ou de céramiques, qui peuvent combattre des maladies comme le cancer [7] et combattre des agents pathogènes humains comme les bactéries [8-12].

Le développement de nouvelles souches bactériennes résistantes aux antibiotiques actuels [13] est devenu un sérieux problème de santé publique ; il existe donc une forte incitation à développer de nouveaux bactéricides [10]. Les bactéries ont des structures membranaires différentes qui permettent une classification générale de celles-ci en Gram négatif ou Gram positif. Les différences structurelles résident dans l'organisation d'un composant clé de la membrane, le peptidoglycane. Les bactéries Gram négatives ne présentent qu'une fine couche de peptidoglycane (~2–3 nm) entre la membrane cytoplasmique et la membrane externe [14] ; en revanche, les bactéries Gram positives n'ont pas de membrane externe mais ont une couche de peptidoglycane d'environ 30 nm d'épaisseur [15]. On sait depuis longtemps que l'argent présente une forte toxicité pour un large éventail de bactéries.

Machine Translated by Google

micro-organismes [16] ; pour cette raison, les composés à base d'argent ont été largement utilisés dans de nombreuses applications bactéricides [17, 18]. Les composés d'argent ont également été utilisés dans le domaine médical pour traiter les brûlures et diverses infections [19]. Plusieurs sels d'argent et leurs dérivés sont utilisés commercialement comme agents antimicrobiens [20]. Des efforts louables ont été faits pour explorer cette propriété en utilisant la microscopie électronique, qui a révélé une interaction dépendante de la taille des nanoparticules d'argent avec les bactéries [11]. Les nanoparticules d'argent ont ainsi été étudiées comme moyen d'administration d'antibiotiques [21] et pour synthétiser des composites destinés à être utilisés comme filtres désinfectants [22] et matériaux de revêtement [23]. Cependant, la propriété bactéricide de ces nanoparticules dépend de leur stabilité dans le milieu de croissance, car cela confère un temps de rétention plus long aux bactéries.
Interaction des nanoparticules. La préparation de nanoparticules d'argent suffisamment stables pour limiter considérablement la croissance bactérienne constitue un défi de taille.

Des études ont été menées sur des souches résistantes aux antibiotiques (résistantes à l'ampicilline) et non résistantes de bactéries Gram-négatives (Escherichia coli) et sur une souche non résistante de bactéries Gram-positives (Staphylococcus aureus). Une souche multirésistante de bactéries Gram-négatives (Salmonella typhus, résistante au chloramphénicol, à l'amoxycline et au triméthoprime) a également été soumise à une analyse pour examiner l'effet antibactérien des nanoparticules [24]. Des efforts ont été faits pour comprendre le mécanisme moléculaire sous-jacent de ces actions antimicrobiennes. L'effet des nanoparticules s'est avéré significativement plus prononcé sur les souches Gram-négatives, indépendamment du fait que les souches soient résistantes ou non, que sur les organismes Gram-positifs. Nous attribuons cet effet antibactérien accru des nanoparticules à leur stabilité dans le milieu en tant que colloïde, qui module le profil de phosphotyrosine des protéines bactériennes et arrête la croissance bactérienne.

L'effet bactéricide des ions argent sur les micro-organismes est très bien connu ; cependant, le mécanisme bactéricide n'est que partiellement compris. Il a été suggéré que l'argent ionique interagit fortement avec les groupes thiols des enzymes vitales et les inactive [25, 26]. Des preuves expérimentales suggèrent que l'ADN perd sa capacité de réplication une fois que les bactéries ont été traitées avec des ions argent [19]. D'autres études ont montré des preuves de changements structurels dans la membrane cellulaire ainsi que la formation de petits granules denses aux électrons formés par l'argent et le soufre [19, 27]. Les ions argent se sont avérés utiles et efficaces dans les applications bactéricides, mais en raison des propriétés uniques des nanoparticules, la nanotechnologie présente une alternative raisonnable pour le développement de nouveaux bactéricides. Les particules métalliques de la taille du nanomètre présentent des propriétés physiques qui sont différentes à la fois de l'ion et du matériau en vrac. Cela leur permet de présenter des propriétés remarquables telles qu'une activité catalytique accrue en raison de morphologies à facettes hautement actives [28–33]. Nous pouvons appliquer plusieurs techniques de microscopie électronique pour étudier le mécanisme par lequel les nanoparticules d'argent interagissent avec ces bactéries. Nous pouvons utiliser la microscopie électronique à balayage en transmission (STEM) à champ sombre annulaire à grand angle (HAADF) et développer une nouvelle préparation d'échantillon qui évite l'utilisation de composés à base de métaux lourds tels que OsO4. Des résolutions élevées et une microanalyse aux rayons X plus précise ont été obtenues.

2. Nanotechnologie

Le terme « nanotechnologie » a été défini pour la première fois par l'Université des sciences de Tokyo, Norio Taniguchi, dans un article de 1974 [34] comme suit : « La « nanotechnologie » consiste principalement en le traitement, la séparation, la consolidation et la déformation des matériaux par un atome ou une molécule.
Les nanotechnologies et les nanosciences ont connu un essor considérable au début des années 1980 avec deux avancées majeures : la naissance de la science des clusters et l'invention du microscope à effet tunnel (STM). Cette avancée a conduit à la découverte des fullerènes en 1985.

Telles que pratiquées à l'Université Rice, il existe trois nanotechnologies distinctes :

- La nanotechnologie « humide » est l'étude des systèmes biologiques qui existent principalement dans un environnement aqueux. Les structures fonctionnelles à l'échelle nanométrique qui nous intéressent ici sont le matériel génétique, les membranes, les enzymes et d'autres composants cellulaires. Le succès de cette nanotechnologie est amplement démontré par l'existence d'organismes vivants dont la forme, la fonction et l'évolution sont régies par les interactions de structures à l'échelle nanométrique.

Machine Translated by Google

- La nanotechnologie « sèche », issue de la science des surfaces et de la chimie physique, se concentre sur la fabrication de structures en carbone (par exemple, les fullerènes et les nanotubes), en silicium et autres matériaux inorganiques. Contrairement à la technologie « humide », les techniques « sèches » admettent l'utilisation de métaux et de semi-conducteurs. Les électrons de conduction actifs de ces matériaux les rendent trop réactifs pour fonctionner dans un environnement « humide », mais ces mêmes électrons fournissent les propriétés physiques qui rendent les nanostructures « sèches » prometteuses comme dispositifs électroniques, magnétiques et optiques. Un autre objectif est de développer des structures « sèches » qui possèdent certaines des mêmes caractéristiques d'auto-assemblage que les structures humides.
- La nanotechnologie computationnelle permet de modéliser et de simuler des structures complexes à l'échelle nanométrique. La puissance prédictive et analytique du calcul est essentielle au succès de la nanotechnologie : il a fallu plusieurs centaines de millions d'années à la nature pour développer une nanotechnologie « humide » fonctionnelle ; les connaissances fournies par le calcul devraient nous permettre de réduire le temps de développement d'une nanotechnologie « sèche » fonctionnelle à quelques décennies, et elles auront également un impact majeur sur le côté « humide ».

Ces trois nanotechnologies sont étroitement interdépendantes. Les avancées majeures de chacune d'elles sont souvent le fruit de l'application de techniques ou de l'adaptation d'informations issues de l'une ou des deux autres.

3. La nanotechnologie dans le domaine de la médecine

Français L'application de la nanotechnologie au traitement, au diagnostic, à la surveillance et au contrôle des maladies a été qualifiée de « nanomédecine ». Bien que l'application de la nanotechnologie à la médecine semble être une tendance relativement récente, les approches de base de la nanotechnologie pour les applications médicales remontent à plusieurs décennies. Le premier exemple de vésicules lipidiques, connues plus tard sous le nom de liposomes, a été décrit en 1965 [35] ; le premier système polymère à libération contrôlée de macromolécules a été décrit en 1976 [36] ; la première nanoparticule polymère furtive à longue circulation a été décrite en 1994 [37] ; le premier bioconjugué à points quantiques a été décrit en 1998 [38, 39] ; et le premier nanocapteur à nanofils remonte à 2001 [40]. Des études récentes sur de nouveaux agents de contraste à nanoparticules ciblées pour la caractérisation précoce de l'athérosclérose et de la pathologie cardiovasculaire aux niveaux cellulaire et moléculaire pourraient représenter la prochaine frontière pour combiner l'imagerie et l'administration rationnelle de médicaments afin de faciliter la médecine personnalisée [41].

Les marqueurs hautement efficaces basés sur la nanotechnologie et les dispositifs de détection précis et quantitatifs pour le diagnostic précoce et le suivi thérapeutique auront une grande influence sur la gestion des patients, sur l'amélioration de leur qualité de vie et sur la réduction des taux de mortalité dans des maladies comme le cancer et la maladie d'Alzheimer.

- Nanoparticules multifonctionnelles pour le traitement du cancer

Des nanoparticules de chitosane biodégradables encapsulant des points quantiques ont été préparées par DK Chatterjee et Y. Zhang, avec une modification de surface appropriée pour immobiliser à la fois l'agent de ciblage de la tumeur et la chimiokine sur leurs surfaces. Les interactions entre les cellules immunitaires et les cellules tumorales ont été visualisées à l'aide d'un microscope optique. L'utilisation de points quantiques dans le traitement du cancer est une grande avancée dans ce domaine. Les points quantiques brillent lorsqu'ils sont exposés à la lumière UV. Lorsqu'ils sont injectés, ils s'infiltrent dans la tumeur cancéreuse. Le chirurgien peut voir la tumeur brillante. La nanotechnologie pourrait être très utile pour régénérer les nerfs blessés. Au cours de la dernière décennie, cependant, les développements dans les domaines de la microscopie de surface, de la fabrication du silicium, de la biochimie, de la chimie physique et de l'ingénierie informatique ont convergé pour fournir des capacités remarquables pour comprendre, fabriquer et manipuler des structures au niveau atomique. L'évolution rapide de cette nouvelle science et les opportunités de son application promettent que la nanotechnologie deviendra l'une des technologies dominantes du 21e siècle.

- Les nanosciences permettent de détecter précocement la maladie d'Alzheimer

Machine Translated by Google

Le cerveau est l'un des systèmes les plus complexes de la biomédecine. Grâce à une meilleure compréhension du fonctionnement du cerveau, de meilleurs diagnostics et traitements pour les maladies neurodégénératives comme la maladie d'Alzheimer sont offerts par la nanotechnologie [42]. Actuellement, le problème principal est la détection précoce pour un traitement efficace de la maladie. Un outil de diagnostic idéal pour la maladie d'Alzheimer (MA) doit avoir une spécificité et une sensibilité supérieures à 80 % pour son diagnostic précoce et exclure d'autres causes. Étant donné que le processus de neurodégénérescence commence bien avant que la MA ne devienne symptomatique, le potentiel de détection précoce est une autre caractéristique importante d'un outil de diagnostic idéal.
La nanotechnologie peut servir de base à de nouveaux outils de détection très précoce de la maladie d'Alzheimer. L'intérêt de la nanotechnologie pour le diagnostic de la maladie d'Alzheimer a été mis en lumière après la publication de deux articles en février 2005. Les deux approches de détection proposées dans ces articles étaient le test de code-barres biologiques (BCA) et la technologie de résonance plasmonique de surface localisée (LSPR) [43-44].

4. Conséquences des nanoparticules sur la santé et la sécurité

La nanopollution est un terme générique qui désigne tous les déchets générés par les nanodispositifs ou lors du processus de fabrication des nanomatériaux. Ce type de déchets peut être très dangereux en raison de sa taille. Ils peuvent flotter dans l'air et pénétrer facilement dans les cellules animales et végétales, provoquant des effets inconnus. La plupart des nanoparticules fabriquées par l'homme n'apparaissent pas dans la nature, de sorte que les organismes vivants ne disposent peut-être pas de moyens appropriés pour traiter les nanodéchets.

Plus une particule est petite, plus son rapport surface/volume est élevé et plus sa réactivité chimique et son activité biologique sont élevées. La plus grande réactivité chimique des nanomatériaux entraîne une production accrue d'espèces réactives de l'oxygène (ROS), y compris de radicaux libres [45]. La production de ROS a été trouvée dans une gamme diversifiée de nanomatériaux, notamment les fullerènes de carbone, les nanotubes de carbone et les oxydes métalliques nanoparticulaires. La production de ROS et de radicaux libres est l'un des principaux mécanismes de toxicité des nanoparticules ; elle peut entraîner un stress oxydatif, une inflammation et des dommages conséquents aux protéines, aux membranes et à l'ADN [45].

Les nanomatériaux se sont révélés toxiques pour les tissus humains et les cultures cellulaires, entraînant une augmentation du stress oxydatif, une production de cytokines inflammatoires et la mort cellulaire [46]. Contrairement aux particules plus grosses, les nanomatériaux peuvent être absorbés par les mitochondries cellulaires [47] et le noyau cellulaire [48, 49]. Des études démontrent le potentiel des nanomatériaux à provoquer une mutation de l'ADN [49] et à induire des dommages structurels majeurs aux mitochondries, pouvant même entraîner la mort cellulaire [47, 50]. La taille est donc un facteur clé pour déterminer la toxicité potentielle d'une particule. Cependant, ce n'est pas le seul facteur important. D'autres propriétés des nanomatériaux qui influencent la toxicité comprennent : la composition chimique, la forme, la structure de surface, la charge de surface, l'agrégation et la solubilité, [45] et la présence ou l'absence de groupes fonctionnels d'autres produits chimiques [51].

Le développement des nanotechnologies pourrait poser des problèmes importants en matière d'environnement, de santé et de sécurité, car certains effets négatifs des nanoparticules dans notre environnement pourraient être négligés. Cependant, la nature elle-même crée toutes sortes d'objets nanométriques, de sorte que les dangers probables ne sont pas dus à la seule échelle nanométrique, mais au fait que des matériaux auparavant non toxiques peuvent devenir nocifs lorsqu'ils sont ingérés ou inhalés sous forme de nanoparticules. Les risques sociaux liés au développement des nanotechnologies incluent la possibilité d'applications militaires de la nanotechnologie dans la guerre biologique, la guerre chimique, les munitions et l'armement et même comme implants pour « améliorer » les soldats. Les capacités de surveillance améliorées grâce aux nanocapteurs sont également une préoccupation pour les défenseurs du droit à la vie privée. Dans le cadre des discussions sur les questions liées aux nanotechnologies, l'acronyme NELSI est utilisé pour désigner les implications éthiques, juridiques et sociales de la nanotechnologie.

5. L'argent comme biocide

L'argent (Ag) est un élément métallique de transition dont le numéro atomique est 47 et la masse atomique est 107,87. Les utilisations médicinales de l'argent sont documentées depuis 1000 avant J.-C. L'argent est un additif de santé dans la médecine traditionnelle chinoise et indienne ayurvédique [52]. Son action en tant qu'antibiotique vient du fait qu'il s'agit d'un « biocide » toxique non sélectif. Les biocides antimicrobiens à base d'argent sont utilisés comme conservateurs du bois. Dans l'utilisation de l'eau, des désinfectants à base d'argent et de cuivre sont utilisés dans

Machine Translated by Google

systèmes de distribution hospitaliers et hôteliers pour contrôler les agents infectieux (par exemple, Legionella). L'argent, associé au cuivre, est couramment utilisé pour inhiber la croissance bactérienne et fongique dans les élevages de poulets et dans le nettoyage des huîtres après récolte. L'argent est utilisé pour stériliser l'eau recyclée à bord de la station spatiale MIR et de la navette spatiale de la NASA [53]. Microdyn (argent colloïdal dans de la gélatine) est vendu dans les supermarchés pour désinfecter les salades et l'eau potable. Johnson Mathey Chemicals (Nottingham, Royaume-Uni) a développé un composite inorganique (produit à base d'argent immobilisé à libération lente) destiné à être utilisé comme conservateur dans les cosmétiques, les articles de toilette et les produits de détail similaires sensibles à l'hygiène [54]. Au Japon, un nouveau composé (Amenitop, des microsphères de gel de silice contenant un complexe argent-thiosulfate) est mélangé aux plastiques pour une protection antibactérienne durable [18]. L'halogénure d'argent est souvent incorporé dans les lunettes de vue pour une protection « photochromatique » réversible, car il diminue la lumière visible transmise. La résistance à l'argent est importante à surveiller car la technologie moderne a développé une large gamme de produits qui dépendent de l'argent comme composant microbien clé. À la fin des années 1970, Robert O. Becker a découvert que les ions argent favorisent la croissance osseuse et tuent les bactéries environnantes. L'argent tue environ 650 organismes pathogènes différents. Les pansements topiques à base d'argent ont été largement utilisés comme traitement des infections des brûlures, des plaies ouvertes et des ulcères chroniques. Les nanoparticules d'argent et les porteurs d'Ag+ peuvent être bénéfiques dans la cicatrisation retardée des plaies diabétiques, car les plaies diabétiques sont affectées par de nombreuses infections secondaires. Ces nanoparticules peuvent aider les patients diabétiques à cicatriser rapidement les plaies avec des cicatrices minimales [55]. Le nitrate d'argent est toujours un antimicrobien couramment utilisé dans le traitement des plaies chroniques [56].

6. Argent colloïdal

Les scientifiques ont découvert que les fluides corporels les plus importants sont de nature colloïdale : des particules ultrafines en suspension. Le sang, par exemple, transporte les nutriments et l'oxygène vers les cellules du corps. Cela a conduit à des études sur l'argent colloïdal (atomes d'argent électriques). Un procédé électrocolloïdal, connu pour être la meilleure méthode, est utilisé pour fabriquer l'argent colloïdal. L'argent colloïdal semble être un antibiotique naturel puissant et préventif contre les infections. Agissant comme un catalyseur, il désactiverait l'enzyme dont les bactéries unicellulaires, les virus et les champignons ont besoin pour leur métabolisme de l'oxygène. Ils s'étouffent sans que cela n'affecte les enzymes humaines ou certaines parties de la chimie du corps humain. Le résultat est la destruction des organismes pathogènes dans le corps et dans les aliments.

7. Synthèse de nanoparticules d'argent

Des particules d'argent de taille nanométrique ont été synthétisées par des techniques de condensation et de cocondensation de gaz inerte. Les deux techniques sont basées sur l'évaporation d'un métal dans une atmosphère inerte avec refroidissement ultérieur pour la nucléation et la croissance des nanoparticules. La taille et la morphologie des nanoparticules ont été analysées à l'aide d'un microscope électronique à transmission (MET). La stabilité des nanoparticules a été examinée en les exposant aux conditions ambiantes pendant un mois. L'efficacité antibactérienne des nanoparticules a été étudiée en introduisant les particules dans un milieu contenant des bactéries. Les études antibactériennes ont été réalisées en solution et sur des boîtes de Petri. Les nanoparticules d'argent se sont révélées présenter des effets antibactériens à de faibles concentrations. Les propriétés antibactériennes étaient liées à la surface totale des nanoparticules. Des particules plus petites avec un rapport surface/volume plus élevé ont fourni un moyen plus efficace pour l'activité antibactérienne. Les nanoparticules se sont révélées complètement cytotoxiques pour E. coli pour des concentrations de surface aussi faibles que 8 µg d'Ag/cm2 [12].

8. Effet des nanoparticules d'argent sur le profil de phosphotyrosine des protéines bactériennes

En examinant la teneur en phosphotyrosine des protéines dérivées de bactéries Gram positives et négatives à l'aide d'un anticorps monoclonal spécifique, l'effet possible des nanoparticules sur

Machine Translated by Google

La transduction du signal bactérien affectant la croissance peut être étudiée. La phosphorylation de divers substrats protéiques est désormais bien établie chez les espèces bactériennes [57] et on a découvert qu'elle influence la transduction du signal bactérien [58]. Pratiquement aucun changement dans le profil des protéines phosphorylées sur tyrosine n'a été observé pour S. aureus après traitement avec des nanoparticules d'argent ; cependant, il y a eu une déphosphorylation notable de deux peptides de masses relatives de 150 et 110 kDa dans E. coli et S. typhi exposés aux nanoparticules [24]. Comme la phosphorylation sur tyrosine chez les bactéries conduirait à l'activation de divers substrats protéiques comme les facteurs sigma de l'ARN polymérase et les UDPglucose déshydrogénases [59], une diminution de la phosphorylation peut refléter une inhibition de l'activité de ces enzymes avec des implications critiques sur la croissance bactérienne. Un rapport récent a décrit la phosphorylation de la tyrosine des protéines bactériennes de liaison à l'ADN simple brin (BsSSB), des molécules omniprésentes qui se lient à l'ADN à diverses étapes fonctionnelles comme la réplication et la recombinaison [60]. Une voie de signalisation phospho s'est également avérée essentielle à la progression du cycle cellulaire bactérien [61]. L'identité des peptides substrats et celle des tyrosine phosphatases putatives responsables de la déphosphorylation observée chez les bactéries à Gram négatif, comme décrit par Siddhartha et al., restent à établir et peuvent faire l'objet de recherches futures. Les présentes découvertes, ainsi que les interactions rapportées des nanoparticules d'argent avec des enzymes riches en thiols et de l'ADN génomique bactérien [11], peuvent expliquer l'effet inhibiteur des nanoparticules sur la croissance des bactéries à Gram négatif.
Il est intéressant de noter que la phosphorylation des protéines tyrosine kinases impliquées dans la biosynthèse et le transport des exopolysaccharides et des polysaccharides capsulaires a été rapportée chez un certain nombre de bactéries Gram-négatives et Gram-positives [62].

9. Conclusions

Français Les nanoparticules d'argent présentent une large distribution de tailles et de morphologies avec des facettes hautement réactives. Le principal mécanisme par lequel les nanoparticules d'argent manifestent des propriétés antibactériennes est l'ancrage et la pénétration de la paroi cellulaire bactérienne, et la modulation de la signalisation cellulaire par la déphosphorylation de substrats peptidiques clés putatifs sur les résidus de tyrosine. Les nanoparticules d'argent agissent principalement de trois manières contre les bactéries Gram-négatives : (1) les nanoparticules principalement de l'ordre de 1 à 10 nm se fixent à la surface de la membrane cellulaire et perturbent considérablement son bon fonctionnement, comme la perméabilité et la respiration ; (2) elles sont capables de pénétrer à l'intérieur des bactéries et de provoquer d'autres dommages en interagissant éventuellement avec des composés contenant du soufre et du phosphore tels que l'ADN ;

(3) les nanoparticules libèrent des ions argent, qui contribuent de manière supplémentaire à l'effet bactéricide des nanoparticules d'argent [19]. Bien que la lyse des cellules bactériennes puisse être l'une des raisons de la propriété antibactérienne observée, les nanoparticules modulent également le profil de phosphotyrosine des peptides bactériens putatifs, ce qui pourrait ainsi affecter la transduction du signal bactérien et inhiber la croissance des organismes. L'effet dépend de la dose et est plus prononcé contre les organismes Gram négatifs que contre les organismes Gram positifs. L'effet antibactérien des nanoparticules est indépendant de l'acquisition d'une résistance par les bactéries aux antibiotiques. Cependant, d'autres études doivent être menées pour vérifier si les bactéries développent une résistance aux nanoparticules et pour examiner la cytotoxicité [63] des nanoparticules envers les cellules humaines avant de proposer leur utilisation thérapeutique.

Références

[1] A. Curtis, C. Wilkinson, Tendances Biotechnol. 19, 97 (2001).
[2] C.W. Waren, S. Nie, Science 281, 2016 (1998).
[3] A. Vaseashta, D. Dimova-Malinovska, Sci. Technologie. Av. Maître. 6 312 (2005).
[4] R. Langer, Science 293, 58 (2001).
[5] K. Roy, QG Mao, SK Huang, KW Leong, Nat. Méd. 5 387 (1999).
[6] E. Sachlos, D. Gotora, JT Czernuszka, Tissue Eng. 12 2479 (2006).
[7] OC Farokhzad, J. Cheng, BA Teply, I. Sherifi, S. Jon, PW Kantoff, JP Richie, R. Langer, Proc. Natl Acad. Sci. USA 103, 6315 (2006).

Machine Translated by Google

[8] Stoimenov PK, Klinger RL, Marchin GL, Klabunde KJ, Langmuir 18, 6679 (2002).
[9] I. Sondi, B. Salopek-Sondi, J. Colloïdes Interface Sci. 275 177 (2004).
[10] A. Panacek, L. Kvitek, R. Prucek, M. Kolar, R. Vecerova, N. Pizurova, V. K. Sharma, T. Nevecna, R. Zboril, J. Phys. Chem. B 110, 16248 (2006).
[11] JR Morones, JL Elechiguerra, A. Camacho, K. Holt, JB Kouri, JT Ramirez, MJ Yacaman, Nanotechnologie 16, 2346 (2005).
[12] J. Baker, A. Pradhan, L. Pakstis, DJ Pochan, Sl Shah, J. Nanosci. Technologie. 5 244 (2005).
[13] SV Kyriacou, WJ Brownlow, N. Xu XH, Biochimie 43, 140 (2004).
[14] RGE Murray, P. Steed, HE Elson, Can. J. Microbiol. 11, 547 (1965).
[15] GD Shockman, JF Barret, Annu. Rev. Microbiol. 37, 501 (1983).
[16] S.Y. Liau, D.C. Read, W.J. Pugh, J.R. Furr, A.D. Russell , Lett. Appl. Microbiol. 25 279 (1997).
[17] K. Nomiya, A. Yoshizawa, K. Tsukagoshi, NC Kasuga, S. Hirakawa, J. Watanabe, J. Inorg. Biochimie. 98 46 (2004).
[18] A. Gupta, S. Silver, Nat. Biotechnol. 16 888 (1998).
[19] QL Feng, J. Wu, GQ Chen, FZ Cui, TN Kim, JO Kim, J. Biomed. Maître. Rés. 52 662 (2000).
[20] R. Holladay, W. Moeller, D. Mehta, J. Brooks, R. Roy, M. Mortenson, numéro de demande WO2005US47699 20051230 Office européen des brevets (2006).
[21] P. Li, J. Li, C. Wu, Q. Wu, J. Li, Nanotechnologie 16 1912 (2005).
[22] P. Jain, T. Pradeep, Biotechnol. Bioeng. 90 59 (2005).
[23] Y. Li, P. Leung, L. Yao, QW Song, E. Newton, J. Hosp. Infec. 62 58 (2006).
[24] S. Shrivastava, T. Bera, A. Roy, G. Singh, P. Ramachandrarao et D. Dash, Nanotechnologie 18 225103 9pp (2007).
[25] Y. Matsumura, K. Yoshikata, S. Kunisaki, T. Tsuchido , Appl. Microbiol. (2003).
[26] A. Gupta, M. Maynes, S. Silver, Appl. Environ. Microbiol. 64 5042 (1998).
[27] L. Nover, KD Scharf, D. Neumann, Mol. Cell. Biol. 3 1648 (1983).
[28] MJ Yacaman, JA Ascencio, HB Liu, J. Gardea-Torresdey, J. Vac. Ski. Technologie. B19 1091 (2001).
[29] G. Somorjai, Nature 430 730 (2004).
[30] M. Haruta, Catal. Aujourd'hui 36 115 (1997).
[31] N. Doraiswamy, LD Marks, Surf. Sci. 348 67 (1996).
[32] S. Iijima, T. Ichihashi Phys. Rev. Lett. 56 616 (1986).
[33] PM Ajayan, LD Marks, Phys. Tour. Lett. 60 585 (1988).
[34] N. Taniguchi, Proc. Intl. Conf. Prod. Eng. Tokyo, Partie II, Société japonaise d'ingénierie de précision (1974).
[35] AD Bangham, MM Standish, JC Watkins, J. Mol. Biol. 13 238 (1965).
[36] R. Langer, J. Folkman, Nature 263 797 (1976).
[37] R. Gref, Y. Minamitake, M. T. Peracchia, V. Trubetskoy, V. Torchilin, R. Langer, Science 263 1600 (1994).
[38] M. Bruchez Jr., M. Moronne, P. Gin, S. Weiss, AP Alivisatos, Science 281 2013 (1998).
[39] WC Chan, S. Nie, Science 281 2016 (1998).
[40] Y. Cui, Q. Wei, H. Park, CM Lieber, Science 293 1289 (2001).
[41] SA Wickline, GM Lanza, J Cell Biochem. 39 90 (2002).
[42] S. Singh, M. Singh, ISGambhir, Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures 3, 2, 75 (2008).
[43] JM Nam, CS Thaxton, CA Mirkin, Science 301, 1884 (2003).
[44] AJ Haes et RP Van Duyne, J Am Chem Soc 124(35) 10596 (2002).
[45] A. Nel, T. Xia, L. Madler, N. Li, Science 311 (5761) : 622 (2006).
[46] G. Oberdörster, A. Maynard, K. Donaldson, V. Castranova, J. Fitzpatrick, K. Ausman, J. Carter, B. Karn, W. Kreyling, D. Lai, S. Olin, N. Monteiro-Riviere, D. Warheit, H. Yang, Toxicologie des particules et des fibres 2 : 8 (2005).
[47] Ning Li, Perspectives de santé environnementale 111 (4) : 455 (2003).

Machine Translated by Google

[48] AE Porter, M. Gass, K. Muller, JN Skepper, P. Midgley et M. Welland, Environmental Science et technologie 41 (8) : 3012 (2007).
[49] M. Geiser, B. Rothen-Rutishauser, N. Kapp, S. Schürch, W. Kreyling, H. Schulz, M. Semmler, VI Hof, J. Heyder, P. Gehr, Perspectives de santé environnementale 113 (11) : 1555 (2005).

[50] R. Savic, L. Luo, A. Eisenberg, D. Maysinger, Science 300 (5619) : 615 (2003).
[51] A. Magrez, S. Kasas, V. Salicio, N. Pasquier, JW Seo, M. Celio, S. Catsicas, B. Schwaller, L. Lining, Nano Letters 6(6):1121 (2006). [52] http://www.reach4life.com/
colloidalsilver.htm [53] http://www.harveyopolis.com/educate-
yourself/silver/articles [54] http://www.matthey.com/pmd /chem/npd/jmac.htm
[55] M. Mishra, H. Kumar, K. Tripathi, Digest Journal of
Nanomaterials and Biostructures 3 , 2 , 49 (2008).
[56] J.B. Wright, K. Lam, D. Hanson, RE Burrell, Am J Inf Cont. NA 7, 627, (1995).
[57] J. Deutscher, M. H. Saier, J. Mol. Microbiol. Biotechnol. 9 125 (2005).
[58] J. Kirstein, K. Turgay, J. Mol. Microbiol. Biotechnol. 9 182 (2005).
[59] I. Mijakovic, D. Petranovic, N. Bottini, J. Deutscher, P. Ruhdal Jensen, J. Mol. Microbiol. Biotechnol. 9 189 (2005).
[60] I. Mijakovic, D. Petranovic, B. Macek, T. Cepo, M. Mann, J. Davies, PR Jensen, D. Vujaklia, acides nucléiques Res. 34 1588 (2006).
[61] AA Iniesta, PT McGrath, A. Reisenauer, HH McAdams, L. Shapiro, Proc. Natl Acad. Sci. États-Unis 103 10935 (2006).
[62] C. Grangeasse, B. Obadia, I. Mijakovic, J. Deutscher, AJ Cozzone, P. Doublet, J. Biol. Chimie. 278 39323 (2003).
[63] L. Braydich-Stole, S. Hussain, JJ Schlager, MC Hofmann, Toxicol. Sci. 88 412 (2005).