



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur de la Recherche Scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued-



Faculté de la Technologie

Département de Génie des procédés et la pétrochimie

Mémoire de Fin d'Etude

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTERACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie chimique

Présenté par :

HAMMOUDI Ammar Said

Thème

**Évaluation de l'activité antibactérienne
de nanoparticule de ZnO synthétisé par
plasma froid**

Devant le Jury:

Dr.	Président	Université d'El Oued.
Dr.	Examineur	Université d'El Oued.
Dr. FERHAT Med Fouad	Encadreur	Université d'El Oued

2022/2023

Dédicace

Avant toute personne, je remercie ALLAH le tout puissant.

Je dédie ce modeste travail avec plein d'amour et de respect:

*A celle m'est la plus chère au monde, qui n'a pas cessé de
m'encourager, de prier pour moi, et qui a su m'entourer de
toute son affection et son amour. Que Dieu la protège, ma
chère mère*

*A ce qui fait l'impossible pour me donner le bonheur, mon cher
père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues
années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer
dans la vie.*

A mes chers frère et sœurs.

*Mes professeurs qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un
savoir bien acquis.*

Pour mes meilleurs amis.

A tous mes chers de la promotion de 2021/2023

AMMAR SAID HAMMOUDI

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions le Dieu, notre créateur de nos avoir donné la connaissance, la force, la volonté et le courage afin d'accomplir ce travail modeste. Au terme de ce travail, nous souhaitons adresser tous nos sincères remerciements et notre profonde gratitude aux personnes qui nous ont apporté leur soutien et qui ont ainsi contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire de recherche.

*Mes premiers remerciements vont au : **Dr. FERHAT Mohamed Fouad**, mon encadreur, pour tout le soutien, l'aide, l'orientation, qu'elle nous a apportée durant nos années d'étude ainsi que pour ses précieux conseils et encouragements lors de la réalisation du mémoire de fin d'étude.*

*Je tiens à remercier vivement le Directeur de l'Université HAMMA Lakhdar : le Professeur **FARHAT Omar**, le Doyen de la Faculté des Sciences et Technologies : **Dr CHAMSA Ali**, le Chef du Département de génie du procédé : **Dr LAOUINI Salah Eddine**, et le Doctorant : **MESSAI Ridha**.*

Nos profonds remerciements vont à tous les enseignants de la faculté sans citer de nom, de peur d'oubli quelqu'un, pour l'effort fourni durant les 05 années de notre formation, tous les membres d'équipe de la spécialité génie de procédé qui ont aidés à leur manière, soit directement, soit simplement en nous manifestant leur sympathie. Aussi à tout le personnel de laboratoire central d'EPH El-Oued pour sa gentillesse et son soutien.

Je tenais ensuite à remercier mon parent pour le soutien inconditionnel dont ils ont fait preuve depuis que notre projet professionnel est défini. Merci pour le soutien financier, moral, psychologique et matériel. Si je suis ici aujourd'hui, c'est grâce à vous.

Enfin, je remercie mon ami et camarade de la promotion 2020/2023 pour ces deux années passées ensemble, dans les meilleurs moments comme dans les pires.

Table des matières :

Liste des figures

Liste des Tableaux

Liste des abréviations

Introduction

PARTIE I : THEORIQUE**CHAPITRE I : Synthèse des NPs de ZnO par plasma froid**

Introduction	5
1. Définition des nanomatériaux	5
2. Nanoparticules	5
3. Synthèse des nanoparticules	6
4. Les nanoparticules d'oxyde de zinc (ZnO).....	7
4.1. Application de nanoparticule du ZnO	7
5. Caractérisation des nanoparticules de ZnO	8
6. Le plasma	9
6.1. Structure et composition du plasma	10
6.2. Propriétés du plasma	11
7. Techniques de génération de plasma froid	11
8. Application de plasma froid	12
9. Synthèse des nanoparticules de ZnO par plasma froid	13
9.1. Principes de la synthèse par plasma froid	13
9.2. Paramètres de influençant la synthèse des nanoparticules	14
9.3. Synthèse de nanoparticules par Décharge glissante	15

CHAPITRE II : Propriété antibactérienne des NPs de ZnO

Introduction	17
1. Définition des bactéries	17
1.1. Structure des bactéries	17
1.2. Classification des bactéries en fonction de leur forme et de leur mode de vie	18
1.2.1. Classification basée sur la forme	18
1.2.2. Classification basée sur la coloration de Gram	18
1.2.3. Classification basée sur le mode de vie	18
1.2.4. Classification basée sur la nutrition.....	18
1.2.5. Classification basée sur la pathogénicité	18

1.3. Différents types de bactéries pathogènes pour l'homme	19
1.3.1. Escherichia coli	19
1.3.2. Staphylococcus aureus	19
1.3.3. Pseudomonas aeruginosa	20
1.3.4. Klebsiella pneumoniae	20
2. Mécanismes d'action des NPs de ZnO contre les bactéries	21
3. Évaluation de l'activité antibactérienne des NPs de ZnO	22

PARTIE II : PRATIQUE

CHAPITRE I : MATERIEL ET METHODE

Introduction	25
1. Matériel	25
1.1. Matériel biologique	25
1.1.1. Souches bactériennes	25
1.2. Matériel chimique	26
2. Méthodes	26
2.1. Synthèse de nanoparticules de ZnO par la méthode plasma froid	26
2.2. Préparation des souches bactériennes	28
2.3. Activité antibactérienne	28
1.3.1. AntibioGramme	28
1.3.2. Activité antibactérienne des nanoparticules d'oxyde de zinc	30

CHAPITRE II : RESULTATS ET DISCUSSION

1. Caractéristiques du ZnO synthétisé.....	34
1.1. Étude UV-visible.....	34
1.2. FTIR Analyse spectroscopique.....	36
1.3. X-ray diffraction.....	37
1.4. Scanning Electron Microscopy (SEM) + EDAX	39
2. Résultats de l'Activité antibactérienne des antibiogrammes	41
2.1. Contre l'E. Coli	41
2.2. Contre le S. aureus	42
2.3. Contre le P. aeruginosa	43
2.4. Contre le K. pneumoniae	44
3. Résultats de l'activité antibactérienne des nanoparticules	46
3.1. L'activité antibactérienne des nanoparticules contre l'E. Coli	46
3.2. L'activité antibactérienne des nanoparticules contre S. aureus	47

3.3. L'activité antibactérienne des nanoparticules contre <i>P. aeruginosa</i>	48
3.4. L'activité antibactérienne des nanoparticules avec <i>K. pneumoniae</i>	49
Discussion	51
Conclusion	53
Bibliographiques	54
Résumé	62

Liste des figures :

Figure 1: Gamme de tailles des nanoparticules comparée à celle des principales structures.....	6
Figure 2: Différentes méthodes de synthèse de nanoparticules.....	7
Figure 3 : Températures des électrons (T_e) et des espèces lourdes (T_g) dans un plasma en fonction de la pression.	10
Figure 4 : (a) Croquis schématique du réacteur à décharge à arc glissant / (b, c) photographies de décharge électrique dans un réacteur à arc glissant.	15
Figure 5 : <i>Escherichia coli</i> au microscope.....	19
Figure 6: <i>Staphylococcus aureus</i>	20
Figure 7 : <i>P. aeruginos</i>	20
Figure 8 : <i>Klebsiella</i>	21
Figure 9 : Mécanismes d'action des nanoparticules (NP) contre les bactéries	22
Figure 10: Schéma du Glid arc I- Cellule ouverte.....	27
Figure 11 : Four	27
Figure 12 : La poudre de nanoparticules synthétisée	28
Figure 13 : Appareil de mesure de la turbidité.	31
Figure 14 : Ultrasons.	31
Figure 15 : Activité antibactérienne des nanoparticules (méthode des puits).	32
Figure 16 : Spectre d'absorption de ZnO NPs.....	34
Figure 17 : (a) Plot de $(\alpha h\nu)^2$ versus énergie photonique de ZnO synthétisé. (b) Insert montre le plan énergétique Urbach de $\ln(\alpha)$ versus $(h\nu)$	35
Figure 18: FTIR Spectre de ZnO NPs et inset montre le spectre agrandi dans la plage $<600\text{cm}^{-1}$..	37
Figure 19 : X-ray diffraction pattern of ZnO NPs.....	38
Figure 20 : SEM de image MEB du plasma NP ZnO synthétisé avec un grossissement de (A) 1,00 KX ; (B) 10,00 KX et leur distribution granulométrique correspondante (C).	40
Figure 21 : Spectres EDAX typiques pour les NP ZnO synthétisés par plasma	41
Figure 22: Souche d' <i>E. Coli</i> avant et après incubation avec des antibiotiques.	41
Figure 23 : Résultat de l'activité antibactérienne des antibiotiques contre d' <i>E. Coli</i>	42
Figure 24 : Souche de <i>S. aureus</i> avant et après incubation avec des antibiotiques.	42
Figure 25 : Résultat de l'activité antibactérienne des antibiotiques contre le <i>S. aureus</i>	43
Figure 26 : Souche de <i>P. aeruginosa</i> avant et après incubation avec des antibiotiques	43
Figure 27 : Résultat de l'activité antibactérienne des antibiotiques contre le <i>P. aeruginosa</i>	44
Figure 28 : Souche de <i>K. pneumoniae</i> avant et après incubation avec des antibiotiques	44

Figure 29 : Résultat de l'activité antibactérienne des antibiotiques contre le <i>K. pneumoniae</i> ...	45
Figure 30 : Souche d' <i>E. Coli</i> avec NPs de ZnO.	46
Figure 31 : L'activité antibactérienne des nanoparticules avec <i>E. Coli</i>	46
Figure 32 : Souche de <i>S. aureus</i> avec NPs de ZnO.	47
Figure 33 : L'activité antibactérienne des nanoparticules avec <i>S. aureus</i>	47
Figure 34 : Souche de <i>P. aeruginosa</i> avec NPs de ZnO.	48
Figure 35 : L'activité antibactérienne des nanoparticules avec <i>P. aeruginosa</i>	48
Figure 36 : Souche de <i>K. pneumoniae</i> avec NPs de ZnO.	49
Figure 37 : L'activité antibactérienne des nanoparticules avec <i>K. pneumoniae</i>	49

Liste des Tableaux :

Tableau 1 : Pathogénicité des souches testées.	25
Tableau 2: Liste des antibiotiques utilisés et leur charge et les diamètres critiques.	29
Tableau 3 : IR les niveaux et leurs attributions pour les NPs du système ZnO.	36
Tableau 4 : Estimation of structural parameters of ZnO NPs	39
Tableau 5 : Pourcentages atomiques obtenus par EDAX des éléments présents dans les NPs d'oxyde de zinc.....	40
Tableau 6 : Résultats de l'antibiogramme contre les différentes bactéries.	45
Tableau 7 : Résultats d'antibactérienne des nanoparticules.	50

Liste des abréviations :

ADN : Acide Désoxyribonucléique.

CASFM : le Comité de l'antibiogramme de la Société Française de Microbiologie.

CMI : La Concentration Minimale Inhibitrice.

COV : Composés Organiques Volatils.

DMSO : Diméthylsulfoxyde.

DRX : La Diffraction des Rayons X.

E. coli : Escherichia coli.

FT-IR : Fourier Transform Infrared.

I : Intermédiaire.

K. pneumoniae : Klebsiella pneumoniae.

MET : La Microscopie Electronique à Transmission.

MH: Muller Hilton.

NO_x : les oxydes d'azote.

NPs : nanoparticules.

ORL : Oto-Rhino-Laryngologie.

P. aeruginosa : Pseudomonas aeruginosa.

PDT : thérapie photodynamique.

R : Résistante.

ROS : Espèces Oxydantes Réactives.

S : Sensible.

S. aureus : Staphylococcus aureus.

SO_x : Les Oxydes de Soufre.

Te : Températures des électrons.

Tg : Température de gaz

UV-vis : Ultraviolet-visible

XPS : La Spectroscopie de Photoélectrons X.

Zn : Zinc.

ZnO : Oxyde de Zinc.

Introduction :

Dans les années 1940, les antibiotiques ont été découverts, sauvant ainsi des millions de vies. Cependant, l'utilisation croissante et parfois inappropriée de ces médicaments a conduit à l'adaptation de nombreuses souches bactériennes et à leur développement de résistances aux antibiotiques. La résistance bactérienne aux antibiotiques est devenue une préoccupation majeure, car elle se généralise sur la quasi-totalité des espèces bactériennes. Ce phénomène est exacerbé par les problèmes de contamination et d'infections bactériennes, qui sont devenus un problème majeur de santé mondiale. [1]

Ainsi, il est essentiel de trouver des solutions alternatives aux antibiotiques afin de limiter la résistance bactérienne. Les nanotechnologies sont l'un des domaines de recherche les plus dynamiques de la science des matériaux modernes. [2]

Les avancées considérables en nanotechnologie et en science des matériaux ont permis la création de nombreuses nouvelles nanoparticules. Les nanoparticules sont désormais omniprésentes dans notre vie quotidienne, présentes dans les cosmétiques, les emballages, l'automobile, les textiles, etc. Les industriels considèrent ces nanoparticules comme une solution à de nombreux problèmes, car elles possèdent des propriétés physico-chimiques exceptionnelles par rapport aux matériaux massifs.[3]

Il est possible de produire des nanoparticules de différentes manières, cependant, la synthèse de nanoparticules par plasma est une méthode respectueuse de l'environnement, économique et sans danger biologique.[4]

Le ZnO-NP est une nanoparticule métallique largement utilisée comme agent antimicrobien, grâce à ses propriétés physicochimiques uniques et ses mécanismes antimicrobiens spécifiques. Les ZnO-NPs ont été démontrés pour induire un stress oxydatif en générant des espèces réactives de l'oxygène, perturber la membrane cellulaire en s'accumulant à sa surface, pénétrer dans la cellule et libérer des ions Zn^{+2} qui présentent une activité antimicrobienne significative. Cette activité antimicrobienne fait des ZnO-NPs une alternative prometteuse aux antibiotiques traditionnels dans la lutte contre les infections bactériennes résistantes aux médicaments.[5]

Dans ce cadre, notre étude vise à évaluer l'efficacité antibactérienne des nanoparticules d'oxyde de zinc synthétisé par plasma froid. Nous présentons aussi :

- Partie bibliographie qui englobe de Synthèse des nanoparticules de ZnO par plasma froid et leur propriétés antibactériennes.

- La deuxième partie de notre travail décrit le matériel et les méthodes employés pour évaluer l'activité antibactérienne des nanoparticules d'oxyde de zinc sur des souches bactériennes particulièrement résistantes.
- Ensuite nous avons présenté les résultats obtenus, suivis par des analyses approfondies.
- Enfin, nous concluons nos études en proposant des perspectives de recherche.

PARTIE I : THEORIQUE

CHAPITRE I :

Synthèse des NPs

de ZnO par

plasma froid

Introduction :

Ce chapitre se concentre sur l'étude des nanoparticules d'oxyde de zinc (ZnO), ainsi que leurs multiples applications dans des domaines tels que la médecine, l'environnement, l'électronique et l'alimentation. Il présente également différentes méthodes de synthèse des nanoparticules, à savoir la méthode physique (top-down) et la méthode chimique (bottom-up). De plus, il décrit les techniques de caractérisation des nanoparticules de ZnO, telles que la microscopie électronique à transmission, la diffraction des rayons X, la spectroscopie de photoélectrons X, la spectroscopie de diffusion Raman et la spectrométrie de masse, qui fournissent des informations détaillées sur les propriétés des nanoparticules.

En outre, ce chapitre aborde également l'utilisation du plasma froid dans la synthèse des nanoparticules de ZnO, ainsi que les propriétés essentielles de ce plasma qui influencent cette synthèse. Il examine les différentes techniques de génération de plasma froid, telles que la décharge électrique, la photo-ionisation et l'injection de plasma. Chaque technique présente ses avantages et ses limites, et le choix de la méthode dépend des besoins spécifiques de la synthèse des nanoparticules de ZnO.

1. Définition des nanomatériaux :

La nanoscience est une discipline scientifique qui se focalise sur l'étude des propriétés de la matière à l'échelle nanométrique. Elle vise à comprendre les propriétés uniques des matériaux à cette échelle, notamment les solides dont les propriétés dépendent de leur taille [6]. La nanotechnologie, quant à elle, est un domaine qui regroupe les activités de synthèse, d'ingénierie et d'utilisation de matériaux dont la taille varie de 1 à 100 nanomètres. Ces matériaux sont appelés des nanomatériaux [7]. Bien que la conférence de Richard Feynman en 1959 soit souvent citée comme le point de départ des concepts de nanoscience et de nanotechnologie, l'utilisation des nanomatériaux remonte à une époque antérieure [8].

2. Nanoparticules :

Les nanoparticules sont des particules dont au moins une dimension est inférieure à 100 nanomètres. En raison de leur petite taille, les nanoparticules ont des propriétés uniques qui les distinguent des particules de plus grande taille. Ces propriétés peuvent inclure une grande surface spécifique, une meilleure réactivité chimique, une capacité de pénétration accrue et une diffusion plus rapide, et sont largement utilisées dans de nombreux domaines.[9]

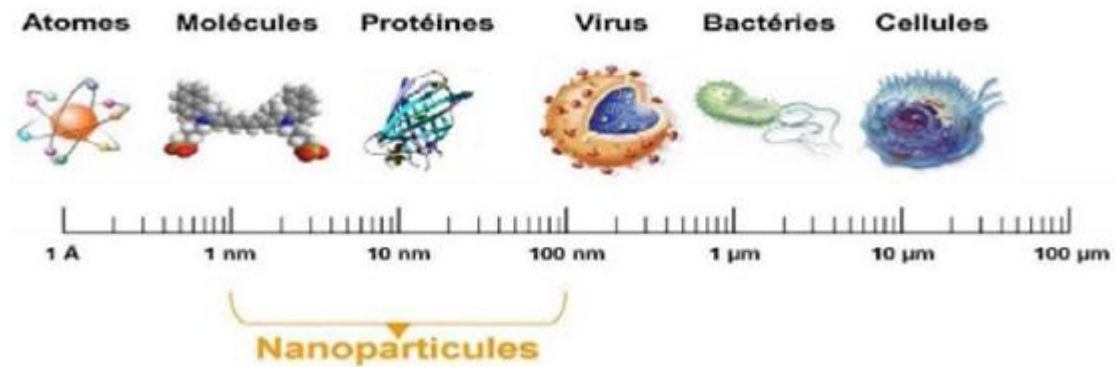


Figure 1: Gamme de tailles des nanoparticules comparée à celle des principales structures. [10]

3. Synthèse des nanoparticules :

De nombreuses techniques différentes ont été développées pour produire des nanoparticules métalliques, car il existe deux stratégies générales et bien connues pour obtenir des matériaux à l'échelle nanométrique [11], l'une par la méthode physique et l'autre par la méthode chimique comme le montre la figure 2.

La voie physique dite descendante « top-down ». La technique descendante souffre de la nécessité d'éliminer de grandes quantités de matière, et implique la fragmentation des solides en utilisant des techniques physiques, par exemple, l'ablation laser [12], et les rayonnements ionisants ce qui permet de développer une grande variété des nanoparticules, voie chimique de réticulation ascendante ou « Botton-up » où les atomes issus de la réduction des ions sont assemblés pour produire des nanoparticules, afin de réduire les précurseurs de matériaux à l'aide de techniques chimiques telles que la réduction chimique, la photochimie ou l'électrochimie [13] .

Parmi ces dernières, la réduction chimique est la méthode la plus largement utilisée dans l'industrie des nanoparticules, car elle permet un meilleur contrôle de la taille et de la morphologie des nanoparticules.

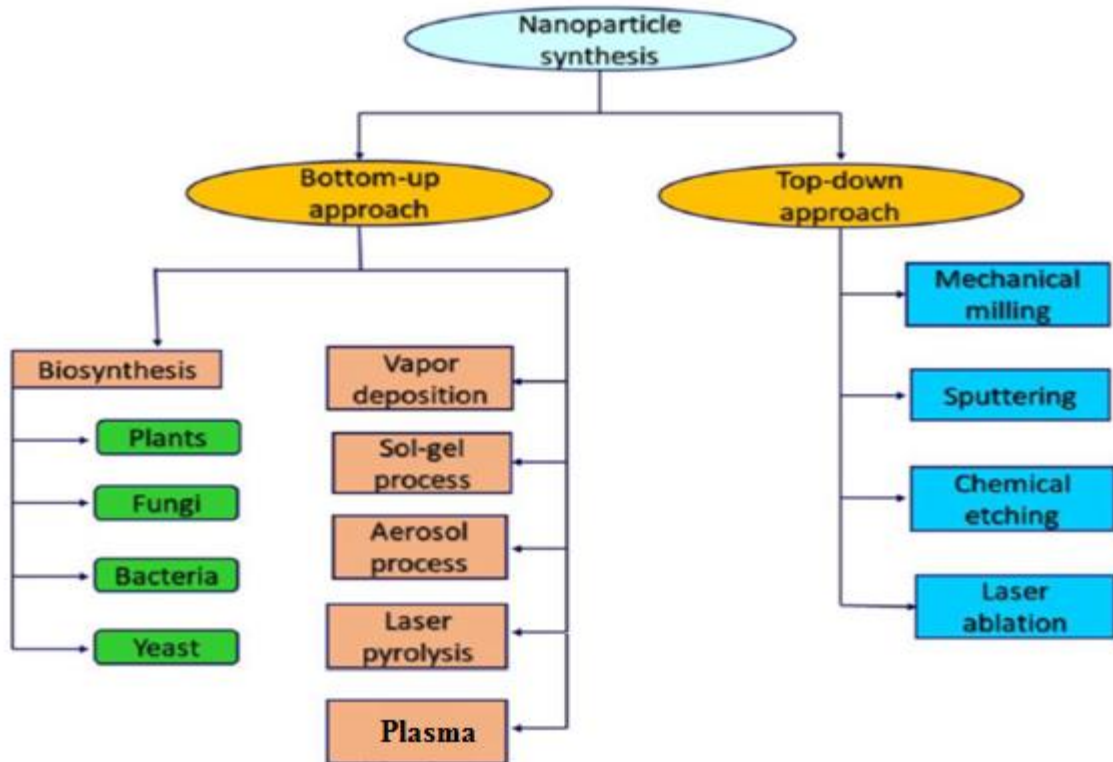


Figure 2: Différentes méthodes de synthèse de nanoparticules [14]

4. Les nanoparticules d'oxyde de zinc (ZnO) :

Les ZnO sont un matériau polyvalent avec de nombreuses propriétés chimiques et physiques uniques. Elles sont chimiquement et thermiquement stables, durables, sélectives, et possèdent un coefficient de couplage élevé. De plus, elles ont des propriétés optiques, électriques et thermiques spécifiques qui les rendent attrayantes pour une gamme d'applications diverses. Par exemple, leur indice de réfraction élevé (1,95-2,10) les rend utiles dans les applications de pigments. Les NPs de ZnO peuvent également être utilisées comme conducteurs électriques lorsqu'elles sont convenablement dopées, et sont thermiquement stables à des températures extrêmement élevées, allant jusqu'à environ 1800°C.

4.1. Application de nanoparticule du ZnO :

a. Applications médicales : les nanoparticules de ZnO sont utilisées pour des applications médicales, telles que la thérapie photodynamique (PDT) [15], la détection de biomarqueurs et la thérapie anticancéreuse [16]. Elles ont également été utilisées pour améliorer la cicatrisation des plaies et réduire l'inflammation [17]. Les recherches en la matière sont encore en cours, et les résultats sont prometteurs. [18]

b. Applications environnementales : les nanoparticules de ZnO peuvent être utilisées pour dégrader les polluants organiques dans les eaux usées, en particulier les colorants. Elles peuvent également être utilisées pour lutter contre les bactéries dans les filtres à air. Cependant, des préoccupations ont été soulevées quant à leur toxicité pour les organismes aquatiques. [19]

c. Applications électroniques : les nanoparticules de ZnO peuvent être utilisées pour améliorer les performances des dispositifs électroniques, tels que les transistors, les capteurs et les cellules solaires. Elles peuvent également être utilisées pour la fabrication de matériaux optiques, tels que les films antireflets.[20]

d. Applications alimentaires : les nanoparticules de ZnO peuvent être utilisées pour améliorer la durée de conservation des aliments et réduire la contamination bactérienne. Cependant, des préoccupations ont été soulevées quant à leur sécurité pour la consommation humaine à long terme. [21]

5. Caractérisation des nanoparticules de ZnO :

La caractérisation des nanoparticules de ZnO synthétisées par plasma froid peut être réalisée par différentes techniques [22], En utilisant ces techniques de caractérisation, il est possible de déterminer la taille, la morphologie, la distribution de taille, la pureté et la qualité cristalline des nanoparticules de ZnO synthétisées par plasma froid. Ces informations sont importantes pour évaluer la qualité des nanoparticules de ZnO et leur aptitude à être utilisées dans différentes applications.[23]. Voici quelques-unes des méthodes les plus couramment utilisées :

a. La microscopie électronique à transmission (MET) : Cette technique permet d'observer la morphologie des nanoparticules avec une résolution spatiale élevée. Elle peut également être utilisée pour déterminer la taille et la forme des particules. En outre, la MET peut fournir des informations sur la structure cristalline de la nanoparticule et sur l'orientation de ses plans cristallins.[24]

b. La diffraction des rayons X (DRX) : Cette technique permet de déterminer la structure cristalline des nanoparticules. La DRX peut être utilisée pour identifier les plans cristallins de la nanoparticule, ce qui permet de déterminer sa structure cristalline. En outre, la DRX peut être utilisée pour estimer la taille des particules en utilisant la méthode de Debye-Scherrer.[25]

c. La spectroscopie de photoélectrons X (XPS) : Cette technique permet de déterminer la composition chimique de la surface des nanoparticules. Elle peut être utilisée pour identifier les éléments chimiques présents dans la nanoparticule et pour déterminer leur état d'oxydation. En outre, la XPS peut être utilisée pour mesurer la taille des particules en utilisant la profondeur de pénétration des électrons. [26]

d. La spectroscopie de diffusion Raman : Permet de déterminer la structure cristalline et la composition chimique des nanoparticules. Elle peut être utilisée pour identifier les vibrations moléculaires présentes dans la nanoparticule, ce qui permet de déterminer sa structure cristalline et sa composition chimique. En outre, la spectroscopie de diffusion Raman peut être utilisée pour mesurer la taille des particules en utilisant la relation entre la taille des particules et la position du pic Raman.[27]

e. La spectrométrie de masse : Cette technique permet de déterminer la taille et la distribution des masses des nanoparticules. Elle peut également être utilisée pour mesurer la composition chimique des nanoparticules et pour identifier les éléments chimiques présents dans la nanoparticule.[28]

En utilisant ces techniques de caractérisation, les scientifiques peuvent obtenir des informations détaillées sur les nanoparticules de ZnO, ce qui leur permet de comprendre leur comportement physique et chimique et d'optimiser leur synthèse pour répondre à des applications spécifiques.

f. La spectrométrie UV- Vis : La spectroscopie UV-vis est une méthode couramment utilisée pour étudier les propriétés optiques des nanoparticules de ZnO. Elle permet de mesurer l'absorption et la réflexion de la lumière dans la gamme des ultraviolets et du visible, fournissant ainsi des informations sur la bande interdite et les propriétés de transition électronique des nanoparticules. La photoluminescence est une autre technique permettant d'étudier l'émission de lumière par les nanoparticules de ZnO lorsqu'elles sont excitées par une source lumineuse [29].

g. La spectrométrie FT-IR: La spectrométrie FT-IR (Fourier Transform Infrared) est une technique de caractérisation utilisée pour analyser les nanoparticules de ZnO. Elle permet d'identifier les groupes fonctionnels présents sur la surface des particules, tels que les groupes hydroxyles, carbonyles et alcoxydes, fournissant ainsi des informations sur la composition chimique et les interactions des nanoparticules. Cette technique permet également d'étudier les processus de modification de surface et de suivre les changements dans les bandes d'absorption caractéristiques. En résumé, la spectrométrie FT-IR est une méthode utile pour comprendre la structure, la composition et les propriétés des nanoparticules de ZnO [30].

6. Le plasma :

Le plasma est souvent désigné comme la forme de matière la plus abondante dans l'univers et constitue un composant majeur des étoiles et autres objets célestes. Le plasma est une forme énergétique de la matière qui diffère des états : solide, liquide et gazeux. Le plasma est considéré comme le quatrième état de la matière. Il se compose uniquement d'un mélange de particules de plasma chargées - électrons, ions et espèces neutres dans les états fondamentaux et excités. Les

propriétés du plasma dépendent de la source et de la quantité d'énergie fournie, conduisant à deux grandes catégories : les plasmas thermiques et non thermiques comme le montre la figure 3.

De plus, le plasma peut exister dans une large gamme de températures sans altérer son état. Cela en fait une forme de matière polyvalente avec diverses applications dans le monde réel. Par exemple, les plasmas gazeux sont largement utilisés dans des applications médicales telles que la stérilisation et la désinfection en raison de leurs propriétés antimicrobiennes. Il est également de plus en plus utilisé dans des industries telles que l'aérospatiale, la production d'énergie et le traitement des matériaux. Par ailleurs, peut être formé par une variété de méthodes telles que la radiofréquence ou l'excitation par micro-ondes.[31]

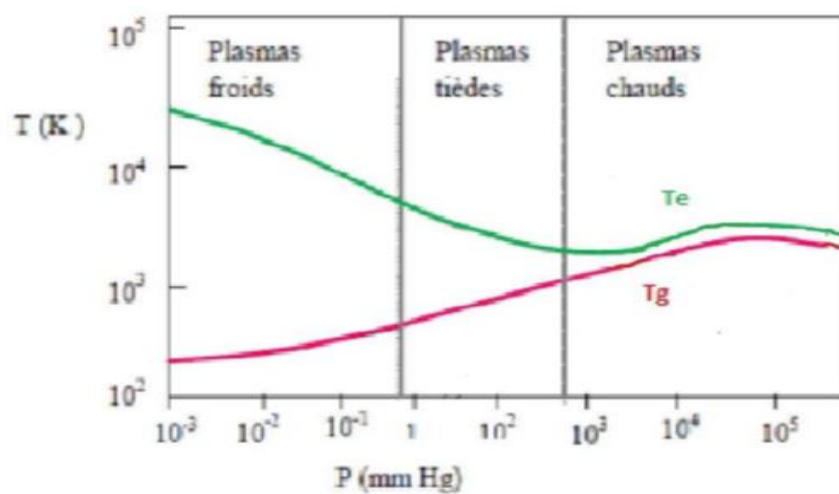


Figure 3 : Températures des électrons (T_e) et des espèces lourdes (T_g) dans un plasma en fonction de la pression. [32]

6.1. Structure et composition du plasma :

Dans le contexte de la synthèse des nanoparticules de ZnO par plasma froid, il est important de comprendre en détail la structure et la composition du plasma utilisé pour cette méthode. Le plasma est créé par l'application d'une énergie externe à un gaz, qui peut être l'air atmosphérique, de l'hélium, de l'argon ou de l'oxygène, entre autres. Cette énergie ionise les atomes et les molécules du gaz, créant ainsi un mélange de particules chargées et neutres. [33]

La structure du plasma peut varier en fonction de plusieurs facteurs, tels que la nature du gaz d'origine, la densité de puissance appliquée et les conditions de pression et de température. Selon ces facteurs, on peut distinguer plusieurs régions dans le plasma, telles que la région du plasma froid, où les particules chargées sont peu nombreuses et les espèces neutres dominent, ou la région du plasma chaud, où la densité électronique et ionique est élevée et la température est élevée.[34]

La composition du plasma peut également varier selon les conditions de formation et la nature des gaz utilisés. Les espèces présentes dans le plasma peuvent inclure des ions, des électrons, des atomes neutres, des molécules, des radicaux et des photons, entre autres. Les espèces chargées, comme les ions et les électrons, sont souvent les espèces les plus importantes pour les processus de synthèse de nanoparticules par plasma froid, car elles sont responsables de la génération de l'énergie nécessaire à la formation de nanoparticules.[35]

6.2. Propriétés du plasma :

Les propriétés du plasma sont étroitement liées à sa structure et sa composition, et ces propriétés ont une grande influence sur la synthèse de nanoparticules de ZnO par plasma froid. Une propriété importante du plasma est sa conductivité électrique, qui est due à la présence d'électrons libres et d'ions dans le plasma. Cette conductivité peut être contrôlée par la densité de puissance appliquée et la composition du gaz utilisé, ce qui permet de modifier les propriétés du plasma pour optimiser la synthèse de nanoparticules de ZnO.[36]

Une autre propriété importante est la température du plasma, qui peut varier de quelques milliers à plusieurs dizaines de milliers de degrés Celsius en fonction des conditions de formation. Cette température élevée permet d'activer des réactions chimiques spécifiques pour la synthèse de nanoparticules de ZnO.

En plus de la température, la densité électronique et ionique du plasma peut également être modifiée pour optimiser la synthèse de nanoparticules de ZnO. Des densités électroniques élevées peuvent être utilisées pour ioniser les précurseurs de ZnO, tandis que des densités ioniques élevées peuvent être utilisées pour former des nanoparticules de ZnO.[37]

D'autres propriétés du plasma peuvent également jouer un rôle important dans la synthèse de nanoparticules de ZnO par plasma froid, telles que le temps de rétention, la pression et le flux de gaz. En modifiant ces propriétés, il est possible de contrôler la formation, la taille et la forme des nanoparticules de ZnO.[38]

7. Techniques de génération de plasma froid :

La génération de plasma froid peut se faire selon différentes techniques, chacune ayant ses avantages et ses limitations. Les principales techniques utilisées sont :

- La décharge électrique : Cette technique consiste à appliquer une tension électrique élevée à un gaz à basse pression pour ioniser le gaz et créer un plasma. Il existe plusieurs types de décharges électriques, notamment la décharge à barrière diélectrique, la décharge à courant continu et la décharge à micro-ondes.[39]

- La photo-ionisation : Cette technique utilise des photons pour ioniser un gaz et créer un plasma. Elle peut être réalisée à l'aide d'une lampe à décharge sans électrodes ou d'un laser.[40]
- L'injection de plasma : Cette technique consiste à injecter un plasma préexistant dans un gaz ambiant pour le maintenir en état de plasma.[41]
- la décharge d'arc glissant : Le procédé de production de plasma appelé Glid Arc Discharge, également connu sous le nom de décharge à arc glissant, est une méthode abordable et simple.

8. Application de plasma froid :

Le plasma froid a de nombreuses applications dans divers domaines, notamment dans l'industrie, la médecine, l'environnement et l'énergie. Voici quelques exemples d'applications :

a. Traitement de surface : le plasma froid peut être utilisé pour modifier les propriétés de surface des matériaux, tels que la mouillabilité, l'adhérence, la conductivité, la résistance à l'usure, etc. Cette technique est largement utilisée dans l'industrie des semi-conducteurs, de l'optique, de l'aérospatiale et de l'automobile.[42]

b. Stérilisation : le plasma froid peut être utilisé pour éliminer les bactéries, les virus et les champignons sur les surfaces des instruments médicaux, des implants, des emballages alimentaires, des textiles, etc. Cette méthode de stérilisation est écologique, économique et efficace.[43]

c. Dépollution : le plasma froid peut être utilisé pour décomposer les polluants gazeux, tels que les gaz à effet de serre, les COV, les NOx, les SOx, etc. Cette méthode de dépollution est écologique et peu coûteuse, par rapport aux autres technologies de traitement de l'air. Les eaux usées provenant d'établissements de soins de santé contiennent souvent des substances pharmaceutiques, des produits chimiques et des agents pathogènes potentiellement dangereux. Le traitement par plasma froid peut contribuer à la dégradation et à l'élimination de ces polluants. [44]

d. Synthèse de nanoparticules : le plasma froid peut être utilisé pour synthétiser des nanoparticules de différents matériaux, tels que les métaux, les oxydes, les carbures, les nitrites, etc. Cette méthode de synthèse permet d'obtenir des particules de haute pureté et de taille uniforme, avec un contrôle précis de leur morphologie. [45] Les nanoparticules d'argent sont connues pour leurs propriétés antimicrobiennes, tandis que les nanoparticules de silice sont appréciées pour leurs applications optiques et biomédicales. Les nanoparticules de titane trouvent leur utilité dans la photocatalyse et les revêtements, tandis que les nanoparticules de carbone sont prisées pour leur conductivité élevée et leur légèreté [46].

e. Production d'énergie : le plasma froid peut être utilisé pour produire de l'énergie électrique, thermique et chimique, à partir des déchets organiques, des biomasses, des gaz naturels, etc. Cette méthode de production d'énergie est écologique, renouvelable et peu coûteuse, par rapport aux autres sources d'énergie [47].

9. Synthèse des nanoparticules de ZnO par plasma froid :

La synthèse des nanoparticules de ZnO par plasma froid est une technique en pleine expansion dans le domaine de la nanotechnologie. [48], Cette méthode de synthèse permet d'obtenir des nanoparticules de haute pureté et de petite taille, avec une distribution de taille étroite et une surface spécifique élevée. En outre, elle permet de produire des nanoparticules hautement stables et dispersibles dans l'eau, ce qui est important pour leur utilisation en tant qu'agents antibactériens [49] .

L'utilisation du plasma froid comme méthode de synthèse présente plusieurs avantages par rapport aux méthodes conventionnelles telles que la synthèse en solution [50]. Cette méthode de synthèse ne nécessite pas l'utilisation de produits chimiques nocifs et offre un contrôle précis sur la taille et la forme des nanoparticules. De plus, cette méthode permet de synthétiser des nanoparticules à des températures relativement basses, évitant ainsi la formation de phases indésirables.

Cependant, la synthèse des nanoparticules de ZnO par plasma froid nécessite une compréhension approfondie des mécanismes impliqués dans le processus de synthèse. [48] . La synthèse des nanoparticules de ZnO par plasma froid implique la dissociation des précurseurs de ZnO en atomes ou en molécules et leur recombinaison pour former des nanoparticules de ZnO.

La synthèse des nanoparticules de ZnO par plasma froid est une méthode prometteuse pour obtenir des nanoparticules de haute pureté et de petite taille, avec une distribution de taille étroite et une surface spécifique élevée. Cette méthode offre également un contrôle précis sur la taille et la forme des nanoparticules, tout en évitant l'utilisation de produits chimiques nocifs et la formation de phases indésirables. Cependant, une compréhension approfondie des mécanismes impliqués dans le processus de synthèse est nécessaire pour optimiser les conditions de synthèse et améliorer les propriétés des nanoparticules de ZnO.

9.1. Principes de la synthèse par plasma froid :

La synthèse des nanoparticules de ZnO par plasma froid repose sur la décomposition d'un précurseur gazeux de Zn en atomes de Zn et la réaction ultérieure de ces atomes avec l'oxygène de l'air pour former les nanoparticules de ZnO. Cette méthode de synthèse est considérée comme avantageuse par rapport aux méthodes conventionnelles, car elle permet une production de

particules de petite taille avec une distribution de taille étroite, une haute pureté et une grande surface spécifique. [35]

Le plasma froid est utilisé pour la synthèse des nanoparticules de ZnO, car il peut produire une quantité importante d'espèces réactives telles que des ions, des atomes et des radicaux qui peuvent interagir avec le précurseur de Zn et favoriser la formation des nanoparticules de ZnO. Le plasma froid est généré à partir d'un gaz inerte, tel que l'argon ou l'hélium, qui est ionisé par l'application d'un champ électrique à haute fréquence.[51]

La synthèse par plasma froid est également une méthode écologique et économique car elle nécessite peu de précurseur, elle peut être réalisée à température ambiante et ne produit pas de déchets dangereux. De plus, cette méthode de synthèse peut être facilement adaptée pour la production de nanoparticules de ZnO à grande échelle.[52]

Et dessus, elle les principes de la synthèse par plasma froid est basée sur la génération d'un plasma à partir d'un gaz inerte qui permet la formation de nanoparticules de ZnO à partir d'un précurseur gazeux de Zn, offrant ainsi une méthode de synthèse efficace, écologique et économique pour la production de nanoparticules de ZnO.[53]

9.2. Paramètres de influençant la synthèse des nanoparticules :

Les paramètres de synthèse jouent un rôle important sur la taille et la morphologie des nanoparticules de ZnO synthétisées par plasma froid. Différents paramètres peuvent être ajustés pour contrôler la taille, la morphologie et la distribution des particules. Parmi ces paramètres les plus influents, on peut citer :

- La concentration de la source des ions de Zn^{2+} : une augmentation de la concentration de la solution qui contient les ions Zn^{2+} peut conduire à une augmentation de la taille des nanoparticules de ZnO, car il y a plus des ions de Zinc disponibles pour réagir avec les espèces générer du plasma pour former les nanoparticules .[54]
- La puissance du plasma : une augmentation de la puissance du plasma peut augmenter la production de radicaux et d'ions réactifs, conduisant à une diminution de la taille des nanoparticules de ZnO.
- Le temps de décharge du plasma : un temps de décharge plus long peut conduire à une décroissance des nanoparticules de ZnO, diminuant ainsi leur taille.
- Le débit de gaz : un débit de gaz plus élevé peut conduire à une diminution de la taille des nanoparticules de ZnO, car cela peut augmenter la quantité des radicaux réagissent avec les ions Zn^{2+} .

- La température du substrat : une température plus élevée du substrat peut favoriser la croissance d'agitation des ions et leurs contacts avec les radicaux qui facilitent la synthèse des nanoparticules de ZnO et l'augmentation de leur taille.

Il est important de noter que ces paramètres peuvent interagir les uns avec les autres, conduisant à des effets complexes sur la taille et la morphologie des nanoparticules de ZnO synthétisées par plasma froid. Une optimisation minutieuse de ces paramètres est nécessaire pour obtenir des nanoparticules de ZnO de la taille et de la morphologie souhaitées.[55]

9.3. Synthèse de nanoparticules par Décharge glissante :

Cette technique implique l'utilisation de deux électrodes opposées qui sont positionnées symétriquement autour d'un jet de gaz, tel que de l'air humide. Une différence de potentiel élevée, généralement de l'ordre de 5 à 10 kV, est appliquée entre les électrodes pour générer une décharge de glissement. Cette technique est utilisée pour la synthèse de nanoparticules de ZnO, entre autres applications. Elle permet d'obtenir des particules de haute pureté et de taille uniforme, avec un contrôle précis de leur morphologie.

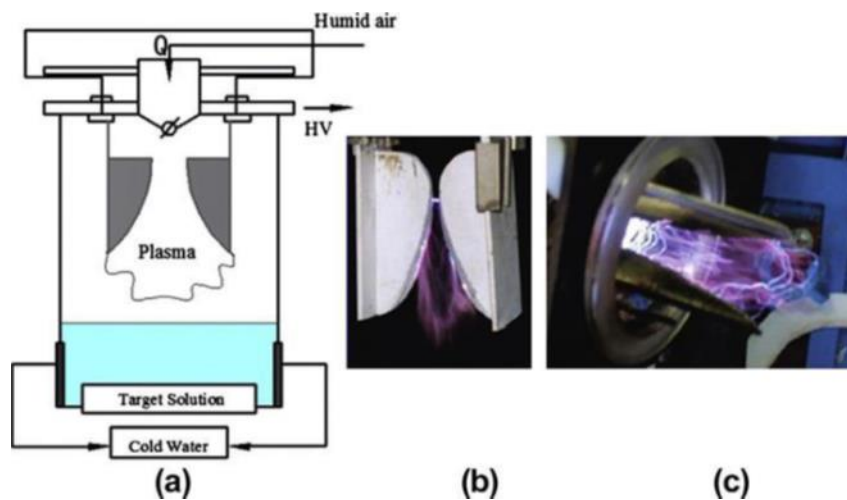


Figure 4 : (a) Croquis schématique du réacteur à décharge à arc glissant / (b, c) photographies de décharge électrique dans un réacteur à arc glissant. [34]

L'arc démarre à la distance minimale entre les électrodes et glisse le long de celles-ci en s'allongeant sous l'influence du flux de gaz avant d'exploser en colonne et de former un nouvel arc. Cette colonne est très riche en espèces hautement réactives. Ces espèces réactives sont en partie responsables des propriétés chimiques et de l'effet létal du Glid arc.[56] Si nous utilisons de l'air sec ($N_2 + O_2$), il y aura une réaction entre les molécules d'azote et d'oxygène pour former des espèces telles que : $O\bullet$, O_3 , NO_x , $N\bullet$, $NO\bullet$, etc. Si la décharge est créée dans de l'air humide, d'autres réactions peuvent exister entre O_2 , N_2 et H_2O et favoriser ainsi la formation de nouvelles espèces très réactives telles que : les radicaux $OH\bullet$ et $OH_2\bullet$.

Le "Glid arc" généré contient divers types de composés oxydants tels que les radicaux hydroxyles qui jouent un rôle important dans la décomposition des composés organiques en raison de leur potentiel redox élevé capable de dégrader les polluants cibles même lors de la minéralisation. [57] Au cours des deux dernières décennies, divers prototypes de Glid arc ont été développés pour la manipulation des fluides. Alors que, quel que soit le type de réacteur à plasma, le principe de production de plasma est identique dans sa première configuration

CHAPITRE II :

Propriété antibactérienne des NPs de ZnO

Introduction :

Les nanoparticules de ZnO sont de plus en plus utilisées pour leur activité antibactérienne potentielle. Les propriétés antibactériennes des nanoparticules de ZnO sont dues à leur capacité à interagir avec la membrane cellulaire des bactéries et à produire des radicaux libres qui endommagent les structures cellulaires.

1. Définition des bactéries :

Les bactéries sont des procaryotes unicellulaires, définis par l'absence de noyau et leur matériel génétique sous forme d'ADN circulaire au centre du cytoplasme. Elles sont très diverses en termes de morphologie. Les bactéries se reproduisent rapidement et efficacement par simple division cellulaire. Les bactéries sont présentes dans tous types de milieux, qu'ils soient terrestres, aquatiques ou aériens, et jouent des rôles essentiels dans les cycles biogéochimiques, l'agriculture, la médecine et l'industrie. [58].

1.1. Structure des bactéries :

La structure des bactéries comprend une membrane plasmique qui entoure la cellule et contrôle l'échange de matériaux entre la cellule et son environnement. [59]

Les bactéries possèdent également une paroi cellulaire qui leur donne une forme spécifique et les protège des stress environnementaux [60]

Les flagelles sont des structures de propulsion que les bactéries peuvent utiliser pour se déplacer vers des sources de nutriments ou pour éviter des substances nocives. Les flagelles sont constitués de protéines et sont en rotation constante [61]

Les pili, également connus sous le nom de fibrine, sont de petites excroissances qui permettent aux bactéries de se fixer aux surfaces et de former des colonies. Bailey est également impliqué dans la conjugaison bactérienne, le processus de transfert de matériel génétique entre bactéries [60].

Les plasmides sont de petits morceaux circulaires d'ADN qui peuvent être échangés entre des bactéries de la même espèce ou d'espèces différentes. Les plasmides peuvent contenir des gènes qui confèrent aux bactéries des avantages sélectifs, tels que la résistance aux antibiotiques. [61]

La capsule est une couche de polysaccharides ou de glycoprotéines qui entoure la cellule bactérienne et la protège des attaques du système immunitaire de l'hôte ou des agents antimicrobiens. La capsule peut également faciliter la fixation des bactéries aux surfaces.[62]

Les endospores sont des structures résistantes qui permettent aux bactéries de survivre dans des conditions environnementales défavorables, telles que des températures élevées ou des niveaux élevés de rayonnement. Les endospores sont des formes dormantes de la bactérie qui peuvent se réactiver lorsque les conditions environnementales sont plus favorables. dormantes de bactéries qui peuvent se réactiver lorsque les conditions environnementales sont plus favorables.[63]

1.2. Classification des bactéries en fonction de leur forme et de leur mode de vie :

1.2.1. Classification basée sur la forme :

Les bactéries peuvent être classées en fonction de leur forme, qui peut être sphérique (coccus), en forme de bâtonnet (bacille) ou en forme de spirale (spirille). Cette classification est souvent utilisée pour identifier les bactéries pathogènes.[64]

1.2.2. Classification basée sur la coloration de Gram :

Les bactéries peuvent être classées en fonction de leur réponse à la coloration de Gram [65], qui est une technique de laboratoire courante utilisée pour identifier les bactéries. Les bactéries peuvent être classées en deux groupes : les bactéries à Gram positif, qui ont une paroi cellulaire épaisse et prennent une coloration violette, et les bactéries à Gram négatif, qui ont une paroi cellulaire plus mince et prennent une coloration rose. Cette classification est importante car elle permet de déterminer le traitement antibiotique approprié.[66]

1.2.3. Classification basée sur le mode de vie :

Les bactéries peuvent être classées en fonction de leur mode de vie, qui peut être aérobie (nécessite de l'oxygène pour survivre), anaérobie (ne peut pas survivre en présence d'oxygène), ou facultatif (peut survivre avec ou sans oxygène). Cette classification est importante car elle permet de comprendre comment les bactéries se développent et se propagent dans différents environnements.[67]

1.2.4. Classification basée sur la nutrition :

Les bactéries peuvent être classées en fonction de leur mode de nutrition, qui peut être autotrophe (produit sa propre nourriture à partir de sources inorganiques) ou hétérotrophe (dépend de sources organiques pour sa nourriture). Cette classification est importante car elle permet de comprendre comment les bactéries se nourrissent et se développent.[68]

1.2.5. Classification basée sur la pathogénicité :

Les bactéries peuvent être classées en fonction de leur capacité à causer des maladies chez les humains et les animaux. Certaines bactéries sont pathogènes et peuvent causer des infections

graves, tandis que d'autres sont bénéfiques et peuvent être utilisées dans des applications telles que la production d'aliments fermentés.[69]

1.3. Différents types de bactéries pathogènes pour l'homme :

Il existe plusieurs types de bactéries pathogènes pour l'homme, qui peuvent causer des infections et des maladies. Voici quelques exemples :

1.3.1. *Escherichia coli* :

E. coli est une bactérie en forme de bâtonnet appartenant à la famille des Enterobacteriaceae. Il mesure environ 1 à 2 micromètres de long et se trouve souvent dans l'intestin des animaux et des humains en tant que bactérie commensale ou bénéfique.[70] Certaines bactéries *E. coli*, cependant, peuvent être pathogènes et provoquer des infections chez l'homme sous forme d'infections gastro-intestinales chez l'homme, telles que la diarrhée. Le syndrome hémolytique et urémique est une maladie potentiellement mortelle caractérisée par une anémie, une thrombocytopénie et une insuffisance rénale aiguë. Les souches pathogènes de bactéries peuvent également provoquer des infections des voies urinaires et des plaies [71].

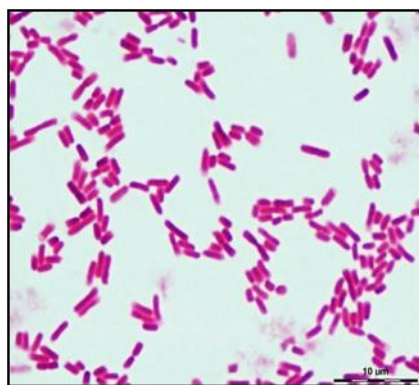


Figure 5 : *Escherichia coli* au microscope [72]

1.3.2. *Staphylococcus aureus* :

S. aureus est une bactérie sphérique (coccus) appartenant à la famille des Staphylococcaceae. Ils mesurent environ 0,5 à 1 micron de diamètre et se trouvent souvent sur la peau et dans les voies respiratoires supérieures des humains en tant que symbiotes. *Staphylococcus aureus* est connu pour sa capacité à former des colonies sur des milieux de culture, qui ont un aspect doré ou jaune et provoquent de nombreuses infections telles que des infections du sang et des pneumonies.[73]

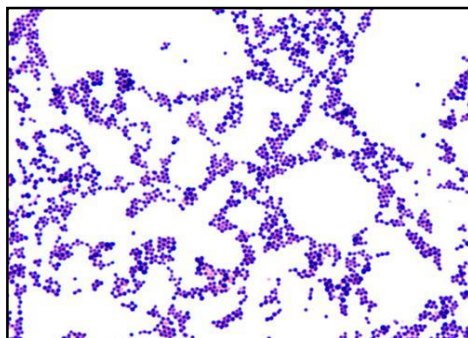


Figure 6: Staphylococcus aureus [74]

1.3.3. *Pseudomonas aeruginosa* :

P. aeruginosa est une bactérie en forme de bâtonnet appartenant à la famille des Pseudomonadaceae. Il mesure de 1 à 5 μm de long et se trouve souvent dans l'eau, le sol et les surfaces humides. *P. aeruginosa* est connu pour sa capacité à résister aux antibiotiques et aux désinfectants, ce qui en fait une cause fréquente d'infections nosocomiales[75]. *Pseudomonas aeruginosa* peut provoquer diverses infections chez l'homme, en particulier chez les personnes dont le système immunitaire est affaibli. Les infections courantes comprennent les infections des voies respiratoires, les infections des voies urinaires et les infections cutanées. *Plasmodium aeruginosa* est également connu pour provoquer des infections graves chez les patients atteints de mucoviscidose, une maladie génétique qui affecte principalement les poumons et le système digestif.[76]



Figure 7 : *P. aeruginosa* [77]

1.3.4. *Klebsiella pneumoniae* :

K. pneumoniae est une bactérie en forme de bâtonnet appartenant à la famille des Enterobacteriaceae. Elle mesure environ 1 à 3 micromètres de longueur et possède une capsule polysaccharidique qui la rend résistante à l'activité des macrophages et des neutrophiles. *K. pneumoniae* est souvent trouvée dans les intestins humains et peut également être trouvée dans

l'environnement.[78] *K. pneumoniae* provoque des infections nosocomiales, notamment des infections des voies urinaires, des pneumonies, des méningites et des infections du sang. Tous ces agents pathogènes de la pneumonie restent résistants aux antibiotiques et sont notoirement difficiles à traiter.[79]

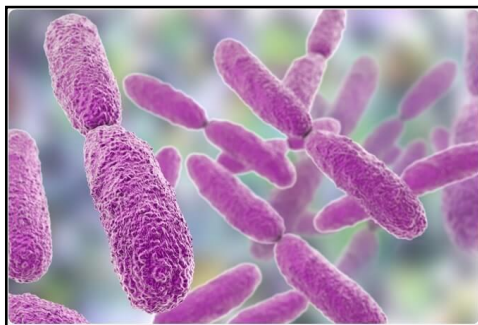


Figure 8 : Klebsiella (SCIENCE PHOTO LIBRARY / KKO). [68]

2. Mécanismes d'action des NPs de ZnO contre les bactéries :

Les nanoparticules de ZnO ont montré des effets antimicrobiens contre diverses bactéries, Les mécanismes d'action proposés incluent l'interaction avec la membrane cellulaire et la production de radicaux libres. Les nanoparticules de ZnO peuvent perturber la membrane cellulaire des bactéries en induisant une fuite d'ions et de molécules intracellulaires, ce qui peut entraîner la mort cellulaire.[80] En outre, les nanoparticules de ZnO peuvent produire des radicaux libres, tels que l'oxyde nitrique et les espèces réactives de l'oxygène, qui peuvent causer des dommages oxydatifs à l'ADN, aux protéines et aux lipides des bactéries. Ces mécanismes d'action peuvent potentiellement être utilisés pour développer de nouveaux agents antimicrobiens pour lutter contre les infections bactériennes.[81]

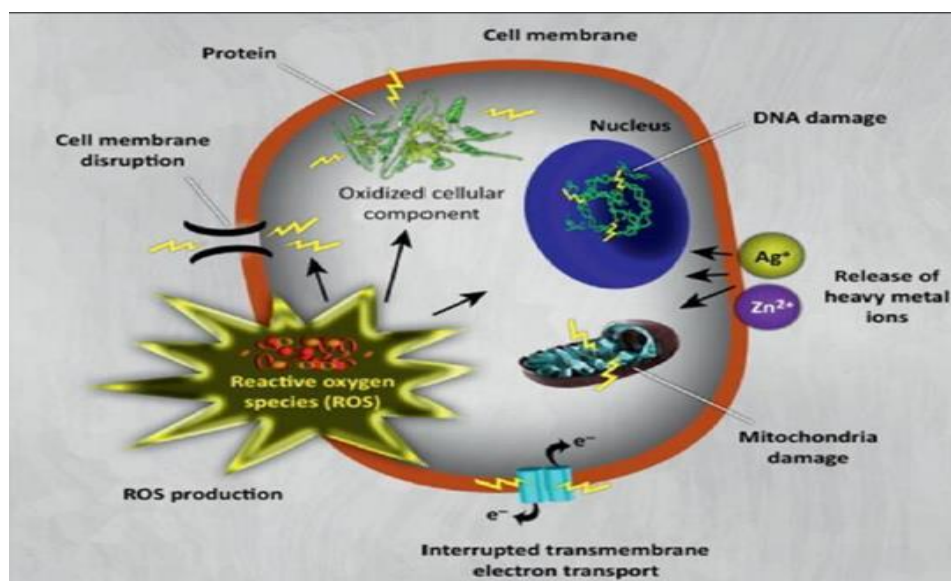


Figure 9 : Mécanismes d'action des nanoparticules (NP) contre les bactéries

3. Évaluation de l'activité antibactérienne des NPs de ZnO :

Il existe plusieurs méthodes pour évaluer l'activité antibactérienne des nanoparticules de ZnO, la méthode du disque et la méthode du puits étant les méthodes les plus courantes pour évaluer l'activité antibactérienne des nanoparticules de ZnO. La méthode des disques consiste à utiliser des disques imprégnés de nanoparticules de ZnO qui sont placés sur des plaques de culture bactérienne pour évaluer la zone d'inhibition de la croissance bactérienne [82]. La méthode des puits consiste à préparer une série de puits dans une plaque de culture bactérienne et à y ajouter différentes concentrations de nanoparticules de ZnO pour évaluer leur effet sur la croissance bactérienne. [83]

Une méthode courante consiste à mesurer la concentration minimale inhibitrice (CMI) des nanoparticules pour une souche bactérienne donnée [84]. Cette méthode consiste à préparer une dilution de nanoparticules et à les incuber avec des bactéries pour déterminer la plus faible concentration de nanoparticules nécessaire pour inhiber la croissance bactérienne.[85]

PARTIE II :

PRACTIQUE

CHAPITRE I :

MATERIEL ET

METHODE

Introduction :

Les nanoparticules d'oxydes métalliques, telles que l'oxyde de zinc, sont considérées comme des candidats prometteurs pour une nouvelle génération de composés actifs. Il est crucial pour la communauté scientifique de concevoir et développer de nouveaux agents antibactériens pour remplacer les antibiotiques conventionnels. Dans cette optique, la présente étude vise à évaluer l'activité antibactérienne des nanoparticules d'oxyde de zinc (ZnO) contre 04 souches bactériennes. Toutes les expériences ont été menées au niveau de l'incubateur d'entreprises de l'Université Martyr Hama Lakhdar et du laboratoire central de l'institution hospitalière Ben Omar Al-Djilani wilaya d'El Oued.

1. Matériel :

1.1. Matériel biologique :

1.1.1. Souches bactériennes :

Les souches bactériennes utilisées dans cette étude ont été fournies par le laboratoire d'analyses médicales d'El-Medjed wilaya d'El Oued. Les souches ont étéensemencées sur gélose nutritive et stockées à 4°C dans un réfrigérateur en vue de tests ultérieurs. Le tableau suivant présente le résultat de la coloration de Gram et du pouvoir pathogène de ces micro-organismes.

Tableau 1 : Pathogénicité des souches testées.

Souche	Gram	Pouvoir pathogène
Escherichia coli	Gram -	- Infections urinaires - Infections nosocomiales - diarrhées, cholécystites
Staphylococcus aureus	Gram +	- Infections cutanées - Infections ORL - Infections des plaies. - Infections urinaires

Pseudomonas aeruginosa	Gram -	-Infections nosocomiales. -Infections chez les immunodéprimés.
Klebsiella pneumoniae	Gram -	- Infections intestinales et urinaires - Infections nosocomiales - Infections respiratoires

1.2. Matériel chimique :

Les nanoparticules d'Oxyde de Zinc (NPs de ZnO) sont synthétisées par le technique plasma froid à partir de : l'acétate de Zinc.

2. Méthodes :

2.1. Synthèse de nanoparticules de ZnO par la méthode plasma froid :

Nous dissolvons 10 g d'acétate de zinc dans 500 ml d'eau distillée, puis le mettons sur un mélangeur magnétique jusqu'à ce qu'il devienne homogène entre eux pendant 15 minutes, puis 100 ml sont versés dans un réacteur thermique refroidi à l'eau à une distance d'environ 5 cm des extrémités des électrodes, tout en agitant magnétiquement la solution et en l'exposant au plasma pendant 60 minutes.

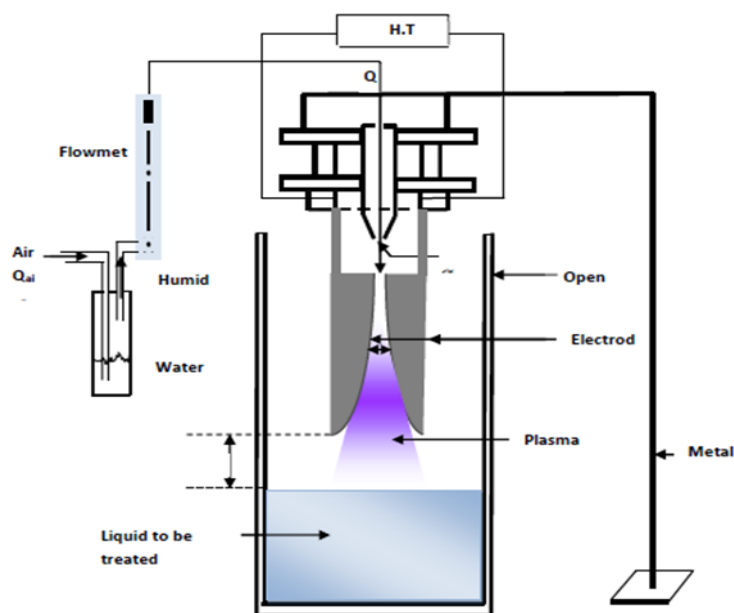


Figure 10: Schéma du Glid arc I- Cellule ouverte

Après avoir arrêté la décharge, la solution exposée est placée sur une plaque chauffante sous agitation pour être séchée. Lorsque le séchage est terminé, nous effectuons le processus de pelletage, nous obtenons ainsi une poudre qui est placée dans un four à 600 °C pendant 3 heures.



Figure 11 : Four

Ensuite, nous le sortons du four et le broyons bien, et c'est ainsi que nous obtenons des nanoparticules d'oxyde de zinc.

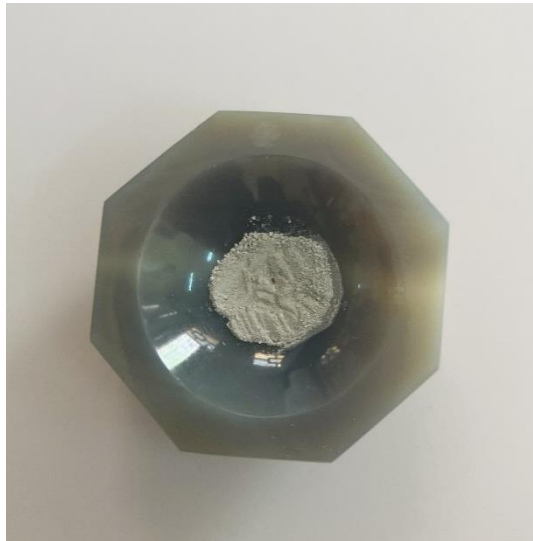


Figure 12 : La poudre de nanoparticules synthétisée

2.2. Préparation des souches bactériennes :

Inoculum de bactéries a été préparé pour chaque souche à partir du milieu de conservation en réalisant une culture sur bouillon nutritif et en l'incubant pendant 24 heures à 37°C. Après cette étape, les souches ont étéensemencées sur gélose nutritive en utilisant la méthode des stries, et ont été incubées pendant 24 heures à 37°C pour permettre la croissance de colonies isolées et la préparation des bactéries inoculées ultérieurement.

2.3. Activité antibactérienne :

1.3.1. Antibiogramme :

a. Principe : La méthode utilisée pour évaluer la sensibilité d'une souche bactérienne aux antibiotiques est la méthode de diffusion de disques d'antibiotiques sur gélose Muller Hinton (MH). Cette technique consiste à ensemencer une souche bactérienne standardisée sur une boîte de Pétri contenant de la gélose MH, un milieu standardisé pour la plupart des bactéries. Des disques contenant un ou plusieurs antibiotiques à une dose connue sont ensuite placés sur la surface de la gélose. La boîte de Pétri est ensuite incubée à 37°C pendant 24 heures [86].

b. Prélèvement des colonies bactériennes : à l'aide d'une pipette de pasteur à partir d'une culture fraîche de 24 heures et immergées dans de l'eau physiologique stérile. La charge bactérienne a été ajustée à environ 0,5 McFarland (environ 1×10^8 UFC/ml), ce qui correspond à une densité

optique de 0,08 à 0,10 mesurée à 625 nm. L'ensemencement a été effectué dans une zone stérile dans les 15 minutes suivant la préparation de l'inoculum.

c. Ensemencement : Le milieu Mueller-Hinton est préparé en le faisant fondre dans un bain-marie et en le maintenant à une température supérieure à sa température de fusion. Ensuite, le milieu fondu est versé dans des boîtes de Pétri stériles et laissé solidifier. Ensuite, un écouvillon stérile est plongé dans la suspension bactérienne et l'excès de liquide est éliminé en tournant doucement l'écouvillon contre les parois du tube. La surface entière de la boîte de Pétri est ensuite frottée trois fois en faisant tourner la boîte d'environ 60°C entre les stries pour assurer une distribution uniforme de la suspension bactérienne sur le milieu solide.

d. Application des disques d'antibiotique : Les disques d'antibiotiques sélectionnés ont été déposés sur la surface de la gélose Mueller-Hinton ensemencée à l'aide d'une pince stérile. Une légère pression a été appliquée avec une pince ou une aiguille stérile pour assurer un contact uniforme du disque avec la gélose. Les boîtes ont été retournées et incubées idéalement dans les 15 minutes suivant le dépôt des disques, sans dépasser 30 minutes, puis incubées pendant 16 à 24 heures à $35 \pm 2^\circ\text{C}$ en présence d'oxygène.

Une méthode courante pour évaluer l'efficacité des antibiotiques est de mesurer le diamètre d'inhibition (en mm) autour du disque déposé sur la gélose MH ensemencée. La taille de cette zone indique la sensibilité ou la résistance de la souche bactérienne à l'antibiotique utilisé. Les valeurs critiques des antibiotiques sont définies par le Comité de l'antibiogramme de la Société Française de Microbiologie (CASFM 2020). Les résultats sont interprétés selon le tableau ci-dessous pour classer les bactéries comme sensibles et/ou résistantes.

Tableau 2: Liste des antibiotiques utilisés et leur charge et les diamètres critiques.

Antibiotiques	Code	Charge des disques Ug	Diamètres critiques mm		
			R	I	S
Ciprofloxacine	CIP	05	≤ 15	16 - 20	≥ 21
Imipénème	IMP	10	≤ 19	20 - 22	≥ 23
Céfazoline	CZ	30	≤ 19	20 - 22	≥ 23
Amoxicilline	AMC	10	≤ 13	14 - 16	≥ 17

Céftazidime	CAZ	30	≤ 17	18 - 20	≥ 21
Sulfaméthoxazole	SXT	23.75	≤ 10	11 - 15	≥ 16
Vancomycine	VA	20	...	...	17
Rifampicine	RP	05	≤ 16	17 - 19	≥ 20
Amikacine	AK	30	≤ 14	15 - 16	≥ 17
Tobramycine	TOB	10	≤ 12	13 - 14	≥ 15

1.3.2. Activité antibactérienne des nanoparticules d'oxyde de zinc :

Méthode de diffusion sur puits a été utilisée pour évaluer l'effet antibactérien des nanoparticules de ZnO.

a. Principe : La technique de diffusion sur puits permet d'évaluer la capacité de diffusion radiale d'une solution à partir d'un puits, créant ainsi une zone claire d'inhibition facilement mesurable. Cette méthode consiste à utiliser des billes en verre stériles d'un diamètre de 6 mm pour créer des puits dans la gélose. Ensuite, 100 μ l de la solution de NPs sont ajoutés dans chaque puits et incubés à une température et une durée appropriées selon le micro-organisme utilisé.[87]

b. Mode opératoire (CASFM, 2020) :

- Pour préparer le milieu de culture, le Muller Hinton (MH) est liquéfié par ébullition puis maintenu à une température de 45°C jusqu'au moment de son utilisation.
- À partir d'une culture pure âgée de 18 à 24 heures sur un milieu d'isolement adapté, prélever quelques colonies bien isolées et identiques à l'aide d'une anse de platine préalablement flambée et refroidie.
- Transférer les colonies dans 2 ml d'eau physiologique stérile en déchargeant bien l'anse.

- Homogénéiser la suspension bactérienne en utilisant un vortex jusqu'à ce que son opacité atteigne l'équivalent de 0,5 McFarland ou une DO de 0,08 à 0,10 lue à 625 nm.



Figure 13 : Appareil de mesure de la turbidité.

c. Préparation des solutions de ZnO :

- Mesurer la quantité nécessaire de poudre de NPs de ZnO avec une balance, puis la diluer dans du Diméthylsulfoxyde DMSO pour obtenir des concentrations de 05, 10, 20 $\mu\text{g/ml}$ et DMSO seul. Ensuite, nous mettons la solution dans un bain à ultrasons pendant 30 minutes.



Figure 14 : Ultrasons.

- Sur des boîtes de Pétri contenant du milieu de Mueller-Hinton (MH) refroidi à une hauteur de 4 mm, placer des billes en verre stériles de 6 mm de diamètre pour former des puits.

- Retirer les billes à l'aide d'une pince stérile une fois que le MH est solidifié pour créer des puits d'une profondeur adéquate pour introduire les concentrations de NPs de ZnO et les témoins positifs et négatifs.
- Après ensemencement par écouvillonnage de la suspension bactérienne, ajouter 100 μ l de chaque concentration de NPs de ZnO dans les puits correspondants.
- Incuber les boîtes à 35 ± 2 °C pendant 24 heures.
- Toutes les expériences sont réalisées en triplicatas.

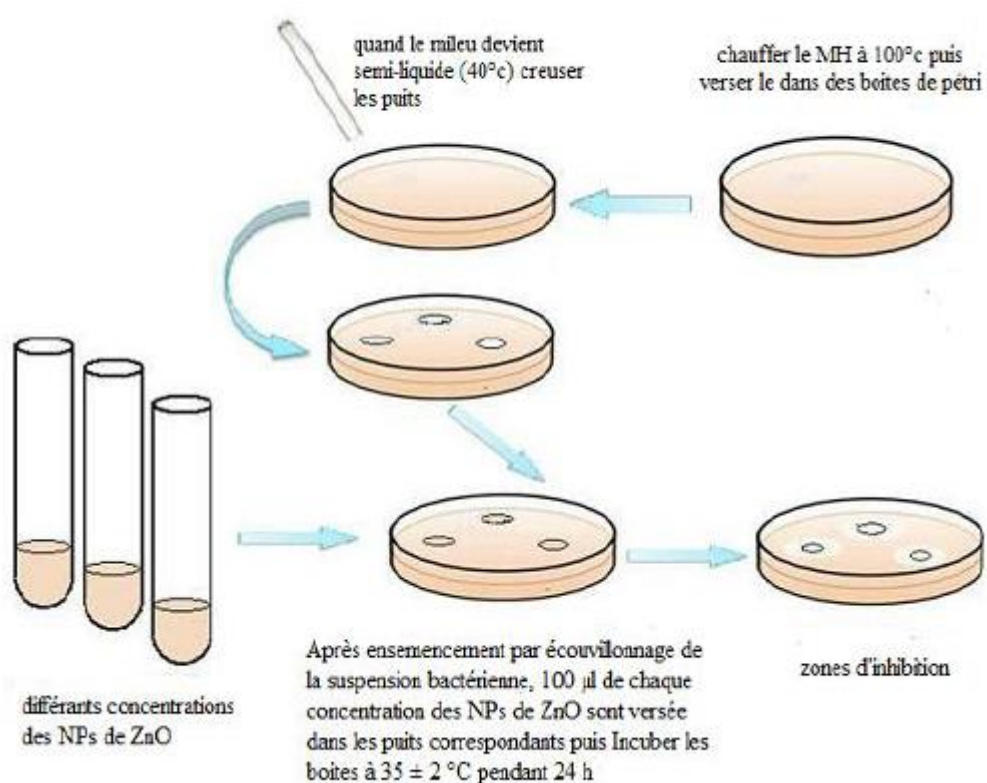


Figure 15 : Activité antibactérienne des nanoparticules (méthode des puits).

CHAPITRE II :

RESULTATS ET

DISCUSSION

1. Caractéristiques du ZnO synthétisé:

1.1. Étude UV-visible:

ZnO est un oxyde de transition avec une structure hexagonale et un écart de bande direct de 3,30 eV avec du matériau semi-conducteur de type n. Alors que les NPs ZnO ont un écart de bande direct de 3,25.0 eV à 3,37 eV. Plusieurs facteurs affectent les lacunes de bande de ZnO NPs, c'est-à-dire la cristallinité, la taille du grain, la dimension des particules, la forme des particulés et la dislocation. La figure 1 montre le spectre UV-Vis du réacteur ZnO synthétisé (GAD-II). Les spectres UV-vis montrent un fort pic d'absorption à 365 nm, attribué à la résonance plasmonique de surface de ZnO NPs [88] .

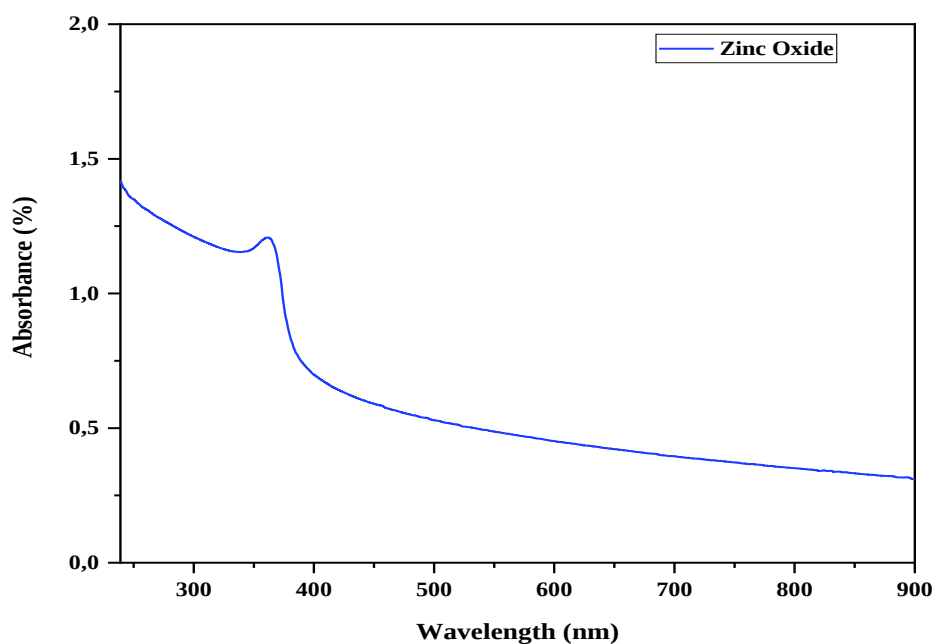


Figure 16 : Spectre d'absorption de ZnO NPs.

Ici, les nanoparticules synthétisées sont considérées comme un matériau ayant une énergie de bande passante directe. Pour la transition directe, l'énergie de l'écart de bande optique des nanoparticules a été déterminée en utilisant l'équation (1)[89]:

$$\text{Equation 1 : } (\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g)$$

où α , E_g , et $h\nu$ sont le coefficient d'absorption, l'écart de bande optique des nanoparticules et l'énergie photonique où A est une constante indépendante sur $h\nu$. Par conséquent, l'écart de

bande optique est obtenu en utilisant le complot de Tauc en plottant $(\alpha h\nu)^2$ versus $(h\nu)$, et en extrapolant la partie linéaire pour trouver l'interception avec l'axe d'énergie (Figure 2.a). La valeur calculée de l'écart de bande optique des NPs de ZnO synthétisés est de 3,30 eV, par rapport à l'intervalle de bande de 3,37 eV. Les résultats sont cohérents avec l'examen de la littérature selon laquelle l'écart de bande a changé en fonction de nombreux paramètres, par exemple, l'imperfection dans le cristal de ZnO, la forme de particule et la taille des particules.

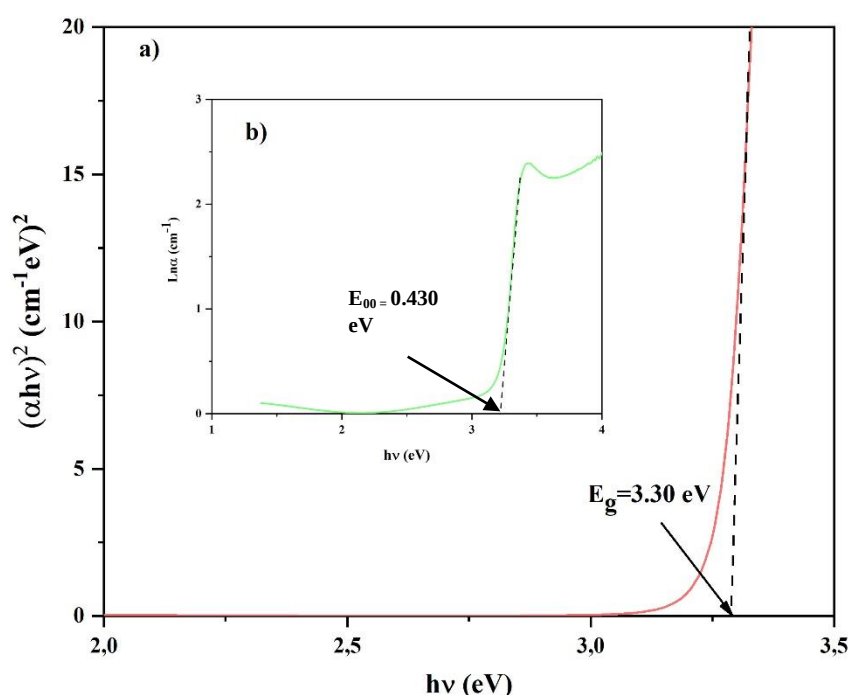


Figure 17 : (a) Plot de $(\alpha h\nu)^2$ versus énergie photonique de ZnO synthétisé. (b) Insert montre le plan énergétique Urbach de $\ln(\alpha)$ versus $(h\nu)$.

L'incorporation de l'impureté dans le semi-conducteur révèle souvent la formation de la queue de bande dans l'écart de bande. Les transitions optiques entre les états occupés dans la queue de la bande de valence à des états non occupés de l'extrémité de bande de conduction induisent une dépendance exponentielle du coefficient d'absorption α sur l'énergie photonique près de la limite de bande. L'énergie de la queue de bande ou énergie Urbach (E_{00}), qui caractérise les défauts locaux, suit l'équation 2 empirique de la loi Urbach [90]:

$$\text{Equation 2 : } \alpha = \alpha_0 \left(\frac{h\nu}{E_{00}} \right)^{1/4}$$

371/5 000 Caractères Translatent.

Où α_0 est une constante et E_{00} est interprété comme la largeur des queues des états localisés dans la région de l'écart. Pour évaluer les valeurs de α_0 et E_{00} , il faut tracer la variation du coefficient d'absorption α à l'échelle logarithmique en fonction de l'énergie photonique $h\nu$. La queue d'Urbach a été déterminée à partir de la pente de la variation de $\log(\alpha)$ avec l'énergie photonique incidente $h\nu$ [91]. E_{00} peut être estimé à partir de la pente inverse du plan linéaire de $\ln(\alpha)$ versus $h\nu$ tel que décrit dans l'insert de la figure 17 montre que l'énergie Urbach des NPs ZnO est 0,430 eV. Ce résultat peut s'expliquer par l'effet des perturbations structurelles et thermiques.

1.2. FTIR Analyse spectroscopique:

Afin d'identifier les groupes fonctionnels pour ZnO NPs, l'analyse FTIR est utilisée. Les spectres de la solution d'acétate de zinc traitée par plasma non thermique (GAD.II), avant et après l'annulation à 600 °C pendant 3 heures sont montrés à la Figure 18. Les nombres d'onde des pics qui sont apparus dans le FTIR et leurs origines fonctionnelles sont présentés dans le tableau 3. À la suite du traitement plasmatique de la solution d'acétate de zinc, les spectres FTIR avant le traitement de l'anélie ont révélé un certain nombre de bandes d'absorption (697, 954, 1037, 1045, 1386, 1451, et 1542 cm^{-1}) correspondant aux groupes fonctionnels des molécules organiques. [92]. Les bandes larges et fortes à 1451 et 1542 cm^{-1} sont attribuées à l'azote lié ($\text{O} = \text{N}$, et $\text{C} = \text{N}$) respectivement. Les bandes de 1037 et 1045 cm^{-1} peuvent être attribuées à la vibration asymétrique d'étirement ($\text{C}=\text{O}$) et de $\text{C}-\text{O}-\text{C}$, et à la ($\text{C}-\text{N}$) étirement de l'amine aromatique. Les bandes d'absorption à 426 et 565 cm^{-1} sont attribuées à la vibration d'étirement $\text{Zn}-\text{O}$ du type hexagonal de wurtzite ZnO crystal citation appartenant à la sublattice de l'oxygène ($\text{E}_{2\text{H}}$) vibration et les vacances d'oxygène de 1386 cm^{-1} est spécifié comme des défauts liés à l'hydrogène sur la surface de ZnO [93].

Tableau 3 : IR les niveaux et leurs attributions pour les NPs du système ZnO.

Assignments	Wavenumber (cm^{-1})	Wave Number (cm^{-1})
	Before Annealing	After Annealing
Zn-O Stretching	< 600	< 600
N-O Stretching	697	Absent
C-N	954	Absent

C=O	1037	Absent
C-O-C/C-N	1045	Absent
O-H	1386	Absent
O=N	1451	Absent
C=N	1542	Absent
O≡N	2010	2009
C≡N	2158	2156

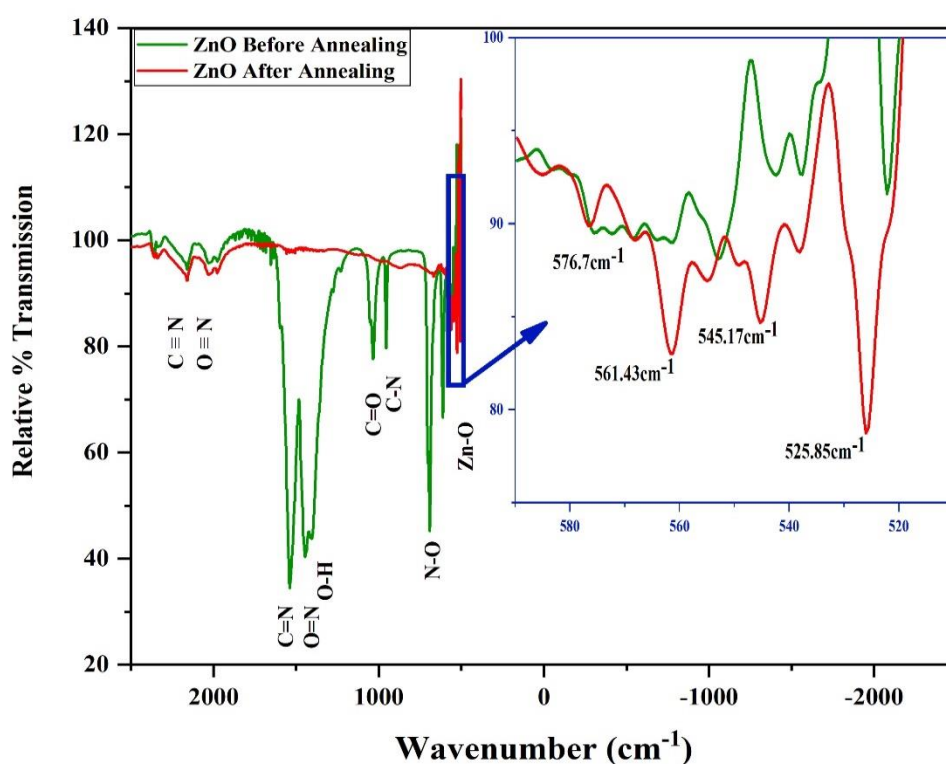


Figure 18: FTIR Spectre de ZnO NPs et inset montre le spectre agrandi dans la plage $< 600 \text{ cm}^{-1}$.

1.3. X-ray diffraction:

Le schéma XRD de l'échantillon préparé de NP ZnO apparaît à la figure 19. La phase monocristal ZnO est vérifiée par le schéma de diffraction. Le niveau d'orientation (101) peut être exactement indexé comme la structure hexagonale du cristal, et tous les pics de diffraction dans les motifs

(100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201), (004) et (202) indiquent que les nanoparticules sont polycristallines[94]. Ces valeurs sont bien en accord avec celles de la carte standard (numéro JCPDS: 01-089-0551).

La taille cristalline des NP ZnO est de 27,18 nm, a été calculée à l'aide de la formule de Scherrer [95] et énumérés dans le tableau 4. Pour la structure du Cristal hexagonal, $k = 0$, $91 \cdot \lambda$ est la longueur d'onde (1,54 Å), β est la pleine largeur à moitié maximum (FWHM), et θ est l'angle auquel (101) pic a été observé. En outre, nous pouvons observer l'écart de position de pointe par rapport aux données de référence de ZnO en vrac qui confirme la présence de contrainte dans les nanoparticules. L'estimation du stress a été effectuée à l'aide des formules suivantes:

$$\text{Equation 3 : } \sigma = \left[2C_{13} - \frac{C_{33}(C_{11}+C_{12})}{C_{13}} \right] \varepsilon$$

Où, est la souche, C_{13} (1,05 10¹¹ N/m²), C_{33} (2,1 10¹¹ N/m²), C_{11} (2,1 10¹¹ N/m²), et C_{12} (1,2 10¹¹ N/m²), sont les constantes de rigidité élastique, « c » est le paramètre de la grille obtenu à partir du plan (101) pour les NP ZnO, c_0 est le paramètre de la grille de la masse [96]. Les valeurs estimées de 2θ , FWHM, taille cristalline, paramètre de réseau, déformation, contrainte et dislocation sont données dans le tableau 4. Les valeurs négatives de la contrainte indiquent la présence de contrainte de compression [97]. Cette contrainte de compression se produit généralement s'il y a des défauts natifs et des distorsions dans le réseau.

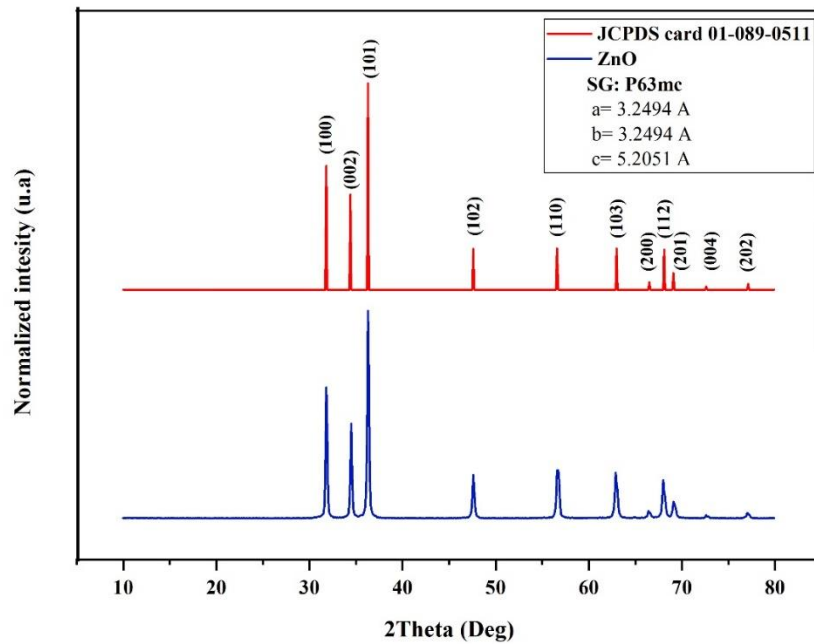


Figure 19 : X-ray diffraction pattern of ZnO NPs.

Tableau 4 : Estimation of structural parameters of ZnO NPs

nom de l'échantillon	2 θ (deg)	FWHM (deg)	D (nm)	Lattice parameter ($\text{\AA}$)		$\varepsilon \times 10^{-4}$	$\sigma(\text{GPa})$	$\xi \times 10^{14}$ (line/m ²)
ZnO pure	36.318	0.2952	27.18	a=b	C	1.921	-0.861	1.35
				3.2494	5.2051			

1.4. Scanning Electron Microscopy (SEM) + EDAX:

La formation, la forme et la taille des particules ainsi que l'étude topographique de l'échantillon préparé ont été effectuées à l'aide de (SEM).

La figure 5 montre des images de MEB à faible grossissement révélant la microstructure typique des NP ZnO principalement de tailles différentes et des grains agglomérés de forme régulière sont visibles et les particules semblent poreuses. La taille moyenne du grain visualisée par SEM est étroitement liée à la taille cristalline déduite du FWHM. Montre que la visualisation MEB ne permet de voir que les grains, qui sont constitués d'atomes et de cristaux plus ou moins désordonnés, tandis que dans la méthode XRD ce qui est mesuré est l'étendue de la région cristalline qui diffracte les rayons X de façon cohérente. Il s'agit d'un critère plus rigoureux qui réduit la taille des grains.

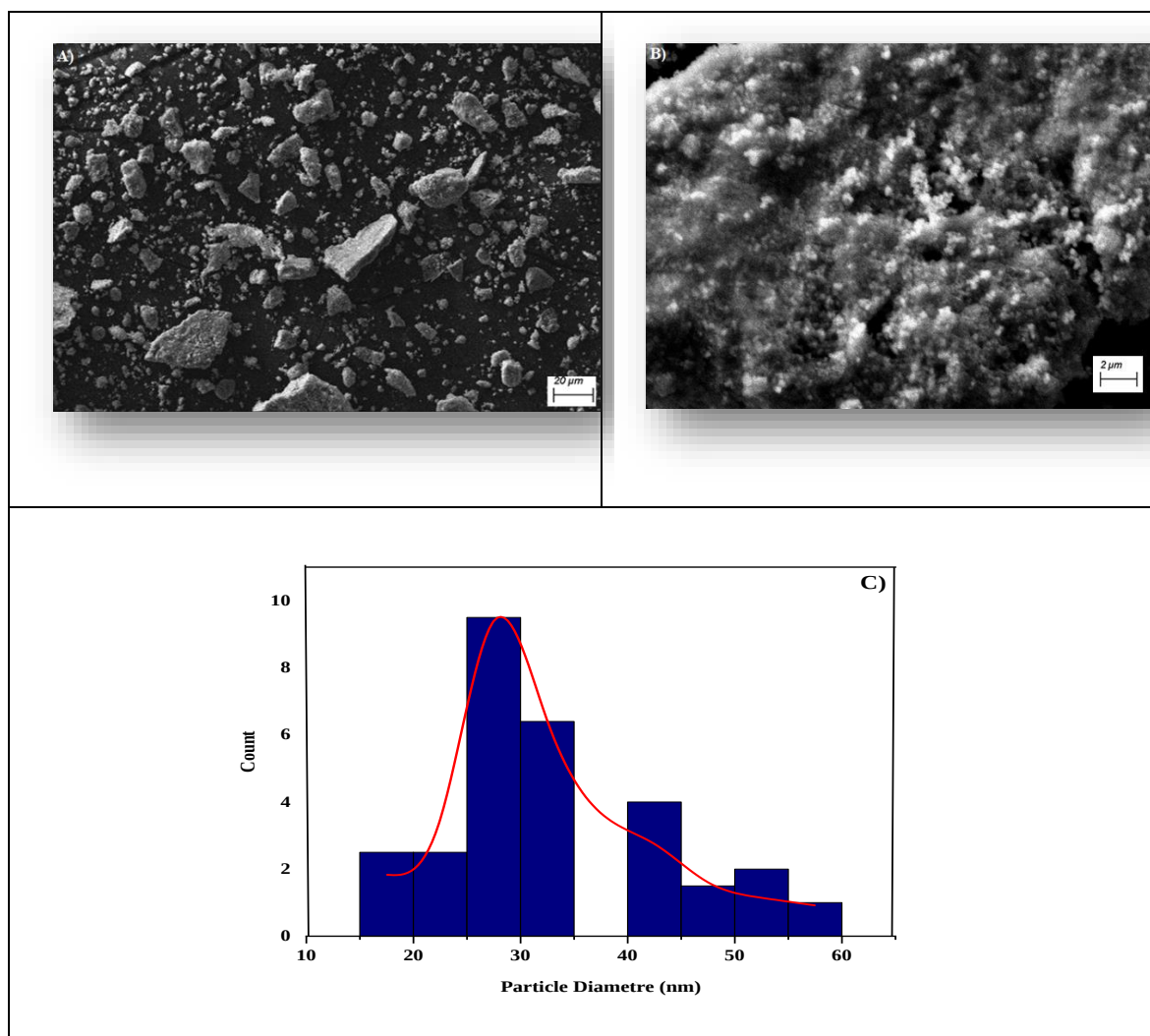


Figure 20 : SEM de image MEB du plasma NP ZnO synthétisé avec un grossissement de (A) 1,00 KX ; (B) 10,00 KX et leur distribution granulométrique correspondante (C).

La composition chimique et le pourcentage atomique des NP ont été déterminés par le spectre des rayons X de l'analyse de dispersion d'énergie. Montrez à la figure 5 les spectres EDAX obtenus pour l'échantillon de NP ZnO. Les éléments identifiés dans la nanoparticule de ZnO sont le zinc et l'oxygène. L'analyse EDAX révèle la présence d'autres pics d'azote par réaction plasmatique. Ne pas tenir compte du pic de carbone présent dans l'air, qui est visible dans l'insert de la figure 20.

Tableau 5 : Pourcentages atomiques obtenus par EDAX des éléments présents dans les NPs d'oxyde de zinc.

Elément	O (%atomique)	Zn (%atomique)	N (%atomique)	C (%atomique)
Echantillon	26	65	4	5

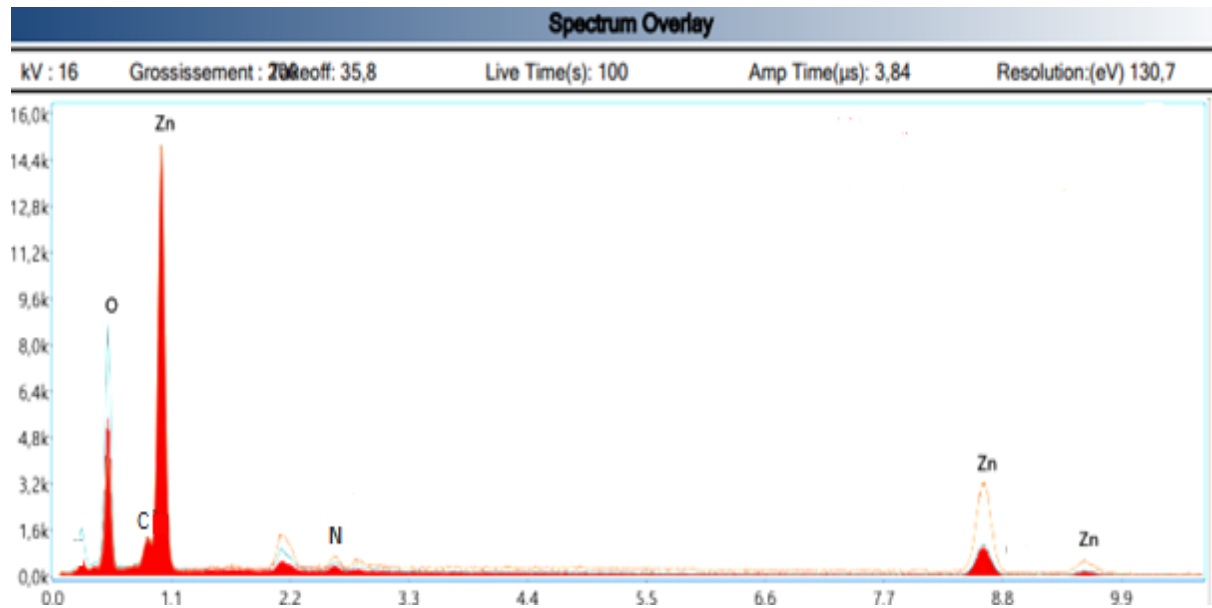


Figure 21 : Spectres EDAX typiques pour les NP ZnO synthétisés par plasma

2. Résultats de l'Activité antibactérienne des antibiogrammes:

2.1. Contre l'E. Coli :

Après une incubation de 24 heures de la bactérie E. Coli en présence d'antibiotiques spécifiques sélectionnés en fonction des souches, des zones d'inhibition clairement définies de l'effet de ces antibiotiques ont été observées.

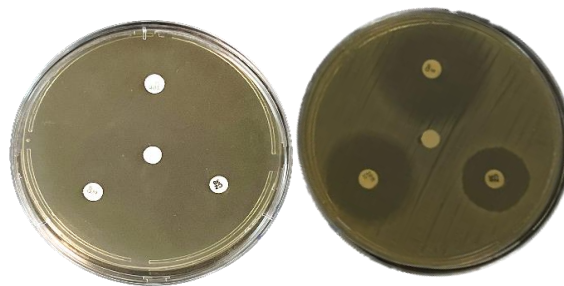


Figure 22: Souche d'E. Coli avant et après incubation avec des antibiotiques.

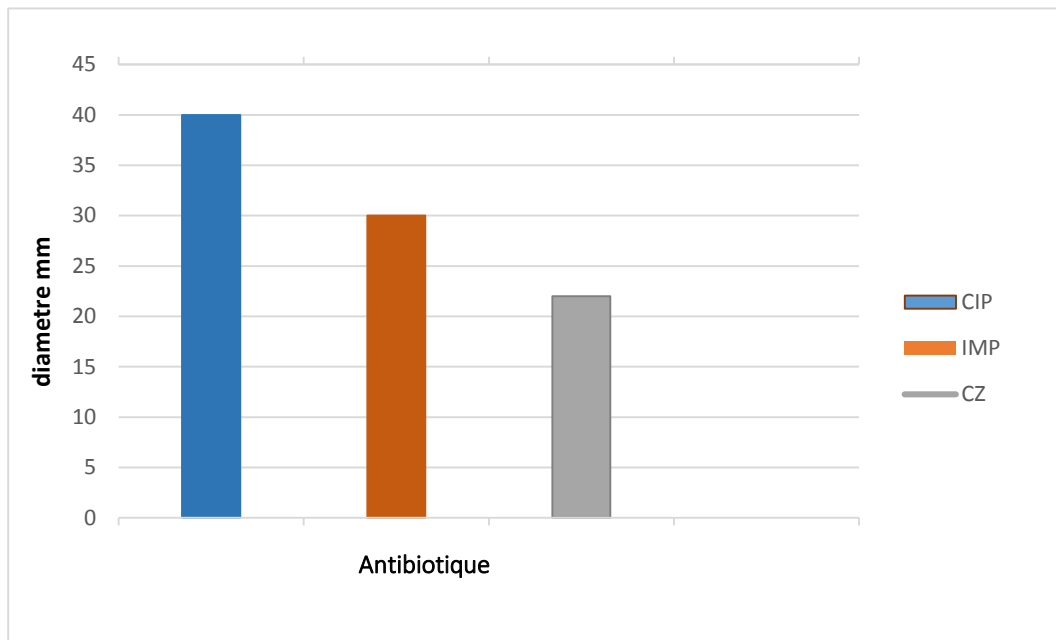


Figure 23 : Résultat de l'activité antibactérienne des antibiotiques contre d'E. Coli

D'après l'affichage graphique ci-dessous, on remarque que l'action des antibiotiques sur la bactérie E. Coli est une action positive qui diffère en termes de résistance, comme on voit que CIP et IMP ont une sensibilité élevée, les diamètres des cercles vont de 30- 40, et quant à CZ, il a une résistance moyenne, et le diamètre de son inhibition est estimé à 22 mm.

2.2. Contre le S. aureus :

Suite à une incubation de 24 heures de la souche bactérienne S. aureus avec des antibiotiques sélectionnés spécifiquement en fonction de la souche, des zones d'inhibition clairement définies de l'effet de ces antibiotiques ont été observées.

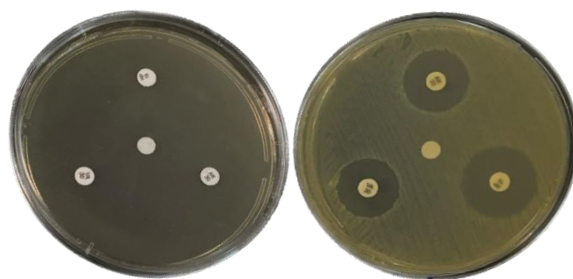


Figure 24 : Souche de S. aureus avant et après incubation avec des antibiotiques.

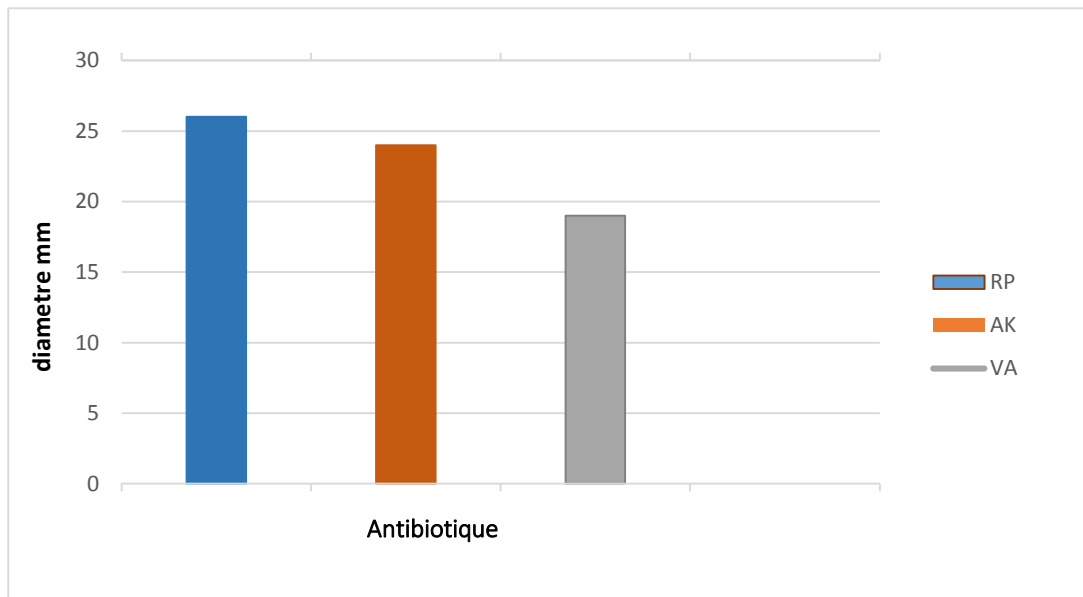


Figure 25 : Résultat de l'activité antibactérienne des antibiotiques contre le *S. aureus*.

Nos résultats montrent que tous les antibiotiques ont une efficacité et une sensibilité positives contre *S. aureus*.

2.3. Contre le *P. aeruginosa* :

Après une incubation de 24 heures de la souche de *P. aeruginosa* avec des antibiotiques spécifiquement sélectionnés pour cette souche, nous avons observé des zones d'inhibition nettement définies de l'effet de ces antibiotiques.

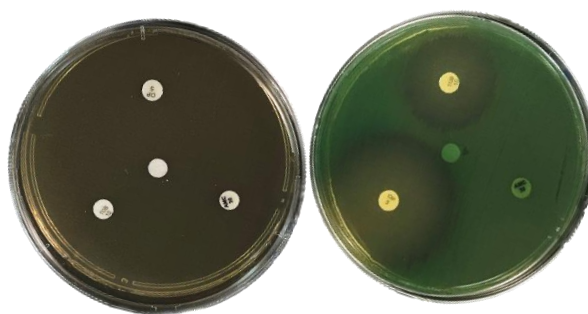


Figure 26 : Souche de *P. aeruginosa* avant et après incubation avec des antibiotiques

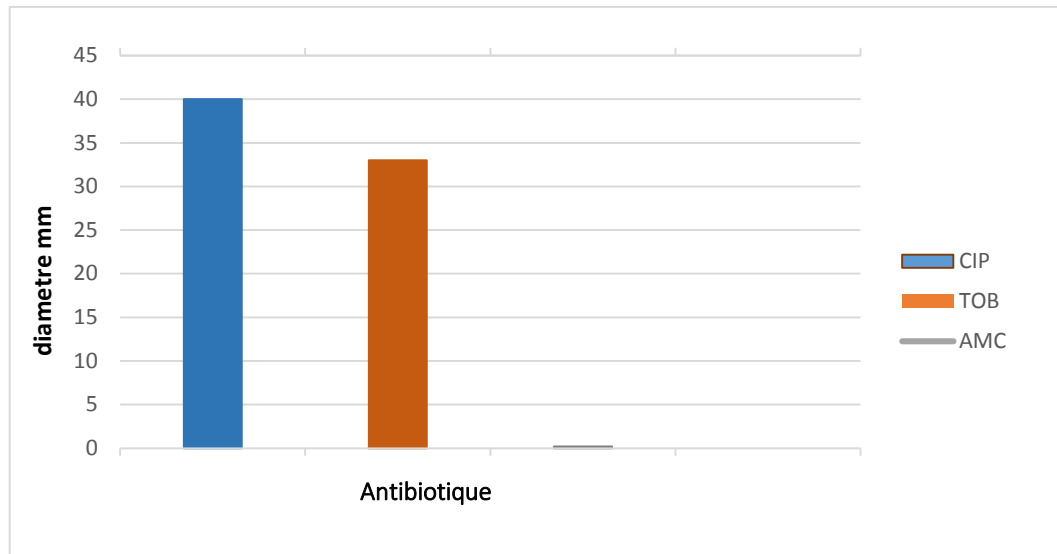


Figure 27 : Résultat de l'activité antibactérienne des antibiotiques contre le *P. aeruginosa*

Les résultats montrent une sensibilité élevée à l'antibiotique CIP avec un diamètre d'inhibition de 40 mm et à l'antibiotique TOB avec un diamètre de 33 mm avec des bactéries *Pseudomonas*, mais l'AMC est résistante et n'a pas d'activité.

2.4. Contre le *K. pneumoniae* :

Suite à une période d'incubation de 24 heures de la souche de *K. pneumoniae* en présence d'antibiotiques spécifiquement sélectionnés pour cette souche, nous avons pu observer des zones d'inhibition clairement définies, révélant l'effet des antibiotiques sur la croissance bactérienne.

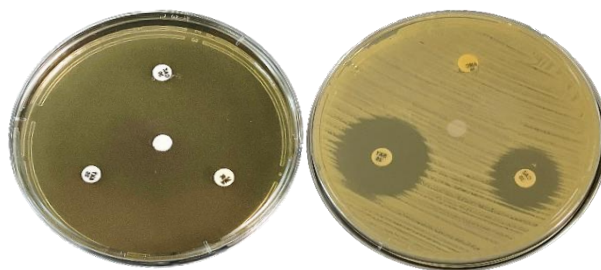


Figure 28 : Souche de *K. pneumoniae* avant et après incubation avec des antibiotiques

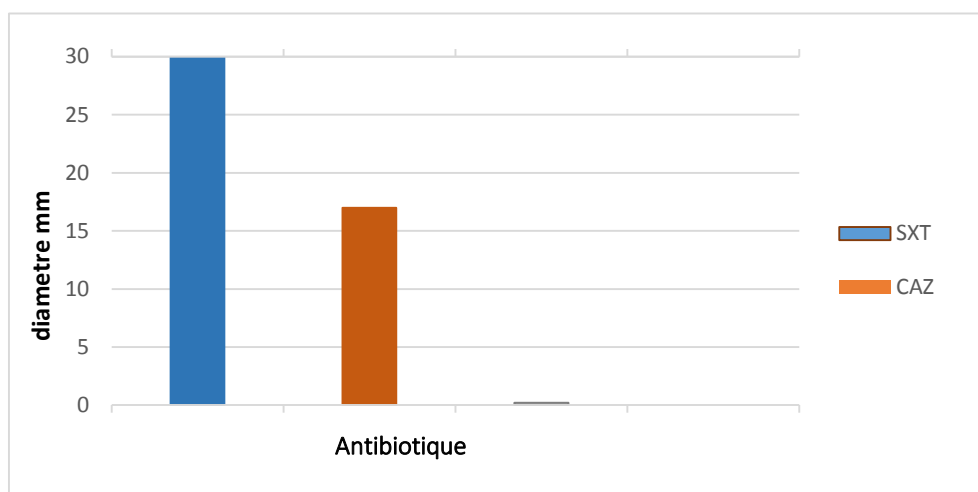


Figure 29 : Résultat de l'activité antibactérienne des antibiotiques contre le *K. pneumoniae*

Les résultats sur le graphique montrent qu'ils sont similaires à la sensibilité aux antibiotiques de *Pseudomonas*, on constate qu'il existe une sensibilité efficace avec SXT et CAZ avec un diamètre de 20 à 31 avec *Klebsiella*, En revanche, l'antibiotique AMC s'est révélé inefficace contre ces bactéries. La mesure du diamètre de ces zones est représentée par le tableau .Selon les recommandations du comité de l'antibiogramme de la société française de microbiologie (CA-SFM), on a pu classer les bactéries dans l'une de ces catégories suivantes : Sensible- Résistante – Intermédiaire [86].

Tableau 6 : Résultats de l'antibiogramme contre les différentes bactéries.

Souches	Antibiotique	Diamètre (mm)	Classe clinique
E. Coli	CIP	38	S
	IMP	30	S
	CZ	22	I
S. aureus	RP	26	S
	AK	24	S
	VA	19	S
P. aeruginosa	CIP	40	S
	TOB	33	S
	AMC	00	R
K. pneumoniae	STX	31	S
	CAZ	17	R
	AMC	00	R

3. Résultats de l'activité antibactérienne des nanoparticules :

3.1. L'activité antibactérienne des nanoparticules contre l'E. Coli :

Après une incubation de 24 heures avec des nanoparticules d'oxyde de zinc, qui ont été ajoutées pour explorer une alternative dans la lutte contre la résistance bactérienne aux antibiotiques, des observations ont été faites sur les souches bactériennes



Figure 30 : Souche d'E. Coli avec NPs de ZnO.

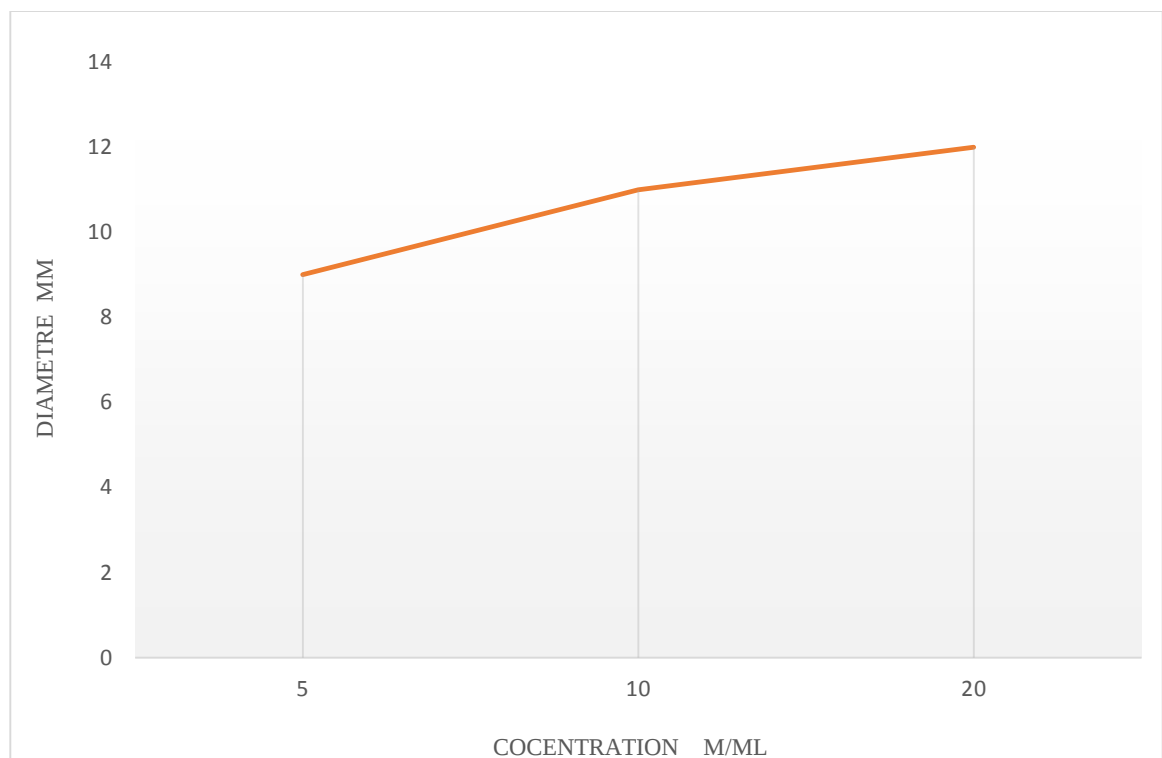


Figure 31 : L'activité antibactérienne des nanoparticules avec E. Coli

Nous avons observé une faible inhibition de la croissance bactérienne d'*Escherichia coli* en présence de différentes concentrations de nanoparticules d'oxyde de zinc. Cette observation est

représentée dans le graphique où on peut voir une augmentation progressive du diamètre d'inhibition. À la plus faible concentration, le diamètre était relativement petit, tandis qu'à la deuxième concentration, il était de 11 mm et à la concentration la plus élevée de 20 mg/ml, le diamètre d'inhibition était de 12 mm.

3.2. L'activité antibactérienne des nanoparticules contre *S. aureus* :

Après une incubation de 24 heures de la souche bactérienne de *S. aureus* avec des nanoparticules d'oxyde de zinc ajoutées dans le but d'explorer une alternative dans la lutte contre la résistance bactérienne aux antibiotiques, des observations ont été effectuées.



Figure 32 : Souche de *S. aureus* avec NPs de ZnO.

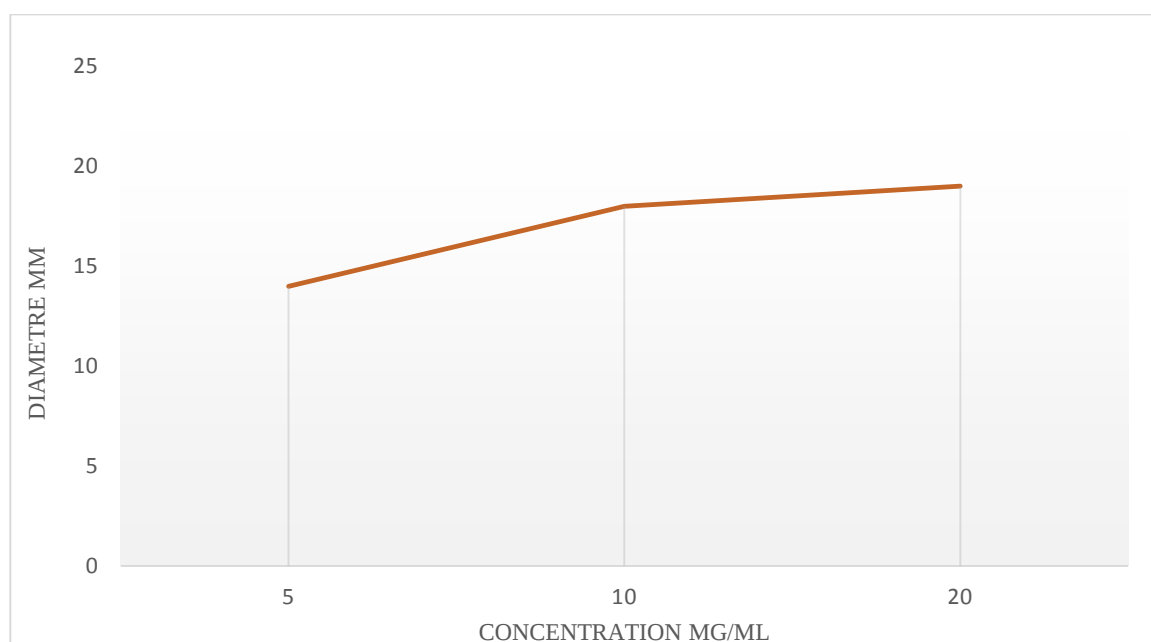


Figure 33 : L'activité antibactérienne des nanoparticules avec *S. aureus*.

D'après les données présentées dans le tableau et le graphique, nous observons une augmentation significative du diamètre d'inhibition de la croissance de *Staphylococcus aureus* en présence de nanoparticules d'oxyde de zinc, qui agissent comme des agents antibactériens. Nous constatons

que le diamètre d'inhibition a augmenté de manière dose-dépendante, passant de 14 mm à une concentration de 5 mg/ml à 19 mm à la concentration la plus élevée

3.3. L'activité antibactérienne des nanoparticules contre *P. aeruginosa* :

Après avoir ajouté des nanoparticules d'oxyde de zinc à la souche bactérienne de *P. aeruginosa* pour explorer une alternative dans la lutte contre la résistance bactérienne aux antibiotiques, une incubation de 24 heures a été réalisée et des observations ont été effectuées.



Figure 34 : Souche de *P. aeruginosa* avec NPs de ZnO.

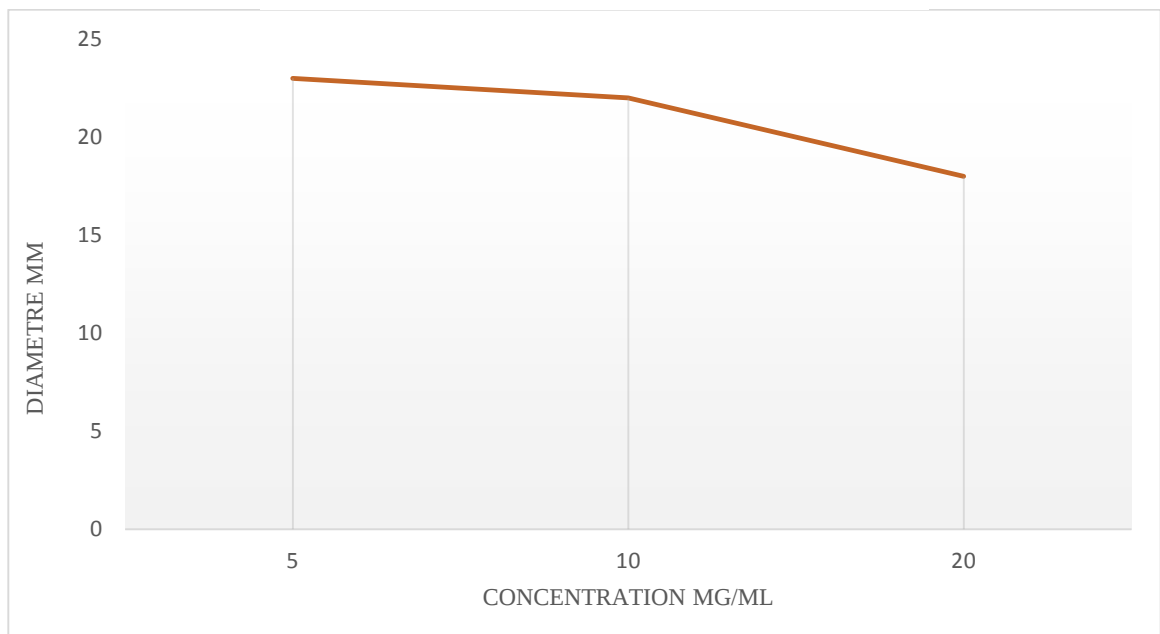


Figure 35 : L'activité antibactérienne des nanoparticules avec *P. aeruginosa*.

Les résultats obtenus ont montré une diminution du diamètre de la zone d'inhibition de *P. aeruginosa* en présence de nanoparticules d'oxyde de zinc, une alopecie à la concentration la plus élevée où le diamètre était de 18 mm. En revanche, la zone d'inhibition était la plus grande à la

concentration la plus faible avec un diamètre de 23 mm. De plus, à une concentration moyenne de 10 mg/ml, le diamètre de l'inhibition était de 22 mm.

3.4. L'activité antibactérienne des nanoparticules avec *K. pneumoniae* :

Après avoir incubé la souche bactérienne de *K. pneumoniae* pendant 24 heures en présence de nanoparticules d'oxyde de zinc, qui ont été ajoutées dans le but d'explorer une alternative à l'utilisation d'antibiotiques dans la lutte contre la résistance bactérienne, des observations ont été effectuées.



Figure 36 : Souche de *K. pneumoniae* avec NPs de ZnO.

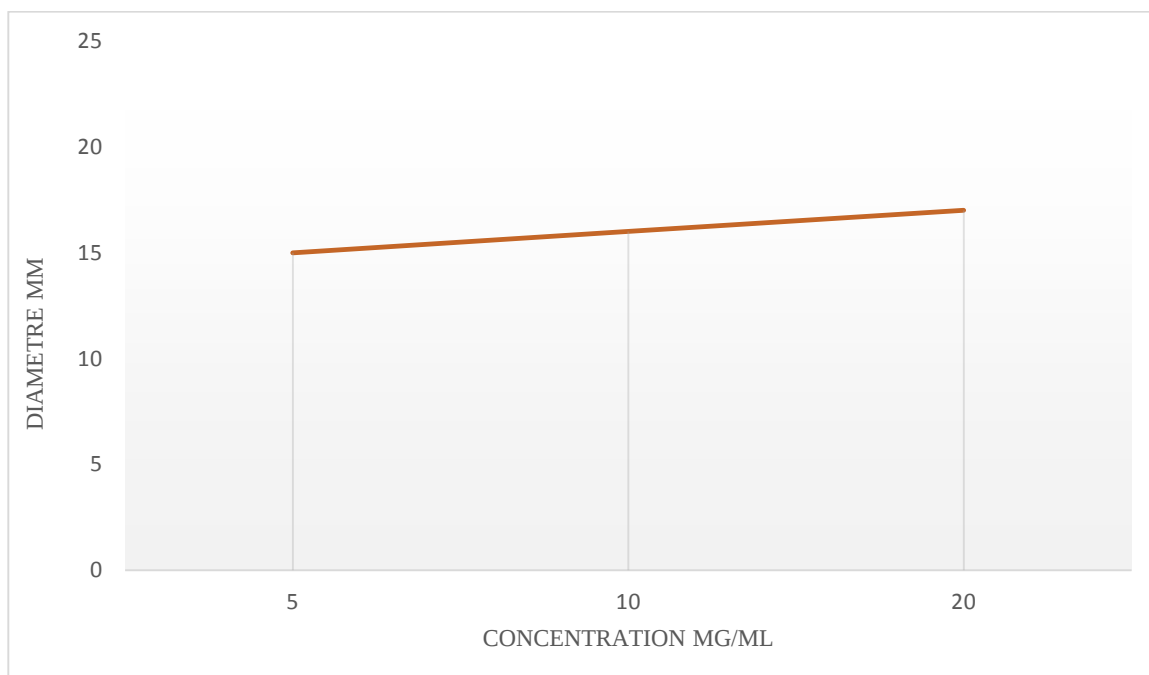


Figure 37 : L'activité antibactérienne des nanoparticules avec *K. pneumoniae*

La courbe représentant les diamètres d'inhibition de *Klebsiella pneumoniae* en fonction de la concentration de nanoparticules d'oxyde de zinc, utilisées comme alternative aux antibiotiques, montre une augmentation progressive. À la concentration la plus faible, le diamètre d'inhibition était de 15 mm, tandis qu'à la concentration intermédiaire, il atteignait 16 mm. À la concentration la plus élevée de 20 mg/ml, le diamètre d'inhibition était de 17 mm. Cette tendance à l'augmentation des diamètres d'inhibition en fonction de la concentration des nanoparticules d'oxyde de zinc suggère une efficacité croissante contre *Klebsiella pneumoniae*.

Tableau 7 : Résultats d'antibactérienne des nanoparticules.

Effet d'inhibition Souches	Diamètre d'inhibition en mm		
	05 mg/ml	10 mg/ml	20 mg/ml
E. Coli	9	11	12
S. aureus	14	18	19
P. aeruginosa	23	22	18
K. pneumoniae	15	16	17

Discussion :

L'utilisation de nanoparticules d'oxyde de zinc comme agent antimicrobien est une approche prometteuse pour lutter contre la résistance aux antibiotiques. Dans cette étude, nous avons évalué l'efficacité de trois concentrations différentes de nanoparticules d'oxyde de zinc sur quatre souches bactériennes communes, à savoir *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* et *Klebsiella pneumoniae*. Nous avons comparé ces résultats avec l'utilisation d'antibiotiques à disque.

Les résultats de cette étude ont montré que les nanoparticules d'oxyde de zinc avaient une activité antimicrobienne contre toutes les souches bactériennes testées. Les diamètres d'inhibition pour différentes concentrations de nanoparticules d'oxyde de zinc ont augmenté proportionnellement à la concentration, indiquant une relation dose-réponse, c'est ce que nous avons observé à travers le tableau et les graphiques. Où nous en avons été sur 03 bactéries, à savoir, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* et *Klebsiella*, à l'exception de *Pseudomonas*, qui a prouvé le contraire.

Lors de notre expérience, nous avons remarqué que les courbes augmentaient lorsque 3 types de bactéries s'exposaient à différentes concentrations de nanoparticules d'oxyde de zinc par exemple :

Chez *Staphylococcus*, nous avons observé une augmentation progressive du diamètre de l'inhibition de croissance des bactéries avec l'augmentation de la concentration en nanoparticules d'oxyde de zinc. À la concentration la plus faible de 05 mg/ml, le diamètre était de 14 mm, tandis qu'à la concentration la plus élevée de 20 mg/ml, le diamètre était de 19 mm.

Chez *Escherichia coli*, nous avons observé une sensibilité plus faible et des diamètres plus petits, mais une augmentation similaire du diamètre d'inhibition avec l'augmentation de la concentration de nanoparticules d'oxyde de zinc.

Cependant, chez *Klebsiella*, la courbe de croissance était linéairement croissante, ce qui signifie que l'efficacité des nanoparticules d'oxyde de zinc était directement proportionnelle à leur concentration.

Contrairement aux autres bactéries, *Pseudomonas* a montré une sensibilité inversement proportionnelle à la concentration de nanoparticules d'oxyde de zinc. En effet, nous avons constaté que le diamètre d'inhibition de croissance était plus grand à la plus faible concentration (23 mm) qu'à la concentration moyenne de 10 mg/ml (22mm), et la plus grande concentration a entraîné un diamètre de 18 mm.

Les disques antibiotiques ont également montré des résultats efficaces, car certaines souches bactériennes présentaient une résistance partielle ou complète aux antibiotiques testés. Cependant, la plupart d'entre eux ont montré des résultats efficaces et leur sensibilité aux bactéries a été confirmée en mesurant les diamètres de l'inhibition. D'autre part, il existe deux types d'antibiotiques, AMC et CAZ, qui n'ont montré aucune inhibition ou efficacité car ces bactéries étaient en état de résistance, et les expériences ont montré un antibiotique CZ, dont l'inhibition était intermédiaire avec un diamètre confiné entre 20-22 mm.

En comparant les deux expériences, nous avons constaté que l'activité antibactérienne des nanoparticules d'oxyde de zinc était similaire à celle des antibiotiques en comprimés, avec des résultats efficaces et une sensibilité prouvée des bactéries testées. Cependant, certains antibiotiques n'ont pas montré d'efficacité, tels que l'antibiotique CIP. De plus, les nanoparticules d'oxyde de zinc, avec leurs différentes concentrations, ont montré une activité variable sur la souche bactérienne *Escherichia coli*, caractérisée par un petit diamètre et une sensibilité limitée.

En fin, ces résultats suggèrent que les nanoparticules d'oxyde de zinc pourraient être une alternative efficace aux antibiotiques traditionnels dans le traitement des infections bactériennes. Des études supplémentaires devront être menées pour déterminer leur efficacité et leur sécurité avant une utilisation clinique généralisée. Il est également important de prendre en compte l'impact environnemental potentiel des nanoparticules d'oxyde de zinc et de poursuivre les recherches dans ce domaine.

Conclusion :

La recherche de solutions alternatives à l'utilisation d'antibiotiques pour lutter contre la résistance bactérienne est devenue une priorité pour de nombreux scientifiques. Les nanoparticules d'oxydes métalliques, notamment l'oxyde de zinc ZnO, ont suscité un grand intérêt dans la recherche de nouvelles molécules antimicrobiennes en raison de leur forte activité contre un large spectre de microorganismes. Les mécanismes d'action des nanoparticules de ZnO sont multiples et incluent la libération d'ions, la génération d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) et l'adhésion électrostatique aux bactéries, conduisant à la mort cellulaire.

Les nanotechnologies ont ouvert de nouvelles perspectives pour la médecine en offrant des possibilités innovantes pour la thérapie et le diagnostic. Cependant, l'utilisation de nanoparticules à des fins médicales soulève des questions éthiques, notamment en termes d'interface entre les nanotechnologies, la médecine et l'information. Il est donc important de considérer les implications éthiques de ces développements dans le domaine médical.

En fin de compte, la recherche continue sur les nanoparticules et leur application dans le domaine médical pourrait offrir de nouvelles perspectives pour la lutte contre la résistance bactérienne, ainsi que des opportunités pour améliorer les traitements médicaux existants. Toutefois, il est essentiel de poursuivre les recherches pour mieux comprendre les implications éthiques et de sécurité liées à l'utilisation de ces technologies dans le domaine médical.

Bibliographiques :

1. Walsh, C., Antibiotics: actions, origins, resistance. 2003: American Society for Microbiology (ASM).
2. Lanone, S. and J. Boczkowski, Les sources de nanoparticules. Revue française d'allergologie, 2010. **50**(3): p. 211-213.
3. Courtois, B., D. Bémer, and S. Binet, Les nanoparticules: Un enjeu majeur pour la santé au travail? 2020: EDP Sciences.
4. Wollny, P., et al., The role of phase transition by nucleation, condensation, and evaporation for the synthesis of silicon nanoparticles in a microwave plasma reactor—Simulation and experiment. Chemical Engineering Journal, 2023. **453**: p. 139695.
5. Abbasi, B.H., S. Anjum, and C. Hano, Differential effects of in vitro cultures of *Linum usitatissimum* L.(Flax) on biosynthesis, stability, antibacterial and antileishmanial activities of zinc oxide nanoparticles: A mechanistic approach. RSC advances, 2017. **7**(26): p. 15931-15943.
6. Longo, J.P.F., et al., Nanotechnology for cosmetics applications—a journey in innovation, in Quantum Materials, Devices, and Applications. 2023, Elsevier. p. 263-278.
7. Bayda, S., et al., The history of nanoscience and nanotechnology: from chemical–physical applications to nanomedicine. Molecules, 2019. **25**(1): p. 112.
8. Plévert, L. and C. Joachim, Nanosciences. La révolution invisible: La révolution invisible. 2009: Média Diffusion.
9. Auffan, M., et al., Towards a definition of inorganic nanoparticles from an environmental, health and safety perspective. Nature nanotechnology, 2009. **4**(10): p. 634-641.
10. Goutayer, M., Nano-émulsions pour la vectorisation d'agents thérapeutiques ou diagnostiques: étude de la biodistribution par imagerie de fluorescence in vivo. 2008, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
11. Shenhar, R. and V.M. Rotello, Nanoparticles: scaffolds and building blocks. Accounts of chemical research, 2003. **36**(7): p. 549-561.
12. Belloni, J., et al., Synthesis, chemistry and some applications of metal nanoparticles. New J. Chem, 1998. **22**: p. 1239-1255.
13. Nguyen, D.T., D.-J. Kim, and K.-S. Kim, Controlled synthesis and biomolecular probe application of gold nanoparticles. Micron, 2011. **42**(3): p. 207-227.

14. Jadoun, S., et al., Green synthesis of nanoparticles using plant extracts: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 2021. **19**: p. 355-374.
15. Chouikrat, R., Nanoparticules multifonctionnelles excitables par les rayons X pour la thérapie photodynamique. *Laboratoire Reactions et Genie des Procédés*, 2015.
16. Rousseaux, S., et al., Régulateurs de l'épigénome mâle: marqueurs et cibles potentielles de thérapie anti-cancéreuse. *Bulletin du Cancer*, 2019. **106**(10): p. 836-838.
17. Martin, P.M., Évaluation de l'impact de pansements biologiques humains produits par génie tissulaire sur la guérison de plaies cutanées murines. 2015, Université Laval.
18. Zhang, J., et al., Bimetallic nickel cobalt sulfide as efficient electrocatalyst for Zn-air battery and water splitting. *Nano-micro letters*, 2019. **11**: p. 1-13.
19. Nabhani, K.A., F. Khan, and M. Yang, Technologically enhanced naturally occurring radioactive materials in oil and gas production: a silent killer. *Process Safety and Environmental Protection*, 2016. **99**: p. 237-247.
20. Kumar, R., et al., Zinc oxide nanostructures for NO₂ gas-sensor applications: A review. *Nano-Micro Letters*, 2015. **7**: p. 97-120.
21. Naveed Ul Haq, A., et al., Synthesis approaches of zinc oxide nanoparticles: the dilemma of ecotoxicity. *Journal of Nanomaterials*, 2017. **2017**.
22. Rajeshkumar, S. and L. Bharath, Mechanism of plant-mediated synthesis of silver nanoparticles—a review on biomolecules involved, characterisation and antibacterial activity. *Chemico-biological interactions*, 2017. **273**: p. 219-227.
23. Darroudi, M., et al., Sol-gel synthesis, characterization, and neurotoxicity effect of zinc oxide nanoparticles using gum tragacanth. *Ceramics International*, 2013. **39**(8): p. 9195-9199.
24. Gallant, D., et al., Dégradation in vitro de l'amidon par le suc pancréatique. Etude par microscopie électronique à transmission et à balayage. *Starch-Stärke*, 1973. **25**(2): p. 56-64.
25. Serna, F., J. Lagneau, and J.-M. Carpentier, La diffraction des rayons X: une technique puissante pour résoudre certains problèmes industriels et technologiques. *Chim. Nouv*, 2014: p. 1-12.
26. Gandubert, A., et al., X-ray photoelectron spectroscopy surface quantification of sulfided CoMoP catalysts—relation between activity and promoted sites—part I: influence of the Co/Mo ratio. *Oil & Gas Science and Technology-Revue de l'IFP*, 2007. **62**(1): p. 79-89.

27. Colombari, P., Analyse sans contact des céramiques anciennes par diffusion Raman. *Actualité Chimique*, 2003(2): p. 12-17.
28. Binder, D., et al., Identification de brai de bouleau (*Betula*) dans le Néolithique de Giribaldi (Nice, France) par la spectrométrie de masse. *ArchéoSciences, revue d'Archéométrie*, 1990. **14**(1): p. 37-42.
29. Brouiri, T., Élaboration et étude des propriétés électriques des couches minces et des nanofils de ZnO. 2011, Université Paris-Est.
30. Concepción, M.O.A.M., et al., PHOTOCATALYTIC AND PHOTOELECTROCATALYTIC ACTIVITY OF MIXED SEMICONDUCTOR/NANOPOROUS CARBON MATERIALS: APPLICATION TO THE DEGRADATION OF ENVIRONMENTAL POLLUTANTS.
31. Saman, N.M., M.H. Ahmad, and Z. Buntat, Application of cold plasma in nanofillers surface modification for enhancement of insulation characteristics of polymer nanocomposites: a review. *IEEE Access*, 2021. **9**: p. 80906-80930.
32. Lin, K., et al., Decomposition of aqueous solutions of phenol using high energy electron beam irradiation—a large scale study. *Applied radiation and isotopes*, 1995. **46**(12): p. 1307-1316.
33. Fridman, A., Plasma chemistry. 2008: Cambridge university press.
34. Fridman, A. and L.A. Kennedy, Plasma physics and engineering. 2021: CRC press.
35. Adamovich, I., et al., The 2017 Plasma Roadmap: Low temperature plasma science and technology. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017. **50**(32): p. 323001.
36. Abedi, K., et al., Decomposition of chlorinated volatile organic compounds (CVOCs) using NTP coupled with TiO₂/GAC, ZnO/GAC, and TiO₂-ZnO/GAC in a plasma-assisted catalysis system. *Journal of Electrostatics*, 2015. **73**: p. 80-88.
37. Lojkowski, W., et al., Solvothermal synthesis of nanocrystalline zinc oxide doped with Mn²⁺, Ni²⁺, Co²⁺ and Cr³⁺ ions. *Journal of Nanoparticle Research*, 2009. **11**: p. 1991-2002.
38. Narayan, T.C., et al., Direct visualization of hydrogen absorption dynamics in individual palladium nanoparticles. *Nature communications*, 2017. **8**(1): p. 14020.
39. Bárdos, L. and H. Baránková, Cold atmospheric plasma: Sources, processes, and applications. *Thin solid films*, 2010. **518**(23): p. 6705-6713.
40. Honarvar, Z., et al., Application of cold plasma to develop carboxymethyl cellulose-coated polypropylene films containing essential oil. *Carbohydrate polymers*, 2017. **176**: p. 1-10.

41. Niazi, F., et al., Role of *Salvadora persica* chewing stick (miswak): A natural toothbrush for holistic oral health. *European journal of dentistry*, 2016. **10**(02): p. 301-308.
42. Xiouras, C., et al., Applications of ultrasound to chiral crystallization, resolution and deracemization. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018. **43**: p. 184-192.
43. Klämpfl, T.G., et al., Cold atmospheric air plasma sterilization against spores and other microorganisms of clinical interest. *Applied and environmental microbiology*, 2012. **78**(15): p. 5077-5082.
44. Hailili, R., et al., Oxygen vacancies induced visible-light photocatalytic activities of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ with controllable morphologies for antibiotic degradation. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2018. **221**: p. 422-432.
45. Ekanayake, U.M., et al., Atmospheric-pressure plasma seawater desalination: Clean energy, agriculture, and resource recovery nexus for a blue planet. *Sustainable materials and technologies*, 2020. **25**: p. e00181.
46. Dadi, R., Synthèse de nanoparticules d 'oxydes métalliques et leur activité antibactérienne. 2019, Université Paris-Nord-Paris XIII.
47. Ghavam, S., et al., Sustainable ammonia production processes. *Frontiers in Energy Research*, 2021. **9**: p. 580808.
48. Lee, Y., et al., Effect of bipolar charging of SiH_4 on the growth rate and crystallinity of silicon films grown in the atmospheric pressure chemical vapor deposition process. *Electronic Materials Letters*, 2020. **16**: p. 385-395.
49. Peng, Z., et al., Facile synthesis of magnetic Fe@ Al-ZnO nanocomposite for photocatalytic bacterial inactivation under visible-light irradiation. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2021. **123**: p. 105560.
50. Ashraf, R., et al., Effect of Calcination on properties of ZnO nanoparticles. *Materials Today: Proceedings*, 2015. **2**(10): p. 5468-5472.
51. Bulychev, N.A. and M.A. Kazaryan. Optical properties of zinc oxide nanoparticles synthesized in plasma discharge in liquid under ultrasonic cavitation. in XIV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications. 2019. SPIE.
52. Baruwati, B., D.K. Kumar, and S.V. Manorama, Hydrothermal synthesis of highly crystalline ZnO nanoparticles: a competitive sensor for LPG and EtOH. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2006. **119**(2): p. 676-682.
53. Li, Z., et al., Plasma-induced oxygen vacancies enabled ultrathin ZnO films for highly sensitive detection of triethylamine. *Journal of Hazardous Materials*, 2021. **415**: p. 125757.

54. Bouhadoun, S., Synthèse de nanoparticules de dioxyde de titane par pyrolyse laser et leur application en photocatalyse. 2015, Université Paris Saclay (COMUE).
55. Jonidi-Jafari, A., et al., Application of Ni-doped ZnO nanorods for degradation of diazinon: kinetics and by-products. *Separation Science and Technology*, 2017. **52**(15): p. 2395-2406.
56. Meguernes, K., J. Chapelle, and A. Czernichowski. Oxidization of CH₄ by CO₂ in an Electric Arc and in a Cold Discharge. 11th Int. in Symp. on Plasma Chem., Loughborough, England. 1993.
57. Buxton, G.V., et al., Critical Review of rate constants for reactions of hydrated electrons, hydrogen atoms and hydroxyl radicals ($\cdot\text{OH}/\cdot\text{O}-$ in Aqueous Solution. *Journal of physical and chemical reference data*, 1988. **17**(2): p. 513-886.
58. Madigan, M.T., et al., *Bender KS Brock Biology Of Microorganisms*, Global Edition. 2018, Pearson Education Limited London, UK:.
59. Dasaraju, P.V. and C. Liu, Chapter 93: infections of the respiratory system. Galveston: University of Texas Medical Branch at Galveston, 1996. **1**.
60. Baron, S., *Medical microbiology*. 1996.
61. Murphy, D.R., et al., Pain patterns and descriptions in patients with radicular pain: Does the pain necessarily follow a specific dermatome? *Chiropractic & osteopathy*, 2009. **17**: p. 1-9.
62. Neuhaus, F.C. and J. Baddiley, A continuum of anionic charge: structures and functions of D-alanyl-teichoic acids in gram-positive bacteria. *Microbiology and molecular biology reviews*, 2003. **67**(4): p. 686-723.
63. Collins, M.D. and D. Jones, Distribution of isoprenoid quinone structural types in bacteria and their taxonomic implication. *Microbiological reviews*, 1981. **45**(2): p. 316-354.
64. Tortora, G.J., B.R. Funke, and C.L. Case, *Microbiology: an introduction*. 2018: Pearson.
65. Kumar, S. and M. Tripathi, Antibiotic resistant bacteria: A global menace. *Virol Immunol J*, 2017. **1**(3): p. 000118.
66. Kariuki, S. and G. Dougan, Antibacterial resistance in sub-Saharan Africa: an underestimated emergency. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2014. **1323**(1): p. 43-55.
67. Lacasse, M., et al., 2022 SPILF-Clinical Practice Guidelines for the Diagnosis and Treatment of Disco-Vertebral Infection in Adults. *Infectious Diseases Now*, 2023.
68. Madigan, M.T., J.M. Martinko, and J. Parker, *Brock biology of microorganisms*. Vol. 11. 1997: Prentice hall Upper Saddle River, NJ.

69. Tortora, G., B. Funke, and C. Case, *Microbiology: An Introduction*. Glenview. 2013, Pearson Education, Inc.
70. Kaper, J., J. Nataro, and H. Mobley, *Nature reviews. Microbiology*. *Nat Rev Microbiol*, 2004. **2**(2): p. 123-140.
71. Erbeling, E.J., et al., A universal influenza vaccine: the strategic plan for the National Institute of Allergy and Infectious Diseases. *The Journal of infectious diseases*, 2018. **218**(3): p. 347-354.
72. Al-Zarouni, M., et al., Prevalence and antimicrobial susceptibility pattern of extended-spectrum beta-lactamase-producing Enterobacteriaceae in the United Arab Emirates. *Medical Principles and Practice*, 2008. **17**(1): p. 32-36.
73. Dinges, M.M., P.M. Orwin, and P.M. Schlievert, Exotoxins of *Staphylococcus aureus*. *Clinical microbiology reviews*, 2000. **13**(1): p. 16-34.
74. Chambers, H.F., The changing epidemiology of *Staphylococcus aureus*? *Emerging infectious diseases*, 2001. **7**(2): p. 178.
75. Lyczak, J.B., C.L. Cannon, and G.B. Pier, Establishment of *Pseudomonas aeruginosa* infection: lessons from a versatile opportunist. *Microbes and infection*, 2000. **2**(9): p. 1051-1060.
76. Bodey, G.P., et al., Infections caused by *Pseudomonas aeruginosa*. *Reviews of infectious diseases*, 1983. **5**(2): p. 279-313.
77. Avril, J. and H. Dabernat, Denis f, Monteil h. *Bactériologie clinique*. 3ème. Paris: ellipses edition marketing sa, 2000: p. 171-173.
78. Munoz-Price, L.S., et al., Clinical epidemiology of the global expansion of *Klebsiella pneumoniae* carbapenemases. *The Lancet infectious diseases*, 2013. **13**(9): p. 785-796.
79. Poirel, L., et al., Emergence of oxacillinase-mediated resistance to imipenem in *Klebsiella pneumoniae*. *Antimicrobial agents and chemotherapy*, 2004. **48**(1): p. 15-22.
80. Li, M., L. Zhu, and D. Lin, Toxicity of ZnO nanoparticles to *Escherichia coli*: mechanism and the influence of medium components. *Environmental science & technology*, 2011. **45**(5): p. 1977-1983.
81. Brayner, R., et al., Toxicological impact studies based on *Escherichia coli* bacteria in ultrafine ZnO nanoparticles colloidal medium. *Nano letters*, 2006. **6**(4): p. 866-870.
82. Azizi-Lalabadi, M., et al., Antimicrobial activity of Titanium dioxide and Zinc oxide nanoparticles supported in 4A zeolite and evaluation the morphological characteristic. *Scientific reports*, 2019. **9**(1): p. 17439.

83. Kambou, S., A.C.E. Boko, and D.M. Angaman, Activité antibactérienne in vitro de l'hémolymph de deux espèces de Coléoptère (*Oryctes owariensis* et *Rhynchophorus phoenicis*) immunisées par des souches bactériennes. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 2023. **38**(4): p. 936-943.
84. Alzoreky, N. and K. Nakahara, Antibacterial activity of extracts from some edible plants commonly consumed in Asia. *International journal of food microbiology*, 2003. **80**(3): p. 223-230.
85. Hage, M., Understanding the mechanisms of interactions at interfaces between bacteria and materials: development of anti-adhesion and anti-biofilm surfaces. 2021, Université de Lille; Université Libanaise.
86. Joffin, J.-N. and G. Leyral, *Microbiologie technique*. 1991: Centre régional de documentation pédagogique.
87. Mahrane, S., A. Abad, and Z. Guechi, Serotypes and antibiotic susceptibility of *Streptococcus agalactiae* strains isolated from invasive neonatal infections. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*, 2023. **22**(3): p. 253-258.
88. Fu, M., et al., Sol–gel preparation and enhanced photocatalytic performance of Cu-doped ZnO nanoparticles. *Applied Surface Science*, 2011. **258**(4): p. 1587-1591.
89. Fritzsche, H. and J.J.P.P. Tauc, New York,) p, Amorphous and liquid semiconductors. 1974. **254**.
90. Keşkenler, E.F., et al., Optical and structural properties of bismuth doped ZnO thin films by sol-gel method: Urbach rule as a function of crystal defects. 2014.
91. Kumar, H., R.J.I.L.o.C. Rani, Physics, and Astronomy, Structural and optical characterization of ZnO nanoparticles synthesized by microemulsion route. 2013. **14**: p. 26--36.
92. Liang, M.-K., et al., New insights into the mechanism of ZnO formation from aqueous solutions of zinc acetate and zinc nitrate. 2014. **26**(14): p. 4119-4129.
93. Wei, S., J. Lian, and Q.J.A.S.S. Jiang, Controlling growth of ZnO rods by polyvinylpyrrolidone (PVP) and their optical properties. 2009. **255**(15): p. 6978-6984.
94. Thakur, S., et al., Enhancement of microwave absorption properties of epoxy by sol–gel-Synthesised ZnO nanoparticles. 2016. **58**(4): p. 310-324.
95. Langford, J.I. and A. Wilson, Scherrer after sixty years: a survey and some new results in the determination of crystallite size. *Journal of applied crystallography*, 1978. **11**(2): p. 102-113.

96. Kumar, G.A., M.R. Reddy, and K.N. Reddy. Structural and Optical properties of ZnO thin films grown on various substrates by RF magnetron sputtering, in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. IOP Publishing.
97. Gupta, V. and A. Mansingh, Influence of postdeposition annealing on the structural and optical properties of sputtered zinc oxide film. Journal of applied Physics, 1996. **80**(2): p. 1063-1073.

Résumé :

L'utilisation croissante de l'activité antibactérienne a conduit à l'émergence de souches bactériennes qui lui sont résistantes. Pour cela, de nouvelles alternatives doivent être recherchées pour éliminer les bactéries. Dans ce contexte, nous évaluerons l'activité antibactérienne des nanoparticules d'oxyde de zinc (ZnO).

Nous avons mené une étude pour évaluer l'efficacité des nanoparticules d'oxyde de zinc synthétisées par plasma froid comme agent antibactérien. Nous avons testé trois (03) concentrations différentes de ces nanoparticules sur quatre (04) types de bactéries en utilisant la méthode du puits. Les résultats ont montré que les nanoparticules d'oxyde de zinc avaient une activité inhibitrice significative contre les souches testées. Plus précisément, avec *Escherichia coli*, nous avons observé des diamètres d'inhibition allant de 9 à 12 mm, tandis que ceux de *S. aureus* se situaient entre 14 et 19 mm. Les scores de *Pseudomonas* étaient variables avec des diamètres d'inhibition allant de 18 à 23 mm, tandis que ceux de *Klebsiella* variaient de 15 à 17 mm.

Par conséquent, ces nanoparticules peuvent être considérées comme un agent antibactérien potentiel. Cette efficacité est due à la facilité de synthèse et d'utilisation de la technologie des nanoparticules d'oxyde de zinc.

Les mots clés : ZnO, Nanoparticules, Plasma froid, activité antibactérienne.

المخلص:

إن الاستخدام المتزايد لنشاط مضادات البكتيريا أدى الى ظهور سلالات بكتيرية مقاومة لها. لهذا يجب البحث عن بدائل جديدة للقضاء على البكتيريا. في هذا السياق، سنقوم بتقييم النشاط المضاد للبكتيريا لجسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO).

أجرينا دراسة لتقييم فعالية الجسيمات النانوية لأكسيد الزنك المُصنَّعة بواسطة البلازما الباردة كعامل مضاد للبكتيريا. اختبرنا ثلاثة (03) تراكيز مختلفة من هذه الجسيمات النانوية على أربعة (04) أنواع من البكتيريا باستخدام طريقة البئر. أظهرت النتائج أن الجسيمات النانوية لأكسيد الزنك لها فعالية ونشاطاً مثبطاً كبيراً ضد السلالات المختبرة. على وجه التحديد، مع *Escherichia coli*، لاحظنا أقطار تثبيط تتراوح من 9 إلى 12 مم، بينما كانت أقطار *S. aureus* بين 14-19 مم. كانت نتائج *Pseudomonas* متغيرة مع أقطار تثبيط تتراوح من 18 إلى 23 مم، بينما تراوحت أقطار *Klebsiella* بين 15 و 17 مم.

وعليه يمكن اعتبار هذه الجسيمات النانوية عاملاً محتملاً مضاداً للبكتيريا. ترجع هذه الكفاءة إلى سهولة تكنولوجيا التوليف والاستخدام للجسيمات النانوية لأكسيد الزنك.

الكلمات المفتاحية: أكسيد الزنك، الجسيمات النانوية، البلازما الباردة، نشاط مضادات البكتيريا.

