



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة الشهيد حمة لخضر الوادي

Université Echahid Hamma Lakdhar EL-OUED

كلية العلوم الطبيعية و الحياة

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

قسم البيولوجيا الخلوية و الجزيئية

Département de Biologie Cellulaire et Moléculaire

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique en Sciences

biologiques

Spécialité : Toxicologie

THÈME

**Applications des nanotechnologies en médecine
vétérinaire : " perspectives diagnostiques et
thérapeutiques "**

Présenté Par :

M^{elle} : Amamra Safa

Soutenue le : 13/06/2026

Devant le jury composé de:

- | | |
|---------------------------------------|----------------------|
| • Présidente pr. Djahra Ali Boutlelis | Université d'El Oued |
| • Examinatrice pr. Mahboub Nasma | Université d'El Oued |
| • Promoteur MCA Dr. Bekkouche Amal | Université d'El Oued |

Année universitaire : 2025/2026





Remerciements

Avant tout, je remercie Allah, le Tout-Puissant, de m'avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur(e), Mme **Bekkouche Amal** pour sa disponibilité, ses précieux conseils, son soutien constant et ses orientations pertinentes tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Son accompagnement scientifique a été d'une grande importance dans la réalisation de cette étude.

J'adresse également mes sincères remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer ce travail et pour les remarques constructives qu'ils apporteront afin de l'enrichir.

Mes remerciements s'adressent également à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont participé à la réalisation de ce mémoire par leurs conseils, leur aide ou leurs encouragements.

Je réserve une pensée toute particulière à mes chers parents, auxquels je témoigne ma profonde reconnaissance pour leur amour, leurs sacrifices, leur soutien inconditionnel et leur confiance. Je les remercie pour avoir toujours cru en moi et pour m'avoir encouragée à poursuivre mes études.

Enfin, j'exprime ma gratitude à toute ma famille ainsi qu'à mes amis pour leur présence, leur soutien moral et leurs encouragements durant cette période.





Résumé

Résumé

La médecine vétérinaire est confrontée à de nombreux défis liés au diagnostic précoce, au traitement efficace et à la prévention des maladies animales. Face aux limites des approches conventionnelles, les nanotechnologies apparaissent comme une innovation prometteuse offrant de nouvelles perspectives diagnostiques et thérapeutiques. Cette étude vise à présenter les principales applications des nanotechnologies en médecine vétérinaire, en mettant l'accent sur leur rôle dans l'amélioration du diagnostic et du traitement des maladies animales. Après une présentation générale des nanoparticules, de leurs classifications, de leurs propriétés physicochimiques et des méthodes de synthèse, ce travail explore les différentes catégories de nanomatériaux utilisées dans le domaine vétérinaire, notamment les nanoparticules métalliques, polymériques, les liposomes, les nanoémulsions et les nanocristaux. Sur le plan diagnostique, les nanotechnologies permettent le développement de biosenseurs et de systèmes de détection hautement sensibles et spécifiques, favorisant un diagnostic rapide et précis des maladies infectieuses et parasitaires. Sur le plan thérapeutique, elles contribuent à l'amélioration de l'administration des médicaments grâce à des systèmes de vectorisation ciblée, augmentant ainsi leur efficacité tout en réduisant les effets secondaires et les doses administrées. Les applications des nanotechnologies s'étendent également à la vaccination, à l'imagerie médicale, à la lutte contre l'antibiorésistance ainsi qu'à la surveillance de la santé animale. Malgré les avantages considérables qu'elles offrent, certaines préoccupations relatives à leur toxicité, leur biocompatibilité et leur impact environnemental nécessitent des recherches complémentaires avant une utilisation à grande échelle. En conclusion, les nanotechnologies représentent une avancée majeure pour la médecine vétérinaire moderne. Elles ouvrent la voie à des stratégies diagnostiques et thérapeutiques plus performantes, contribuant à l'amélioration de la santé animale, à la sécurité alimentaire et à la protection de la santé publique.

Mots-clés : Nanotechnologies, médecine vétérinaire, nanoparticules, diagnostic, thérapie, santé animale.

Abstract

Abstract

Veterinary medicine faces numerous challenges related to the early diagnosis, effective treatment, and prevention of animal diseases. Given the limitations of conventional approaches, nanotechnology has emerged as a promising innovation offering new diagnostic and therapeutic perspectives. This study aims to present the main applications of nanotechnology in veterinary medicine, with particular emphasis on its role in improving the diagnosis and treatment of animal diseases. After providing an overview of nanoparticles, their classifications, physicochemical properties, and synthesis methods, this work explores the different categories of nanomaterials used in the veterinary field, including metallic nanoparticles, polymeric nanoparticles, liposomes, nanoemulsions, and nanocrystals. From a diagnostic perspective, nanotechnology enables the development of highly sensitive and specific biosensors and detection systems, facilitating the rapid and accurate diagnosis of infectious and parasitic diseases. From a therapeutic perspective, it contributes to improving drug delivery through targeted delivery systems, thereby enhancing therapeutic efficacy while reducing side effects and the required dosages. The applications of nanotechnology also extend to vaccination, medical imaging, combating antimicrobial resistance, and animal health monitoring. Despite the considerable advantages offered by these technologies, concerns regarding their toxicity, biocompatibility, and environmental impact require further investigation before their large-scale implementation. In conclusion, nanotechnology represents a major advancement in modern veterinary medicine. It paves the way for more efficient diagnostic and therapeutic strategies, contributing to improved animal health, food safety, and public health protection.

Keywords: Nanotechnology, Veterinary Medicine, Nanoparticles, Diagnosis, Therapy, Animal Health.

الملخص

يواجه الطب البيطري العديد من التحديات المرتبطة بالتشخيص المبكر والعلاج الفعال والوقاية من الأمراض الحيوانية. وفي ظل محدودية الأساليب التقليدية، تبرز تقنيات النانو كابتكار واعد يوفّر أفقًا جديدة في مجالي التشخيص والعلاج. تهدف هذه الدراسة إلى عرض أهم تطبيقات تقنيات النانو في الطب البيطري، مع التركيز على دورها في تحسين تشخيص الأمراض الحيوانية وعلاجها. وبعد تقديم لمحة عامة عن الجسيمات النانوية وتصنيفاتها وخصائصها الفيزيائية والكيميائية وطرق تحضيرها، يتناول هذا العمل مختلف أنواع المواد النانوية المستخدمة في المجال البيطري، ولا سيما الجسيمات النانوية المعدنية والبوليمرية، والليبوسومات، والمستحلبات النانوية، والبلورات النانوية. على الصعيد التشخيصي، تتيح تقنيات النانو تطوير مستشعرات حيوية وأنظمة كشف عالية الحساسية والنوعية، مما يساهم في التشخيص السريع والدقيق للأمراض المعدية والطفيليات. أما على الصعيد العلاجي، فإنها تساهم في تحسين إيصال الأدوية من خلال أنظمة الاستهداف الموجه، مما يزيد من فعاليتها ويقلل من الآثار الجانبية والجرعات المطلوبة. كما تمتد تطبيقات تقنيات النانو إلى مجالات التلقيح والتصوير الطبي ومكافحة مقاومة المضادات الحيوية، بالإضافة إلى مراقبة صحة الحيوان. وعلى الرغم من المزايا الكبيرة التي توفرها هذه التقنيات، فإن بعض المخاوف المتعلقة بسميتها وتوافقها الحيوي وتأثيرها البيئي ما تزال تتطلب المزيد من الدراسات والأبحاث قبل اعتمادها على نطاق واسع. وفي الختام، تمثل تقنيات النانو تقدمًا مهمًا في الطب البيطري الحديث، حيث تفتح المجال أمام استراتيجيات تشخيصية وعلاجية أكثر كفاءة، مما يساهم في تحسين صحة الحيوان، وتعزيز الأمن الغذائي، وحماية الصحة العامة.

الكلمات المفتاحية:

تقنيات النانو، الطب البيطري، الجسيمات النانوية، التشخيص، العلاج، صحة الحيوان.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Abréviation	Signification
NP	Nanoparticules
NASA	National Aeronautics and Space Administration
UV	Ultraviolet
IR	Infrared
PEGylées	Polyéthylène glycol
PGP	Permeability glycoprotein
PLGA	Poly(Lactic-co-Glycolic Acid)
MET	Microscope électronique à transmission
AFM	Microscopie à force atomique
ZP	Potentiel zêta ZP
SH	Hydrophobie de surface
Bio NEMS	Biological Nanoelectromechanical Systems
PQ	Points quantiques
DMZ	Diminazène
TBb	Tuberculose bovine
L'EPM	La myéloencéphalite protozoaire équine
PEDV	L'émergence du virus de la diarrhée épidémique porcine
CV canin	Circovirus canin
FVR	La fièvre de la vallée du Rift
AgNPs	Nanoparticules d'argent
RL	Liposomes de rivastigmine
IBV	Virus de la bronchite infectieuse aviaire
SeNPs	Nanoparticules de sélénium
GEHNPs	Nanoparticules de gélatine-épigallocatechine gallate décorées d'acide hyaluronique
PTX	Le paclitaxel
MCV	Maladies cardiovasculaires
NC	Nanovecteurs
CXCR4	Récepteur de chimiokine C-X-C de type 4

LISTE DES ABRÉVIATIONS

VEGF	Facteur de croissance endothélial vasculaire
ERO	Espèces réactives de l'oxygène
UFP	Les particules ultrafines
Al₂O₃	Oxyde d'aluminium
SARM	<i>Staphylococcus aureus</i> résistant à la méthicilline
IgG	Immunoglobuline G
IgA	Immunoglobuline A
SOD	Superoxyde dismutase
IA	Intelligence artificielle
LCR	Liquide céphalo-rachidien
PCR	Réaction en chaîne par polymérase (Polymerase Chain Reaction)
IFAT	Test d'immunofluorescence indirecte (Indirect Fluorescent Antibody Test)
IRM	Imagerie par résonance magnétique
TDM	Tomodensitométrie
SARS-CoV-2	Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (Coronavirus 2 du syndrome respiratoire aigu sévère)
NF-κB	Facteur nucléaire kappa B
H5N1	Virus de l'influenza aviaire de sous-type H5N1
ESB	Encéphalopathie spongiforme bovine
EPR	Effet de perméabilité et de rétention accrues (Enhanced Permeability and Retention)
SDN	Système de délivrance des nanomédicaments (ou Système de délivrance nanoparticulaire, selon le contexte)
MDR	Multirésistance aux médicaments (Multidrug Resistance)
BSMNC	Cellules mononucléées de la moelle osseuse (Bone Marrow Mononuclear Cells)
hASC	Cellules souches dérivées du tissu adipeux humain (Human Adipose-derived Stem Cells)
NIR	Proche infrarouge (Near Infrared)
SWNT	Nanotubes de carbone à simple paroi (Single-Walled Carbon Nanotubes)

LISTE DES ABRÉVIATIONS

DRX	Diffraction des rayons X
Raman	Spectroscopie Raman
FTIR	Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier
AFM	Microscopie à force atomique
MET	Microscopie électronique en transmission
MEB	Microscopie électronique à balayage

Liste des Figures

Liste des Figures

Figure	Titre	Page
01	Montre la division des nanomatériaux en termes de dimensions	20
02	Points quantiques	21
03	Fullerène	21
04	Nanobilles	21
05	Nanoparticules	22
06	Nanotubes	22
07	Nanofils	22
08	Diverses applications de la nanotechnologie en médecine vétérinaire	34
09	Représentation visuelle des étapes typiques du processus diagnostique en pathologie	47
10	Nanotechnologie et administration des vaccins les animaux	66
11	Mécanisme d'action des nanoparticules	67
12	Effets toxiques des nanoparticules	70

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableaux	Titre	Page
I	Principes et caractéristiques de la nanotechnologie	19
II	Quelques défis majeurs en pathologie vétérinaire : leurs causes, leurs impacts et leurs solutions potentielles	47
III	Comment les infections respiratoires peuvent se manifester différemment chez diverses espèces	48
IV	Facteurs de différenciation entre l'EPM et la malformation vertébrale cervicale (syndrome de Wobbler).	49
V	Application de la nanomédecine nouvelle contre différentes maladies	54
VI	Nanotechnologie dans les systèmes d'administration de médicaments	63
VII	Exemples de produits thérapeutiques et de vaccins issus du génie des nanoparticules en médecine vétérinaire.	65
VIII	Étude de diverses toxicités testées sur des nanomatériaux	68
IX	Effets toxiques de certaines nanoparticules	69
X	Effet des nanoparticules sur les organismes vivants	69

Sommaire

Sommaire

Titre	Page
Remerciement	
Résumé	
Abstract	
الملخص	
Liste des Figures	
Liste des tableaux	
Sommaire	
Introduction générale	
Chapitre I: Généralités sur la nanotechnologie	
I-1 Le mot nano	18
I-2 Définition de la nanotechnologie	18
I-3 Définition des nanoparticules	18
I-4 Histoire de la nanotechnologie	18
I.5. Notions de base	18
I.6. Principes et caractéristiques de la nanotechnologie	19
I.7. Dimensions des nanomatériaux	20
I.8. Formes de nanomatériaux	20
I.8.1. Points quantiques	21
I.8.2. Fullerène	21
I.8.3. Nanobilles	21
I.8.4. Nanoparticules	22
I.8.5. Nanotubes	22
I.8.6. Nanofils	22
I.9. Utilisations de la nanotechnologie	23
I.9.1. Le domaine médical	23
I.9.2. L'aviation	23
I.9.3. Le domaine de l'énergie	23
I.9.4. L'Industrie	23
I.10. L'importance de la nanotechnologie	23
I.11. Les difficultés face aux nanotechnologies	24

Sommaire

I.12. L'effet de la nanotechnologie	24
I.13. Avantages de la nanotechnologie	24
Chapitre II : Applications des nanotechnologies en médecine vétérinaire	
I. Nanotechnologie	27
I.1. Classification des nanoparticules	27
I.1.1. Selon leur structure et leur application en médecine vétérinaire	27
1- Nanoparticules polymères	27
2- Liposomes	27
3- Fullérènes et nanotubes de carbone	27
4- Microbivores et respirocytes	28
5- Nanocoques	28
6- Points quantiques	28
7- Nanoparticules lipidiques solides	28
8- Nanoparticules d'oxyde de fer magnétiques	29
9- Dendrimère	29
10- Nanoémulsion	29
11- Nanobulles	30
12- Nanoparticules d'aluminosilicate	30
13- Micelles polymères	30
14- Nanosphères polymères	30
15- Nanoparticules métalliques	31
I.1.2 .Selon leur origine	31
1. Nanomatériaux inorganiques	31
2. Nanomatériaux organiques	31
3. Nanoparticules de protéines et de peptides	31
4. Nanoparticules hybrides	31
I.1.3 .Selon leur forme	32
I.1.4 .Classification diverse	32
1 .Structures immunostimulantes	32
2 .Particules pseudo-virales	32
II. Préparation et caractérisation des nanoparticule	32
II.1 .Les nanoparticules peuvent être préparées de différentes manières	32

Sommaire

II.1.1 .Méthode d'émulsion-évaporation du solvant	32
II.1.2 .Technique de double émulsion et dissipation	32
II.1.3 .Méthode de relargage salin	32
II.1.4 .Méthode émulsion-diffusion	32
II.1.5. Méthode de précipitation / déplacement du solvant	33
II.2 .Nombreuses techniques de caractérisation des nanoparticules	33
II.2.1 .Taille des nanoparticules	33
II.2.1.1. Détermination de la taille des nanoparticules	33
II.2.1.1.1. Microscope électronique à balayage (MEB) :	33
II.2.1.1.2. Microscope électronique à transmission (MET)	33
II.2.1.1.3- Microscopie à force atomique (AFM)	33
II.2.1.1.4. Potentiel zêta (ZP)	33
II.2.1.1.5. Hydrophobie de surface (SH)	33
III. Applications des nanotechnologies	34
III.1. Applications des nanotechnologies en médecine vétérinaire	34
III.1.1. Administration de médicaments	34
III.1.2. Ciblage thérapeutique	36
III.1.3. Administration transdermique de médicaments	37
III.2. Utilisations potentielles des nanotechnologies dans la recherche médicale	37
III.2.1. Fins thérapeutiques	37
III.2.2. Indications préventives	38
III.2.3. Indications diagnostiques	38
III.3. Nanotechnologies en médecine et sciences vétérinaires	38
III.3.1. Applications potentielles en production animale	39
III.3.2. Santé et nutrition animales	39
III.3.3. Reproduction et élevage	40
III.3.4. Thérapeutique vétérinaire	40
III.3.5. Nanovaccins et nano adjuvants	40
III.3.5.1. Des exemples illustrent les différents types de nanovaccins utilisés en médecine vétérinaire	41
III.3.6 .Pet Animal Care	41
III.3.7. Systèmes d'administration de médicaments :	41

Sommaire

III.3.8. Limites actuelles et sécurité des nanoparticules	42
Chapitre III : Perspectives diagnostiques et thérapeutiques en médecine vétérinaire	
Perspectives diagnostiques en médecine vétérinaire	46
1 Complexité de la présentation de la maladie	48
2 Limites des outils de diagnostic actuels	51
3 Maladies émergentes	52
Applications possibles des nanotechnologies en sciences vétérinaires	54
1 Nanotechnologies et diagnostic des maladies	57
1.2. Les outils de diagnostic	58
2 Nanotechnologies thérapeutiques	59
3 Nanotechnologies Traitement	60
4 Nanotechnologie dans les systèmes d'administration de médicaments	62
5 Nanotechnologies et reproduction animale	63
6 Nanovaccins	64
Mécanisme d'action des nanoparticules	66
Effets toxiques des nanoparticules	67
Conclusion	71
Références	75



INTRODUCTION GÉNÉRALE

12/04/2023

Introduction générale

Introduction générale

La nanotechnologie est une discipline en pleine expansion, créée en 1974, qui vise à assembler de nouveaux matériaux dont la taille se situe entre 1 et 100 nm. Le terme « nano » fait référence à une échelle minuscule (1 nm équivaut à 10^{-9} m) et dérive du latin « nanus », qui signifie «prédominant». **(Ochekpe et al., 2009)**

La nanotechnologie est une autre forme d'innovation qui trouve des applications dans de nombreux domaines, notamment les sciences et l'agriculture. De plus, les nanomatériaux peuvent influencer les applications biomédicales et la recherche menée in vivo et in vitro. **(Cardoso et al., 2018)**

Grâce à leur rapport surface/volume élevé, leur réactivité accrue, leur durabilité, leur bioactivité, leur biodisponibilité, leur taille de particules régulée, la libération contrôlée du médicament, le ciblage spécifique et l'arrivée contrôlée des médicaments, les nanoparticules présentent des propriétés physico-chimiques inédites, supérieures à celles des matériaux massifs. **(Zaidi et al., 2017)**

De plus, la nanotechnologie présente un potentiel considérable pour l'administration de médicaments car elle peut infiltrer les cellules, les tissus et les organes plus efficacement que les macroparticules, surmontant ainsi la faible biodisponibilité et la toxicité des produits pharmaceutiques conventionnels. **(Patra et al., 2018)**

Des médicaments peuvent être incorporés dans des nanoparticules ou appliqués à leur surface. De plus, les nanomédicaments utilisent divers dispositifs nanotechnologiques pour accélérer et étendre les réponses aux problèmes scientifiques ou à la lutte contre les infections. **(Vahedifard et al., 2021)**

Elle est utile pour surmonter les obstacles inhérents à la médecine conventionnelle et comprendre différentes stratégies physiologiques et obsessionnelles. L'économie de la plupart des pays repose principalement sur l'élevage. **(Chau et al., 2007)**

Bien que de nombreuses maladies soient en augmentation, des innovations modernes, prédictives et bénéfiques, sont constamment développées pour diagnostiquer et traiter les maladies animales, dans le but ultime d'accroître la disponibilité des protéines pour l'alimentation humaine. **(Swain et al., 2016)**

La nanotechnologie recèle un immense potentiel pour optimiser l'administration de médicaments en médecine vétérinaire. **(Num et al., 2013)**

Introduction générale

L'obsession pour les atomes nouvellement synthétisés permettrait de développer de nouvelles thérapies médicales efficaces pour soigner les maladies, protéger les organismes contre les infections virales ou bactériennes et favoriser la cicatrisation. De plus, ces nouvelles combinaisons pourraient faciliter l'administration de médicaments au sein des cellules pour un traitement efficace des maladies. **(Bhatia, 2016).**

La nanothéranostique est une forme de thérapie qui associe médicaments et outils de diagnostic pour mesurer les réactions au traitement et optimiser l'efficacité et la sécurité des médicaments. Elle offre également une excellente capacité de conception et d'amélioration de ces associations thérapeutiques, permettant leur distribution clinique et leur identification avant et pendant le traitement. **(Zhao et al., 2018)**

Les nanopharmaceutiques figurent parmi les applications les plus prometteuses et bénéfiques de la nanotechnologie en médecine vétérinaire. **(Zhao et al., 2018)**

Une zoonose (maladie zoonotique) est une maladie infectieuse qui se transmet naturellement entre les animaux vertébrés, qu'ils soient sauvages ou domestiques, et l'être humain. Dans certains cas, les personnes infectées peuvent ensuite transmettre la maladie à d'autres individus, comme c'est le cas de la peste. En revanche, pour certaines maladies telles que la brucellose, la transmission interhumaine est rare ou inexistante. **(abdellah; 2017)**

Parmi les grandes maladies émergentes figurent la maladie à virus Ebola et les infections à Salmonella, qui sont des zoonoses. Le virus de l'immunodéficience humaine était à l'origine une zoonose transmise à l'être humain au début du XX^e siècle, mais il est devenu par la suite une maladie spécifiquement humaine. La plupart des souches de grippe qui affectent l'homme sont aujourd'hui des maladies humaines ; toutefois, plusieurs souches de grippe porcine et de grippe aviaire sont des zoonoses. Ces virus peuvent parfois se recombiner avec des souches humaines de la grippe et provoquer des épidémies. **(Peer et al;2007)**

Les zoonoses peuvent être causées par différents agents pathogènes, notamment des virus, des bactéries, des champignons et des parasites. Parmi les 1 415 agents pathogènes connus pour infecter l'être humain, environ 60 % sont d'origine animale. La majorité des maladies humaines trouvent leur origine chez les animaux. Cependant, certaines maladies dont le cycle de transmission implique habituellement un passage direct de l'animal à l'homme, comme la rage, sont considérées comme des zoonoses directes. Les zoonoses présentent différents modes de transmission. Dans le cas des zoonoses directes, l'agent pathogène est transmis directement de l'animal à l'homme par contact, par voie aérienne (comme la grippe) ou par morsure et salive (comme la rage). À l'inverse, la transmission peut

Introduction générale

également se faire par l'intermédiaire d'un vecteur (par exemple certains insectes), qui transporte l'agent pathogène sans être lui-même atteint par la maladie. Lorsque l'infection est transmise à l'homme par l'intermédiaire d'un vecteur animal, on parle alors de maladie à transmission vectorielle. **(abdellah; 2017)**

Grâce aux progrès réalisés dans le domaine des nanotechnologies, les outils diagnostiques et les traitements sont désormais plus performants en termes de sensibilité, de spécificité, de rapidité et de coût. De nombreux nanomatériaux, tels que les nanoparticules métalliques, les nanoparticules polymériques, les nanoémulsions, les liposomes et les nanocristaux, ont été utilisés pour la détection et le diagnostic des maladies vétérinaires. L'importance des nanotechnologies dans le traitement des maladies animales réside également dans leur capacité à améliorer l'administration ciblée des médicaments, à augmenter leur biodisponibilité et à réduire leurs effets secondaires. Les nanoparticules permettent de transporter les agents thérapeutiques directement vers les tissus atteints, ce qui améliore l'efficacité du traitement tout en diminuant les doses nécessaires. En outre, elles jouent un rôle prometteur dans le développement de vaccins vétérinaires innovants, la lutte contre les infections bactériennes, virales et parasitaires, ainsi que dans la réduction du phénomène de l'antibiorésistance. Par conséquent, les nanotechnologies constituent aujourd'hui un outil essentiel pour améliorer la santé animale, optimiser les performances des traitements vétérinaires et contribuer à la sécurité sanitaire et alimentaire. **(Scott et al, 2002)**

Objectifs d'étude:

- ✚ Étudier le rôle et les applications des nanotechnologies en médecine vétérinaire et mettre en évidence leur importance dans l'amélioration du diagnostic, du traitement et de la prévention des maladies animales.
- ✚ Présenter le concept des nanotechnologies et les propriétés des nanomatériaux utilisés en médecine vétérinaire.
- ✚ Étudier les différents types de nanoparticules, leurs classifications.
- ✚ Mettre en évidence les applications des nanotechnologies dans le diagnostic des maladies animales grâce au développement d'outils diagnostiques plus rapides et plus précis.
- ✚ Expliquer le rôle des systèmes nanométriques dans l'administration ciblée des médicaments afin d'améliorer leur efficacité thérapeutique.
- ✚ Étudier les applications des vaccins nanotechnologiques dans le renforcement de la réponse immunitaire et la prévention des maladies animales.



Chapitre I

Généralités sur la nanotechnologie

I-1 Le mot nano :

Le terme « Nano » signifie quelque chose qui est très petit ou minuscule. Le mot "nano" est apparu en Grèce et est dérivé du mot - "nanos" ; Ce qui signifie nain. **(abdellah; 2017)**

I-2 Définition de la nanotechnologie :

Un nano est une très petite unité de mesure ; Là où le nano est égal à un millionième de millimètre, c'est-à-dire qu'il est impossible de le voir à l'œil nu ou avec de simples. Par conséquent, la nanotechnologie peut être définie comme la science qui étudie la possibilité de modifier la matière au niveau nano, afin de produire de nouveaux matériaux ou des dispositifs avancés pour servir les intérêts humains dans divers domaines. Il faut noter que le terme nano est l'un des anciens termes scientifiques qui ont été abordés par le scientifique Richer Feynman en 1959 après JC lors d'une conférence qu'il a donnée à l'American Physical Society ; Il a dit qu'il y a beaucoup d'espace à l'intérieur de l'atome, mais cela n'a pas été pris au sérieux à l'époque. **(DrexlerK ; 1986)**

I-3 Définition des nanoparticules :

Les nanoparticules (NP) sont de petits assemblages moléculaires de l'ordre du nanomètre (taille de 1 à 100 nm) composés de centaines à des milliers d'atomes. La taille du nanomètre augmente la surface de contact entre les matériaux et améliore la réactivité. **(Yang ; 2000)**

I-4 Histoire de la nanotechnologie :

Les humains utilisent les nanotechnologies depuis des milliers d'années, par exemple dans la fabrication de l'acier et la vulcanisation du caoutchouc.

La première mention de certains concepts distinctifs de la nanotechnologie est apparue en 1867 par James Clerk Maxwell. Le sujet de cette technique a été repris par le physicien physique Richard Feynman lors d'une réunion de l'American Physical Society en Californie pour la technologie médicale le 29 décembre 1959. Feynman a décrit un processus par lequel le traitement de molécules chirurgicales et simples pourrait être développé. Le terme « nanotechnologie » a été défini pour la première fois par Norio Taniguchi de l'Université des sciences de Tokyo dans un article de recherche en 1974 comme suit : « La nanotechnologie » est essentiellement la manipulation, la séparation, l'assemblage et la distorsion des matériaux par un atome ou une molécule. Depuis lors, la définition de la nanotechnologie a généralement été élargie vers le haut pour inclure jusqu'à 100 nanomètres. **(Aumsri ; 2007)**

I.5. Notions de base

La recherche à l'échelle nanométrique de la matière est fascinante car c'est l'étape de base où les atomes sont disposés ensemble. Ainsi, on peut former de nombreux types de matériaux

différents en manipulant la matière à cette échelle. L'échelle nanométrique varie de 1 à 100 nm. Il est plus petit que l'échelle microscopique et plus grand que l'échelle atomique. Comme la recherche autour de cette technologie implique diverses propriétés de la matière, il est important d'avoir une solide expérience dans de multiples sciences.

Au niveau nanométrique, les règles de la mécanique quantique du matériau sont très différentes de son niveau atomique. Par exemple, un matériau qui se comporte comme un isolant à la forme moléculaire peut se comporter comme un semi-conducteur lors de la décomposition à l'échelle nanométrique. À ce niveau, le point de fusion des substances peut également changer en raison d'une augmentation de la surface. Toute la recherche autour de la nanotechnologie implique aujourd'hui l'étude de ces propriétés à l'échelle nanométrique et de savoir comment les utiliser pour de nouvelles applications.

Aujourd'hui, la nanotechnologie fait également référence à la science de la construction de matériaux de bas en haut en utilisant les outils et la technologie disponibles aujourd'hui, pour former des produits haute performance. (Tarun ; 2020)

I.6. Principes et caractéristiques de la nanotechnologie

Il existe de nombreux principes qui distinguent la nanotechnologie des techniques que nous connaissons, raison pour laquelle les scientifiques s'intéressent à atteindre cette échelle nanométrique, et le tableau ci-dessous montre les plus importants de ces principes et leurs avantages ainsi que leur objectif. (Halfaoui; 2020)

Tableau I : Principes et caractéristiques de la nanotechnologie. (Tarun ; 2020)

Principe	Fonctionnalité
La capacité de contrôler avec précision le mouvement des atomes individuels et leur réarrangement	La possibilité de construire n'importe quel matériau car l'atome est l'unité de construction de tous Matériaux
Propriétés physiques et chimiques d'une substance à grande échelle. Les nanomètres diffèrent des propriétés du même matériau à échelle normale	Découvrez les propriétés distinctives des matériaux qui sont utilisés dans de nombreuses inventions et domaines appliqués
La nanotechnologie est basée sur les principes de la physique et de la chimie Biologie, génie électrique et électronique	Connecter la science et encourager chacun avec ses différentes spécialités. Entrer dans son domaine et traiter les uns avec les autres

Chapitre I Généralités sur la nanotechnologie

La capacité de contrôler et de réorganiser avec précision les atomes individuels en fabriquant des appareils et des matériaux et en les purifiant des impuretés et se débarrasser des imperfections	Les propriétés des matériaux et des appareils s'améliorent à mesure qu'ils sont plus petits, Plus léger, plus solide, plus rapide, moins cher et moins économe en énergie
La nanotechnologie est basée sur la recherche scientifique qui se caractérise par la possibilité de son application dans des inventions utiles	La science-fiction devenue réalité

I.7. Dimensions des nanomatériaux

○ Matériaux unidimensionnels et Matériaux 2D et Matériaux 3D

Tous les matériaux dont les dimensions sont inférieures à 100 nanomètres entrent dans cette catégorie. Cette catégorie comprend les nanomatériaux unidimensionnels (c'est-à-dire n'ayant qu'une seule dimension à l'échelle nanométrique) Qui a deux dimensions et trois dimensions.

(Racha ; 2018)

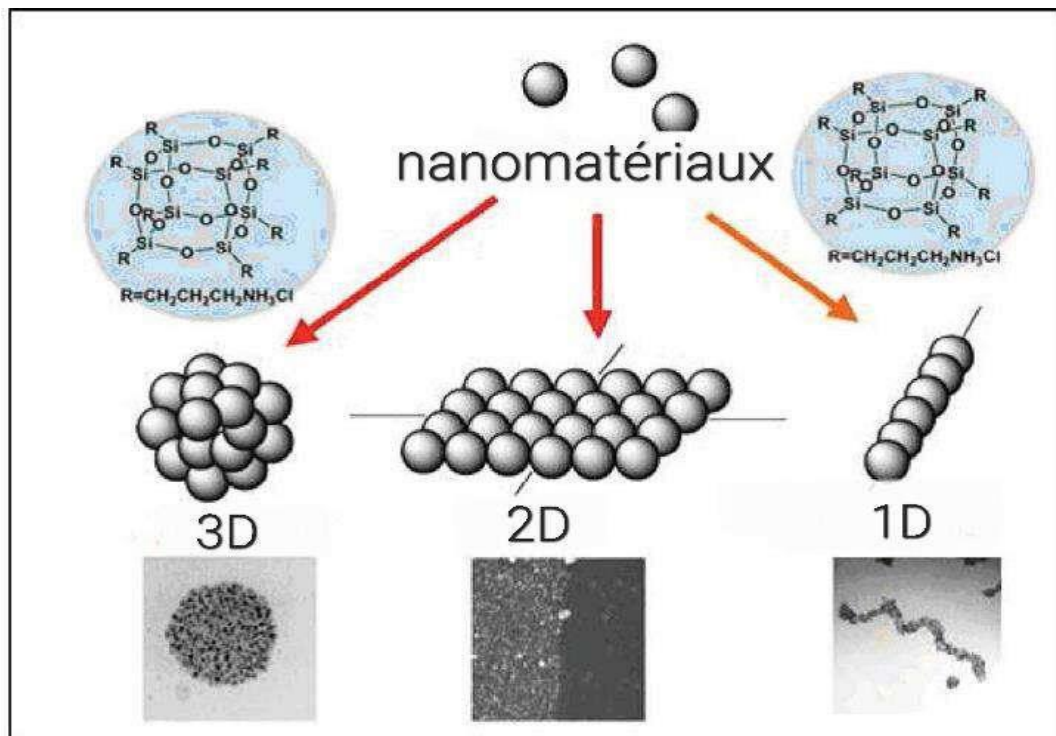


Figure 01 : montre la division des nanomatériaux en termes de dimensions. (Racha ; 2018)

I.8. Formes de nanomatériaux

Lors de la fabrication de matériaux de taille nanométrique, la composition physique et la concentration chimique des matières premières utilisées dans la fabrication jouent un rôle important dans les propriétés des nanomatériaux résultants. (Ahmida ;2007)

I.8.1. Points quantiques

Il s'agit d'une nanoparticule semi-conductrice tridimensionnelle, dont les dimensions vont de 2 à 10 nanomètres. Lorsque le diamètre du point quantique est de 10 nanomètres, 3 millions de points quantiques peuvent être alignés les uns à côté des autres avec une longueur égale à la largeur d'un pouce humain, la figure 02 montre des points quantiques. (Ahmida ;2007)

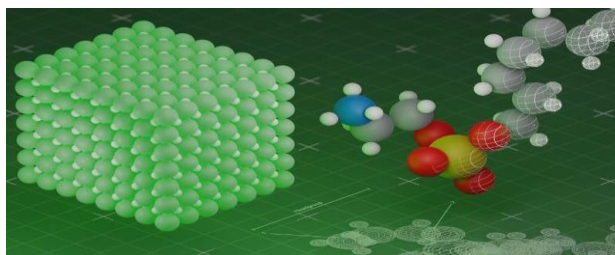


Figure 02 : Points quantiques. (Ahmida ;2007)

I.8.2. Fullerène

Les nanoparticules composées d'atomes de carbone à triple liaison donnent la forme de sphères qui ont une structure similaire au graphite, mais au lieu de la forme hexagonale pure, elles contiennent des pentagones (et éventuellement des sept) d'atomes de carbone, ce qui conduit à la flexion des couches en sphères ou cylindres. La figure 03 montre le Fullerène. (BAETKE ; 2015)

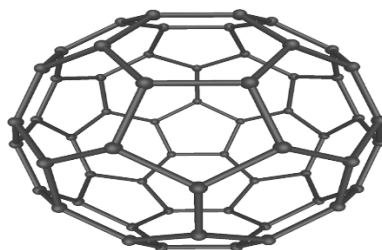


Figure 03 : Fullerène (BAETKE ; 2015)

I.8.3. Nanobilles

Les nanosphères appartiennent à la classe des fluors (C60), avec une légère différence de composition car elles sont multi-coquilles et dépourvues de centre, et en raison de leur structure en forme d'oignon, les scientifiques les ont appelées bucky, c'est-à-dire oignons. Il peut avoir plus de 500 nanomètres de diamètre. (Lundqvist; 2008)

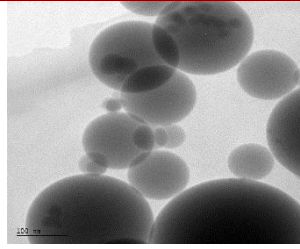


Figure 04 : Nanobilles (Lundqvist; 2008)

I.8.4. Nanoparticules

En nanotechnologie, une particule est définie comme la plus petite unité, elle possède les propriétés chimiques et physiques d'une substance volumétrique. Les nanoparticules ont des dimensions allant de 1 à 100 nanomètres. (Lundqvist; 2008)

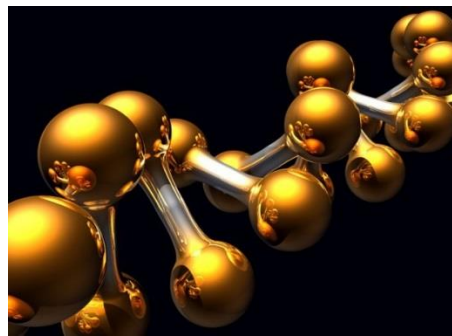


Figure 05: Nanoparticules (Lundqvist; 2008)

I.8.5. Nanotubes

Les matériaux utilisés en nanotechnologie sont soumis à une condition de base, cette condition est à l'échelle nanométrique de 1 à 100 nanomètres, de sorte que les matériaux utilisés doivent être découpés en morceaux ne dépassant pas 100 nanomètres de diamètre. (Bhatia ;2016)

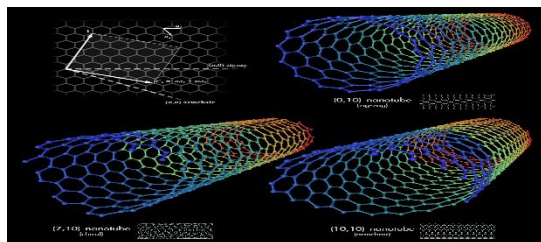


Figure 06 : Nanotubes. (Bhatia ;2016)

I.8.6. Nanofils

Ce sont des fils à une dimension, de diamètres inférieurs au nanomètre et de longueurs différentes, souvent dans un rapport supérieur à 1000 fois leur longueur sur leur largeur. Il se distingue des fils ordinaires (tridimensionnels) par la force de la conductivité électrique. (Anselmo ; 2016)

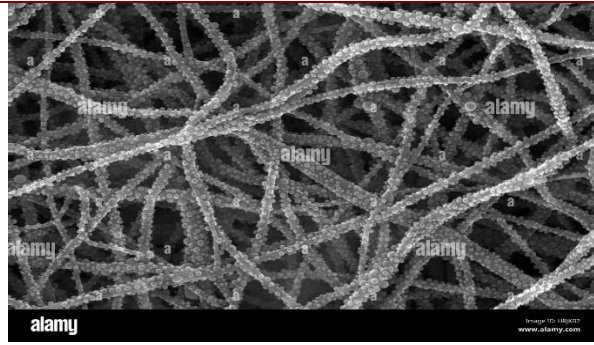


Figure 07 : Nanofils (Anselmo; 2016)

I.9. Utilisations de la nanotechnologie

I.9.1. Le domaine médical

Les scientifiques ont pu fabriquer des appareils précises de la taille des cellules sanguines pour traiter de nombreuses maladies nécessitant des interventions chirurgicales, telles que : les blocages dans les artères, ainsi que les tumeurs, et le chercheur Italien Silvano Dragonieri de l'Université de Bari a inventé un nez électronique utilisant des nanotubes de carbone qui diagnostiquent les maladies du cancer en analysant l'air qui sort des poumons lors de l'expiration. (Nadia ; 2017)

I.9.2. L'aviation

L'Agence aéronautique et spatiale américaine (NASA) a fabriqué des machines précises qui fonctionnent avec la nanotechnologie à injecter dans le corps des astronautes, dans le but de surveiller l'état de santé de leur corps et de les traiter immédiatement sans envoyer de médecin. (Calvaresi ; 2020)

I.9.3. Le domaine de l'énergie

La production de batteries de stockage qui stockent de grandes quantités d'énergie pendant de longues périodes, et produisent ainsi des voitures fonctionnant à l'énergie propre à moindre coût, et ne dépendant pas du pétrole. (Cardoso ; 2018)

I.9.4. L'Industrie

La fabrication de vêtements intelligents qui produisent de l'énergie, ou éliminent par eux-mêmes la saleté et les germes, ainsi que la fabrication de matériaux solides qui dépassent la dureté de l'acier avec un poids léger, et la fabrication de verre anti-poussière et non conducteur, en plus de la fabrication d'écrans tridimensionnels caractérisés par leur transparence et leur capacité à se plier. (Carvalho ; 2018)

I.10. L'importance de la nanotechnologie

La nanotechnologie a le potentiel de changer chaque aspect de notre vie. Au cours des deux dernières décennies, les chercheurs ont commencé à développer la capacité de manipuler la

Chapitre I Généralités sur la nanotechnologie

matière au niveau des atomes uniques et petits groupes d'atomes et de caractériser les propriétés des matériaux et des systèmes à cette échelle. **(Devaraj ; 2009)**

Cette capacité a conduit à la découverte étonnante que des amas de petits nombres d'atomes ou les molécules - les grappes à l'échelle nanométrique - ont souvent des propriétés (telles que la résistance, la résistivité électrique et conductivité et absorption optique) qui sont significativement différentes des propriétés de même matière à l'échelle de la moléculaire ou à l'échelle volumique. **(Dudhi ; 2020)**

I.11. Les difficultés face aux nanotechnologies

En nanotechnologie, on parle de particules de petite taille, ce qui signifie qu'il est difficile à les contrôler, voire à les percevoir :

- La difficulté à contrôler les particules de matériaux après les avoir retirées de leur emplacement afin de les diriger vers de nouveaux endroits.
- Imprévisibilité des résultats de l'évolution des molécules, ce qui peut signifier des résultats indésirables. **(Domínguez ; 2023)**

I.12. L'effet de la nanotechnologie

L'impact de la nanotechnologie s'étend de ses applications médicales, éthiques, mentales, juridiques et environnementales à des domaines tels que l'ingénierie, la biologie, la chimie, l'informatique, la science des matériaux et les communications.

Les principaux avantages de la nanotechnologie comprennent l'amélioration des méthodes de fabrication, les systèmes de purification de l'eau, les systèmes énergétiques, l'optimisation physique, la nanomédecine, l'amélioration des méthodes de production alimentaire, la nutrition et la fabrication automatisée d'infrastructures à grande échelle. La taille réduite dans la nanotechnologie peut permettre l'automatisation de tâches qui étaient auparavant inaccessibles aux contraintes physiques, ce qui à son tour peut réduire les besoins en main-d'œuvre humaine, en terrain ou en maintenance.

Les risques potentiels comprennent les problèmes d'environnement, de santé et de sécurité ; Les effets transitoires tels que le déplacement des industries traditionnelles à mesure que les produits de la nanotechnologie deviennent dominants, qui préoccupent les défenseurs des droits à la vie privée. Ceux-ci peuvent être particulièrement importants si les effets négatifs. **(Paul ; 2010)**

I.13. Avantages de la nanotechnologie

La nanotechnologie offre de nombreux avantages qui entrent dans de nombreux domaines de la vie, car elle contribue à améliorer considérablement de nombreux secteurs technologiques et industriels, tels que : les technologies de l'information, l'énergie, la médecine, la sécurité

Chapitre I Généralités sur la nanotechnologie

ationale, les sciences de l'environnement, la sécurité alimentaire et bien d'autres choses. La nanotechnologie adapte les structures des matériaux à très petite échelle pour obtenir des propriétés spécifiques, grâce auxquelles il peut renforcer l'efficacité des matériaux, tout en étant léger, plus durable, réactif et imbriqué, de nombreux produits commerciaux quotidiens sur le marché reposent sur la nanotechnologie. , des nanofilms transparents ou des films sur les écrans d'ordinateur, les caméras, les lunettes, les fenêtres et d'autres surfaces peuvent aider à les rendre imperméables, antireflets, résistants aux UV ou aux IR, aux rayures ou conducteurs d'électricité. (Joga ; 2021)



Chapitre II

Applications des nanotechnologies en médecine vétérinaire

I. Nanotechnologie :

I.1. Classification des nanoparticules :

Les nanoparticules sont classées selon leur origine, leur forme, leur structure et leur utilisation prévue. (Modena et al., 2019)

I.1.1. Selon leur structure et leur application en médecine vétérinaire

1) Nanoparticules polymères:

Deux polymères sont présents au début du processus : des polymères constitués, par exemple, de polyéthylène glycol (PGP), et des polymères marqués par des polysaccharides, tels que l'inuline et le chitosane, dont la structure repose sur ces polymères. Les dendrimères sont identiques en forme, mais la radiation à partir du centre des branches est plus ou moins prononcée. Cette structure nanoparticulaire est largement utilisée comme précurseur de Newcastle dans la préparation d'anticorps. (Chan et al., 2010)

2) Liposomes:

Les particules PEGylées sont des particules sphériques, biodégradables et non destructives qui se dispersent souvent pour inclure des remèdes non solubles dans l'eau grâce à un double revêtement de la coiffe phospholipidique qui recouvre différents antigènes. La surface externe protège le composant contre les attaques de l'organisme grâce à un film (Jiang et al., 2011) de polyéthylène glycol. De plus, Les anticorps gras peuvent être fixés à sa surface externe avec des antigènes chélatés. La capacité de ce type de nanoparticules à réaliser des traitements solubles et non solubles dans l'eau est généralement démontrée. (Malam et al., 2009) Les différents liposomes, solubles et insolubles dans l'eau, sont très efficaces. Grâce à leur structure biodégradable, Ils sont associés à une grande prospérité. Un autre type de liposome est constitué d'immunoliposomes conjugués à la couche externe d'antigènes (Gao et al., 2019) pour la vaccination et d'anticorps liés. Enfin, les liposomes sont très utiles pour l'administration de médicaments car ils sont hautement biodégradables. Ils présentent souvent une grande capacité à empiler simultanément des substances solubles et insolubles dans l'eau. La diffusion permet de libérer les médicaments contenus. Dans les deux cas, leur principal obstacle réside dans la faible concentration des médicaments chargés, leur courte durée d'action et leur arrivée rapide. (Gurunathan et al., 2020).

3) Fullérènes et nanotubes de carbone:

Les fullerènes de carbone sont des sphères nanométriques qui permettent aux agents pathogènes et aux cellules d'interagir directement. Ces nanotubes, composés d'une demi-sphère et d'une demi-cylindre, peuvent servir de biocapteurs pour la détection d'éléments spécifiques ou d'outils

immunologiques. De plus, leur structure en forme d'aiguille hypodermique leur confère une grande capacité à pénétrer les cellules, notamment pour le traitement de certaines maladies.

(Omacrsawa, 2012).

4) Microbivores et respirocytes :

Les cellules indépendantes transportent des globules rouges et des globules blancs (rouges et blancs) au lieu des quasi-espèces de globules rouges et de lymphocytes. Lorsqu'elles fonctionnent de manière bien contrôlée, elles utilisent l'O₂ tout en éliminant le CO₂ accumulé. Initialement, les enzymes ont transformé les microbes non indigènes éliminés pour former, à partir de nucléotides, de graisses insaturées et d'acides aminés, des molécules issues de la synthèse d'ADN. **(Surendiran et al., 2009).**

5) Nanocoques :

De forme circulaire, fixée à une feuille d'or externe, cette nanocoque est utilisée pour examiner les tumeurs malignes par irradiation laser infrarouge. Biocompatibles et non cytotoxiques, les nanocoques réduisent les forces X et peuvent être utilisées comme adjuvant en radiothérapie.

(Li et al., 2015).

6) Points quantiques :

Molécules microscopiques (2 à 10 nm) présentant une semi-conductivité sous l'effet de la lumière, elles trouvent des applications en optoélectronique. Le cadmium, le sélénium et le zinc constituent les éléments structuraux des composants semi-conducteurs. Composé d'un noyau inorganique et d'une enveloppe organique, un revêtement fluide peut être conjugué à diverses biomolécules. Le centre contient un diamant. La taille de la pierre précieuse détermine la couleur de la lumière émise. Ces dispositifs permettent de concevoir des tests simples et durables, capables de s'illuminer pendant plusieurs jours. Les points quantiques offrent de nombreuses applications en diagnostic et en immun diagnostic. **(Afsharipour et al., 2020).**

7) Nanoparticules lipidiques solides :

Les lipides possèdent un noyau lipophile, ce qui permet leur utilisation dans le traitement des tumeurs. Leur enveloppe hydrophile externe est conjuguée à différents médicaments ou anticorps hydrophiles. De plus, cette membrane externe améliore la biodisponibilité du médicament. Par ailleurs, les nanoparticules lipidiques solides cationiques peuvent lier efficacement des segments d'acides nucléiques par liaison électrostatique, permettant ainsi leur utilisation dans des thérapies **(Paliwal et al., 2020)** de haute qualité. Ces nanoparticules peuvent être administrées par voie topique, orale ou sous-cutanée. Elles peuvent acheminer efficacement les médicaments dans le système nerveux central en traversant la barrière hémato-encéphalique.

8) Nanoparticules d'oxyde de fer magnétiques:

Définies principalement par un champ magnétique externe qui guide les nanoparticules vers leurs cellules cibles via la circulation sanguine, elles sont adaptées à l'imagerie, au chauffage et à la distribution de médicaments. (Zhao et al., 2020). Leur structure comprend un noyau de fer entouré d'un film de silice fluorescent qui facilite la liaison du médicament. Une couche externe en caoutchouc permet la modification des particules. Grâce à leurs propriétés intéressantes, elles sont utilisées dans diverses applications médicales pour le diagnostic et le traitement de maladies, en tant que structures théranostiques polyvalentes. Le polyéthylène glycol (PEGlycol) est utilisé pour enrober les particules afin d'empêcher leur agrégation et de les protéger de la réaction immunitaire. En améliorant la préservation de la lumière, les enrobages de silice favorisent l'imagerie des tumeurs malignes. (Israel et al., 2020).

9) Dendrimère :

Ce sont des nanomatériaux hyperbranchés hautement solubles, composés de polymères incroyablement fins et plus petits que les cellules du corps. Injectés dans le flux sanguin, leur taille réduite et leur structure moléculaire les préservent des réactions (Scott et al., 2005). d'hypersensibilité indésirables. Leur dimension étendue leur donne l'apparence d'un arbre tridimensionnel. Des médicaments peuvent être fixés à la surface du dendrimère. Divers composés thérapeutiques, solubles ou non dans l'eau, peuvent être incorporés dans les dendrimères par liaisons physiques et chimiques ; de plus, ces médicaments peuvent être insérés dans les cavités centrales par un empilement non covalent. La conjugaison covalente de médicaments et de dendrimères empilés peut accroître leur stabilité et leur efficacité thérapeutique. Ils jouent un rôle crucial dans le traitement du cancer. Leur ramification importante caractérise les dendrimères, et leur structure complexe peut être intégrée à des médicaments utilisés en imagerie. (Carvalho et al., 2020).

De nombreuses expériences ont démontré que les nanocomposites contenant des dendrimères sont des agents antimicrobiens extrêmement efficaces contre *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli* et *Staphylococcus aureus*. Au sein de la tumeur, leur action est induite par la fixation de leur médicament ou de leur substrat nucléaire. Enfin, selon un processus approprié, des messages sont transmis lors de l'élimination des cellules cancéreuses. (Kambhampati and Kannan, 2013).

10) Nanoémulsion:

En tant qu'agents bactéricides et virucides, les nanoémulsions présentent des effets réparateurs bénéfiques. Les gouttelettes d'huile se lient à l'enveloppe/couche et s'y combinent au contact

d'une bactérie ou d'un virus grâce à la tension superficielle, permettant ainsi au médicament d'atteindre les cellules microbiennes. De plus, les nanoémulsions peuvent servir de milieu de transmission d'antigènes. De nombreux antigènes peuvent être mélangés dans une seule nanoparticule. **(Bhatt and Madhav, 2011)**. Ce sont des gouttelettes huileuses de taille nanométrique, piégées dans l'eau et recouvertes d'une fine couche de tensioactif qui modifie leurs propriétés physiques. Les émulsions huile dans eau et eau dans huile sont des types de nanoémulsions. La température de conservation optimale des nanoémulsions, obtenues par des méthodes à faible concentration, est de 4 °C à température ambiante, avec une durée de conservation supérieure à deux mois. Du fait de la constance de la libération des antigènes, les émulsions de nanoparticules eau/huile agissent comme adjuvants, favorisant la production d'anticorps à des titres élevés. Quelques chercheurs ont observé les effets de la perte de graisse sur les globules rouges et les spermatozoïdes. De nombreux audits ont conclu que les nanoémulsions sont sans danger pour les cellules eucaryotes et ne provoquent aucune toxicité. **(Krishnamoorthy et al., 2018)**.

11) Nanobulles:

Elles restent stables à température ambiante, mais se réchauffent légèrement sous l'effet des ultrasons. Elles sont fréquemment utilisées pour la distribution d'agents chimiothérapeutiques, notamment dans les tissus cancéreux. Les suspensions de nanoparticules liposomales peuvent être utilisées en thérapie génique. **(Alheshibri et al., 2016)**.

12) Nanoparticules d'aluminosilicate :

Un polyphosphate à chaîne courte est mélangé à des nanoparticules de silice pour accélérer le mécanisme naturel de coagulation, ce qui réduit les saignements. **(López-sagasetta ; 2016)**

13) Micelles polymères:

Elles contiennent un centre hydrophobe qui facilite le transport de médicaments hydrophobes. Leur forte solubilité dans l'eau est due à la présence d'une couche hydrosoluble sur le squelette hydrophobe. Des polymères amphiphiles, tels que la caprolactone ou le PLGA, ont également été développés. Généralement utilisées pour l'administration ciblée de médicaments, elles permettent le transport de produits moins solubles dans l'eau, comme le paclitaxel et l'amphotéricine B. **(Miller et al., 2013)**.

14) Nanosphères polymères:

Elles facilitent l'organisation d'un système d'administration de nanosuspension solide dépendant des macrophages pour l'infection et la séquestration en inhibant l'agrégation.

(Zheng et al., 2005).

Des polymères biodégradables ou non biodégradables ont été utilisés pour créer des structures rondes et uniformes d'un diamètre inférieur au micron. Le récepteur du facteur de croissance épidermique humain de type 2 et la croissance des cellules cancéreuses in vitro peuvent être étudiés grâce aux technologies d'administration transdermique de médicaments. **(Liao et al., 2010).**

15) Nanoparticules métalliques:

L'or et l'argent figurent parmi les métaux importants principalement utilisés dans le traitement du cancer. Une autre forme de nanoparticule métallique est constituée d'un noyau d'argent-manganèse recouvert d'une couche protectrice de dioxyde de manganèse. Ces nanoparticules sont liées à divers anticorps et radionucléides pour complexer et améliorer les capacités d'imagerie. La liaison non spécifique est favorisée par le polyéthylène glycol, qui permet aux particules comestibles non ciblées de rester attachées à ce dernier. D'autres nanoparticules métalliques ont été utilisées en traitement, notamment les nanoparticules bimétalliques, telles que les nanoparticules argent/or et argent-sélénium. **(Thakkar et al., 2010)**

I.1.2 .Selon leur origine

Les nanoparticules biologiques, inorganiques et hybrides sont les trois types différents de nanoparticules. **(Hood et al., 2014).**

1. Nanomatériaux inorganiques :

Des études préliminaires ont démontré leur stabilité, leur biodisponibilité et leur faible cytotoxicité.

Une fois configurés et intégrés, ils présentent des propriétés électriques et optiques inédites, modulables par l'assemblage. Parmi ces matériaux figurent des matériaux inorganiques tels que l'or, l'argent et le phosphate de calcium. **(Rao et al., 2007).**

2. Nanomatériaux organiques

3. Nanoparticules de protéines et de peptides :

Grâce à leur faible toxicité, leur biodégradabilité et leur biosimilarité, ces polymères sont généralement utilisés dans des applications plus sophistiquées (par exemple, des bioproduits de haute qualité, comme la gélatine). Un renforcement différentiel est possible, notamment par la coopération de plusieurs charges utiles. **(Shemetov et al., 2012).** La gélification de type A est obtenue par extraction acide, tandis que celle de type B est réalisée par séparation basique et présente un point isoélectrique variable. Le contenu génétique héréditaire peut être stocké sous forme de stigmates co-stockés avec des opérandes disponibles dans des nanoparticules à base de blanc d'œuf. **(Wei et al., 2017).**

4. Nanoparticules hybrides

Elles créent une structure hybride polymère-lipide en combinant diverses nanoparticules, telles que des nanoparticules polymères et des liposomes. Le composé résultant possède un squelette de polymères hydrophobes biodégradables recouvert de principes actifs hydrophiles, permettant une libération simultanée du médicament. La quantité d'eau pénétrant et la quantité de médicament libérée par les nanoparticules sont contrôlées par la couche lipidique. **(Sailor and Park, 2012).**

I.1.3 .Selon leur forme

Leur finalité les classe selon leur usage prévu (thérapeutique, diagnostique, distribution de vaccins ou nutritionnel). **(Calvaresi, 2020).**

I.1.4 .Classification diverse

1 .Structures immunostimulantes : il s'agit de particules adjuvantes de saponine à structure supramoléculaire. Leur fonction principale est d'absorber divers antigènes viraux en établissant une relation hydrophobe avec les protéines d'enveloppe virale. **(Muluh et al., 2021).**

2 .Particules pseudo-virales : particules dont la taille varie de 20 nm à 800 nm et qui s'auto-assemblent. Elles réactivent ainsi les réactions fortement immunodéficientes sans nécessiter de contamination, car elles sont dépourvues d'acide nucléique. **(Zeltins, 2013).**

3. Elles préconisent l'utilisation de complexes protéiques quaternaires dans les vaccins humains et animaux. **(López-Sagaseta et al., 2016).**

II. Préparation et caractérisation des nanoparticules

II.1 .Les nanoparticules peuvent être préparées de différentes manières:

II.1.1 .Méthode d'émulsion-évaporation du solvant :

Elle se divise en deux étapes. Cette procédure est ensuite modifiée pour permettre une émulsification à haute pression et une autre technique appelée évaporation du solvant. **(Nava-Arzaluz et al., 2012)**

II.1.2 .Technique de double émulsion et dissipation :

En combinant des solutions de polymères organiques avec des solutions de médicaments hydrophiles et en agitant vigoureusement pour créer des émulsions eau/huile, le procédé encapsule les médicaments hydrosolubles. **(Martins et al., 2018).**

II.1.3 .Méthode de relargage salin :

L'effet de relargage est utilisé pour éliminer un solvant miscible à l'eau d'une solution liquide. **(Galindo-Rodriguez et al., 2004).**

II.1.4 .Méthode émulsion-diffusion :

Ce procédé consiste à dissoudre partiellement le polymère dans une solution miscible à l'eau, puis à l'immerger dans l'eau. À terme, l'émulsion ainsi formée constitue un milieu aqueux contenant un stabilisant, permettant la diffusion du polymère vers l'extérieur et la formation de nanosphères ou de nanocapsules. Parmi les inconvénients, on note la quantité importante d'eau à traiter, ce qui ralentit la mise en œuvre du procédé. (Tiruwa, 2016).

II.1.5. Méthode de précipitation / déplacement du solvant :

Précipitation d'un polymère préformé à partir d'une structure fixe et dispersion d'une substance normalement soluble dans un milieu fluide sans ajout de tensioactif. Des médicaments comme le CH_3CO ou l'éthanol sont dissous dans de l'eau semi-polaire. Cette méthode convient aux comprimés peu efficaces jusqu'à leur dissolution complète. (Hernández-Giottonini et al., 2020)

II.2 .Nombreuses techniques de caractérisation des nanoparticules:

II.2.1 .Taille des nanoparticules :

La taille des particules influe sur la dispersion du médicament. La surface des petits objets est plus grande. La limite d'empilement du médicament peut être exposée à la surface de la molécule en tant que produit final afin d'accélérer la libération du médicament. (Haiss et al., 2007).

II.2.1.1. Détermination de la taille des nanoparticules :

II.2.1.1.1. Microscope électronique à balayage (MEB) :

Le microscope électronique à balayage fournit des données contraintes sur la dispersion de la population réelle et sa distribution normale. Cette approche est longue, coûteuse et nécessite souvent une compréhension mutuelle de l'estimation de la distribution. (Medetalibeyoğlu et al., 2018).

II.2.1.1.2. Microscope électronique à transmission (MET) :

La microscopie électronique à transmission (MET) est principalement utilisée pour vérifier la morphologie des nanoparticules après leur traitement. (Zhu et al., 2018).

II.2.1.1.3- Microscopie à force atomique (AFM) :

La topographie de surface et les profils de rugosité des nanoparticules sont déterminés à l'aide de photographies AFM 2D et 3D. (Takechi-Haraya et al., 2018).

II.2.1.1.4. Potentiel zêta (ZP) :

Le potentiel zêta (ZP) est utilisé pour déterminer la taille et la charge surfacique des nanoparticules. (Parizad et al., 2018).

II.2.1.1.5. Hydrophobie de surface (SH) :

La taille des nanoparticules préparées a été déterminée par différentes méthodes, notamment la chromatographie d'interaction hydrophobe, le fractionnement biphasique et l'adsorption de sondes. (Valsesia et al., 2018).

III. Applications des nanotechnologies :

La nanotechnologie est saluée comme une approche révolutionnaire pour résoudre divers problèmes, notamment la santé et la production animales.

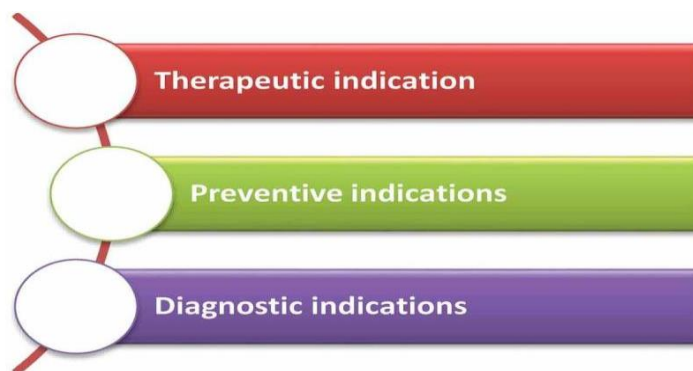


Figure 08. Diverses applications de la nanotechnologie en médecine vétérinaire. (Bai et al., 2018)

III.1. Applications des nanotechnologies en médecine vétérinaire

III.1.1. Administration de médicaments : Le mot « médicament » est dérivé du grec « drogue », qui signifie herbes séchées. Traditionnellement, les plantes étaient largement utilisées pour traiter les maladies humaines et animales. Un médicament peut être défini comme « une substance capable de modifier l'activité physiologique d'un individu ». On distingue ainsi deux grandes catégories de médicaments : (Bose ; 2021) les drogues récréatives et 2 les médicaments. En médecine vétérinaire, nous nous intéressons ici uniquement aux médicaments. L'administration de médicaments désigne les formulations et les systèmes permettant de transporter un composé pharmaceutique dans l'organisme afin d'obtenir l'effet thérapeutique recherché en toute sécurité. Les médicaments peuvent être administrés à l'animal par différentes voies : orale, inhalation, application cutanée (massage à l'huile, gouttes nasales, gouttes ophtalmiques) et, bien sûr, la voie d'administration la plus importante : l'injection. Les injections peuvent être classées en différents types : (1) intramusculaire, (2) sous-cutanée, (3) intrapéritonéale et (4) intraveineuse. Les médecins ont constaté que la biodisponibilité du médicament est beaucoup plus faible pour toutes les voies d'administration autres que la voie intraveineuse. (Lemmerman ; 2020)

Afin de maintenir une biodisponibilité élevée, l'administration intraveineuse est privilégiée. Cependant, lors de l'administration par un vétérinaire, des difficultés peuvent survenir : insolubilité en milieu aqueux, distribution non spécifique, faible biodisponibilité, nécessité d'administrer des doses élevées en raison d'une mauvaise absorption, absence de profil de libération optimal, toxicité liée à une exposition chronique, etc. C'est pourquoi les systèmes d'administration de médicaments basés sur les nanotechnologies ont suscité l'espoir. Ces systèmes reposent sur trois principes : **(1)** l'encapsulation efficace du médicament, **(2)** son acheminement précis vers la zone ciblée, **(3)** sa libération efficace au niveau de cette zone.

Environ 40 % des formulations récemment développées sont superflues pour l'industrie pharmaceutique et peuvent s'avérer inefficaces pour les patients en raison d'une faible biodisponibilité due à une faible solubilité dans l'eau ou à une perméabilité membranaire insuffisante. L'utilisation des formulations conventionnelles est limitée par une libération du médicament inefficace, une faible solubilité et leur toxicité. Les nouvelles technologies d'administration de médicaments basées sur les nanomatériaux offrent une perspective prometteuse pour surmonter ces difficultés. L'idée de cibler sélectivement des types cellulaires spécifiques à l'aide de nanoparticules fonctionnalisées avec des substances biologiquement actives spécifiques, telles que des protéines de surface cellulaire ou des récepteurs de cytokines, est particulièrement intéressante. **(Wu ; 2023)**

L'essor des nanotechnologies a coïncidé avec l'émergence des applications biologiques. Les nanoparticules, utilisées comme vecteurs de médicaments, ont été développées pour la première fois par Spieser et ses collaborateurs à la fin des années 1960. Au début des années 1970, des nanoparticules de polyacrylamide réticulé ont été produites. Scheffel et al. ont mis au point un procédé de production de particules d'albumine radiomarquées pour l'imagerie en médecine nucléaire. Widder et al. ont incorporé des particules magnétiques dans les nanoparticules afin de cibler ces dernières par des champs magnétiques. Il existe deux types de nanoparticules : les nanosphères. Ce sont des particules sphériques à noyau solide, contenant un médicament incorporé dans la matrice ou adsorbé à leur surface. **(Kakinen ; 2024)**

Nano-encapsules : Il s'agit de systèmes vésiculaires dans lesquels le médicament est encapsulé au sein d'un noyau central entouré d'une gaine polymère. Cette propriété a été exploitée pour l'imagerie et le traitement du cancer chez l'animal et chez l'homme. L'utilisation de nanoparticules conjuguées à des peptides exprimés par les cellules cancéreuses permet une liaison sélective à ces cellules et la libération ciblée de l'agent thérapeutique, minimisant ainsi

son impact sur les tissus sains et, par conséquent, les effets secondaires. Cette même approche d'administration de médicaments est applicable en médecine vétérinaire. **(Wei ; 2021)**

Différents systèmes d'administration de médicaments intégrant des produits nanotechnologiques tels que des nanotubes, des dendrimères ou des nanocoques recouvertes d'or peuvent être conçus pour réagir à la lumière (infrarouge et laser) ou à la chaleur, et ainsi être activés et désactivés. La libération sélective de médicaments, activée par des stimuli spécifiques, est également possible grâce à l'utilisation de systèmes bio-nano électrochimiques automatisés, appelés BioNEMS. Ces systèmes peuvent être implantés à proximité d'un vaisseau sanguin, par voie intramusculaire ou sous-cutanée, et libérer leur contenu périodiquement pour l'administration de médicaments thérapeutiques ou la surveillance post-opératoire d'animaux. L'utilisation des Bio NEMS minimise l'intervention humaine, puisqu'ils peuvent être activés automatiquement.

external stimuli such as radiation. The same reaction can be evoked by internal cellular signaling associated with tissue damage, such as increase of local temperature and/or release of cytokines. After stimulation, BioNEMS can respond by releasing antimicrobial agents or hormones and cytokines, leading to tissue regeneration and accelerated healing. **(Peng ; 2022)**

III.1.2. Ciblage thérapeutique :

Le ciblage thérapeutique est l'objectif principal de la recherche et du développement pharmaceutiques. Il consiste à optimiser l'indice thérapeutique d'un médicament en localisant précisément son activité pharmacologique au site ou à l'organe d'action. Ceci le distingue du ciblage classique où le récepteur spécifique du médicament est la cible et où l'objectif est d'améliorer l'affinité et la liaison à ces récepteurs. Le ciblage thérapeutique peut être réalisé par des systèmes physiques, biologiques ou moléculaires permettant d'obtenir une forte concentration d'agents pharmacologiquement actifs au niveau des sites physiopathologiquement pertinents. Si l'administration du médicament à un site spécifique est réussie, on observe une réduction significative de la toxicité et de la dose du médicament, ainsi qu'une amélioration de l'efficacité du traitement. **(Das R ; 2023)**

III.1.3. Administration transdermique de médicaments :

La nanotechnologie joue un rôle prometteur dans les applications transdermiques. Les médicaments composés de nanoparticules peuvent être efficacement délivrés directement dans l'épiderme. Les systèmes d'administration transdermique de médicaments comprennent les dendrimères, largement utilisés pour administrer des médicaments, des vaccins et des agents chimiothérapeutiques. **(Rizzo ; 2013)**

III.2. Utilisations potentielles des nanotechnologies dans la recherche médicale :

III.2.1. Fins thérapeutiques:

Les caractéristiques physico-chimiques des nanoparticules (NP) lors de leur fabrication, en fonction de l'application prévue, permettent une grande variété de formulations. Il est ainsi possible de personnaliser les traitements et les diagnostics. **(Kamaly et al., 2016)**. Elles permettent d'intégrer des informations dans un contexte unique, incluant tous les éléments nécessaires à leur fonctionnement. Grâce à leur rapport surface/volume élevé, leur utilisation permet d'incorporer des charges utiles importantes. **(Lim et al., 2018)**. Leur résilience leur permet de résister à des conditions extrêmes de poids et de température. De par leur taille réduite, elles peuvent franchir la barrière hémato-encéphalique et atteindre facilement leurs sites cibles, échappant ainsi à leur détection et à leur élimination. Cependant, les NP peuvent s'intégrer rapidement à la structure normale de l'organisme, provoquant des réactions immunologiques indésirables. **(Varoufakis, 2015)**

L'administration de diverses préparations par capsules injectables à usage local est possible.

Un suivi continu du traitement/diagnostic est possible. Les NP sont conçues pour contrôler la distribution des médicaments. Les nanoparticules (NP) ciblent avec succès et précision les lésions névrotiques et s'y accumulent, ce qui permet une thérapie plus efficace, une biodisponibilité accrue des médicaments et une réduction de la durée du traitement, deux avantages ayant un impact économique significatif. Elles favorisent la libération de diverses hormones, antibiotiques et antioxydants. **(Nagaich et al., 2016)**. Elles permettent l'éradication de pathogènes intracellulaires tels que la brucellose et la leishmaniose, ainsi que de pathogènes multirésistants comme le SARM. Les cellules cancéreuses peuvent être éliminées grâce aux NP par le transport d'agents chimiothérapeutiques, le réchauffement des cellules et une attaque immunologique ciblée. **(Nathwani et al., 2009)**. L'utilisation de nanoparticules enrobées de cellules tumorales permet d'éradiquer les cellules cancéreuses métastatiques qui se sont propagées loin du site initial de la lésion.

Divers matériaux, tels que les polymères, les lipides et les métaux, peuvent être utilisés ; ils contiennent souvent divers éléments, comme des agents chimiothérapeutiques et des anxiolytiques, des agents de séquences d'imagerie et de détection spécifiques, des acides nucléiques et des protéines, ainsi que des additifs antimicrobiens. Les antimicrobiens nanostructurés peuvent être utilisés pour traiter diverses infections microbiennes, dont la tuberculose. **(Nathwani et al., 2009)**. Les nanovecteurs sont considérés comme un élément essentiel de la nanomédecine, comme le montrent de nombreuses études démontrant leur

efficacité dans le traitement de nombreuses maladies par des approches pharmacologiques classiques. À l'instar des nanoparticules, le développement d'agents chimiothérapeutiques s'avère plus efficace pour traiter les affections chroniques, avec une toxicité et un blocage cellulaire bien moindres que les chimiothérapies traditionnelles. L'efficacité des nanoparticules dans le contrôle de la croissance tumorale, avec une toxicité réduite, a été démontrée par la formulation de doxorubicine et de paclitaxel, actifs contre la plupart des lignées cellulaires résistantes au cancer. **(Kim et al., 2010).**

III.2.2. Indications préventives :

Ce procédé ouvre de nouvelles perspectives pour le développement de nouveaux anticorps grâce à des adjuvants hautement stables. De nombreuses études préliminaires ont permis la création de capteurs implantés sous la peau des patients afin de surveiller le nombre de protéines cibles spécifiques. **(Ali et al., 2021)**

III.2.3. Indications diagnostiques:

L'association de nanoparticules à des anticorps spécifiques des tumeurs permet de prédire précocement le pronostic de la plupart des cancers, grâce à une meilleure survie sans progression des métastases et à une prise en charge globale plus efficace. Utilisée en imagerie médicale, cette technique peut être employée en continu sans risque **(Baetke et al., 2015)**. de lésions hépatiques ou rénales et son utilisation est éprouvée depuis longtemps. La nanorobotique peut être employée pour des interventions diagnostiques et thérapeutiques à l'échelle miniature. Elle permet également le transport de nanocaméras pour des chirurgies d'assistance continue. Elle offre une capacité de balayage et de diagnostic extrêmement rapide. Grâce à l'utilisation de puces à nano-réseaux haute densité, elle permet d'identifier un large éventail de gènes et de protéines. **(Anselmo and Mitragotri, 2016)**

III.3. Nanotechnologies en médecine et sciences vétérinaires :

Dans des domaines tels que la thérapeutique, le diagnostic, l'ingénierie tissulaire, la fabrication de vaccins et les désinfectants, les nanotechnologies ont un impact significatif sur la prescription vétérinaire. Le bien-être, l'élevage, la reproduction et la subsistance des animaux bénéficient des nanotechnologies. Le traitement étant administré directement aux cellules cibles, il peut être utilisé à faibles doses, réduisant ainsi la rétention d'opioïdes et les délais de sevrage chez les animaux d'élevage. **(Bai et al., 2018).**

III.3.1. Applications potentielles en production animale :

Plusieurs applications futures des nanotechnologies en élevage concernent la formulation de médicaments, de vitamines, de probiotiques et de compléments alimentaires, ainsi que

l'identification et l'élimination d'agents infectieux sans chirurgie grâce aux nanoparticules. Cependant, l'utilisation systématique d'antibiotiques en production animale laisse des traces qui affectent le consommateur final, même si les nanotechnologies permettent de réduire la gamme d'antibiotiques à utiliser, **(Fattal et al ;1989)** Ces chercheurs ont étudié l'impact de l'ampicilline encapsulée dans des nanoparticules sur des souris infectées par *Salmonella typhimurium*. Leurs résultats ont montré que les souris traitées à l'ampicilline et aux nanoparticules présentaient un taux de survie comparable à celui du groupe témoin, à ceci près que ce dernier a nécessité 40 fois plus d'antibiotiques pour obtenir le même résultat. **(Singh et al., 2020)**. La production animale doit tirer parti de cette avancée en utilisant des nanofertilisants qui apportent des vitamines à des endroits précis du fourrage, en quantités adaptées. **(Singh et al., 2020)**. Ceci peut être réalisé grâce aux propriétés des aimants. De même, les nanomatériaux combinés à des hydrogels ou des zéolites pourraient améliorer la qualité de l'eau potable en absorbant les composés toxiques. **(Servatan et al., 2020)**.

III.3.2. Santé et nutrition animales :

Les nano-minéraux sont peu coûteux, utilisables en petites quantités et agissent comme facteurs de croissance et stimulants immunitaires, offrant de nombreux avantages pour le développement de l'alimentation animale. **(Manuja et al., 2012)**. De même, ils peuvent contribuer à la manipulation des agents pathogènes présents dans les aliments et à l'amélioration de la fermentation ruminale. L'oxyde de zinc nano est un nano-minéral prometteur utilisé pour augmenter le taux de croissance, la réponse immunitaire et traiter les maladies affectant la reproduction du bétail. Le zinc nano devrait être utilisé pour prévenir la diarrhée chez les jeunes porcelets. Le zinc nano réduit le nombre de cellules somatiques chez les vaches laitières atteintes de mammites subcliniques. **(Patil et al., 2009)**.

La microencapsulation des ingrédients alimentaires les protège de l'oxydation et de la dégradation causées par la lumière et l'oxydation ; elle les protège également de la lyse par les enzymes du système digestif telles que les protéases ; elle améliore également la consistance des additifs lipophiles à différentes valeurs de pH, ce qui améliore leur dispersion et leur mélange, prolongeant ainsi leur durée d'action. La mycotoxicose est un problème important qui affecte à la fois le bétail et les humains. Elle a été détectée dans environ 25 % des aliments pour animaux. **(Tatli Seven et al., 2018)**.

III.3.3. Reproduction et élevage:

De nombreuses applications des nanotechnologies sont utilisées pour diagnostiquer et gérer les problèmes de fertilité, comme l'identification des chaleurs, la congélation de sperme et l'intervention directe lors du vêlage. **(Patil et al., 2009)**. Les nanotechnologies peuvent

également servir à traiter divers problèmes de fertilité, comme la conservation du placenta. De plus, les nanoparticules contribuent significativement à la protection et au maintien des hormones sexuelles, **(El-Sayed and Kamel, 2020)**, telles que les hormones stéroïdiennes et les hormones gonadotropes.

Les nanotubes constituent l'un des dispositifs les plus avancés et performants en production animale. Compte tenu du coût élevé de leur production et de leur diffusion, des modifications de l'œstradiol sanguin peuvent être insérées avec précision sous la peau. **(Woldeamanuel et al., 2021)**. Les nanotubes peuvent être utilisés pour détecter les chaleurs chez les animaux grâce à leur capacité à se lier aux anticorps anti-œstradiol pendant les chaleurs par fluorescence ou infrarouge. Par ailleurs, la microfluidique a facilité les processus de fécondation in vitro à l'ère moderne. En fonction de la toxicité de certaines nanoparticules métalliques, notamment le cadmium, des nanoparticules stérilisantes peuvent être utilisées comme contraceptifs chez les animaux. **(Woldeamanuel et al., 2021)**.

III.3.4. Thérapeutique vétérinaire :

La nanotechnologie devrait jouer un rôle important en thérapeutique vétérinaire à l'avenir. **(Meena et al., 2018)**. À titre d'exemple, citons l'efficacité des thérapies par nanovecteurs mixtes dans le traitement des maladies affectant les animaux destinés à la consommation humaine. **(Meena et al., 2018)**.

Selon des études récentes, les points quantiques (PQ) peuvent être utilisés pour l'imagerie in vivo chez les petits animaux. De plus, la nanotechnologie est utilisée pour traiter les trypanosomes, comme le montre la distribution améliorée du diminazène (DMZ) au site d'intervention. Les nanoparticules cationiques poreuses utilisées ont permis d'améliorer le ciblage des trypanosomes. Les paramètres de santé ont été évalués après la thérapie par nanoparticules et ont montré une diminution partielle des symptômes allergiques. **(Senel, 2020)**.

III.3.5. Nanovaccins et nano adjuvants

Grâce à leur potentiel d'amélioration des réponses immunologiques, les nanoparticules sont de plus en plus utilisées dans le développement des vaccins vétérinaires. Elles peuvent également agir comme adjuvant, en ralentissant la libération des antigènes et en améliorant ainsi

l'efficacité vaccinale. L'utilisation de nanoparticules pour le transport des antigènes améliore l'efficacité vaccinale en ciblant les ganglions lymphatiques. (Oyewumi et al., 2010).

III.3.5.1. Des exemples illustrent les différents types de nanovaccins utilisés en médecine vétérinaire

A. Le vaccin recombinant à base de spores de *Bacillus anthracis* et le vaccin antigrippal sont deux exemples de vaccins nanoémulsionnés. (Youssef et al., 2019).

B. Après administration orale, les vaccins chargés sur des nanoparticules de PLGA induisent des réponses immunitaires de type IgG et IgA. Ces vaccins protègent notamment contre *Helicobacter pylori*, le tétanos, la coqueluche et le virus parainfluenza bovin de type III. (Sarti et al., 2011).

C. Le vaccin recombinant contre la SOD de *Leishmania* est un exemple de vaccin chargé sur des nanoparticules de chitosane et administré par voie sous-cutanée.

De plus, le vaccin antituberculeux chargé sur du chitosane est administré par voie respiratoire. Les vaccins contre l'antigène pneumococcique A et contre *Streptococcus equi* sont également chargés sur du chitosane et administrés par voie intranasale. Un vaccin à base de nanoparticules d'or est utilisé pour protéger contre la fièvre aphteuse. (Youssef et al., 2019).

D. Les vaccinations contre la capside vide du virus et les particules centrales sont nocives pour les chevaux et sont appelées peste équine africaine. (Youssef et al., 2019).

III.3.6 .Pet Animal Care:

Nanotechnology was often used in pet animal treatment to develop novel products.

Due to their physicochemical properties, they are used to increase the performance of surface fresheners and disinfectants. For instance, silver nanoparticles are incorporated into topical shampoos. (Devaraj et al., 2009).

III.3.7. Systèmes d'administration de médicaments :

En pharmacologie, les nanoparticules constituent un système d'administration de médicaments idéal pour protéger les animaux contre les virus ou les maladies bactériennes, favoriser la cicatrisation et soulager l'inconfort (Wilczewska et al., 2012). De plus, ces nouvelles substances facilitent l'acheminement des médicaments vers des tissus et des organes spécifiques. Ces structures peuvent influencer la vitesse d'assimilation, d'absorption, de digestion et d'élimination des médicaments ou d'autres substances dans l'organisme, permettant ainsi d'observer la pharmacocinétique, d'assurer la biodisponibilité et la stabilité, de prolonger la durée d'action, de réduire la fréquence des doses nécessaires au maintien des réponses thérapeutiques et de diminuer la production de toxines. (Suri et al., 2007).

III.3.8. Limites actuelles et sécurité des nanoparticules :

Bien que la plupart des nanoparticules soient sans danger, certaines peuvent avoir des effets indésirables. **(Hofmann-Amttenbrink et al., 2015)** Par exemple, une exposition pulmonaire prolongée aux nanotubes de carbone peut entraîner des problèmes de reproduction chez les employés de l'industrie pharmaceutique. De plus, la formation de nanoparticules potentiellement dangereuses, issues de l'oxyde de fer en périphérie ou de dommages, est accélérée par une rupture de l'interaction entre le médicament et les particules. **(Singh et al., 2018)**. Ces dernières peuvent alors acheminer le médicament vers les tissus sains plutôt que vers les tissus cibles.

L'arrivée incomplète du médicament loin du tissu ou de l'organe cible peut alors entraîner une toxicité pour les tissus sains et l'administration de doses sous-thérapeutiques à la zone ciblée. Leur capacité à franchir de multiples barrières organiques, comme la barrière hémato-encéphalique, peut engendrer des conséquences importantes à l'échelle mondiale, telles que la demande croissante de radionucléides. Par ailleurs, les nanofibres de carbone contribuent à l'appauvrissement de la couche d'ozone. **(Hasan et al., 2018)**.

**Chapitre III : Perspectives
diagnostiques et thérapeutiques en
médecine vétérinaire**

Chapitre III : Perspectives diagnostiques et thérapeutiques en médecine vétérinaire

I- Perspectives diagnostiques en médecine vétérinaire

Le processus diagnostique en médecine vétérinaire comprend plusieurs étapes, depuis l'examen clinique jusqu'au diagnostic final et aux recommandations de traitement (**Fig09**), où la pathologie vétérinaire joue un rôle essentiel. La pathologie vétérinaire constitue la pierre angulaire de la médecine vétérinaire et facilite le diagnostic et la compréhension des maladies animales. Par l'examen des tissus et des fluides, les pathologistes vétérinaires élucident la complexité des maladies, guidant ainsi les cliniciens dans leur recherche de diagnostics précis et de stratégies de traitement efficaces. Cependant, cette noble quête n'est pas sans difficultés. De la variabilité interspécifique à la nature insaisissable de certaines maladies, en passant par les limites des outils diagnostiques (Tableau 02), la pathologie vétérinaire est confrontée à de nombreux défis. (**stokol et al;2016**)

Qui entravent sa capacité à établir des diagnostics précis et rapides. Contrairement à la pathologie humaine, qui se concentre souvent sur une seule espèce, les pathologistes vétérinaires sont confrontés à une grande diversité d'espèces animales, chacune présentant des caractéristiques anatomiques et pathologiques uniques. Cette variabilité inhérente constitue un défi majeur, exigeant des pathologistes vétérinaires de posséder de vastes connaissances et une expertise pointue pour diagnostiquer avec précision les maladies chez de nombreuses espèces. De plus, la complexité de la présentation clinique des maladies complique davantage le diagnostic, car différentes maladies peuvent se manifester par des signes cliniques et pathologiques similaires, ce qui peut entraîner des erreurs de diagnostic et des retards de traitement. Les limites des outils diagnostiques actuels représentent un autre défi en pathologie vétérinaire. Bien que les progrès technologiques aient permis d'élargir le champ d'application des outils diagnostiques, la pathologie vétérinaire reste un défi. (**knoblaugh;2018**)

Chapitre III : Perspectives diagnostiques et thérapeutiques en médecine vétérinaire



Figure 09 : Représentation visuelle des étapes typiques du processus diagnostique en pathologie (ochuko ;2024)

En raison de contraintes financières ou d'infrastructures inadéquates, de nombreuses cliniques et laboratoires peuvent ne pas avoir accès à ces outils de diagnostic. Par conséquent, les pathologistes vétérinaires peuvent être amenés à utiliser des méthodes de diagnostic conventionnelles qui présentent des limitations intrinsèques en termes de sensibilité et de spécificité. (knoblauch;2018)

Tab02 : Quelques défis majeurs en pathologie vétérinaire : leurs causes, leurs impacts et leurs solutions potentielles. (Hoenerhoff;2021)

Défis	Impact	Solutions proposées
Variabilité des espèces	Diagnostic erroné, traitement inapproprié	Formation spécifique à l'espèce, outils de diagnostic avancés
Mimétisme de la maladie	Diagnostic tardif, mauvais pronostic	Diagnostic moléculaire, Outils Assistés par l'IA

Chapitre III : Perspectives diagnostiques et thérapeutiques en médecine vétérinaire

Coût élevé des outils de pointe	Accessibilité limitée	Subventions, programmes de location, partenariats
---------------------------------	-----------------------	---

Les résultats positifs et les faux négatifs peuvent compromettre la précision des diagnostics, soulignant ainsi le besoin urgent de techniques diagnostiques améliorées et de protocoles standardisés afin de garantir des résultats **(Bertram ; 2017)** cohérents et fiables. De plus, l'émergence de nouveaux agents pathogènes et de zoonoses souligne l'importance de la vigilance et de la collaboration entre les secteurs de la santé vétérinaire et humaine pour identifier et gérer efficacement les menaces potentielles pour la santé publique. **(Belay;2017)**

1. Complexité de la présentation de la maladie

• Variabilité des espèces

En pathologie vétérinaire, la variabilité interspécifique représente un défi majeur pour le diagnostic précis des maladies. Les recherches indiquent que cette variabilité peut impacter significativement la précision des diagnostics, avec des études montrant un taux d'erreurs diagnostiques pouvant atteindre 25 % dans les cas impliquant des cliniques vétérinaires multi-espèces.**(Hugen et Dominguez;2023)** Par exemple, alors que le parvovirus canin provoque principalement chez le chien des signes gastro-intestinaux graves, tels que vomissements et diarrhée, **(Gülersoy;2021)** sa présentation chez d'autres espèces, comme le chat, peut être très différente. Chez le chat, le parvovirus peut se manifester par une panleucopénie féline, avec des signes tels que fièvre, léthargie et déshydratation sévère. **(Abdel;2020)**

Une autre illustration réside dans les différentes manifestations des infections respiratoires chez diverses espèces (Tableau 02). Chez les bovins, *Mycobacterium bovis* est généralement responsable de la tuberculose bovine (TBb), qui se manifeste par des signes respiratoires chroniques et des granulomes, principalement au niveau des poumons et des ganglions lymphatiques. En revanche, chez l'homme, *M. bovis* peut provoquer une tuberculose extra pulmonaire affectant des organes tels que les reins et les os, et se présente souvent avec des symptômes systémiques comme la fièvre et la perte de poids. Ces disparités dans les signes cliniques soulignent la nécessité pour les vétérinaires de prendre en compte l'espèce concernée. **(Borham ;2022)**

Chapitre III : Perspectives diagnostiques et thérapeutiques en médecine vétérinaire

Tab03 : Comment les infections respiratoires peuvent se manifester différemment chez diverses espèces (**Borham ;2022**)

Espèces	Signes cliniques	Défi diagnostique
Bétail	Toux, écoulement nasal, diminution de l'appétit, fièvre	Symptômes se chevauchant avec ceux d'autres maladies
Cheval	Écoulement nasal, toux, intolérance à l'effort	Signes induits par l'exercice, réponse variable aux traitements
Oiseau	Éternuements, plumes ébouriffées, écoulement nasal	Petite taille des spécimens, anatomie aviaire
Reptile	Léthargie, respiration bouche ouverte, sifflements respiratoires, perte de poids	Absence d'équipement spécialisé, physiologie différente de celle des mammifères

Tab 04 : Facteurs de différenciation entre l'EPM (La myéloencéphalite protozoaire équine) et la malformation vertébrale cervicale (syndrome de Wobbler). (**Borham ;2022**)

Fonctionnalité	GPE Gastrostomie percutanée endoscopique	Malformation vertébrale cervicale (syndrome de Wobbler)
Etiologies	Causée par des parasites protozoaires (Sarcocystis neurona, Neospora hughesi)	Maladie orthopédique du développement provoquant une instabilité vertébrale cervicale
Âge d'apparition	Peut survenir à tout âge, plus fréquemment chez les jeunes chevaux et les chevaux âgés.	Cela touche généralement les jeunes chevaux (de 6 mois à 3 ans).
Signes cliniques	Ataxie asymétrique, atrophie musculaire, faiblesse, déficits des nerfs crâniens	Ataxie symétrique, faiblesse musculaire, spasticité, troubles de la marche, généralement sans atrophie musculaire
Progression	L'évolution peut être aiguë ou chronique ; les signes peuvent persister puis s'atténuer.	Progressive, s'aggravant souvent lentement avec le temps

Chapitre III : Perspectives diagnostiques et thérapeutiques en médecine vétérinaire

Examen neurologique	Déficits asymétriques, affectant souvent un côté plus que l'autre.	Déficits symétriques, affectant les deux côtés de manière égale.
Réponse au traitement	Souvent sensible au traitement antiprotozoaire (par exemple, ponazuril, diclazuril).	Réponse limitée au traitement médical ; une intervention chirurgicale (par exemple, une stabilisation vertébrale) peut être envisagée.
Diagnostic	Présence d'anticorps sériques et dans le LCR dirigés contre <i>S. neurona</i> ou <i>N. hughesi</i> ; analyse du LCR	Les radiographies montrent un rétrécissement du canal vertébral, la myélographie met en évidence une compression.
Pronostic	Variable, dépend de la gravité et de la réponse au traitement	État réservé à médiocre sans intervention chirurgicale
Tests communs	Ponction de LCR, Western blot, PCR, IFAT, sérologie	Radiographies cervicales, myélographie, tomodensitométrie, IRM
Signes spécifiques	Inclinaison de la tête, paralysie du nerf facial, amyotrophie asymétrique	Ataxie des membres postérieurs plus marquée que celle des membres antérieurs, usure anormale des sabots antérieurs
Notes complémentaires	Souvent, des antécédents de stress ou d'immunosuppression précèdent les signes.	Les poussées de croissance ou un traumatisme peuvent déclencher des signes

Les réponses physiologiques spécifiques des animaux aux agents pathogènes leur permettent d'éviter les erreurs de diagnostic et d'assurer un traitement approprié. Ainsi, en comprenant et en tenant compte de la variabilité interspécifique, les vétérinaires pathologistes peuvent améliorer la précision de leurs diagnostics et, en fin de compte, optimiser la santé de leurs patients.

- **Mimétisme de la maladie**

Le mimétisme des maladies représente un défi supplémentaire en pathologie vétérinaire, car certaines affections peuvent présenter des signes cliniques similaires malgré des causes sous-

Chapitre III : Perspectives diagnostiques et thérapeutiques en médecine vétérinaire

jacentes différentes. Ce défi est illustré par la myéloencéphalite protozoaire équine (EPM) et la malformation vertébrale cervicale (syndrome de Wobbler) chez le cheval (Tableau 3). Ces deux affections peuvent entraîner des déficits neurologiques tels que l'ataxie et la faiblesse musculaire, ce qui rend leur différenciation difficile sur la seule base des signes cliniques. Cependant, l'EPM est causée par une infection protozoaire, tandis que le syndrome de Wobbler est caractérisé par une compression de la moelle épinière due à une malformation ou une instabilité vertébrale. **(Bedenice; 2022)** La distinction précise entre ces deux affections est cruciale pour la mise en œuvre de stratégies thérapeutiques appropriées et l'amélioration du pronostic des patients. Par exemple, une étude a révélé que les erreurs de diagnostic dues au mimétisme des maladies en neurologie équine ont entraîné un retard de traitement dans 30 % **(Bedenice; 2022)**

2. Limites des outils de diagnostic actuels

- Sensibilité et spécificité

Les limites des outils diagnostiques actuels, notamment en termes de sensibilité et de spécificité, constituent un obstacle majeur à un diagnostic précis des maladies. Par exemple, pour le diagnostic de la tuberculose bovine (TBb), le test cutané à la tuberculine est couramment utilisé. Cependant, la sensibilité de ce test peut varier, entraînant des résultats faussement négatifs, en particulier dans les cas d'infection **(Rodrigues et Byrne ;2017)** précoces ou bénins. De ce fait, les animaux infectés peuvent passer inaperçus et présenter un risque de transmission de la maladie au sein des troupeaux et à l'homme. Cette limite souligne la nécessité de disposer d'outils diagnostiques complémentaires plus sensibles afin d'améliorer la précision du dépistage et les mesures de contrôle. **(Wang ;2021)** De même, en médecine vétérinaire des petits animaux, les limites des tests sérologiques pour le diagnostic des maladies vectorielles constituent un défi de taille.

Des maladies comme la dirofilariose canine mettent en évidence les difficultés liées à la spécificité des tests. Par exemple, les tests antigéniques de la dirofilariose peuvent donner des résultats faussement positifs en raison de réactions croisées avec d'autres parasites, tels que *Dirofilaria immitis*, **(Szatmári ;2020)** ce qui peut entraîner des traitements inutiles et un fardeau financier pour les propriétaires d'animaux. Pour pallier cette limitation, des techniques de diagnostic moléculaire, comme la réaction en chaîne par polymérase (PCR), ont été développées pour détecter l'ADN spécifique du pathogène, améliorant ainsi la spécificité des tests et réduisant le risque d'erreur de diagnostic. Cependant, ces méthodes peuvent nécessiter un équipement spécialisé et une expertise, ce qui limite leur disponibilité et leur accessibilité

Chapitre III : Perspectives diagnostiques et thérapeutiques en médecine vétérinaire

financière en pratique vétérinaire. Par conséquent, il est nécessaire de trouver un équilibre entre sensibilité et spécificité dans le développement des outils de diagnostic afin de garantir un diagnostic précis et des stratégies de prise en charge efficaces en pathologie vétérinaire. (Ochwo ;2023)

- **Limites technologiques**

Les limitations technologiques en pathologie vétérinaire constituent un obstacle majeur à un diagnostic précis des maladies. Par exemple, les modalités d'imagerie diagnostique traditionnelles, comme la radiographie, présentent des limitations intrinsèques, notamment pour l'évaluation des structures des tissus mous et la détection de lésions subtiles. En pratique vétérinaire équine, le diagnostic des lésions (Low et KTA ;2017) musculo-squelettiques par radiographie seule peut s'avérer insuffisant pour identifier des anomalies subtiles, entraînant une incertitude diagnostique et un risque de retard de traitement. Cependant, les progrès en les techniques d'imagerie, telles que l'imagerie par résonance magnétique (IRM) et la tomodensitométrie (TDM), offrent une meilleure visualisation des tissus mous et des capacités (Horne et CR ;2023) diagnostiques accrues. Malgré leurs avantages, ces modalités d'imagerie avancées peuvent s'avérer trop coûteuses ou nécessiter des installations spécialisées, limitant ainsi leur accessibilité dans certains contextes vétérinaires. (Reis IL ;2024) De plus, des limitations technologiques sont manifestes dans le diagnostic moléculaire des maladies infectieuses. Par exemple, bien que les tests PCR soient très sensibles et spécifiques pour la détection de l'ADN pathogène, ils ne permettent pas toujours de différencier les organismes viables des organismes non viables. Dans le diagnostic de la mammite bovine, les tests PCR peuvent détecter l'ADN bactérien dans les échantillons de lait, mais ils ne permettent pas de distinguer une infection active d'une contamination bactérienne. Cette limitation peut conduire à un surdiagnostic ou à un traitement antimicrobien inutile, soulignant l'importance d'intégrer les techniques de diagnostic moléculaire à d'autres méthodes diagnostiques afin d'améliorer la précision du diagnostic et la prise de décision clinique. (Yitbarek ;2022)

Bien que les technologies de diagnostic moléculaire et d'imagerie numérique offrent une précision accrue, leur coût élevé constitue un frein à leur adoption généralisée. Une analyse coûts-avantages a montré que, malgré des investissements initiaux importants, les économies à long terme réalisées grâce à une meilleure précision diagnostique et à la réduction des erreurs de traitement peuvent compenser ces coûts. Parmi les stratégies visant à améliorer l'accessibilité figurent les subventions, les programmes de location et les partenariats avec les laboratoires de diagnostic. (Zeng ;2016).

Chapitre III : Perspectives diagnostiques et thérapeutiques en médecine vétérinaire

3. Maladies émergentes

- Nouveaux pathogènes

Les maladies émergentes causées par de nouveaux agents pathogènes représentent des défis importants en pathologie vétérinaire, exigeant des méthodes de diagnostic rapides et précises. L'émergence du virus de la diarrhée épidémique porcine (PEDV) dans l'élevage porcin en est un exemple. **(Kawai ;2017)** Dès son introduction aux États-Unis en 2013, le PEDV a provoqué de graves épidémies de diarrhée et de déshydratation chez les porcs, entraînant des pertes économiques considérables. La difficulté initiale du diagnostic du PEDV résidait dans sa

similarité avec d'autres coronavirus porcins, ce qui a nécessité la mise au point de tests de diagnostic moléculaire spécifiques pour le différencier des souches endémiques. **(Kajdanek ;2024)**

L'identification rapide du PEDV a permis la mise en œuvre opportune de mesures de biosécurité et de stratégies de gestion de la maladie, soulignant l'importance d'une approche proactive. **(Yogesh; 2022)**

La surveillance et la préparation diagnostique sont essentielles pour lutter contre les agents pathogènes émergents. L'épidémie de circovirus canin (CV canin) chez le chien constitue un autre exemple de maladie émergente causée par un nouvel agent pathogène. Le CV canin a été identifié pour la première fois aux États-Unis en 2012, initialement associé à des cas de gastro-entérite hémorragique aiguë et de vascularite chez le chien. **(Scott ;2016)** Cependant, la présentation clinique et la gravité de l'infection par le CV canin étaient variables, allant de signes gastro-intestinaux bénins à une maladie systémique grave, voire mortelle. La difficulté de diagnostiquer le CV canin était due à sa nouveauté et à l'absence de tests diagnostiques spécifiques disponibles initialement. Les vétérinaires s'appuyaient sur la suspicion clinique et l'exclusion d'autres causes fréquentes de signes cliniques similaires, telles que le parvovirus canin et le coronavirus canin. Le développement de tests de diagnostic moléculaire spécifiques pour le CV canin, notamment les tests PCR, a facilité un diagnostic précis et une meilleure compréhension de son épidémiologie et de son spectre clinique. **(Jung ;2020)** Cela souligne l'importance du développement rapide des diagnostics et de la collaboration entre les chercheurs vétérinaires et les diagnosticiens pour faire face aux maladies émergentes en pathologie vétérinaire. **(Lei ;2024)**

Chapitre III : Perspectives diagnostiques et thérapeutiques en médecine vétérinaire

- **Maladies zoonotiques**

Les zoonoses représentent un défi majeur en pathologie vétérinaire en raison de leur impact potentiel sur la santé animale et humaine. L'émergence du virus de la fièvre de la vallée du Rift (FVR), un pathogène zoonotique affectant principalement les animaux domestiques tels que les ovins, les caprins et les bovins, en est un exemple frappant. **(Dankaona ; 2022)** Les épidémies de FVR se caractérisent par des taux élevés d'avortement et de mortalité chez le bétail, entraînant des pertes économiques considérables dans les régions touchées. De plus, l'homme peut contracter la FVR par contact avec des tissus animaux infectés ou des moustiques vecteurs, ce qui se traduit par un large éventail de manifestations cliniques, allant de symptômes grippaux bénins à une fièvre hémorragique sévère. **(Gomez ; 2023)** Le diagnostic de la FVR est complexe en raison du large spectre des présentations cliniques chez l'animal et chez l'homme, ainsi que

de la nécessité de recourir à des analyses de laboratoire spécialisées pour confirmer l'infection. Un diagnostic précoce de la FVR chez l'animal et la détection rapide des cas humains sont essentiels pour la mise en œuvre de mesures de contrôle appropriées, telles que des campagnes de vaccination et des stratégies de lutte antivectorielle, afin de limiter la propagation du virus et de prévenir les épidémies humaines. **(Guarner ; 2023)** Une autre zoonose émergente est la pandémie de maladie à coronavirus 2019 (COVID-19) causée par le nouveau coronavirus du syndrome respiratoire aigu sévère 2 (SARS-CoV-2). Bien qu'initialement on ait cru bien que l'origine du virus soit supposée provenir des marchés d'animaux de Wuhan, en Chine, sa source exacte et sa dynamique de transmission font toujours l'objet de recherches. Les vétérinaires pathologistes jouent un rôle crucial dans l'étude du rôle potentiel des réservoirs et intermédiaires animaux dans la transmission du SARS-CoV-2 à l'homme, ainsi que dans la surveillance des cas de transmission interspécifique au sein des populations animales domestiques et sauvages. Les défis diagnostiques liés à la COVID-19 comprennent la mise au point de tests rapides et précis pour détecter l'infection par le SARS-CoV-2 chez les animaux, ainsi que la compréhension des implications cliniques et des risques de transmission associés à la transmission interspécifique. **(Birungi ; 2021)** La collaboration entre les professionnels de la santé vétérinaire et humaine est essentielle pour une surveillance, un diagnostic et un contrôle efficaces des zoonoses émergentes, soulignant ainsi l'interdépendance de la santé animale et humaine dans le contexte de la pathologie vétérinaire. **(Chemison ; 2024).**

Chapitre III : Perspectives diagnostiques et thérapeutiques en médecine vétérinaire

II- Applications possibles des nanotechnologies en sciences vétérinaires

Tab 05 : Application de la nanomédecine nouvelle contre différentes maladies. (Mohsen ; 2025)

Espèces	Nom de la nanomédecine	Maladie	Principaux impacts
Vache	Nanomédecine des vésicules extracellulaires dérivées du colostrum bovin	Mammite bovine	L'effet anti-inflammatoire potentiel via la modulation de la voie de signalisation NF- κ B
Moutons et chèvres	nanoparticules d'argent (AgNPs)	Salmonelle	L'efficacité principale des nanoparticules d'argent (AgNPs) dans la lutte contre les Salmonella spp. Multirésistantes aux médicaments, in vitro et in vivo, sans effets indésirables
Rat	nanoliposome de naringénine	Stéatose hépatique non alcoolique	L'amélioration principale réside dans l'absorption orale de la naringénine, qui présente des effets inhibiteurs comparables sur la stéatose hépatique non alcoolique à des doses plus faibles que la naringénine brute.
	Liposomes de rivastigmine (RL)	Alzheimer	L'efficacité supérieure des RL par rapport à la solution de rivastigmine améliore la mémoire spatiale et normalise les

Chapitre III : Perspectives diagnostiques et thérapeutiques en médecine vétérinaire

			paramètres biochimiques dans un modèle de la maladie d'Alzheimer.
Souris	Nano-formulation orale de liraglutide pour lutter contre la graisse	Obésité	Amélioration de la stabilité du médicament dans des conditions gastriques difficiles, associée à des réductions notables du poids corporel, de la glycémie et du taux de lipides, ainsi qu'à une diminution du poids du foie et du stress oxydatif hépatique.
	Nano-vaccin contre Brucella abortus Nanoparticules d'argent	Brucella abortus	Émergence de nouveaux nano-vaccins qui améliorent la production d'immunoglobulines et l'efficacité contre la brucellose.
	Fonctionnalisées avec antigène/anticorps du virus de la fièvre aphteuse	La fièvre aphteuse (FMD)	Les nanoparticules d'argent fonctionnalisées permettent une guérison à 100 % chez les souris infectées par la fièvre aphteuse en 12 heures.
Volaille	Vaccin inactivé contre le virus de la bronchite infectieuse encapsulé dans des nanoparticules de chitosane	Virus de la bronchite infectieuse aviaire (IBV)	Induction de réponses immunitaires robustes, à la fois humorales et cellulaires, au niveau des muqueuses, assurant une protection efficace contre

Chapitre III : Perspectives diagnostiques et thérapeutiques en médecine vétérinaire

			l'infection par le virus de la bronchite infectieuse aviaire (IBV).
Poulet	Virus de la grippe aviaire pathogène H5N1 inactivé avec des nanoparticules de sélénium (SeNPs) Formulation de nanoparticules de phosphate de calcium couplées au virus de la maladie de Newcastle	Grippe aviaire, virus H5N1 Newcastle	Amélioration de l'efficacité vaccinale contre la grippe aviaire pathogène H5N1 chez les poulets grâce à la supplémentation en SeNPs Potentiel des nanoparticules de β-cyclodextrine-phosphate de calcium en tant que système d'administration de vaccins efficace pour des réponses immunitaires améliorées
Lapin	Nanoparticules de gélatine-épigallocatechine gallate décorées d'acide hyaluronique (GEHNPs) en collyre	Syndrome de l'œil sec	Production de GEHNPs à haute affinité pour le traitement de l'inflammation oculaire et l'amélioration des symptômes du syndrome de l'œil sec par collyre
Souris et cobayes	Nanocages d'or	fièvre aphteuse	Amélioration significative de la réponse immunitaire contre le virus de la fièvre aphteuse grâce à l'utilisation de particules pseudo-virales

Chapitre III : Perspectives diagnostiques et thérapeutiques en médecine vétérinaire

			combinées à des nanocages d'or
--	--	--	--------------------------------

1 Nanotechnologies et diagnostic des maladies :

Les biopuces peuvent être utilisées pour la détection précoce des maladies chez les animaux. Une biopuce (ou microréseau) est un dispositif généralement composé de centaines ou de milliers de courts brins d'ADN artificiel déposés avec précision sur un circuit de silicium. Les biopuces peuvent également servir à retracer l'origine des aliments pour animaux et des aliments pour animaux, à détecter la présence de produits animaux provenant de différentes espèces et ainsi à localiser la source d'agents pathogènes, en réponse aux menaces pour la santé publique telles que la grippe aviaire et l'ESB (maladie de la vache folle).

Outre les biopuces à ADN, il existe d'autres variantes permettant de détecter des quantités infimes de protéines et de substances chimiques dans un échantillon, ce qui les rend utiles pour la détection d'agents de guerre biologique ou de maladies. **(Patil ; 2009)** Grâce aux biopuces, des échantillons biologiques tels que le sang, les tissus et le sperme peuvent être analysés et manipulés instantanément. Les nanocapteurs bioanalytiques sont des dispositifs ou des systèmes qui mesurent ou détectent une substance chimique à l'aide d'un matériau ou d'un tissu biologique. Ils permettront la détection de très faibles quantités de contaminants chimiques.

Dans les systèmes agricoles et d'élevage, les virus et les bactéries peuvent être combattus. Les nanoshells sont un nouveau type de nanoparticules optiquement accordables, composées d'un noyau diélectrique (par exemple, de silice) recouvert d'une couche métallique ultra-mince (par exemple, d'or). **(Hirsch ; 2003)** Injectées dans le système sanguin de l'animal, elles peuvent être modifiées par l'application d'agents ciblés permettant de se fixer aux récepteurs de surface des cellules cancéreuses. L'illumination du corps par la lumière infrarouge élève la température cellulaire à environ 55 °C, ce qui « brûle » et détruit la tumeur. D'autres chercheurs expérimentent des nanoshells superparamagnétiques « intelligents ».

Les nanoparticules, injectées dans le flux sanguin, ciblent les cellules réceptrices des tumeurs. Composées d'oxydes de fer, elles voient leur capacité à localiser les cellules tumorales accrue lorsqu'elles sont soumises à un champ magnétique. Au niveau de la tumeur, elles libèrent un médicament qui détruit les cellules cancéreuses. Les points quantiques constituent une autre forme de nanomatériaux : ce sont des cristaux de taille nanométrique initialement développés pour des applications optoélectroniques.

Chapitre III : Perspectives diagnostiques et thérapeutiques en médecine vétérinaire

Les points quantiques peuvent être injectés dans le système sanguin des animaux et détecter les cellules dysfonctionnelles. Comme ils réagissent à la lumière, il serait possible d'illuminer l'organisme et de stimuler leur échauffement afin de détruire les cellules cancéreuses. Les sondes et méthodes basées sur l'ingénierie des acides nucléiques offrent de nouvelles perspectives prometteuses pour l'administration de traitements thérapeutiques ou préventifs contre certaines maladies. Ces différentes méthodes de nanotechnologie pourraient constituer une aide thérapeutique potentielle pour atténuer les problèmes de santé des animaux. **(Freitas ;2005)**

1.2. Les outils de diagnostic :

Couramment utilisés, généralement envoyés à des laboratoires externes et dont les résultats peuvent prendre de quelques heures à plusieurs jours, risquent d'être obsolètes plus tôt que prévu. La nanotechnologie peut offrir à nos cliniques vétérinaires des outils de diagnostic moins coûteux, plus rapides et plus précis. **(Meena et al ; 2018)**

a) Particules de points quantiques :

Les particules de points quantiques sont de minuscules cristaux d'une taille de dix millionième de pouce. Ces particules ouvrent la voie à de nouvelles approches en matière d'analyse génétique, de découverte de médicaments et de diagnostic des maladies. Aujourd'hui, les points quantiques sont considérés comme une avancée majeure dans notre compréhension du fonctionnement des gènes.

Les scientifiques pensent que d'ici quelques années, ces particules permettront aux chercheurs de suivre les réactions des cellules à certains médicaments ou virus. Certains envisagent la possibilité d'injecter des points quantiques dans le corps des animaux. Une fois injectés, ces points quantiques pourraient détecter les cellules dysfonctionnelles grâce à leur sensibilité à la lumière. Il serait possible d'influencer leur comportement à l'intérieur de la cellule. Par exemple, ils pourraient réagir à un flash lumineux et chauffer suffisamment pour détruire les cellules cancéreuses. Les points quantiques présentent de nombreux avantages techniques par rapport aux colorants fluorescents traditionnels.

Ces colorants sont couramment utilisés pour détecter et suivre les molécules biologiques. Non seulement ils peuvent persister plus longtemps, mais ils sont également plus brillants et plus faciles à visualiser que les colorants organiques. Ils peuvent s'avérer très utiles pour visualiser les voies de signalisation cellulaire, ce qui est essentiel pour comprendre le comportement de certains médicaments dans l'organisme animal. Outre leur utilité pour l'identification et le suivi

Chapitre III : Perspectives diagnostiques et thérapeutiques en médecine vétérinaire

des molécules, ils promettent des tests plus rapides, plus flexibles et moins coûteux pour l'analyse clinique. **(Chakravarthi ;2010)**

b) Immunoessai:

La technologie d'immunoessai exploite la capacité des anticorps à se fixer aux agents pathogènes envahissants. Les anticorps reconnaissent et se lient aux antigènes avec une grande spécificité. L'une des applications diagnostiques de ce comportement est l'immunoessai conventionnel. Lors d'un test immunologique de routine, une solution, par exemple du plasma sanguin, est exposée à une plaque contenant des anticorps qui se lient à un antigène spécifique à analyser. Lorsque les anticorps se lient à l'antigène, le test change de couleur. Ce système est utilisé pour identifier et diagnostiquer diverses affections touchant les animaux. **(Meena et al ; 2018)**

2 Nanotechnologies thérapeutiques :

La santé vétérinaire est un sujet de préoccupation majeur et de plus en plus visible pour les propriétaires d'animaux et les pouvoirs publics. Face à l'augmentation du coût des médicaments et des soins vétérinaires, ainsi qu'à la croissance de la population animale, le besoin de solutions innovantes est urgent. L'administration efficace des molécules thérapeutiques représente un obstacle important à l'obtention d'une réponse ciblée contre l'agent pathogène. De nombreux médicaments sont efficaces pour traiter les maladies, mais la plupart présentent des limitations liées à leur toxicité, leur faible solubilité aqueuse et leur imperméabilité cellulaire. **(Muluh; 2021)**

Les agents thérapeutiques et diagnostiques sont au cœur des projets de pointe en nanomédecine, et la recherche se concentre sur l'administration et le ciblage rationnels des produits pharmaceutiques chez les animaux. Les nanopharmaceutiques, domaine d'application le plus prometteur et productif des nanotechnologies en médecine vétérinaire, utilisent des nanoparticules. Celles-ci présentent une absorption intracellulaire relativement plus élevée que les microparticules et, de ce fait, peuvent cibler un large éventail de mécanismes biologiques grâce à leur petite taille et leur grande mobilité. Divers nanomatériaux sont utilisés dans le traitement des maladies vétérinaires, tels que les nanoparticules polymères, les nanotubes de carbone, les liposomes, les dendrimères, les nanocoquilles, les nanopores et les nanoparticules magnétiques. Le principal défi consiste à concevoir, à l'aide de ces nanomatériaux, de nouveaux dispositifs et technologies permettant d'acheminer les agents thérapeutiques vers leur site d'action précis et de garantir le maintien de leur activité pharmacologique pendant une durée adéquate. **(Siraj et al; 2024)**

3 Nanotechnologies Traitement

a) Traitement nanomédical du cancer - Nanomédicaments de paclitaxel pur :

Le paclitaxel (PTX) est un médicament de chimiothérapie efficace utilisé pour traiter les tumeurs solides, mais son caractère hydrophobe limite son efficacité sous sa forme conventionnelle. L'absorption et la distribution cellulaires des nanoparticules sont significativement améliorées lorsqu'elles sont formulées à l'échelle nanométrique. **(Zhou; 2021)** Ceci est dû à l'effet d'hyperperméabilité et de rétention (EPR), une propriété des vaisseaux sanguins tumoraux qui permet aux nanoparticules de pénétrer et de rester plus facilement dans le tissu tumoral que dans les tissus sains. De plus, l'accumulation au niveau des tumeurs est accrue. **(Hu ; 2020)** Afin de minimiser les effets secondaires induits par les vecteurs, le concept de nanomédicaments auto-administrés (SDN) a été introduit, permettant la production de nanocristaux de PTX purs sans composants additionnels. Cette approche accroît l'efficacité thérapeutique tout en réduisant la toxicité potentielle. **(Wang ; 2018)**

❖ CO-ASSEMBLAGE DU PACLITAXE ET D'AUTRES MÉDICAMENTS

Des développements supplémentaires ont porté sur le co-assemblage du PTX avec d'autres médicaments en structures SDN uniques, ce qui a permis d'améliorer les résultats du traitement et de surmonter la multirésistance aux médicaments (MDR) — un phénomène dans lequel les cellules cancéreuses deviennent résistantes à plusieurs médicaments de chimiothérapie, compliquant ainsi le processus de traitement. **(Zhou; 2021)**

b) Applications du traitement nanomédical dans les maladies cardiovasculaires (MCV) : ischémie sévère des membres postérieurs

Des chercheurs ont mis en œuvre des approches de bio-ingénierie visant à améliorer la fonctionnalité des nanovecteurs (NC) recouverts de membranes de cellules souches. Ces nanovecteurs bio-ingénierés recouverts de membranes de cellules souches (BSMNC) ont été spécifiquement conçus pour optimiser l'administration ciblée de médicaments aux tissus ischémiques des membres postérieurs. **(Bose ; 2021)**

Afin d'exploiter la capacité de ciblage spécifique des cellules souches, dépendante du récepteur CXCR4 (récepteur de chimiokine C-X-C de type 4), des cellules souches dérivées du tissu adipeux humain (hASC) ont été génétiquement modifiées pour surexprimer le récepteur CXCR4 à leur surface. Ces cellules modifiées (hASC CXCR4-) ont ensuite été utilisées comme matériau de revêtement pour fonctionnaliser des nanoparticules composées de PLGA (acide poly(lactique-co-glycolique)) et chargées en VEGF (facteur de croissance endothélial vasculaire). Après administration systémique de BSMNC chargées en VEGF à des souris

Chapitre III : Perspectives diagnostiques et thérapeutiques en médecine vétérinaire

modèles d'ischémie induite des membres postérieurs, les chercheurs ont observé des améliorations significatives de la restauration du flux sanguin (reperfusion), de la régénération du tissu musculaire et de la préservation globale des membres affectés. **(Bose ; 2021)**

c) La nanomédecine dans le traitement du diabète

Le traitement du diabète pourrait être amélioré par la nanomédecine grâce à l'utilisation de nanoformulations appropriées exploitant divers mécanismes thérapeutiques. Par exemple, pour simuler la libération physiologique d'insuline, des nanoparticules sensibles au glucose peuvent libérer cette hormone en réponse à une hyperglycémie. Les nanoformulations orales d'insuline, destinées à être absorbées par voie intestinale, constituent une alternative attendue de longue date aux injections sous-cutanées, qui peuvent entraîner douleur, inconfort et même infection locale. En thérapie génique et cellulaire, des nanoparticules contenant des oligonucléotides peuvent être utilisées pour moduler les réponses des cellules immunitaires associées au diabète de type 1 et stimuler la sécrétion d'insuline par les cellules β ou les cellules de type β . En revanche, les vecteurs viraux ne provoquent pas d'immunogénicité.

Enfin, l'administration locale de nanoformulations contenant des molécules régénératrices peut stimuler la réparation tissulaire lors de la cicatrisation des plaies diabétiques, offrant ainsi un outil précieux pour traiter cette complication du diabète. Dans cette section, nous exposerons le potentiel d'application clinique de ces différentes méthodes de traitement du diabète basées sur des nanoformulations. **(Andreadi ; 2025)**

4 Nanotechnologie dans les systèmes d'administration de médicaments :

De médicaments intelligents pour animaux contiendraient vraisemblablement de petits emballages scellés contenant le médicament à administrer. Ces systèmes permettraient une utilisation judicieuse de quantités d'antibiotiques plus faibles. Une « étiquette d'adresse » à codage moléculaire intégrée à l'emballage permettrait de cibler précisément la zone d'action dans l'organisme. Des systèmes mécaniques à l'échelle nano et micro serviraient de vecteurs. Ces systèmes pourraient également intégrer des capacités de détection chimique et de prise de décision pour une administration autorégulée de médicaments ou de nutriments, selon les besoins. Ceci aiderait les éleveurs à minimiser l'utilisation d'antibiotiques et à réduire leurs dépenses pharmaceutiques.

Les systèmes d'administration intelligents peuvent également permettre de surveiller les effets de l'administration de produits pharmaceutiques, de nutraceutiques, de nutriments, de compléments alimentaires, de composés bioactifs, de probiotiques, de produits chimiques et de vaccins. Ainsi, à l'avenir, les progrès technologiques permettront de développer des systèmes

Chapitre III : Perspectives diagnostiques et thérapeutiques en médecine vétérinaire

d'administration plus précis grâce à l'utilisation de nanomatériaux (matériaux capables de manipuler des structures ou d'autres particules à l'échelle nanométrique et de contrôler et catalyser des réactions chimiques, comme les fullerènes, les nanotubes, les points quantiques et les dendrimères) pour cibler des organismes biologiques et bioactifs. Ces systèmes permettront de développer des capacités intégrées de détection, de surveillance et de contrôle, y compris une capacité d'autorégulation, et de mettre au point des systèmes de surveillance de la santé et d'intervention thérapeutique pour les animaux de toutes tailles. **(Tomanek ; 2000)**

Tab 06 : Nanotechnologie dans les systèmes d'administration de médicaments **(Jasim ;2021)**

Nanomatériau	Caractéristiques	Applications
Nanoparticules d'un diamètre de 50 à 100 nanomètres	Pénètrent plus facilement dans les tumeurs.	Traitement oncologique
Polymères	Haute précision.	Dispositifs de transport de médicaments fabriqués à partir de matériaux nanobiologiques.
Nanocapsules	Augmentation de la rétention locale du médicament	Libération de médicaments sous contrôle strict.
Nanocoquilles métalliques	Les nanocoques possèdent des propriétés optiques et chimiques très favorables pour l'imagerie biomédicale et les applications thérapeutiques.	L'utilisation de nanocoques absorbantes dans la thérapie thermique NIR des tumeurs
Perfluorocarbone	Suspensions de nanotubes de carbone extrêmement stables	Imagerie de l'angiogenèse, des métastases cancéreuses et des caillots sanguins.

Chapitre III : Perspectives diagnostiques et thérapeutiques en médecine vétérinaire

Nanomatériaux métalliques	Caractéristiques de réponse magnéto-optique et propriétés antibactériennes		-
nanotubes de carbone	-		Nanodiagnostic et nanotraitement des maladies cardiovasculaires

5 Nanotechnologies et reproduction animale:

Les nanotechnologies connaissent un essor important dans le domaine de la reproduction et de la fertilité. Les recherches menées sur la reproduction animale à l'aide des nanotechnologies visent notamment à caractériser les caractéristiques nanométriques des gamètes par microscopie à force atomique et techniques de microscopie à sonde à balayage ; à développer des nanobiosenseurs pour la détection de l'état reproductif physiologique ou altéré (pathogènes et maladies) ; à mettre au point des méthodes chimiques de production de nanoparticules métalliques pour des applications de contrôle de la fertilité ; à développer des nanodispositifs pour la cryoconservation sécurisée des gamètes et des embryons ; et à développer des systèmes de libération prolongée de molécules, notamment des hormones, des vitamines, des antibiotiques, des antioxydants et des acides nucléiques. (Saragusty ; 2011) L'objectif de ces efforts novateurs n'est pas seulement de caractériser et de manipuler la matière à l'échelle nanométrique, mais aussi de développer des produits et des procédés à valeur ajoutée économique, sociale et environnementale, en mettant l'accent sur la recherche de solutions aux défis de la reproduction animale. (Scott ; 2007)

a) Nanobiosenseurs pour la détection du statut reproductif :

Les nanobiosenseurs sont des dispositifs très sensibles dotés de biomolécules sondes immobilisées et constitués de nanomatériaux, tels que des nanoparticules, des nanotubes, des nanofils, des nanofibres, etc. Ils sont principalement utilisés dans la surveillance environnementale et le diagnostic clinique. Le développement et la validation de nanobiosenseurs pour la détection de maladies, d'agents pathogènes, de l'œstrus, des taux d'hormones et du profil métabolique confèrent à ces systèmes le statut d'outil important et prometteur pour la gestion de la reproduction. (Tomanek ; 2000)

b) Nanosystèmes pour la cryoconservation des gamètes et des embryons :

Chapitre III : Perspectives diagnostiques et thérapeutiques en médecine vétérinaire

La cryoconservation des tissus gonadiques, des spermatozoïdes, des ovocytes et des embryons a ouvert un champ de recherche novateur et prometteur en reproduction animale. L'utilisation de nanoparticules métalliques biocompatibles pour la cryoconservation des cellules et des tissus pourrait constituer la prochaine étape des technologies de cryoconservation, permettant d'atteindre des vitesses de refroidissement ultrarapides et un réchauffement rapide et homogène des matériaux biologiques dans des conditions proches des conditions physiologiques. Cependant, les études portant sur l'utilisation de nanoparticules pour la cryoconservation des cellules et des tissus restent encore peu nombreuses. **(Tomanek ; 2000)**

6 Nanovaccins:

Le nanovaccin représente une approche novatrice en matière de vaccination **(El-Sayed et Kamel, 2020)**. Les nanovaccins sont considérés comme plus efficaces car ils stimulent les réponses immunitaires humorales et cellulaires, contrairement aux vaccins traditionnels **(Sekhon et al., 2011)**. Ces vaccins ont le potentiel d'orienter le système immunitaire vers la lutte contre les agents pathogènes et de limiter l'étendue des épidémies et des maladies **(Nandedkar 2009 ; Gheibi Hayat et Darroudi 2019)**. Les techniques de vaccination récentes ont évolué, passant de l'utilisation d'organismes tués ou vivants à des candidats beaucoup plus sûrs, tels que les recombinants et les produits de synthèse. Les nouveaux candidats vaccins présentent souvent une faible immunogénicité et une sensibilité à la dégradation, ce qui nécessite l'ajout d'un adjuvant pour améliorer leur immunogénicité **(Nordly et al. 2009)**. La nanotechnologie a permis le développement de nouvelles approches de transport d'antigènes, en raison de l'impossibilité d'ajuster les adjuvants traditionnels. Les adjuvants à base de nanoparticules peuvent être utilisés pour réduire les doses administrées et envisager des voies d'administration alternatives afin d'induire une réponse immunitaire ciblée, par exemple la voie intranasale pour développer une protection muqueuse ciblée **(Moyer et al. 2016)**. Ils deviennent principalement adaptés à la médecine vétérinaire lorsqu'un grand nombre d'animaux doivent être confinés, ce qui empêche l'utilisation de la vaccination par des moyens conventionnels en raison de problèmes d'accessibilité **(Underwood et van Eps 2012 ; Maina et al. 2020)**.

Chapitre III : Perspectives diagnostiques et thérapeutiques en médecine vétérinaire

Tab 07 : Exemples de produits thérapeutiques et de vaccins issus du génie des nanoparticules en médecine vétérinaire. (Chen et al ;2006)

Espèces animales	Thérapies et vaccins à base de nanoparticules
Bétail	Administration de streptomycine encapsulée dans des liposomes pour le traitement de la brucellose. Administration intranasale de nanoparticules annulaires pour le traitement du virus respiratoire syncytial. Administration transdermique de diclofénac encapsulé dans des liposomes comme médicament anti-inflammatoire et analgésique.
Mouton	Nanobilles de polystyrène pour l'administration du vaccin contre la fièvre aphteuse ; nanosphères d'ADN-chitosane pour l'administration du vaccin contre la maladie de Newcastle ; vaccin liposomal contre la mammite <i>staphylococcique</i> ; vaccin liposomal contre le virus de la leucémie bovine.
Rauque	Administration de diamidine par liposomes pour le traitement de la babésiose ; administration d'ivermectine par micelles pour le traitement de la strongylose ; vaccin adjuvant nanoparticulaire en phase aqueuse contre la pneumonie à <i>Rhodococcus sequei</i> ; administration de <i>Toxoplasma gondii</i> vaccine par liposomes.
Cochon	Vaccin contre la fièvre aphteuse à base de dendrimères ; vaccin polymérique contre les fimbriae d' <i>E. coli</i>

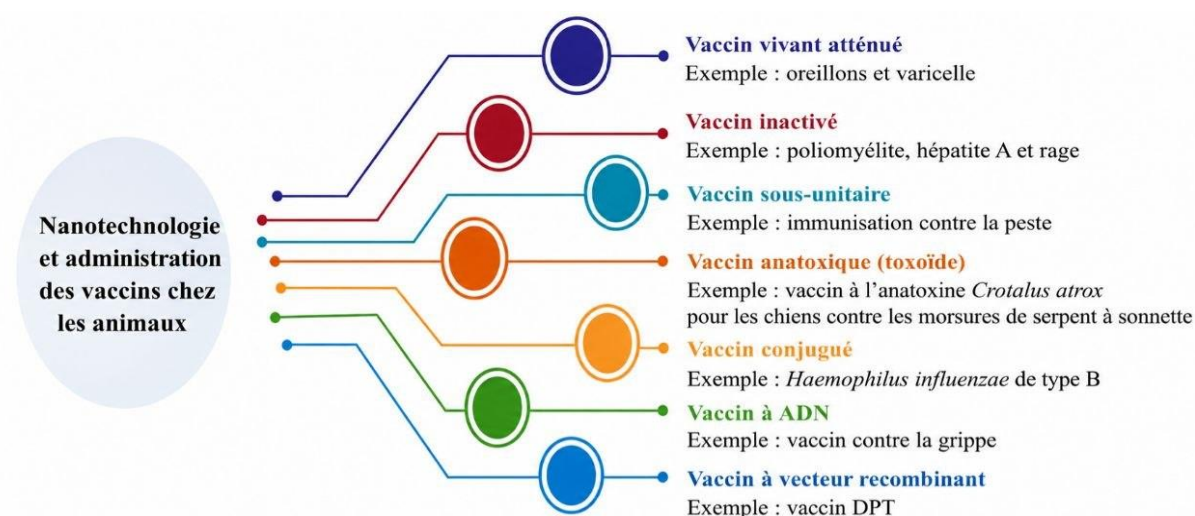


Figure 10: Nanotechnologie et administration des vaccins les animaux (Rai et al ; 2021)

Chapitre III : Perspectives diagnostiques et thérapeutiques en médecine vétérinaire

III- Mécanisme d'action des nanoparticules :

Le comportement des nanoparticules dépend de leur taille, de leur forme et de leur réactivité de surface avec les tissus environnants. Plus une particule est petite, plus son rapport surface/volume est élevé, et plus sa réactivité chimique et son activité biologique sont importantes. La réactivité chimique accrue des nanomatériaux entraîne une production accrue d'espèces réactives de l'oxygène (ERO). **(Jain ; 2011)** La production d'ERO a été observée dans une large gamme de nanomatériaux, notamment les nanotubes de carbone et les nanoparticules d'oxydes métalliques. La production d'ERO et de radicaux libres est l'un des principaux mécanismes pouvant induire un stress oxydatif.

L'inflammation et les dommages consécutifs aux protéines, aux membranes et à l'ADN sont des phénomènes courants. Il a été démontré que les nanoparticules de diverses compositions chimiques génèrent des espèces réactives de l'oxygène (ERO). La production d'ERO a été observée dans des nanoparticules aussi diverses que les fullerènes C60, les nanotubes de carbone à paroi unique (SWNT), les points quantiques et les particules ultrafines (UFP), notamment lors d'une exposition concomitante à la lumière, aux UV ou aux métaux de transition. **(Dilbaghi ; 2013)** Il a été démontré que les nanoparticules de différentes tailles et compositions chimiques migrent préférentiellement vers les mitochondries. Les mitochondries étant des organites redox-actifs, il est probable que la production d'ERO soit altérée, ce qui pourrait surcharger ou perturber les défenses antioxydantes. Certains systèmes de défense antioxydants présents chez les animaux et les zones potentielles où les nanoparticules pourraient générer des radicaux libres restent à élucider. Le mécanisme exact par lequel chacun de ces éléments Les mécanismes par lesquels diverses nanoparticules (NP) induisent la production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) ne sont pas encore pleinement élucidés. Parmi les mécanismes suggérés, on peut citer :

A. La photoexcitation des fullerènes et des nanotubes de carbone à paroi unique (SWNT), provoquant un passage intersystème et la création d'électrons libres

B. Le métabolisme des NP, générant des intermédiaires redox actifs, notamment via les Cytochromes P450

C. Les réponses inflammatoires in vivo susceptibles d'entraîner la libération de radicaux Libres par les macrophages. D'autres mécanismes seront probablement mis en évidence à mesure que les études sur la toxicité des NP progresseront. **(Meena et al ; 2018)**

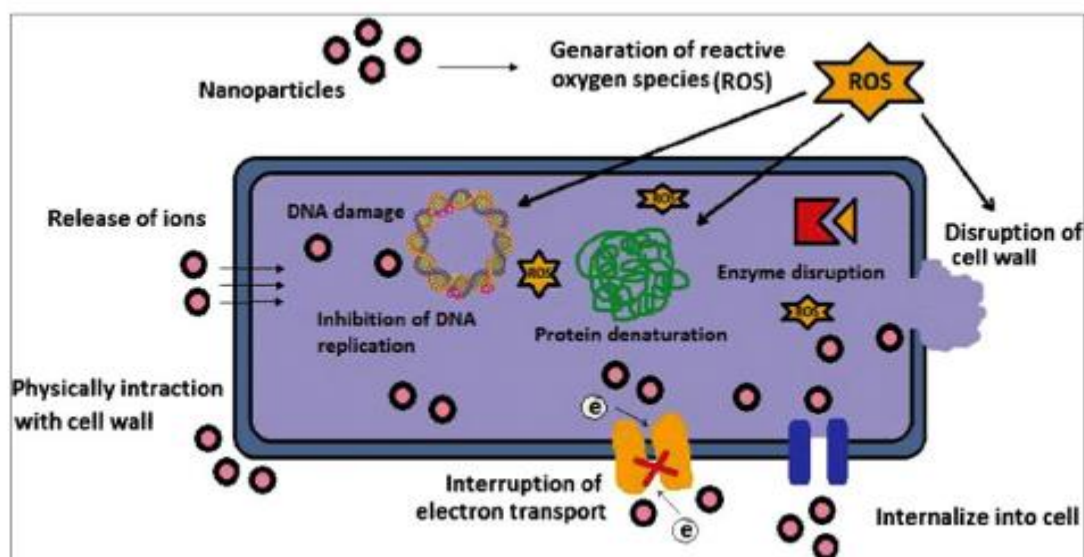


Figure 11 : Mécanisme d'action des nanoparticules (Meena et al ; 2018)

IV- Effets toxiques des nanoparticules :

La toxicologie est la branche de la biologie, de la chimie et de la médecine qui étudie les effets néfastes des substances chimiques sur les organismes vivants.

En toxicologie, on étudie les symptômes, les mécanismes, le traitement et la détection des intoxications, notamment chez les animaux et les humains. La nanotoxicologie étudie la toxicité des nanomatériaux. Du fait de leur rapport d'aspect très élevé, les nanomatériaux possèdent des propriétés uniques par rapport à leurs homologues de grande taille. La nanotoxicologie est la branche des sciences biologiques qui traite de l'étude et des applications de la toxicité des nanomatériaux. Les différents tests de toxicité réalisés sur les nanomatériaux sont présentés dans le (tableau 8). Les études nanotoxicologiques visent à déterminer si, et dans quelle mesure, ces propriétés peuvent constituer une menace pour l'environnement (tableau 9) et pour l'être humain (tableau 10). Par exemple, les nanoparticules de diesel peuvent endommager le système cardiovasculaire du rat des marais (*Rattus rattus*). Les nanoparticules introduites peuvent se distribuer dans divers organes et conserver leur structure, se modifier ou même être métabolisées. Les effets toxiques des nanoparticules sont illustrés dans la figure 12.

Tab 08 : Étude de diverses toxicités testées sur des nanomatériaux. (Rai et al ; 2021)

Objectif de l'étude	Exemple d'effets spécifiques étudiés	Nanomatériaux testés
Cytotoxicité	affinité pour les membranes cellulaires, dommages oxydatifs,	Oxyde d'aluminium (Al_2O_3), oxyde de cérium, oxyde de cuivre, oxyde de

Chapitre III : Perspectives diagnostiques et thérapeutiques en médecine vétérinaire

	mécanisme de relation structure-fonction.	fer, oxyde de nickel, dioxyde de silicium, dioxyde de titane et oxyde de zinc.
Toxicité cutanée	Absorption cutanée, toxicité cutanée	Sélénure de cadmium, fullerènes et fer
Toxicité générale	Coagulation sanguine humaine, induction de l'expression de gènes inflammatoires, génotoxicité.	Oxyde d'aluminium, sélénure de cadmium, fullerènes, sélénures de plomb, points quantiques, dioxyde de titane, sulfure de zinc.
Toxicité pulmonaire	Stress oxydatif, inflammation, effets du revêtement de surface, mécanisme d'élimination.	Oxyde d'aluminium, oxyde de cérium, oxyde de fer, oxyde de nickel, dioxyde de titane.
Translocation	Translocation vers des sites éloignés du lieu d'exposition initial, persistance in vivo.	Oxyde d'aluminium, oxyde de fer, dioxyde de titane, oxyde de zinc.

Tab 09 : Effets toxiques de certaines nanoparticules. (Rai et al ; 2021)

Type de nanoparticules	Inconvénients
Magnétique	L'agrégation entraîne une thrombose et une embolisation.
Métallique	Biocompatibilité médiocre et incertaines in vivo
Nano-coquilles	Relativement grands comparés aux points quantiques
Tubes de carbone	Insoluble en milieu aqueux, cytotoxicité intrinsèque, faible capacité à incorporer et à libérer des composés actifs
Points quantiques	Composé de métaux lourds cytotoxiques, instable lorsqu'il est exposé aux UV, il peut libérer des ions cadmium toxiques.
Dendrimères	Peut provoquer une hémolyse dépendante de la dose et de la charge de surface, cytotoxique in vitro
Liposomes	Peut provoquer une pseudo-allergie, une inflammation

Chapitre III : Perspectives diagnostiques et thérapeutiques en médecine vétérinaire

Polymères	Une faible efficacité de délivrance peut provoquer une pseudo-allergie liée à l'activation du complément.
------------------	---

Tab 10 : Effet des nanoparticules sur les organismes vivants **(Rai et al ; 2021)**

Particule	Effets
Carbone ultrafin	Pénétrer dans le système circulatoire
SWCNT	Forme des plaques sur les parois des vaisseaux, pénètre dans les noyaux cellulaires
Nanoparticules d'argent, d'indium et de carbone élémentaire	Pénètrent et se déplacent à travers le système circulatoire, pénètrent dans divers organes
Nanoparticules de carbone	Passer du nez au cerveau
Points quantiques	Pénètre l'épiderme

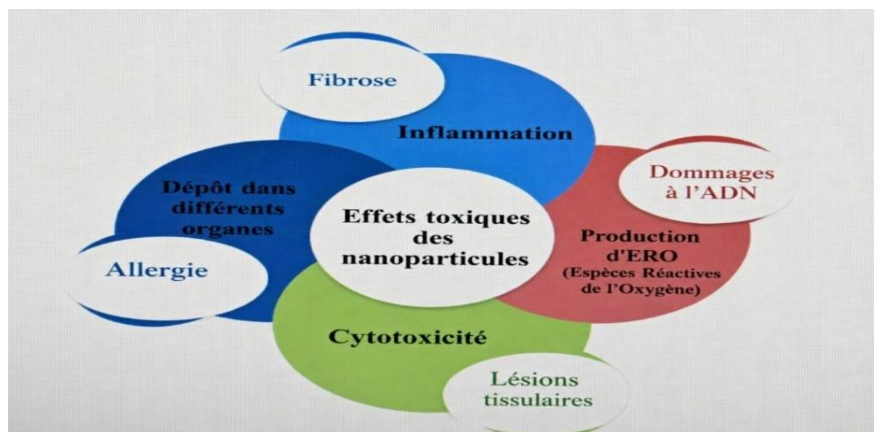


Figure. 12 : Effets toxiques des nanoparticules. **(Rai et al ; 2021)**



Conclusion

Conclusions

Conclusions

Le développement de techniques novatrices, originales et précises pour le diagnostic et le traitement des maladies animales est grandement facilité par les nanoparticules (NP). Les NP jouent un rôle crucial dans la sécurité, la croissance, la vaccination et l'hygiène des animaux. Les NP présentent un grand potentiel d'utilisation dans les applications biomédicales en raison de leurs propriétés biologiques et chimiques distinctes.

Ils peuvent être envoyés et utilisés pour le transport de médicaments, les soins vétérinaires et le traitement des maladies.

L'idée des nanoparticules, leur classification, leurs avantages et leur application possible comme agents thérapeutiques en médecine vétérinaire.

Nous avons abordé l'utilisation des nanosystèmes dans l'approvisionnement en médicaments antimicrobiens en médecine vétérinaire, en nous concentrant particulièrement sur l'argent et le chitosane, ainsi que sur leurs différentes formes et méthodes de préparation et de caractérisation. Notre étude vise à améliorer l'efficacité de certains antibiotiques contre les bactéries pathogènes, à surmonter la résistance aux antibiotiques, à réduire leur toxicité et à accroître leur biodisponibilité.

La technique proposée consiste à préparer des nanoparticules de chitosane et d'argent chargées d'antibiotiques, à les caractériser par les méthodes suivantes (DRX, Raman, FTIR, AFM, MET, MEB, potentiel zêta et potentiel électrochimique), puis à réaliser des expériences in vitro comparant le médicament testé et les nanoparticules préparées à une souche de micro-organisme standard, sensible et résistante.

(Sensibilité et CMI). À partir des résultats des essais in vitro, nous pouvons réaliser des essais in vivo. Ceux-ci peuvent fournir des études comparatives d'efficacité des médicaments et nanoparticules étudiés chez des animaux infectés, tels que des lapins infectés par *Pasteurella*, une souris présentant une inflammation due à *E. coli* et une souris présentant une plaie non traitée, ainsi que des études comparatives de pharmacocinétique, de protection relative et de toxicité.

Des médicaments et des nanoparticules ont été étudiés. Il est bien établi que le nanomédicament étudié possède des propriétés anti-inflammatoires lorsqu'il est combiné avec du chitosane.

Ainsi, on peut conclure que la nanotechnologie, ou la fabrication de systèmes et de dispositifs à l'échelle nanométrique, constitue un domaine scientifique multidisciplinaire en évolution rapide. Les progrès remarquables réalisés dans des secteurs tels que la médecine, les

Conclusions

Télécommunications et l'électronique ont largement contribué à l'essor de la nanotechnologie. L'augmentation de la surface spécifique des nanomatériaux ainsi que les effets liés à l'échelle nanométrique leur confèrent des propriétés particulières qui les rendent utiles dans de nombreuses applications avancées, notamment dans le domaine médical, l'imagerie biologique et les dispositifs de biosurveillance diagnostique. Les nanomatériaux se distinguent de leurs homologues de plus grande taille par des propriétés physiques, chimiques et biologiques uniques.

Les caractéristiques des nanomatériaux influencent fortement leurs interactions avec les molécules et les cellules vivantes. Ces propriétés dépendent notamment de leur taille, de leur forme, de leur composition chimique, de leur structure de surface, de leur charge électrique, de leur solubilité et de leur densité. Par exemple, les nanoparticules peuvent être utilisées pour produire des images plus précises permettant de localiser les tumeurs. De même, les nanotubes de carbone à paroi unique ont été employés comme vecteurs de transport à haute efficacité pour acheminer des biomolécules vers les cellules. Par conséquent, la nanotechnologie présente un avenir très prometteur, notamment grâce à son intégration avec d'autres technologies émergentes.



Références

Références

Références

- Abdel-Baky MMM, El-Khabaz KAS, Abdelbaset AE, Hamed MI. Clinico-epidemiological survey of feline parvovirus circulating in three Egyptian provinces from 2020 to 2021. Arch Virol 2023; 168(4):126.
- Afsharipour, R., SHABANI, A. M. H., DADFARNIA, S. & KAZEMI, E. 2020. Selective fluorometric determination of sulfadiazine based on the growth of silver nanoparticles on graphene quantum dots. Microchimica Acta, 187, 1-8.
- Alheshibri, M., QIAN, J., JEHANNIN, M. & CRAIG, V. S. 2016. A history of nanobubbles. Langmuir, 32, 11086-11100.
- Ali, X., DUAN, Y., ZHANG, Q., SUN, D., FANG, R. H., LIU-BRYAN, R., GAO, W. & ZHANG, L. 2021. Cartilage- targeting ultrasmall lipid-polymer hybrid nanoparticles for the prevention of cartilage degradation. Bioengineering & translational medicine, 6, e10187.
- Anselmo, A. C. & MITRAGOTRI, S. 2016. Nanoparticles in the clinic. Bioengineering & translational medicine, 1, 10-29.
- Aumsri, « History Of Nanotechnology », creative sulekha, (2007)
- BAETKE, S. C., LAMMERS, T. & KIESSLING, F. 2015. Applications of nanoparticles for diagnosis and therapy of cancer. The British journal of radiology, 88, 20150207.
- BAI, D.-P., LIN, X.-Y., HUANG, Y.-F. & ZHANG, X.-F. 2018. Theranostics aspects of various nanoparticles in veterinary medicine. International journal of molecular sciences, 19, 3299.
- Bedenice D, Johnson AL. Neurologic conditions in the sport horse. Anim Front 2022; 12(3):37–44.
- Belay ED, Kile JC, Hall AJ, Barton-Behravesh C, Parsons MB, Salyer S, et al. Zoonotic disease programs for enhancing global health security. Emerg Infect Dis 2017; 23(13):S65–70.
- Bertram CA, Klopffleisch R. The pathologist 2.0: an update on digital pathology in veterinary medicine. Vet Pathol 2017; 54(5):756–66.
- BHATIA, S. 2016. Nanoparticles types, classification, characterization, fabrication methods and drug delivery applications. Natural polymer drug delivery systems. Springer.

Références

- BHATT, P. & MADHAV, S. 2011. A detailed review on nanoemulsion drug delivery system. *International Journal of Pharmaceutical sciences and research*, 2, 2482.
- Byrne AW, Barrett D, Breslin P, Fanning J, Casey M, Madden JM, et al. Bovine tuberculosis in young- stock cattle: a narrative review. *Front Vet Sci* 2022; 9:1000 124.
- Borham M, Oreiby A, El-Gedawy A, Hegazy Y, Khalifa HO, Al-Gaabary M, et al. Review on bovine tubercu- losis: an emerging disease associated with multi- drug-resistant *Mycobacterium* species. *Pathogens* 2022; 11(7):715.
- Calvaresi, M. 2020. The route towards nanoparticle shape metrology. *Nature Nanotechnology*, 15, 512-513.
- Cardoso, V. F., FRANCESKO, A., RIBEIRO, C., BAÑOBRE-LÓPEZ, M., MARTINS, P. & LANCEROS-MENDEZ, S. 2018. Advances in magnetic nanoparticles for biomedical applications. *Advanced healthcare materials*, 7, 1700845.
- Carvalho, M., REIS, R. & OLIVEIRA, J. M. 2020. Dendrimer nanoparticles for colorectal cancer applications. *Journal of Materials Chemistry B*, 8, 1128-1138.
- Chan, J. M., VALENCIA, P. M., ZHANG, L., LANGER, R. & FAROKHZAD, O. C. 2010. Polymeric nanoparticles for drug delivery. *Cancer Nanotechnology*. Springer.
- Chau, C.-F., WU, S.-H. & YEN, G.-C. 2007. The development of regulations for food nanotechnology. *Trends in Food Science & Technology*, 18, 269-280.
- Devaraj, N. K., KELIHER, E. J., THURBER, G. M., NAHRENDORF, M. & WEISSLEDER, R. 2009. ¹⁸F labeled nanoparticles for in vivo PET-CT imaging. *Bioconjugate chemistry*, 20, 397-401.
- Djasem,k, Nanotechnology and Its Applications in DiseaseDiagnosis, Drug Delivery, and Medical Imaging 2021,N 03
- Domínguez-Oliva A, Hernández-Ávalos I, Martínez- Burnes J, Olmos-Hernández A, Verduzco-Mendoza A, Mota-Rojas D. The importance of animal models in biomedical research: current insights and appli- cations. *Animals (Basel)* 2023; 13(7):1223; doi:10.3390/ani13071223.
- Dudhi Pala, N. 2020. Influence of solid lipid nanoparticles on pharmaco-dynamic activity of poorly oral bioavailable drugs. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Nanotechnology*, 13, 4979-4983.
- EL-SAYED, A. & KAMEL, M. 2020. Advanced applications of nanotechnology in veterinary medicine. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 19073-19086.

Références

- Fattal, E., YOUSSEF, M., COUVREUR, P. & ANDREMONT, A. 1989. Treatment of experimental salmonellosis in mice with ampicillin-bound nanoparticles. *Antimicrobial agents and chemotherapy*, 33, 1540-1543.
- Galindo-Rodriguez, S., Allemann, E., FESSI, H. & Doelker, E. 2004. Physicochemical parameters associated with nanoparticle formation in the salting-out, emulsification-diffusion, and nanoprecipitation methods. *Pharmaceutical research*, 21, 1428-1439.
- Gao, A., HU, X.-L., Saeed, M., CHEN, B.-F., LI, Y.-P. & YU, H.-J. 2019. Overview of recent advances in liposomal nanoparticle-based cancer immunotherapy. *Acta Pharmacologica Sinica*, 40, 1129- 1137.
- Gülersoy E, Ateş MB, İyigün SS, Çelik Z, Maden M. Suspected leukoencephalopathy associated with parvovirus infection in a White Shaker with par- voviral enteritis and neosporosis. *Res J Vet Pract* 2021; 9(3):24–9.
- Gurunathan, S., QASIM, M., CHOI, Y., DO, J. T., PARK, C., HONG, K., KIM, J.-H. & SONG, H. 2020. Antiviral potential of nanoparticles—Can nanoparticles fight against coronaviruses ?*Nanomaterials*, 10, 1645.
- HAISS, W., THANH, N. T., AVEYARD, J. & FERNIG, D. G. 2007. Determination of size and concentration of gold nanoparticles from UV– Vis spectra. *Analytical chemistry*, 79, 4215-4221.
- Hamdan, S., PASTAR, I., Drakulich, S., DIKICI, E., TOMIC-CANIC, M., DEO, S. & DAUNERT, S. 2017. Nanotechnology-driven therapeutic interventions in wound healing: potential uses and applications. *ACS central science*, 3, 163-175.
- HASAN, A., MORSHED, M., MEMIC, A., HASSAN, S., WEBSTER, T. J. & MAREI, H. E.-S. 2018. Nanoparticles in tissue engineering: applications, challenges and prospects. *International journal of nanomedicine*, 13, 5637.
- HERNÁNDEZ-GIOTTONINI, K. Y., RODRÍGUEZ-CÓRDOVA, R. J., GUTIÉRREZ-VALENZUELA, C. A., PEÑUÑURI- MIRANDA, O., ZAVALA-RIVERA, P., GUERRERO-GERMÁN, P. & LUCERO-ACUÑA, A. 2020. PLGA nanoparticle preparations by emulsification and nanoprecipitation techniques: Effects of formulation parameters. *RSC Advances*, 10, 4218-4231.
- Hoenerhoff MJ, Meyerholz DK, Brayton C, Beck AP. Challenges and opportunities for the veterinary pathologist in biomedical research. *Vet Pathol* 2021; 58(2):258–65.
- HOFMANN-AMTENBRINK, M., GRAINGER, D. W. & HOFMANN, H. 2015. Nanoparticles in medicine: Current challenges facing inorganic nanoparticle toxicity

Références

- assessments and standardizations. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 11, 1689-1694.
- HOOD, M. A., MARI, M. & MUÑOZ-ESPÍ, R. 2014. Synthetic strategies in the preparation of polymer/inorganic hybrid nanoparticles. *Materials*, 7, 4057-4087.
 - Hugén S, Ankringa N, Robben JH, Valtolina C. Assessment of misdiagnosis in small animal intensive care patients using the Modified Goldman criteria. *Vet Q* 2023; 43(1):1–8.
 - ISRAEL, L. L., GALSTYAN, A., HOLLER, E. & LJUBIMOVA, J. Y. 2020. Magnetic iron oxide nanoparticles for imaging, targeting and treatment of primary and metastatic tumors of the brain. *Journal of Controlled Release*, 320, 45-62.
 - JIANG, W., LIONBERGER, R. & YU, L. X. 2011. In vitro and in vivo characterizations of PEGylated liposomal doxorubicin. *Bioanalysis*, 3, 333-344.
 - Joga, Srujana & Koyyala, Venkata Pradeep babu. *Nanotechnology in Oncology Indian Journal of Medical and Paediatric Oncology*, (2021).
 - KALPANA, V. & DEVI RAJESWARI, V. 2018. A review on green synthesis, biomedical applications, and toxicity studies of ZnO NPs. *Bioinorganic chemistry and applications*, 2018.
 - KAMALY, N., YAMEEN, B., WU, J. & FAROKHZAD, O. C. 2016. Degradable controlled-release polymers and polymeric nanoparticles: mechanisms of controlling drug release. *Chemical reviews*, 116, 2602- 2663.
 - KAMBHAMPATI, S. P. & KANNAN, R. M. 2013. Dendrimer nanoparticles for ocular drug delivery. *Journal of Ocular Pharmacology and Therapeutics*, 29, 151-165.
 - KIM, B. Y., RUTKA, J. T. & CHAN, W. C. 2010. Nanomedicine. *New England Journal of Medicine*, 363, 2434-2443.
 - Knoblaugh SE, Hohl TM, La Perle KMD. Pathology principles and practices for analysis of animal models. *ILAR J* 2018; 59(1):40–50.
 - KRISHNAMOORTHY, R., ATHINARAYANAN, J., PERIASAMY, V. S., ADISA, A. R., AL-SHUNIABER, M. A., GASSEM, M. A. & ALSHATWI, A. A. 2018. Antimicrobial activity of nanoemulsion on drug-resistant bacterial pathogens. *Microbial pathogenesis*, 120, 85-96.
 - LI, S., TUEL, A., MEUNIER, F., AOUINE, M. & FARRUSSENG, D. 2015. Platinum nanoparticles entrapped in zeolite nanoshells as active and sintering-resistant arene hydrogenation catalysts. *Journal of Catalysis*, 332, 25-30.

Références

- LIAO, Y., LI, X.-G. & KANER, R. B. 2010. Facile synthesis of water-dispersible conducting polymer nanospheres. *Acs Nano*, 4, 5193-5202.
- LIM, Y., GARDI, A., SABATINI, R., RAMASAMY, S., KISTAN, T., EZER, N., VINCE, J. & BOLIA, R. 2018. Avionics human-machine interfaces and interactions for manned and unmanned aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*, 102, 1-46.
- LÓPEZ-SAGASETA, J., MALITO, E., RAPPUOLI, R. & BOTTOMLEY, M. J. 2016. Self-assembling protein nanoparticles in the design of vaccines. *Computational and structural biotechnology journal*, 14, 58-68.
- LUNDQVIST, M., STIGLER, J., ELIA, G., LYNCH, I., CEDERVALL, T. & DAWSON, K. A. 2008. Nanoparticle size and surface properties determine the protein corona with possible implications for biological impacts. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105, 14265-14270.
- MALAM, Y., LOIZIDOU, M. & SEIFALIAN, A. M. 2009. Liposomes and nanoparticles: nanosized vehicles for drug delivery in cancer. *Trends in pharmacological sciences*, 30, 592-599.
- MANUJA, A., KUMAR, B. & SINGH, R. K. 2012. Nanotechnology developments: opportunities for animal health and production. *Nanotechnology Development*, 2, e4-e4.
- MARTINS, J. P., TORRIERI, G. & SANTOS, H. A. 2018. The importance of microfluidics for the preparation of nanoparticles as advanced drug delivery systems. *Expert opinion on drug delivery*, 15, 469- 479.
- MEDETALIBEYOĞLU, H., MANAP, S., YOKUŞ, Ö. A., BEYTUR, M., KARDAŞ, F., AKYILDİRIM, O., ÖZKAN, V., YÜKSEK, H., YOLA, M. L. & ATAR, N. 2018. Fabrication of Pt/Pd nanoparticles/polyoxometalate/ionic liquid nanohybrid for electrocatalytic oxidation of methanol. *Journal of The Electrochemical Society*, 165, F338.
- MEENA, N., SAHNI, Y., THAKUR, D. & SINGH, R. 2018. Applications of nanotechnology in veterinary. *Vet World*, 3, 477-480.
- MILLER, T., VAN COLEN, G., SANDER, B., GOLAS, M. M., UEZGUEN, S., WEIGANDT, M. & GOEPFERICH, A. 2013. Drug loading of polymeric micelles. *Pharmaceutical research*, 30, 584-595.
- MODENA, M. M., RÜHLE, B., BURG, T. P. & WUTTKE, S. 2019. Nanoparticle characterization: what to measure? *Advanced Materials*, 31, 1901556.

Références

- Mohammed, N. K., MUHIALDIN, B. J. & MEOR HUSSIN, A. S. 2020. Characterization of nanoemulsion of Nigella sativa oil and its application in ice cream. Food science & nutrition, 8, 2608-2618.
- Muluh, T. A., CHEN, Z., LI, Y., XIONG, K., JIN, J., FU, S. & WU, J. 2021. Enhancing Cancer Immunotherapy Treatment Goals by Using Nanoparticle Delivery System. International Journal of Nanomedicine, 16.2389 ,
- Munro R, Munro HM. Some challenges in foren- sic veterinary pathology: a review. J Comp Pathol 201373–57:(1)149 ;
- Nadia Abu Ramis, « Qu'est-ce que la nanotechnologie », mawdoo3, (2017)
- NAGAICH, U., GULATI, N. & CHAUHAN, S. 2016. Antioxidant and antibacterial potential of silver nanoparticles: biogenic synthesis utilizing apple extract. Journal of pharmaceutics, 2016.
- NARAYAN, R., NAYAK, U. Y., RAICHUR, A. M. & GARG, S. 2018. Mesoporous silica nanoparticles: A comprehensive review on synthesis and recent advances. Pharmaceutics, 10, 118.
- NATHWANI, B. B., JAFFARI, M., JURIANI, A. R., MATHUR, A. B. & MEISSNER, K. E. 2009. Fabrication and characterization of silk-fibroin-coated quantum dots. IEEE transactions on nanobioscience, 8, 72- 77.
- National Academies of Sciences Engineering and Medicine, »Small Wonders, Endless Frontiers: A Review of the National Nanotechnology Initiative », Washington DC, The National Academies Press. (2002).
- NUM, S. & USEH, N. 2013. Nanotechnology applications in veterinary diagnostics and therapeutics. Sokoto Journal of Veterinary Sciences, 11, 10-14.
- OCHEKPE, N. A., OLORUNFEMI, P. O. & NGWULUKA, N. C. 2009. Nanotechnology and drug delivery part 1 :background and applications. Tropical journal of pharmaceutical research, 8.
- OMACRSAWA, E. 2012. Perspectives of fullerene nanotechnology, Springer Science & Business Media.
- OYEWUMI, M. O., KUMAR, A. & CUI, Z. 2010. Nano-microparticles as immune adjuvants: correlating particle sizes and the resultant immune responses. Expert review of vaccines, 9, 1095-1107.
- Paul John, « Nanotechnologie No Free Lunch », Université nationale australienne, Canberra,(2010).

Références

- Rai. D,et Naresh. C Concept of Nanotechnology in Veterinary Medicine, 2021, p 54-57.
- Rodrigues RA, Meneses IIFS, Jorge KSG, Silva MR, Santos LR, Lilenbaum W, et al. False-negative reactions to the comparative intradermal tuberculin test for bovine tuberculosis. *Pesq Vet Bras* 2017; 37(12):1380–4.
- Stokol T. Veterinary pathology—a path forward with new directions and opportunities. *Front Vet Sci* 2016; 3:76.
- Szatmári V, van Leeuwen MW, Piek CJ, Venco L. False positive antigen test for *Dirofilaria immitis* after heat treatment of the blood sample in a micro-filaremic dog infected with *Acanthocheilonema dracunculoides*. *Parasit Vectors* 2020; 13(1):501.
- Tarun Agarwalil, « Qu'est-ce que la nanotechnologie : types et ses utilisations », *Elprocus*,(2020)
- THAKKAR, K. N., MHATRE, S. S. & PARIKH, R. Y. 2010. Biological synthesis of metallic nanoparticles. *Nanomedicine: nanotechnology, biology and medicine*, 6, 257-262.
- TIRUWA, R. 2016. A review on nanoparticles—preparation and evaluation parameters. *Indian journal of pharmaceutical and biological research*, 4, 27-31.
- VAHEDIFARD, F. & CHAKRAVARTHY, K. 2021. Nanomedicine for COVID-19: The role of nanotechnology in the treatment and diagnosis of COVID-19. *Emergent Materials*, 1-25.
- VALSESIA, A., DESMET, C., OJEA-JIMÉNEZ, I., ODDO, A., CAPOMACCIO, R., ROSSI, F. & COLPO, P. 2018. Direct quantification of nanoparticle surface hydrophobicity. *Communications Chemistry*, 1, 1- 11.
- VAROUFAKIS, Y. 2015. *The global minotaur: America, Europe and the future of the global economy*, Zed Books Ltd.
- Wang C, Liu M, Wang Z, Li S, Deng Y, He N. Point-of-care diagnostics for infectious diseases: from methods to devices. *Nano Today* 2021; 37:101092.
- WEI, G., SU, Z., REYNOLDS, N. P., AROSIO, P., HAMLEY, I. W., GAZIT, E. & MEZZENGA, R. 2017. Self-assembling peptide and protein amyloids: from structure to tailored function in nanotechnology. *Chemical Society Reviews*, 46, 4661-4708.
- Werid GM, Miller D, Hemmatzadeh F, Messele YE, Petrovski K. An overview of the detection of bovine respiratory disease complex pathogens using immunohistochemistry: emerging trends and opportunities. *J Vet Diagn Invest* 2024; 36(1):12–23.

Références

- WILCZEWSKA, A. Z., NIEMIROWICZ, K., MARKIEWICZ, K. H. & CAR, H. 2012. Nanoparticles as drug delivery systems. *Pharmacological reports*, 64, 1020-1037.
- WOLDEAMANUEL, K. M., KURRA, F. A. & ROBA, Y. T. 2021. A review on nanotechnology and its application in modern veterinary science. *International Journal of Nanomaterials, Nanotechnology and Nanomedicine*, 7, 026-031.
- Youssef, F. S., EL-BANNA, H. A., ELZORBA, H. Y. & GALAL, A. M. 2019. Application of some nanoparticles in the field of veterinary medicine. *International journal of veterinary science and medicine*, 7, 78-93.
- ZAIDI, S., MISBA, L. & KHAN, A. U. 2017. Nano-therapeutics: a revolution in infection control in post antibiotic era. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 13, 2281-2301.
- ZELTINS, A. 2013. Construction and characterization of virus-like particles: a review. *Molecular biotechnology*, 53, 92-107.
- ZHAO, C.-Y., CHENG, R., YANG, Z. & TIAN, Z.-M. 2018. Nanotechnology for cancer therapy based on chemotherapy. *Molecules*, 23, 826.
- ZHAO, S., YU, X., QIAN, Y., CHEN, W. & SHEN, J. 2020. Multifunctional magnetic iron oxide nanoparticles: An advanced platform for cancer theranostics. *Theranostics*, 10, 6278.
- ZHENG, W., GAO, F. & GU, H. 2005. Magnetic polymer nanospheres with high and uniform magnetite content. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 288, 403-410.
- ZHU, C., LIANG, S., SONG, E., ZHOU, Y., WANG, W., SHAN, F., SHI, Y., HAO, C., YIN, K. & ZHANG, T. 2018. In-situ liquid cell transmission electron microscopy investigation on oriented attachment of gold nanoparticles. *Nature communications*, 9, 1-7.
- ف حلفاوي, ع. مسعودي, التكنولوجيا النانوية و معالجة المحيط, تطبيق الجسيمات النانوية في مجال تنقية المياه, قسم الكيمياء كلية الرياضيات و علوم المادة, جامعة قاصدي مرباح ورقلة 2020,
- محمد حمزة احميدة, نجوى حمزة احميد, عزيزة أنور احميدة, مقدمة مبسطة عن تقنية النانو: تعريفها مصطلحاتها وتطبيقاتها و تواجهها في البيئة, 2017 Libyan International Medical University Journal
- عبد الله احمد عبد الله, تطبيقات تقنية النانو على المواد المستخدمة في الواجهات الخارجية للمباني, جامعة القاهرة, مصر 2017
- رشا مضوي زائد مضوي نازك جاه الله النور عمر- نضال العجب إسماعيل زيدان- هناء الزين محمود الزين استخدام تقنية النانو تكنولوجي في الطب بحث تكميلي لنيل درجة البكالوريوس في التربية فيزياء قسم الفيزياء و الفلك كلية التربية جامعة السودان للعلوم و التكنولوجيا, 2018