

II. Cellules procaryotes

Les bactéries sont des micro-organismes petits (de diamètre $< 1 \mu\text{m}$ - $50 \mu\text{m}$) et unicellulaires qui appartiennent à un groupe appelé procaryotes car leur ADN n'est pas entouré d'une membrane nucléaire. Leur structure cellulaire interne est simple (Figure 1) alors que la plus grande complexité cellulaire concerne les structures de la surface cellulaire.

Les bactéries ne possèdent pas de mitochondries ni de chloroplastes, organites responsables de la production d'énergie dans les cellules eucaryotes, et de structures membranaires internes comme le réticulum endoplasmique et l'appareil de Golgi ; cependant, certaines bactéries photosynthétiques ont des membranes internes. Malgré cette simplicité structurelle, il existe une grande variation dans la forme des cellules lorsqu'elles sont observées au microscope.

Les bactéries sont ubiquitaires. C'est un groupe divers d'organismes qui peuvent obtenir de l'énergie et du carbone à partir d'un grand nombre de sources et, par conséquent, peuvent coloniser n'importe quelle niche sur notre planète. Les eubactéries comprennent certaines bactéries courantes comme l'*Escherichia coli* et le *Staphylococcus aureus* ; elles sont les procaryotes les mieux étudiés et compris. Les archaébactéries constituent un groupe très diversifié d'organismes qui diffèrent des eubactéries par certaines caractéristiques comme des parois et des membranes cellulaires. Leur architecture simple permet une reproduction rapide, ce qui facilite leur adaptation aux changements environnementaux. Le métabolisme bactérien est un modèle d'efficacité en raison d'un grand rapport surface-volume.

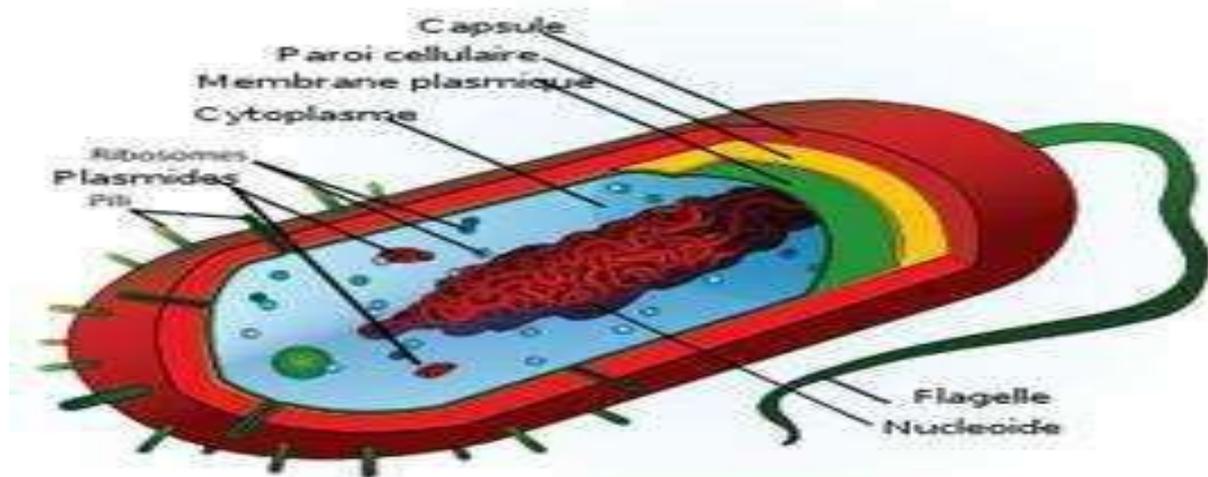


Figure 1 : Structure cellulaire de la cellule bactérienne.

II.1. Cytoplasme et ribosomes

Le cytoplasme des bactéries est aqueux, contenant un cocktail de molécules, d'acides nucléiques (ARN) et de protéines nécessaires au fonctionnement de la cellule. On y retrouve notamment les protéines, les enzymes, les nutriments et toutes les molécules nécessaires à la survie de la bactérie.

Les principales structures, communes à toutes les bactéries que l'on trouve dans le cytoplasme, sont les ribosomes. Les ribosomes, formés d'une petite et d'une grande sous-unité constituée de protéines et d'ARN, sont les sites protéiques de la synthèse dans la cellule. Bien que similaires en forme et en fonction à ceux des cellules eucaryotes, les ribosomes des cellules procaryotes diffèrent dans la nature des protéines et d'ARN qui les constituent.

Les bactéries présentent une grande diversité de morphologies cellulaires. La plupart des bactéries ont une forme soit sphérique, appelées coques (du grec *kókkos*, grain), soit en forme de bâtonnet, appelées bacilles (du latin *baculus*, bâton), soit en forme hélicoïdale, appelées spirilles. Il existe également des formes intermédiaires appelés les coccobacilles. Le mode d'arrangement des cellules bactériennes est aussi une caractéristique qui permet de distinguer les bactéries. Plusieurs espèces bactériennes peuvent être observées sous forme unicellulaire isolée, alors que d'autres espèces sont associées entre elles. Ces dernières peuvent être associées en paires (diplocoques) comme les *Neisseria*, en chaîne comme les *streptocoques* ou en amas comme les *staphylocoques*. La grande diversité de forme est déterminée par la paroi cellulaire et le cytosquelette (Figure 2).

II.2. ADN bactérien

L'ADN bactérien est localisé dans le cytoplasme. Il est constitué d'un seul chromosome de taille différente selon les différentes espèces de bactéries (le chromosome de l'*E. coli* a une longueur de 4×10^6 paires de bases). L'ADN est circulaire, légèrement superenroulé, et associé à des protéines semblables aux histones des cellules eucaryotes. Bien que le chromosome ne soit pas entouré d'une membrane nucléaire, il forme une structure visualisée au microscope électronique, appelé nucléoïde. Certaines bactéries contiennent aussi de petites molécules d'ADN extra chromosomiques, appelées plasmides. Celles-ci portent souvent des gènes qui ne sont pas indispensables à la vie normale de la cellule mais qui confèrent aux cellules des avantages dans certaines situations, comme la résistance aux antibiotiques.

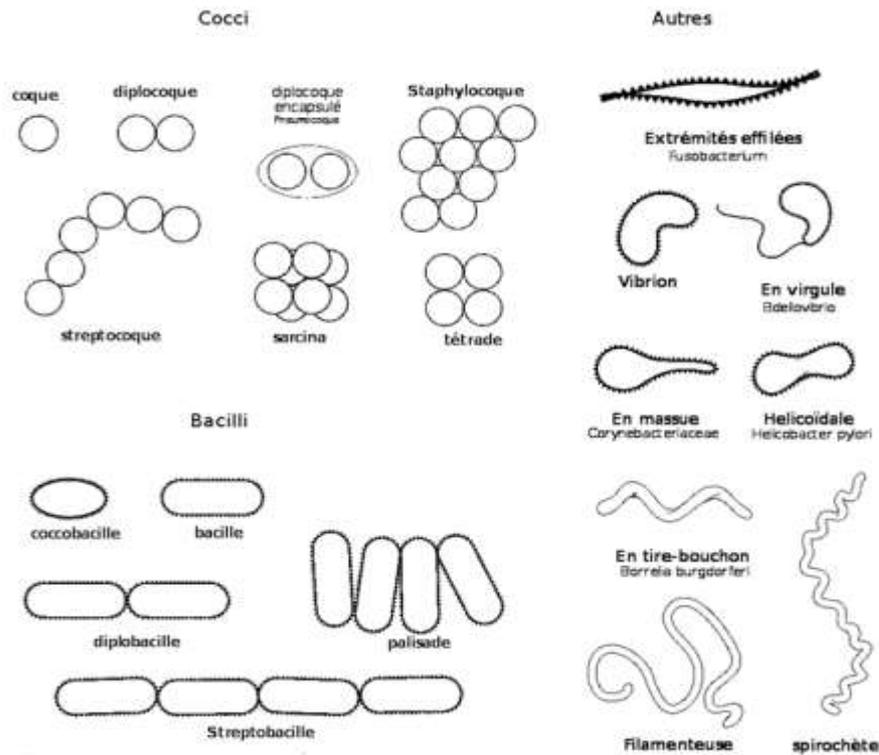


Figure 2 : Différent formes de la bactérie.

II.3. Membrane plasmique (cytoplasmique)

La membrane plasmique est une bicouche lipidique semipermeable qui constitue une barrière entre le cytoplasme et l'environnement externe de la cellule. La membrane est formée de phospholipides (bicouche lipidique) et des protéines (Figure 3). Les lipides et les protéines sont complètement mobiles et bougent les uns par rapport aux autres. Le modèle de membrane largement accepté est celui de la mosaïque fluide.

Des protéines aux fonctions variées sont enfouies dans la bicouche lipidique comme les protéines de transport, les protéines impliquées dans le métabolisme de l'énergie et les récepteurs qui peuvent détecter et répondre aux stimuli chimiques. Les protéines intégrées sont complètement associées à la membrane et peuvent la traverser de part et d'autre. Les protéines contiennent des acides aminés hydrophobes au niveau des régions en contact avec les lipides.

Les phospholipides de la membrane plasmique, comme la phosphatidylcholine, sont constitués d'une tête polaire liée à deux chaînes longues d'acides gras non polaires via le glycérol. Ces molécules, constituées de groupements polaires et non polaires, sont appelées amphipathiques. Les têtes sont hydrophiles et les acides gras sont hydrophobes, ce qui signifie que, dans un environnement aqueux, ces molécules s'arrangent de sorte que les têtes soient en

contact avec l'eau et que les chaînes hydrophobes soient enfouies à l'intérieur de la bicouche loin de l'eau.

Par conséquent, une bicouche peut se former : c'est ce que l'on appelle une membrane de 5-10 nm d'épaisseur. L'intérieur de la membrane est très hydrophobe, ce qui lui permet d'être une barrière aux molécules volumineuses comme le glucose, ou aux molécules très polarisées comme les ions. De petites molécules comme l'eau, ainsi que des composés hydrophobes comme le benzène, peuvent diffuser à travers la membrane en se dissolvant dans la partie hydrophobe. Les membranes bactériennes ne contiennent pas de stérols, comme le cholestérol qui apporte une certaine rigidité à certains organismes.

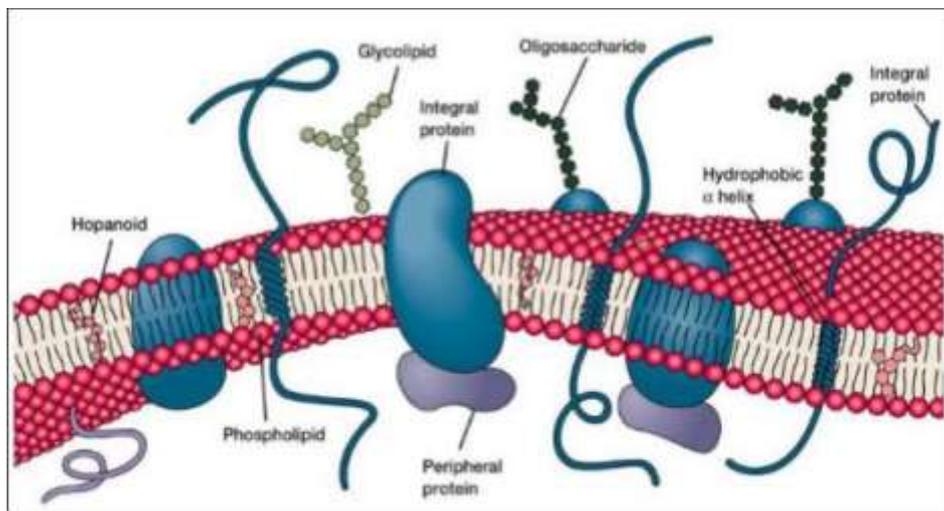


Figure 3 : Structure de la membrane cytoplasmique bactérienne.

II.4. Paroi bactérienne

Le cytoplasme de toutes les bactéries est entouré par une membrane plasmique (cytoplasmique) externe revêtue, chez la plupart des eubactéries, d'une paroi cellulaire rigide constituée de sucres et d'acides aminés, appelée peptidoglycan (PG) (Figure 4). La paroi des bactéries à Gram positif est constituée de plusieurs couches de PG, d'acides teichoïques et lipoteichoïques. La paroi des bactéries à Gram négatif est composée d'une membrane externe reliée par des lipoprotéines à une mince couche de PG.

Le rôle de la paroi bactérienne est donner à la bactérie sa forme et assurer une rigidité et une force, empêchant la lyse de la cellule par osmose lorsqu'elle se trouve dans un environnement dilué. Certaines mycobactéries, comme les myoplasmes, n'ont pas de paroi et sont donc incapables de survivre en dehors d'un hôte animal qui leur apporte un environnement osmotique correct.

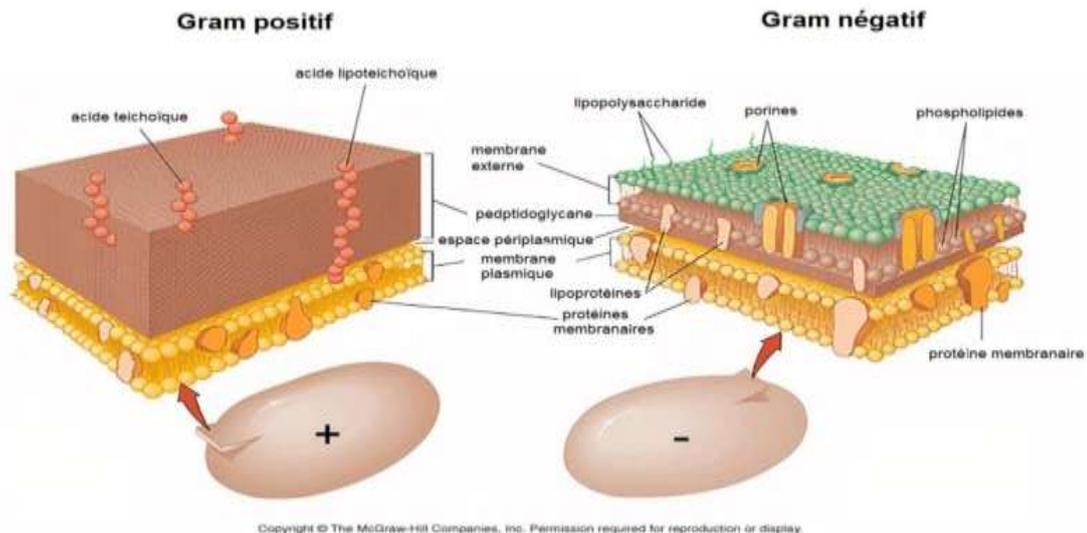


Figure 4 : Structure de la paroi bactérienne

La structure du peptidoglycan (ou parfois couche muréine) de l'*E. coli* est présentée dans la Figure 5. Elle est constituée de longs polymères de deux dérivés sucrés, le N-acétylglucosamine (G) et d'acide N-acétylmuramique (M). La partie peptidique est constituée de chaînes peptidiques composées de 4 acides aminés : une L-alanine en position 1, un D-glutamate en position 2, un acide diamino-pimélique, une lysine ou un autre acide aminé en position 3, et la D-alanine en position 4. Ces deux parties sont liées par des ponts interpeptidiques.

La rigidité est assurée par des liaisons croisées entre les chaînes d'acides aminés ; normalement, entre le troisième acide aminé d'une chaîne au quatrième acide aminé. La nature des chaînes d'acides aminés et les liaisons entre elles varient selon les espèces de bactéries ; cependant, le troisième acide aminé est un acide diaminé (possédant deux groupements amines, pouvant ainsi former des liaisons) et le quatrième acide aminé est normalement la D-alanine (D-Ala).

Chez les bactéries Gram positives, la liaison contient souvent un pont d'acides aminés par exemple, chez le *Staphylococcus aureus*, il existe un pont de cinq acides aminés (pentapeptide) de glycine entre la D-Ala et la L-lysine. Des liaisons croisées multiples à l'intérieur et entre les chaînes donnent au peptidoglycan une structure rigide et forte. Les caractéristiques uniques du peptidoglycan sont :

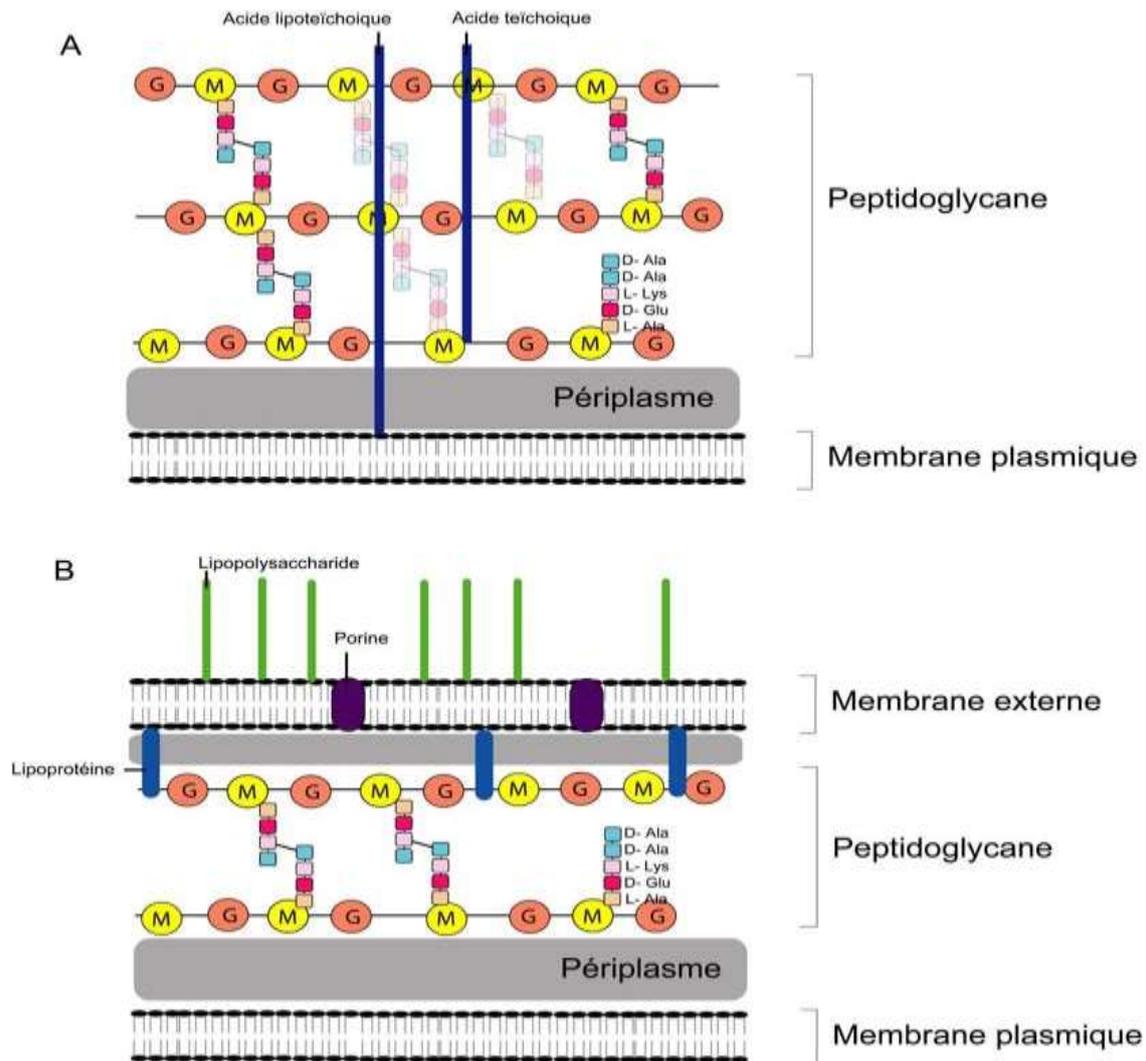


Figure 5 : Représentation simplifiée de la paroi des bactéries à Gram positif et à Gram négatif. **A.** La paroi des bactéries à Gram positif, **B.** La paroi des bactéries à Gram négatif. **G.** N-acétylglucosamine, **M.** acide N-acétylmuramique

- la présence d'acides D-aminés : les acides L-aminés sont généralement trouvés dans les protéines.
- la présence d'acide N-acétylmuramique ; ce sucre n'est pas présent dans les cellules eucaryotes

Des couches de polysaccharides ou de protéines formant une capsule ou une couche fine peuvent couvrir la paroi. Les couches extérieures à la paroi cellulaire sont appelées enveloppes. De nombreuses structures sont présentes à la surface de la bactérie et permettent la survie de la cellule dans son environnement. Des extensions spiculées protéino-aqueuses de plusieurs millimètres de longueur, appelés pili (pilus) se projettent sur la surface cellulaire au microscope électronique. Ces structures permettent l'adhésion des bactéries aux différentes surfaces.

Cependant, il existe un type particulier de pilus, le pilus sexuel, qui est impliqué dans le transfert de matériel génétique d'une bactérie à une autre. Les bactéries mobiles ont un ou plusieurs flagelles qui sont des structures rigides, cylindriques et de longueur pouvant aller jusqu'à 20 μm . La rotation du flagelle sur la bactérie permet le mouvement de la bactérie.

II.4.1. Coloration de Gram

Les cellules sont divisées en deux groupes sur la base de leur réaction à un colorant établi par Christian Gram en 1884. La réaction à la coloration est liée à la structure de l'enveloppe cellulaire de ces deux groupes de bactéries. Les bactéries Gram positives ont seulement une seule membrane appelée membrane plasmique (ou cytoplasmique), entourée par une couche épaisse de peptidoglycan (20-80 nm). Les bactéries Gram négatives ont seulement une couche fine de peptidoglycan (1-3 nm) mais entourée d'une membrane externe supplémentaire agissant comme une barrière (Figure 4 et 5).

Le procédé de coloration Gram est le suivant. Les cellules fixées sont colorées par un colorant sombre comme le violet cristal, suivi par de l'iode qui forme un complexe avec le colorant dans la paroi de la bactérie. On y ajoute de l'alcool qui élimine le colorant violet cristal et iodé de la cellule ayant une paroi fine et non celle à paroi épaisse. Enfin, un colorant plus pâle comme la fuscine est ajouté et colore en rose la cellule décolorée par le premier colorant sombre. Les cellules qui retiennent les colorants (à paroi épaisse) sont appelées Gram positives et sont de couleur pourpre sombre au microscope optique, Celles qui perdent le colorant (à paroi fine et membrane externe) sont appelées Gram négatives et se colorent en rose ou en pourpre clair.

II.5. Espace périplasmique

La membrane externe des bactéries Gram négatives joue le rôle d'une barrière supplémentaire protégeant le peptidoglycan de composés toxiques comme le lysozyme qui détruit la paroi cellulaire. Elle crée un espace aqueux entre les deux membranes, appelé espace périplasmique, on pense qu'il a une structure gélatineuse avec une petite quantité de peptidoglycan. Son épaisseur estimée varie comme le peptidoglycan de 1 à 71 nm mais une valeur réelle définitive est difficile à obtenir. L'espace périplasmique contient un certain nombre de protéines associées : au transport de nutriments dans la cellule, à des enzymes impliquées dans la digestion des nutriments, comme les protéases et a des enzymes protégeant la cellule contre des toxiques chimiques comme les β - lactamases qui détruisent la pénicilline.

II.6. Membrane externe

La membrane externe des bactéries Gram négatives est constituée de phospholipides présente certaines caractéristiques uniques :

- Des pores, qui permettent le passage de petites molécules hydrophiles à travers la membrane ;
- Une petite lipoprotéine abondante appelée lipoprotéine de Braun qui est liée de façon covalente au peptidoglycan et est enfouie dans la membrane externe par son lipide hydrophobe, maintenant ainsi le peptidoglycan et la membrane externe proches l'un de l'autre ;
- Des molécules de LPS sont trouvées dans le feuillet externe de la membrane externe.

Le LPS est constitué de trois parties :

- Le lipide A enfoui dans la membrane ;
- Un cœur polysaccharidique contenant plusieurs sucres inhabituels comme le 2- céto-3 désoxyoctonate ;
- Une chaîne latérale de sucres répétitifs, appelée antigène O ou chaîne latérale O. La composition de la chaîne latérale O varie d'une souche à l'autre et des anticorps dirigés contre l'antigène O sont souvent utilisés pour typer les bactéries au laboratoire.

Les LPS apportent plusieurs caractères aux bactéries Gram négatives :

- Ils créent une charge négative nette à la surface de la cellule ;
- Ils peuvent empêcher l'accès de molécules toxiques à la surface de la cellule et donc jouer un rôle protecteur ;
- Les longues chaînes latérales présentent des variations de structure et peuvent permettre aux bactéries Gram négatives d'échapper à la réponse immune.

Le plus important est que le lipide A de la molécule LPS, appelée endotoxine, est hautement toxique pour les Mammifères ; sa présence dans le courant sanguin même à très faibles concentrations provoque un choc toxique et la mort.

II.7. Endospores

Certaines bactéries comme le *Bacillus* et le *Clostridium* produisent une structure reproductive appelée endospore. On peut la voir sous microscope optique en utilisant des colorants spécifiques comme le vert malachite ou le microscope en contraste de phase. La spore possède plusieurs couches qui entourent le matériel génétique bactérien, lui permettant de

résister à toute sorte de stress environnemental comme la chaleur, l'irritation UV, les désinfectants chimiques et la sécheresse.

II.8. Autre structures internes des bactéries

Certaines bactéries possèdent des structures douées de fonctions spécifiques. Des structures granulaires, appelées corps d'inclusion, peuvent souvent être observée au microscope optique. Ces granules sont souvent des molécules de stockage et peuvent être liées à la membrane comme la poly-3-hydroxybutyrate (PBH) ou être répandues dans le cytoplasme comme les granules polyphosphates (appelées aussi granules métachromatiques).

Des gouttelettes lipidiques peuvent aussi être vues chez certaines bactéries. Un corps d'inclusion intéressant, la vacuole gazeuse, est présent chez les cyanobactéries (algues bleu vert) et autres bactéries photosynthétiques vivant dans un environnement aqueux. Des systèmes membraneux intracellulaires plus complexes et spécialisés sont présents chez les bactéries photosynthétiques comme la bactérie verte non sulfureuse et pourpre et sont associés à la capture de l'énergie lumineuse.