

b) Classification de Copeland :

En 1938, **H.F. Copeland** sépare le règne des bactéries (ou "*Monera*") de celui des protistes.

c) Classification de Whittaker :

En 1959, **R.H. Whittaker** individualise celui des champignons. La proposition de **R.H. Whittaker** (Animal, Végétal, Champignons, Protistes et "*Monères*") a été largement acceptée par la communauté scientifique.

1.3 Différence entre cellule procaryote et cellule eucaryote :

La cellule eucaryote est la cellule qui possède un vrai noyau alors que la cellule procaryote possède des éléments nucléaire mais sans être entouré par une membrane, le tableau suivant résume les caractéristiques des eucaryotes et des procaryotes tout en faisant apparaître les caractères de différenciation :

Caractéristiques	Cellule procaryote	Cellule eucaryote
Taille typique	1-10 μm	10-100 μm
Type de noyau	nucléotide (pas de véritable noyau)	vrai noyau avec double membrane
Division de la cellule	Division simple scissiparité	mitose (réplication de la cellule) méiose (menant à la formation de gamètes)
Membrane nucléaire	Non	Oui
Nombre de chromosomes	1 chromosome (Haploïde)	Plusieurs chromosomes (Diploïde)
Chromosome circulaire	Oui	Non
Histones	Non	Oui
Nucléole	Non	Oui
Microtubule	Non	Oui
Echange génétique transfert	unidirectionnel	fusion de gamètes
ARN et synthèse des	couplé au cytoplasme	synthèse d'ARN dans le noyau

protéines		synthèse de protéines dans le cytoplasme
Réticulum endoplasmique	Non	Oui
Appareil de Golgi	Non	Oui
Lysosomes	Non	Oui
chlorophylle	Des fois dans le cytoplasme	Dans chloroplaste
Mitochondries	Non	Oui
Chloroplastes	Non	Oui chez les plantes
Inclusion-granule-réserve	Oui	Oui
Vacuole à gaz	Des fois	Oui

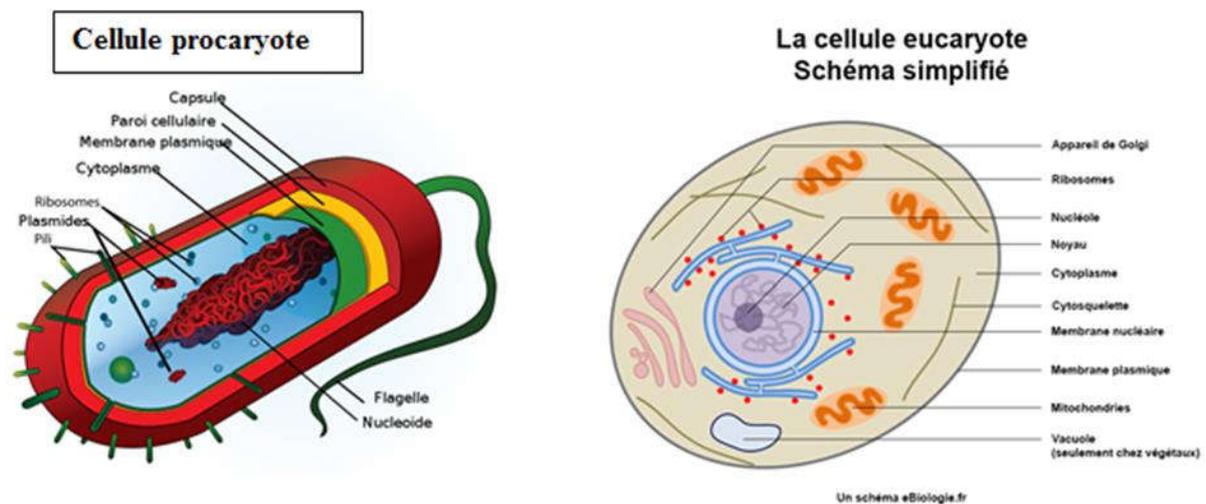


Figure 1 : Cellule Procaryote et cellule Eucaryote

1.4 Relation hôte bactérie :

La relation entre les microorganismes et les autres êtres vivants est une relation complexe, un équilibre pouvant évoluer, et qui est influencé par de nombreux facteurs. On

appelle « **hôte** » **l'organisme qui héberge, qui est soumis à la contamination**. Selon le type de relation existant, on distingue :

a) Micro-organismes symbiotiques : La symbiose est un mode de relation dans lequel bactérie et hôte profitent tous deux de leur association. Ex : les bactéries qui vivent dans le tube digestif (ex : *Escherichia coli*.) interviennent dans la protection contre l'infection dans le tube digestif et dans les synthèses vitaminiques

b) Micro-organismes commensaux : Ce sont des micro-organismes vivant à la surface ou dans les cavités naturelles de l'hôte sans nuire à celui-ci. Ces bactéries peuvent devenir pathogènes (pathogènes occasionnels ou opportunistes). Il existe des commensaux de la peau et des commensaux des muqueuses.

c) Micro-organismes pathogènes : Ce sont des bactéries douées d'un pouvoir agressif chez l'hôte entraînant chez celui-ci une maladie infectieuse. On distingue :

Micro-organismes pathogènes stricts ou à fort potentiel de pathogénicité. Elles sont appelées bactéries parasites : en principe, toujours pathogènes pour un hôte donné ex : *Mycobacterium tuberculosis*.

Micro-organismes pathogènes occasionnels ou opportunistes : Ces microorganismes déterminent des maladies lorsque des conditions particulières se trouvent réalisées (sujets immunodéprimés, antibiothérapie à large spectre, prolongée, âges extrêmes de la vie ...)

d) Le saprophytisme : Les microorganismes saprophytes vivent à l'état libre dans la nature (eaux, sol...). Ils n'établissent pas de relation de dépendance avec d'autres êtres vivants. Ils puisent leur énergie et leurs éléments nutritifs en dégradant les matières organiques provenant de cadavres ou de résidus végétaux. Leur rôle est très important dans le cycle de la vie : ils permettent la dégradation des déchets organiques et la fertilisation des sols par l'humus.

2 La cellule bactérienne

2.1 Introduction :

Les bactéries sont les plus petits organismes connus, doués de métabolisme et capable de se croître et se diviser aux dépens de substances nutritives. Leur diamètre est habituellement d'environ 1µm. la cellule bactérienne est entourée d'une enveloppe rigide la paroi qui lui confère sa forme, sa résistance et qui entoure une seconde enveloppe beaucoup plus mince et plus délicate, la membrane cytoplasmique. Le Cytoplasme est en général très

homogène, contient essentiellement des granulations d'acide ribonucléique, les ribosomes, parfois aussi des substances de réserves qui rendent sa structure plus grossière. Elle ne renferme aucun des organites décrits dans la cellule eucaryote (réticulum endoplasmique, mitochondries...).

Dans le cytoplasme, l'appareil nucléaire se distingue par son aspect fibrillaire, finement réticulé, il n'est pas entouré dans une membrane. La paroi, la membrane, le cytoplasme et l'appareil nucléaire représentent les structures essentielles de la cellule. Elles sont toujours présentes. D'autres organites peuvent éventuellement s'y adjoindre : la capsule, enveloppe externe qui peut prendre un développement considérable, les flagelles de nature protéiques qui confèrent à la bactérie sa mobilité et enfin les pili ou fimbriae qui sont plus fins que les flagelles, rigides et cassants, certains sont appelés pili sexuels et qui jouent un rôle dans la conjugaison bactérienne.

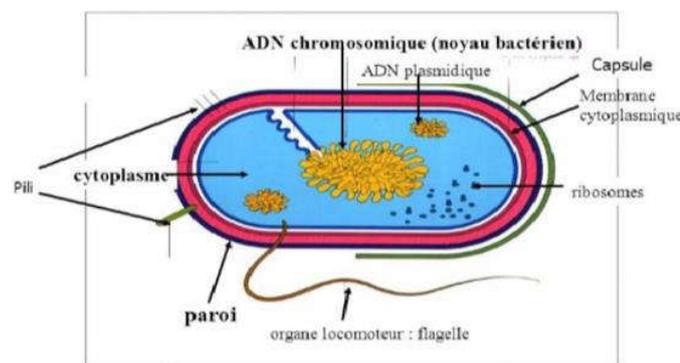
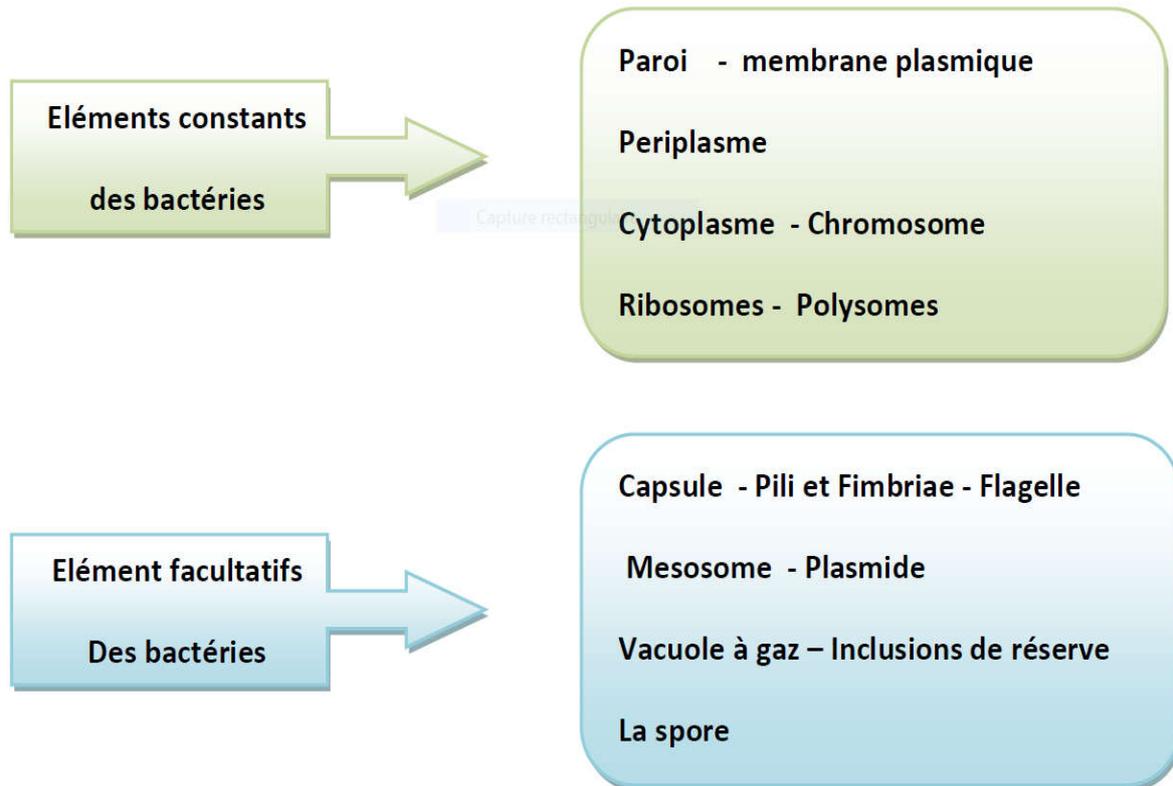


Figure 02 : les éléments constitutifs de la cellule bactérienne

2.2 Éléments constants et inconstants de la structure bactérienne :

Certaines structures sont présentes chez toutes les bactéries, ce sont les éléments « constants » ; d'autres sont retrouvés seulement chez certaines bactéries : ce sont les éléments « inconstants » ou « facultatifs ».



2.2.1 Éléments constants :

- A. Le cytoplasme :** est un hydrogel colloïdal de pH variant de 7 à 7.2. Il est composé d'une phase dispersante constituée par une solution de sels minéraux et de composés solubles de nature lipoprotéique et une phase dispersée formée de nucléoprotéines et de lipides.
- B. La membrane cytoplasmique :** Les membranes cytoplasmiques isolées et observées au microscope en contraste de phase présentent un aspect homogène, de faible densité. Elles ont une épaisseur de 7,5 nm environ et comportent un feuillet interne transparent de nature lipidique pris en « sandwich » entre deux feuilles denses, opaques aux électrons, de nature protéique. L'analyse chimique de ces membranes révèle trois types de substance : lipide, protéine et glucides. Les molécules lipidiques sont de loin les plus abondantes (des phospholipides), en particulier le phosphatidylglycérol et/ou la phosphatidyléthanolamine. Les membranes des bactéries Gram positives contiennent l'un de ces composants ou les deux avec plusieurs autres substances de nature voisine. Les bactéries Gram négative ne renferment qu'un seul ou deux types de molécules lipidiques.

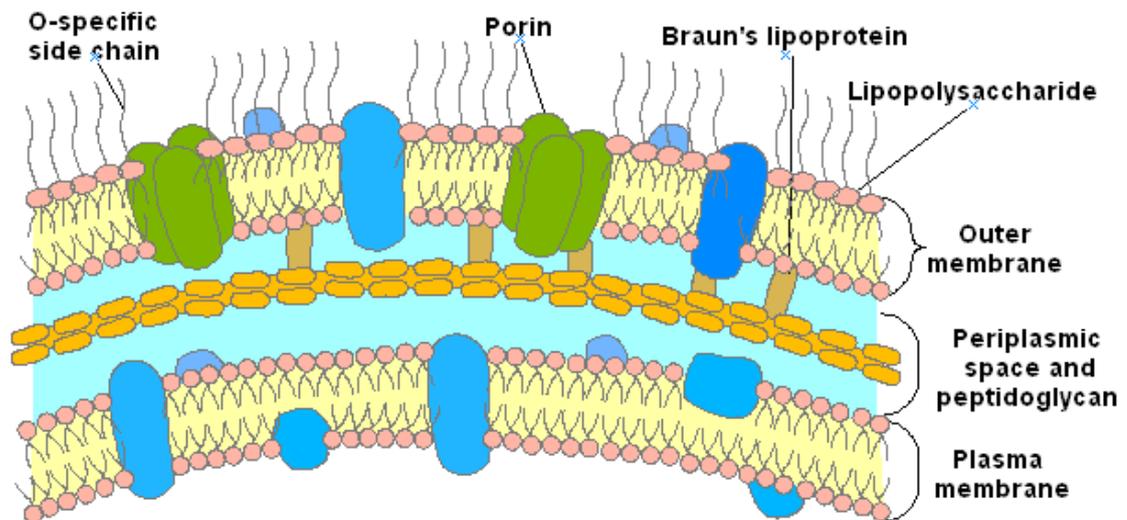


Figure 03 : Structure de la membrane bactérienne

La membrane cytoplasmique contient surtout les enzymes de la chaîne respiratoire autrement dit les déshydrogénases et les coenzymes qui leur sont fonctionnellement associés NAD, FAD, cytochromes, cytochromes-oxydases. Ces systèmes multi-enzymatiques président aux réactions de phosphorylation.

Les lipides sont à la base de la structure. Chaque molécule lipidique est amphiphile, elle est caractérisée par une partie hydrophobe soluble dans l'huile, insoluble dans l'eau et une partie hydrophile ayant les propriétés opposées et porteur d'un groupement phosphate chargé négativement. Ces molécules s'organisent spontanément en deux feuillets où les parties hydrophobes se font face et sont protégées du milieu aqueux tandis que les têtes hydrophiles externes et sont émergées. Ainsi chaque membrane est faite de deux couches hydrophiles séparées par une couche hydrophobe.

Les protéines membranaires sont composés d'acide aminés soudé bout à bout selon une séquence linéaire formant ainsi une chaîne fortement repliée sur elle-même. Les protéines extrinsèques dites protéine périphériques sont liées faiblement à la membrane et apparaissent sur l'une des deux faces du double feuillet et n'ont aucun groupement inséré dans la zone hydrophobe. Les protéines intrinsèques ou internes transvaseraient complètement le double feuillet membranaire pour apparaître sur les deux faces interne et externe de la membrane.

➤ Fonctions de la membrane plasmique

a- Rôle de barrière semi-perméable (ou semi sélective) : elle permet le passage de molécules lipophiles et empêche le passage des molécules hydrophiles.

On distingue 2 grands types de transport :

- **Le transport passif** : il désigne le passage d'un ion ou d'une molécule à travers une membrane sans dépense d'énergie, il se fait dans le **sens du gradient de concentration** et **ne nécessite pas d'énergie**, on distingue :

✚ **Diffusion simple** : Se fait à travers la partie lipidique de la membrane plasmique ; pas d'intervention des protéines membranaires, Cette diffusion se fait dans le sens du gradient (de plus concentré vers le moins concentré) jusqu'à avoir un équilibre, à condition que la molécule doit être hydrophobe et non polaire (non chargé).

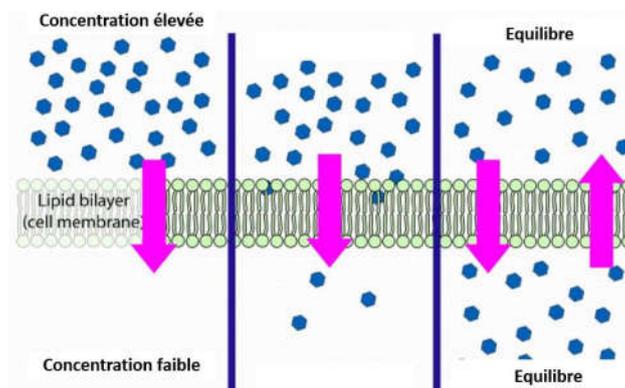


Figure 04 : transport des molécules par diffusion simple.

✚ **Diffusion facilitée** : c'est un toujours un transport passif, se fait dans le sens du gradient (de plus concentré vers le moins concentré) et qui se réalise par la présence de protéine qui permette au molécule de traverser la membrane, ces protéines vont former des canaux transmembranaires, les molécules sont hydrophiles et polaires (chargées), exp : sels minéraux ; ce type de transport est plus rapide par rapport au diffusion simple.

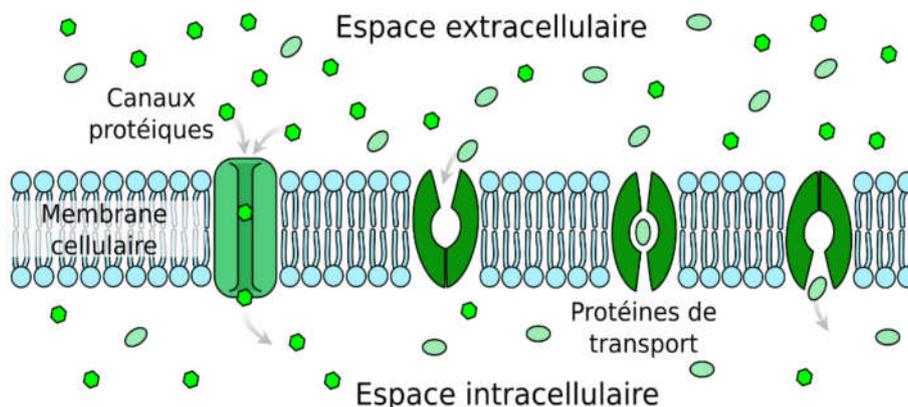


Figure 05 : transport des molécules par diffusion facilitée.

- ✚ **Osmose (diffusion de l'eau)** : l'eau passe du côté moins concentré (hypotonique) vers le côté plus concentré (Hypertonique) dans le but de rendre les deux milieux isotonique (même concentration).

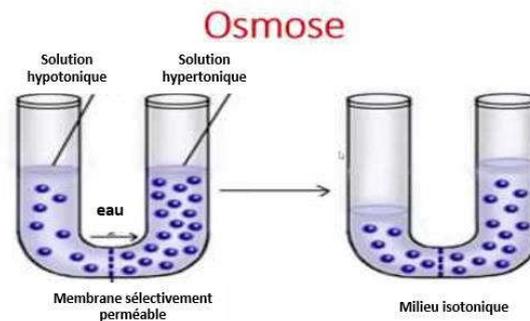


Figure 06 : diffusion d'eau (osmose)

- **Le transport actif** : il se fait en **sens inverse du gradient de concentration** des molécules, ce qui nécessite **l'utilisation d'énergie** (généralement fournie sous forme d'ATP) et qui est assuré par un transporteur protéique, dans le but d'accumuler des molécules, on distingue :
 - ✓ Transport actif primaire : consommation directe de l'énergie(ATP) via les protéines.
 - ✓ Transport actif secondaire : c'est utilisation indirecte de l'énergie, Il est assuré par des protéines qui transportent 2 molécules différentes ; les cotransporteurs.

La 1ere molécule fournit de l'énergie pour la 2ème qui passe contre son gradient. On distingue 3 types de transporteurs : uniport, symport et antiport.

- ❖ Protéine uniporter : passage d'un seul type de molécule.
- ❖ Protéine symporter : passage de 2 molécules différentes à la fois en même sens.
- ❖ Protéine antiporter : passage de 2 molécules différentes à la fois en sens inverse.

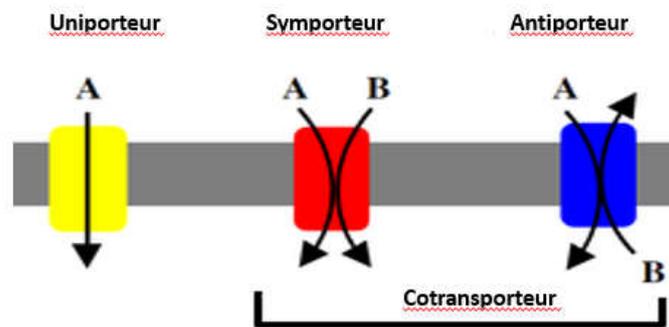


Figure 07 : différents protéines transporteur.

- ✓ Le transport vésiculaire : Les vésicules de transport sont des structures sphériques formées à partir de la bicouche lipidique refermée sur elle-même. Ces vésicules peuvent contenir des molécules et de nombreuses protéines transmembranaires ou associées à la membrane qui assurent leur formation, leur maintien, leurs déplacements et leur adressage à travers la cellule, On distingue :
 - Endocytose : L'endocytose est un mécanisme qui permet le passage de certaines substances de milieu extracellulaire vers l'intérieur de la cellule, ces substances sont enfermées dans un sac constitué d'une membrane qu'on appelle vésicule. L'étape suivante est la migration de cette vésicule en direction de la membrane plasmique puis sa fusion avec celle-ci, ensuite les molécules vont être libérées à l'intérieur de la cellule. On trouve : Pinocytose (passage des petites molécules) et Phagocytose (passage des grosses molécules).
 - Exocytose : C'est l'inverse d'endocytose, on a toujours formation de vésicule, mais cette fois-ci les molécules vont être expulsées vers l'extérieur de la cellule.

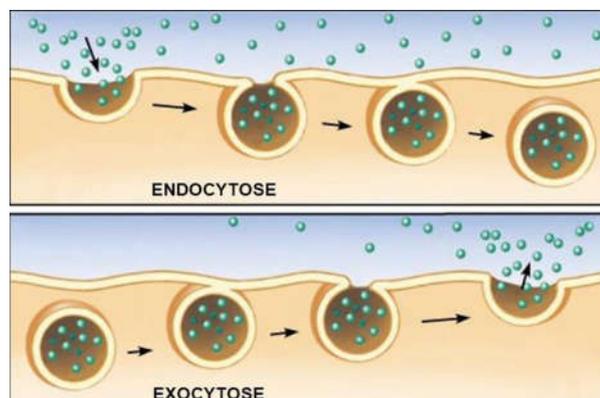


Figure 08 : transport actif par phénomène d'endocytose et d'exocytose.

b- Site de fixation des flagelles la membrane plasmique est considérée comme un site de fixation des flagelles.

c- Possède des protéines membranaires ayant pour rôles :

- Enzymes responsables de la biosynthèse et de l'excrétion dans l'espace périplasmique de molécules nécessaires à la synthèse de la paroi
- Enzymes de la chaîne respiratoire permettant la synthèse d'ATP et celles de la photosynthèse
- Transporteurs de diverses molécules (ions, sucres, ...) dans les 2 sens.

De plus la membrane joue un rôle important dans la détection des signaux et de composés présents dans le milieu environnant grâce à la présence de **protéines transmembranaires du chimiotactisme**. Ceci permet aux bactéries dotées de flagelles de « nager » vers les endroits les plus riches en nutriments par exemple et de s'éloigner des endroits défavorables comme ceux qui contiennent des substances toxiques. Ces protéines interviennent dans le sens de rotation des flagelles.

C. La paroi

La pression osmotique interne de la plupart des bactéries est comprise entre 5 et 20 atmosphères. Elle résulte de l'intense concentration des substances réalisée par les systèmes de transport actif. Pour équilibrer cette énorme pression, la bactérie est pourvue d'un véritable exosquelette rigide et résistant, la paroi, formée d'un polymère, le peptidoglycane encore appelé mucopeptide ou muréine. Elle joue un rôle important dans la division cellulaire et c'est à son niveau que se fait la distinction entre les bactéries Gram positive et bactéries Gram négatives.

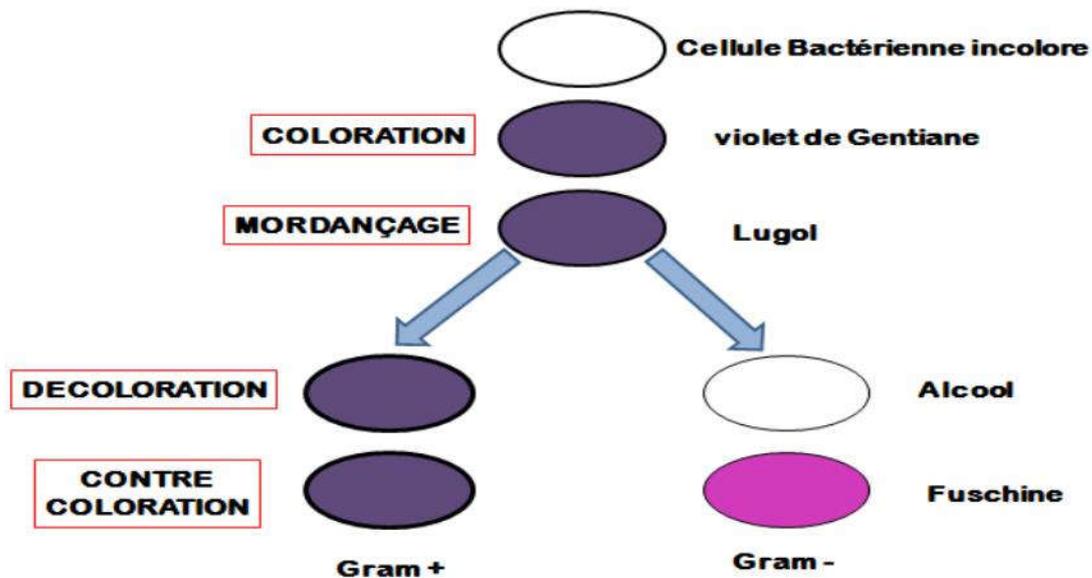
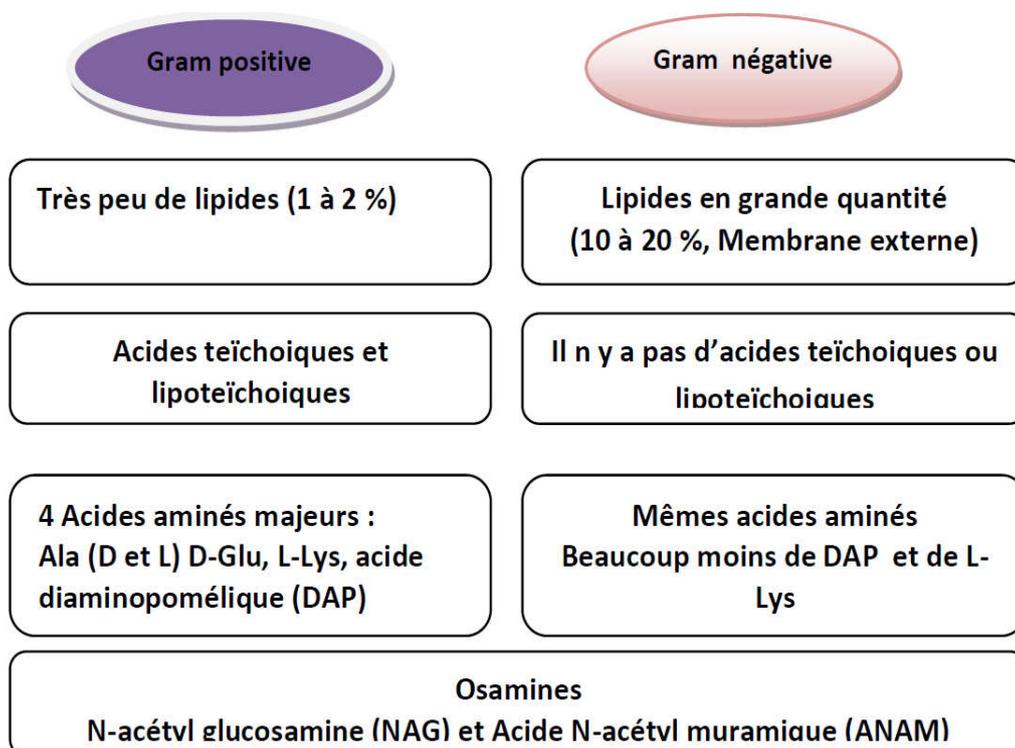


Figure 09 : Etapes de coloration de Gram

Composition chimique



Chez les bactéries Gram positive la paroi est épaisse de 20 à 80 nm et présente un aspect homogène en microscope électronique. L'élément structural principale est le peptidoglycane qui n'est qu'un glycosaminopeptide comportant une molécule d'acide N-acétyl-glucosamique et une molécule d'acide N-acétylmuramique, reliées entre elles par une

liaison b-glucosidique. L'acide muramique est en outre associé à une courte chaîne peptidique de quatre acides aminés appelée térapeptide : deux alanines, un acide glutamique et une lysine.

Chez les bactéries Gram négatives la paroi est beaucoup plus mince (10 à 15 nm) et présente une structure stratifiée plus complexe. Outre le peptidoglycane de base, elle comprend trois autres structures polymériques externes ou reliées à ce peptidoglycane, on distingue en effet :

- Une couche phospholipidique dite membrane externe pour le différencier de la membrane cytoplasmique et qui contient des protéines importantes.
- Un lipopolysaccharide (LPS)
- Et une lipoprotéine assurant la liaison entre la membrane externe et le peptidoglycane et conférant une certaine solidité à l'ensemble

La paroi bactérienne porte un grand nombre d'antigènes spécifiques à chaque type de bactéries appelés antigènes pariétaux ou antigènes O.

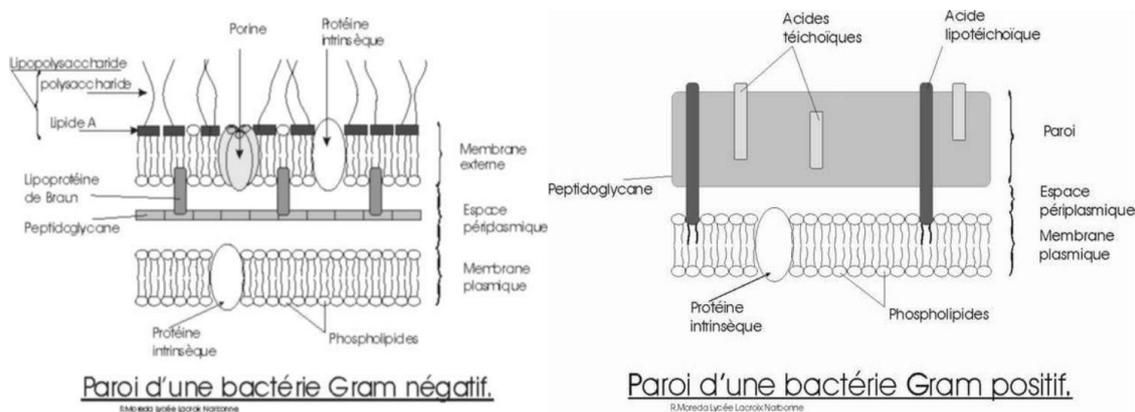


Figure 10 : différent composition de la paroi bactérienne.

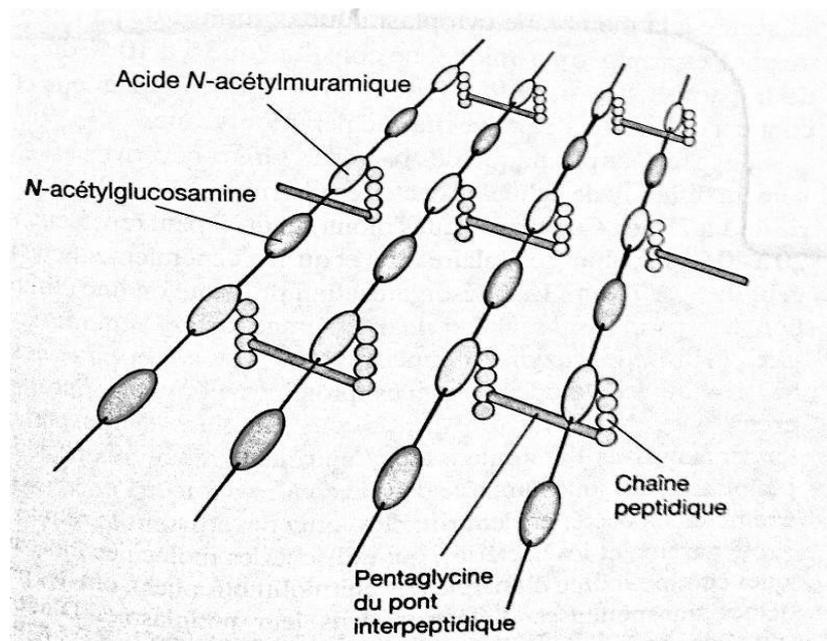


Figure 11 : Dessin schématique du peptidoglycane

-La chaîne polysaccharidique : faite d'une alternance de molécules de N-acétylglucosamine (NAG) et d'acide N-acétylmuramique (NAM).

-Les chaînes latérales peptidiques identiques, composés de 4 acides aminés (**tétrapeptides**), attachées aux NAM. -Chez les Gram positives, un ensemble de **ponts « inter peptidiques »** (pentapeptide) qui partent du 4^{ème} acide aminé du tétrapeptide vers le 3^{ème} acide aminé du tétrapeptide d'une seconde chaîne polysaccharidique et ainsi de suite.

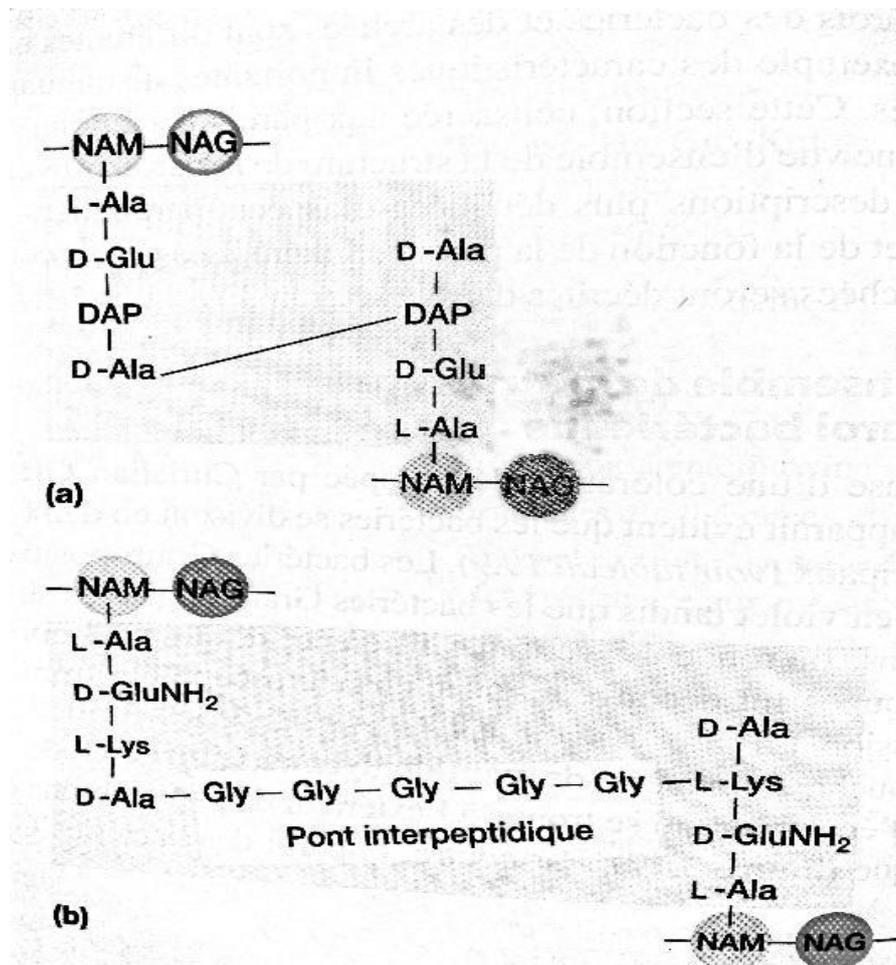


Figure 12 : Organisation du tétrapeptide et du pentapeptide a) Gram -, b) Gram +

Lipopolysaccharides (LPS) : formé de 3 parties :

Le **lipide (A)** couplé à la glucosamine et à des résidus phosphore qui est amphiphile, possédant une partie hydrophobe et un hydrophile. Il y a analogie entre les appellations « **endotoxine** », « **lipide A** » et « **membrane externe** ».

Le **polysaccharide central**, constitué de 10 sucres.

La **chaîne latérale O**, ou **antigène O**, chaîne courte, sa composition varie selon la souche bactérienne.

Le LPS joue plusieurs fonctions, telle que l'**attachement** sur les surfaces, **bloque l'entrée de substances toxiques**. Il agit comme **une endotoxine** (lipide A) qui cause les symptômes des maladies induites par des Gram négatives. On note également la présence de **PORINES** (protéines de passage trimérique) : seules structures de transport des composés hydrophiles, essentielles à la vie de la bactérie comme les monosaccharides, mais aussi à l'action de certains

antibiotiques. D'autres protéines servent à la captation d'ions (fer), ou de vitamines (facteurs de croissance).

D. L'appareil nucléaire

Pendant de nombreuses années, les essais de mise en évidence d'un appareil nucléaire chez les bactéries se sont révélés infructueux : la présence d'acide ribonucléique en quantité extrêmement importantes dans le cytoplasme bactérie masque en effet l'acide désoxyribonucléique et sa coloration par les colorants basophiles. Actuellement, il est amplement démontré que toutes les bactéries des corps intracellulaires que l'on distingue parfaitement des structures cytoplasmiques ; ils possèdent les propriétés chimiques que l'on reconnaît aux noyaux des cellules eucaryotes et se divisent en harmonie avec la cellule.

Comme tous les protistes procaryotes, les bactéries possèdent un appareil nucléaire constitué d'acide desoxyribonucléique (ADN) qui est le support de l'information génétique, il est composé d'ADN (60%), d'ARN (30%) et de protéines (10%).

En 1941 à l'institut Rockfeller, Avery en entreprenant une série d'expériences destinées à mieux comprendre les phénomènes décrits par Griffith en 1928 (mélange de deux pneumocoques S1 et R et leurs effets sur les souris de laboratoire) a découvert les molécules responsables de cette prodigieuse transformation. Il ne s'agissait pas comme on l'a décrit à l'époque d'une protéine mais d'un acide nucléique de poids moléculaire assez élevé, hautement polymérisé, l'acide désoxyribonucléique plus connu sous le nom ADN, très célèbre dans le domaine de la biologie moléculaire. Cette ADN est donc très doué de propriétés génétiques fondamentales puisqu'elle est le vecteur des caractères héréditaires de la bactérie.

La génétique associée à la biochimie a réalisé en cette date une véritable révolution biologique. En 1953 Waston et Crick ont proposés un modèle de structure spatiale « le fameux modèle à double hélice ».

E. Le Chromosome

- **Morphologie et structure**

La majorité des bactéries possèdent un (01) chromosome unique, circulaire. *Vibrio cholerae* en possède deux, un grand de 2,9 millions de bases et un petit de 1 million de bases. Chez *Escherichia coli* il est empaqueté et se trouve dans une région qu'on appelle nucléoïde ou corps nucléaire. Il mesure 1400 µm et 300 Å d'épaisseur. La morphologie des corps observés est variable selon la phase de croissance et de division de la bactérie.

Chez **les Cocci** on observe une petite masse sphérique ou ovoïde, souvent centrale. Chez **les Bacilles**, un Bâtonnets appariés, situés transversalement dans la cellule. Il est Généralement mononucléaire chez les cocci et plurinucléaires chez les bacilles. Cet aspect est visible chez les bactéries jeunes en phase exponentielle. L'appareil nucléaire se réplique plusieurs fois avant que la cellule ne se divise.

Cet ADN est associé à des protéines notamment des topoisomérases qui interviennent dans le repliement de la molécule d'ADN, par contre on ne trouve pas d'histones comme chez les eucaryotes. On trouve par contre des polyamines analogues aux histones, tel que la protéine II riches en Arginine.

- **Composition**

L'ADN ou acide désoxyribonucléique est un polymère de PM élevé, composé d'unités appelées nucléotides.

Nucléotide = « Groupement phosphoré + Sucre à 5 atomes + une base purique ou pyrimidique ».

Bases puriques : adénine A, guanine G

Bases pyrimidiques : Cytosine C et Thymines T

Le sucre : désoxyribose

Le groupement phosphoré est : un phosphate diester en 3' et 5' du désoxyribose

- **Réplication Chimique**

L'ADN se réplique, c'est-à-dire qu'il se reproduit lui-même. La séquence sur une chaîne détermine automatiquement la séquence sur l'autre chaîne.

La réplication **est semi-conservative** : Chaque chaîne parentale reste associée à la nouvelle chaîne pour qui elle sert de matrice.

La réplication **est bidirectionnelle** : Cairns a été le premier à observer un chromosome entier *d'E.coli* en cours de réplication. Il a associé des techniques de marquages isotopiques et d'autoradiographie suivie d'observation en microscopie électronique. Après avoir cultivé des bactéries dans un milieu contenant de la thymidine traitée à faible activité spécifique, pendant un temps dépassant la durée du cycle, il met au point une méthode de lyse de la cellule permettant de libérer l'ADN directement sur une grille de microscopie électronique, en minimisant les risques de cassures mécaniques de la molécule.

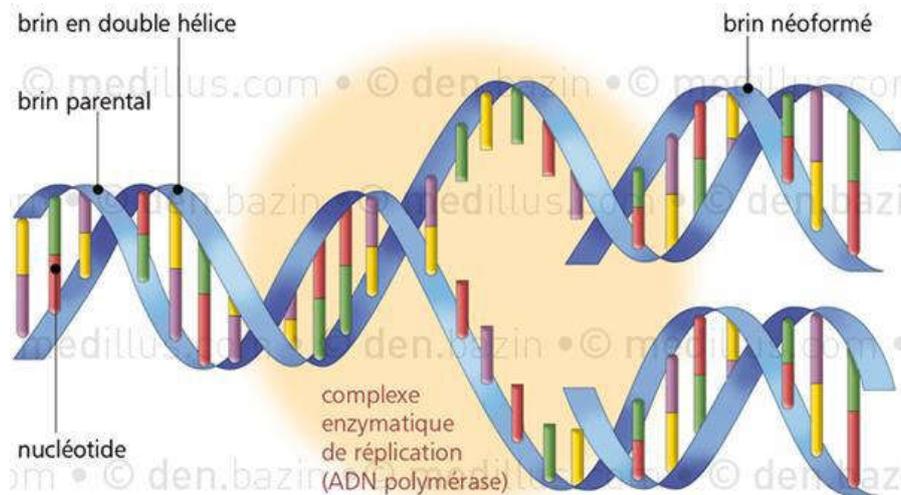


Figure 13 : Répllication semi conservative de l'ADN

▪ Structure

a- Modèle de Watson et Crick

En proposant leur modèle, Watson et Crick ont disposés de trois sortes de données : cytologique, biochimique, et génétique.

➤ Les données chimiques

L'acide désoxyribonucléique est un polymère de PM élevé, composé d'unités moléculaire appelées nucléotides. Chaque nucléotide est constitué d'un groupement phosphoré, d'un ose à cinq atomes de carbone et d'une base de purique et pyrimidique

- Les bases puriques sont l'adénine (A) ou la guanine (G) et les bases pyrimidiques sont la cytosine (C) et la thymine (T).
- L'ose est le désoxyribose.
- Le groupement phosphoré est un phosphate diester en position 3' et 5' du désoxyribose.

Ces nucléotides sont donc de quatre types selon la nature de la base constitutive. Ils s'unissent donc par des liaisons diester établies entre les fonctions acides de l'acidephosphorique et les fonctions alcools de l'ose. Ainsi de longues chaînes polynucléotidiques se constituent formant une épine dorsale où alternent régulièrement les molécules des oses et de phosphates, avec des projections latérales représentées par les bases organiques fixées aux molécules des oses.

Dans toutes les ADN, il existe autant de molécule de thymine que de molécules d'adénine et autant de molécule de cytosine que de molécules de guanine [A=T/C=G]. Autrement dit, on n'a A/T=1 et C/G=1. C'est le grand principe de l'équivalence ou de la complémentarité selon lequel, à une adénine correspond toujours une thymine et à une

cytosine vient toujours s'apparier une guanine. En revanche le rapport A+T/C+G, mieux connu sous le nom de coefficient de Chargaff varie considérablement avec les espèces et reste constant chez toutes les souches d'une même espèce.

➤ Les données génétiques

La formule de Watson et Crick doit répondre à trois impératifs génétiques qui sont normalement au nombre de trois :

- Au cours de la division cellulaire, cette structure doit se répliquer, autrement dit, se reproduire identique à elle-même pour que chacune des cellules fille hérite du même potentiel génétique acquis par la cellule mère.
- Elle doit porter « l'information génétique » qui est transcrite au niveau des molécules protéiques que synthétisera spécifiquement la cellule.
- Elle doit aussi permettre d'expliquer les phénomènes de mutation si fréquemment rencontrés dans les populations microbiennes.

➤ Structure

En une très brillante synthèse de toutes ces données, Watson et Crick ont proposés la structure suivante :

- Une double hélice enroulée à la manière d'une échelle de corde autour d'un axe imaginaire.
- Les deux montants de l'échelle sont constitués par les squelettes désoxyribose-phosphate, les barreaux de l'échelle, par les paires de bases.
- La distance qui sépare les deux chaînes latérales est rigoureusement constante afin d'assurer l'équilibre de l'ensemble et pour éviter des distorsions il faut qu'à chaque base purique s'apparie une base pyrimidique, ceci est rendu possible grâce à des liaisons hydrogènes.
- La double hélice a largeur de 20 Å. Les nucléotides se succèdent le long des montants tous les 3.4 Å. Un tour complet de l'hélice est réalisé tous les 34 Å, faisant intervenir un enchaînement de dix nucléotides.
- Les deux chaînes de la double hélice ont des polarités opposées, par rapport aux liaisons 3'-5' des désoxyriboses avec les phosphates.

Ainsi les trois impératifs génétiques paraissent être satisfaits par ce modèle. Cette structure de l'ADN paraît aussi adaptée à l'autoreproduction.

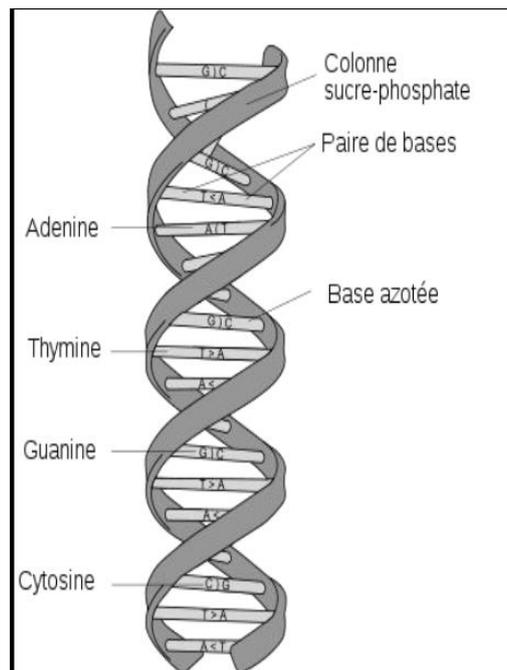


Figure 14 : Structure de L'ADN.

F. **ARN et ribosomes** : les ribosomes des bactéries sont des petites granulations sphériques de 10 à 30 nm de diamètre qui se dispersent dans tout le cytoplasme excepté les régions nucléaires. Ils sont le siège de la biosynthèse des protéines. Les particules des ribosomes sont souvent associées par un mince filament de ARNm, ils sont constitués d'ARN et de protéines. Les ribosomes bactériens comprennent deux sous-unités (30S, 50S).

Ils sont particulièrement présents à proximité de la membrane cytoplasmique, site de synthèse de la paroi et des protéines exportées. Ils n'ont pas la structure des ribosomes des eucaryotes expliquant la spécificité propre au monde bactérien. Des antibiotiques perturbent la synthèse des protéines à leur niveau (tétracyclines).

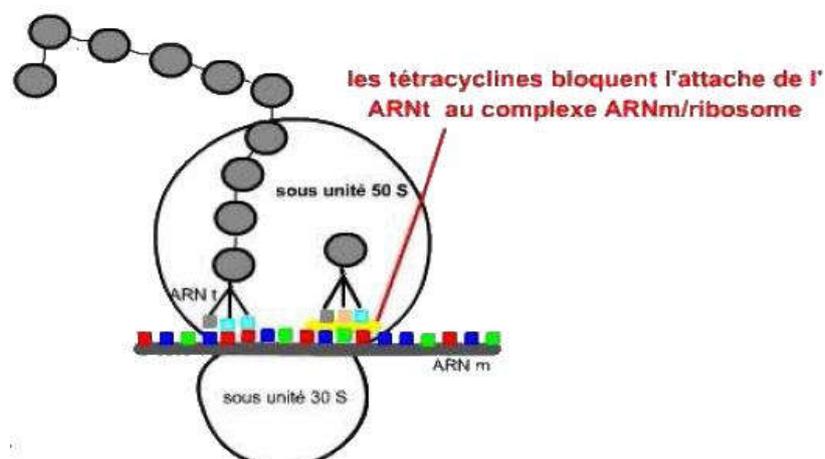


Figure 15 : structure du ribosome et effet de tétracyclines

G. **Granulations et substances de réserves** : les bactéries peuvent accumuler des matériaux organiques et inorganiques constituant généralement des réserves d'énergie. Lorsque ces substances atteignent des tailles suffisamment grandes, elles forment des granulations de réserves. D'une façon générale, chaque groupe bactérien synthétise une seule catégorie de substance. La bactérie peut stocker des réserves sous forme de glycogène ou d'amidon.

H. **Les mésosomes** : Outre que la membrane cytoplasmique qui limite le contenu cytoplasmique de la bactérie, l'existence de structure membranaire intra-cytoplasmique, appelées mésosome est le fruit d'observation plus récente. Ils apparaissent comme des expansions ou des invaginations de la membrane cytoplasmique, de structure vésiculaire, tubulaire ou lamellaire. Elles sont visibles chez les bactéries Gram positives et leur déploiement est plus restreint chez les bactéries Gram négatives. Il participe à la séparation du matériel nucléaire au cours de la division cellulaire. De plus il intervient dans la formation de la paroi transversale qui sépare les cellules filles après la division cellulaire.

I. **Le plasmide**

Ce sont des molécules d'ADN double brin extrachromosomiques, de petite taille (1 kb à 400 kb), 1/100 du chromosome bactérien. Ils portent très peu de gènes, moins de 30 et qui se répliquent indépendamment du chromosome (autoreproduction), qui peuvent s'intégrer à celui-ci et qui sont transmissibles. Lederberg en 1952 a proposé d'appeler des Plasmides (facteurs sexuels F). Mais ce n'est uniquement en 1959 que la communauté scientifique a compris la véritable nature de ces éléments et son rôle biologique en découvrant chez les Shigelles une multirésistance aux antibiotiques. Parfois ils s'intègrent dans le chromosome et on les appelle **des épisomes**, Ils sont transmissibles au cours des générations mais pas de façon équitable comme pour le chromosome. La perte d'un plasmide est dite **curage**

On classe les plasmides selon leur fonction, propagation et existence.

On distingue ainsi : des **plasmides conjugatifs**, qui portent le gène responsable de la synthèse des Pili sexuels, nécessaires à la conjugaison.

Des **plasmides R** (facteurs de résistances) : ils permettent aux bactéries de résister aux antibiotiques.

Des **plasmides Col** qui codent pour des protéines dites **bactériocines**, telle que **la colicine d'*E.coli***. Les bactériocines donnent un avantage à la bactérie en tuant des souches très proches systématiquement parlant d'*E.coli*.

Des **plasmides de virulence** qui codent pour des **toxines** responsables des symptômes causés par des bactéries pathogènes.

Des **Plasmides métaboliques** qui codent pour des enzymes capables de cataboliser des molécules complexes, aromatiques qui polluent notre environnement (pesticides) ou bien des nutriments comme le lactose, citrate de Na, urée. Enfin la fixation de l'azote chez *Rhizobium*.

• Propriétés

a) **Résistance aux antibiotiques** Plusieurs mécanismes permettent d'expliquer la résistance aux substances toxiques induites par des gènes plasmidiques. Dans le cas le plus simple (pénicilline, aminosides, chloramphénicol) l'antibiotique est détruit par une enzyme. Dans d'autres cas, l'agent toxique ne peut accéder à la cible cellulaire....etc. Généralement, on estime que la résistance plasmidique intervient dans plus de 90% des cas observés en clinique, les 10% restant étant dus à la résistance chromosomique. La résistance plasmidique est aussi observée, de plus en plus fréquemment avec les métaux lourds. Les plasmides interviennent dans la résistance aux composés mercuriels et aux sels de cadmium et au plomb chez les Staphylocoques et chez les bacilles à Gram (-).

b) **Résistance aux métaux lourds** (mercure, sels de cadmium, bismuth, de plomb, d'antimoine et arsénites.

c) **Production de substances à rôle pathogène.** L'exemple le plus étudié est rencontré chez les *Escherichia coli*, responsables de diarrhées

d) **Le pouvoir pathogène** dans les 3 cas est contrôlé par une information génétique **portée par un plasmide**, codant pour des **entérotoxines**. Et des **facteurs de colonisation** permettant l'attachement des bactéries à la surface de l'intestin (épithélium intestinal).

e) **Production de bactériocines**

2.2.2 Éléments inconstants :

A. Chromatophores et pigments

Chromatophore des bactéries **photosynthétiques** ≈ chloroplaste des plantes supérieures.

Ils contiennent des pigments photosynthétiques appelés **bactériorchlorophylles** qui assurent la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique. Ils se forment le long de la membrane plasmique par invagination de celle-ci.

D'autres types de pigments peuvent être rencontrés. Pigments responsables de la couleur des colonies :

- ✓ Pyocyanine bleue et pyoverdine bleu-vert chez *Pseudomonas aeruginosa*
- ✓ Dérivé pyrrolique rouge chez *Serratia marcescens*

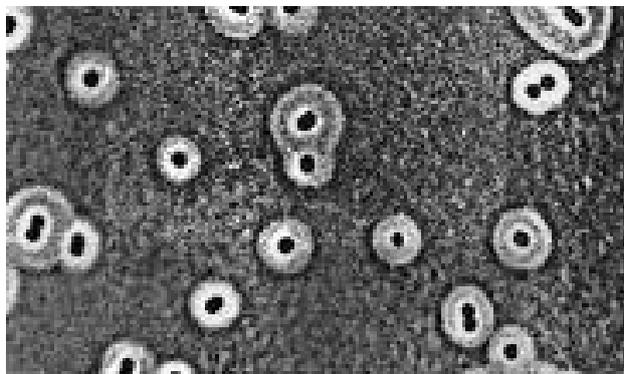
- ✓ Zeaxanthène, pigment jaune chez *Staphylococcus aureus* (staphylocoque doré),...
- ✓ Vitamine K2 chez *Bacillus subtilis* et *Bacillus cereus*
- ✓ Caroténoïde protecteur anti-UV chez les corynébactéries.

B. Vacuoles à gaz : le cytoplasme des trois groupes procaryotes photosynthétiques renferme dans leur cytoplasme des vacuoles à gaz (algues bleu-vert, bactéries pourpres, bactéries vertes). Elles permettent à ces micro-organismes d'habitat aquatique, de flotter et d'ascensionner à la surface de l'eau. Elles ont un contour irrégulier.

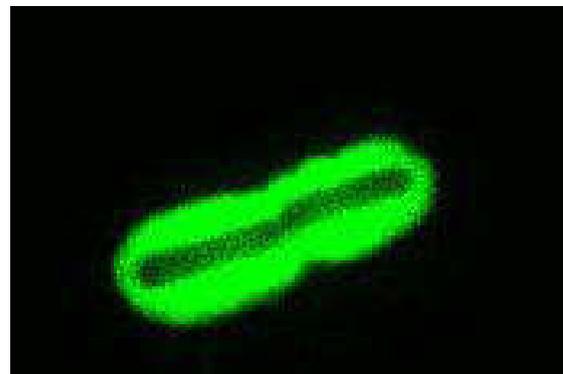
C. La capsule : Certaines bactéries sont capables, dans certaines circonstances, d'élaborer une couche gélatino-muqueuse couche plus ou moins compacte entourant la paroi : la capsule, la formation est largement influencée par les constituants du milieu. Constitué de polysaccharides acides (sucres sous forme d'acides uroniques tel l'acide galacturonique, l'acide glucuronique, mais aussi sous forme de sucres phosphorés), ce composant est lié à certains pouvoirs pathogènes, car il empêche la phagocytose. La capsule de *Bacillus anthracis* est constituée d'un polypeptide d'acide D-glutamique, capsule du pneumocoque, composée d'acides aldobioniques (ose + acide uronique associés par liaison osidique). Les glucides jouent un rôle important. La nature des constituants capsulaire est fréquemment polyholosidique et quelques fois polypeptidique. Cependant, elle ne joue pas un rôle vital comme celui de l'appareil nucléaire ou de la paroi, ou une bactérie non capsulée peut vivre normalement. Sans être indispensable à la bactérie, les substances capsulaires sont pourtant le support des propriétés physiopathologiques et immunologiques et joue rôle dans Rôle de protection vis-à-vis des agents extérieurs : protozoaires, bactériophages, agents physico-chimiques (dessiccation)... La capsule constitue donc un agent de survie et de sélection naturelle des espèces qui la possèdent, ainsi contre des phagocytes : des pneumocoques encapsulés, injectés par voie intrapéritonéale à la souris, tuent l'animal en 24h. Les pneumocoques sans capsule en sont incapables (La capsule constitue donc un facteur de virulence, elle protège les bactéries de la phagocytose). De plus, elle semble exercer un chimiotactisme négatif vis-à-vis des leucocytes. La capsule a des Propriétés antigéniques, et spécificité sérologique (les Ag capsulaires sont responsables de la spécificité sérologique (Ag K). A partir de cette propriété, une classification peut être établie exp : 70 types sérologiques différents chez *Streptococcus pneumoniae*).

Mise en évidence de la capsule

- **Etat frais à l'encre de chine** : les bactéries apparaissent sur fond sombre avec un halo clair autour du corps bactérien qui correspond à la capsule.
- **Microscopie électronique**
- **Techniques immunochimiques** : des Ac anti-capsulaires se fixent sur les Ag capsulaires. Le complexe Ag-Ac précipite et augmente l'épaisseur de la capsule qui devient visible au microscope. Cette réaction est appelée : **Réaction de gonflement de la capsule de NEUFELD**.



Coloration à l'encre de chine



Techniques immunochimiques

Figure 16 : mise en évidence de la capsule

D. Les flagelles et la mobilité

Dans le monde des Protistes inférieurs, on rencontre deux types de mouvements. Les algues bleues et les Myxobactéries, d'une part, se déplacent par glissement sur un support solide. Les Eubactéries et les spirochètes, d'autre part se meuvent grâce à des organes locomoteurs spécialisés dites chez les premiers flagelles et chez le second filament axial finement enroulé autour de la cellule et fixé à ces deux extrémités. Les flagelles sont les organes de locomotion des bactéries, leur nombre varie de 1 à 30 selon les espèces et de longueur entre 6 à 20 μm et de 25 nm de diamètre, de nature protéique (flagelline), sont des filaments longs et très fins servant au déplacement de plusieurs sortes de bactéries. Le nombre et la position des flagelles constituent un critère de classification des bactéries à flagelles.

Lorsqu'il y en a plusieurs, ils peuvent être :

- Fixés sur toute la surface de la bactérie : **ciliature péritriche**.
- Rassemblés à un ou deux pôles : **ciliature polaire**.

Lorsqu'il y a un seul on l'appelle **monotriche**

Il existe différents modes d'insertion des flagelles, selon le nombre et la position de ceux-ci :

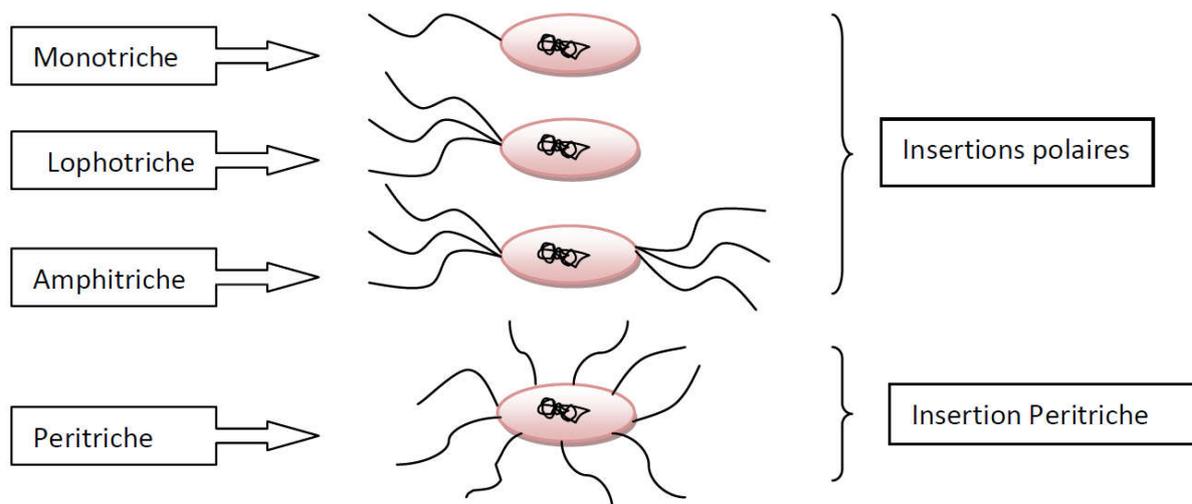


Figure 17 : différents types des flagelles

Fonctions du flagelle

➤ La locomotion

Mises en évidence sur des **milieux semi-gélosés** (diffusion dans la gélose) ou sur **milieu solide** (envahissement de la surface de la boîte. Ex : *Proteus*).

- **Rôle antigénique** : Les **antigènes flagellaires (Ag H)** déterminent différents sérotypes (exemple : sérotypage des *Salmonella*). En présence de l'anticorps correspondant à leur Ag H, les bactéries agglutinent et les bactéries s'immobilisent. La **spécificité antigénique** repose sur le **nombre et la séquence des acides aminés** de la flagelline.
- **Fixation des bactériophages** : Les flagelles sont le **lieu de fixation de certains bactériophages**.
- **Le chimiotactisme** : Le mouvement du flagelle qui engendre le déplacement de la bactérie dans une direction donnée est produit par la **rotation du crochet** dans **un sens ou dans l'autre**. La bactérie est capable de choisir le sens de rotation puisqu'elle est capable de se diriger vers certaines substances (sucres, acides aminés) ou d'en éviter d'autres (acides, bases), notion de **chimiotactisme** (réalisé grâce à des récepteurs chimiques plus ou moins spécifiques).

E. Les Pili (ou Fimbriae)

L'existence d'appendices filiformes différents des flagelles a été révélée par le microscope électronique. Ils sont fréquentés chez les bacilles Gram négatifs, rares chez les formes Gram positives. On leur a donné le nom de *pili (fimbriae)*. **Les fimbriae : mot latin, signifie filament** ». C'est un appendice court (de l'ordre de 1µm), creux, rigide, composé de protéines

disposées en hélice. Il est largement retrouvé en grand nombre autour du corps bactérien (1000). On en distingue deux catégories, de morphologie et de fonction distincte : les pili commun et pili sexuels.

A ce jour on distingue **4 types de Pili (I, II III et IV)**.

Il est plus juste de nommer les **types I, III, IV des fimbriae (pili commun)** et le **type II un Pili sexuel**.

Les pili sexuels ou de type II : Ils sont plus longs et plus épais que les fimbriae (10 µm, 9 nm respectivement) et moins nombreux (1 à 4 par cellule). Ils ont un rôle dans l'attachement des bactéries entre elles (conjugaison : un des 3 modes de transfert de matériel génétique d'une bactérie à une autre). Les pilis sexuels de la bactérie donatrice vont permettre de reconnaître une bactérie réceptrice (de l'amarrer) et entraîner la création d'un pont cytoplasmique entre les 2 bactéries, permettant ainsi le passage d'une molécule de plasmide. D'autre part, ces pili sexuels peuvent permettre la fixation de certains bactériophages qui injectent alors leur matériel génétique par le canal du pilus.

Les fimbriae de type I, III, jouent un rôle dans l'adhésion des bactéries aux différents supports vivant ou non. Ils favorisent la formation de biofilm.

Les fimbriae de type IV, retrouvés par exemple chez *Pseudomonas aeruginosa*, en plus de l'attachement, ils sont impliqués dans un autre mode de mobilité, dite **saccadée**. On les retrouve au niveau des pôles des cellules bactériennes. Les fimbriae IV se contractent et se rétractent comme un ressort, pour permettre la mobilité de la bactérie.

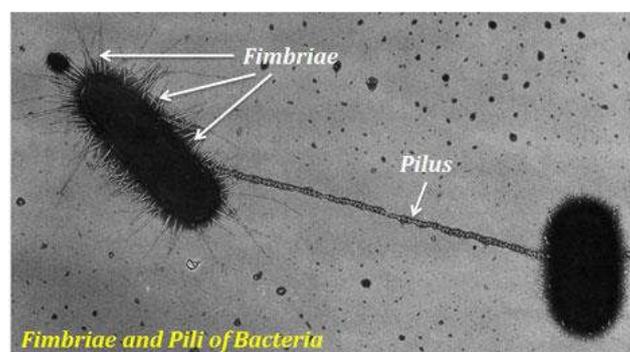


Figure 18 : pili commun et pili sexuel d'une bactérie

F. Les endospores

Certaines bactéries ont le pouvoir de se transformer en petites unités ovales ou sphériques douées d'une résistance extraordinairement élevée, lorsque le milieu s'épuise en éléments

nutritives. On les appelle spores ou endospores puisque leur formation est intracellulaire. L'une des propriétés les plus remarquables des spores est leur thermo-résistance. Ce sont des structures de résistance formées par certaines bactéries lorsque les conditions deviennent défavorables. Elle permet aux bactéries sporulantes de survivre dans des conditions difficiles et extrêmes de l'environnement.

Les endospores caractérisent trois principaux genres des bactéries : *Bacillus*, *Clostridium* et *Sporosarcina* qui sont tous Gram positifs surtout au cours de la phase exponentielle de leur croissance et ont ensuite tendance à se décolorer en Gram négatifs. La plus sont mobile par cils péritriches.

Leur **position** dans la cellule est variable : centrale, terminale, subterminale. Elles servent également dans l'identification bactérienne. La recherche de tous ces caractères se fait dans un **but taxonomique**.

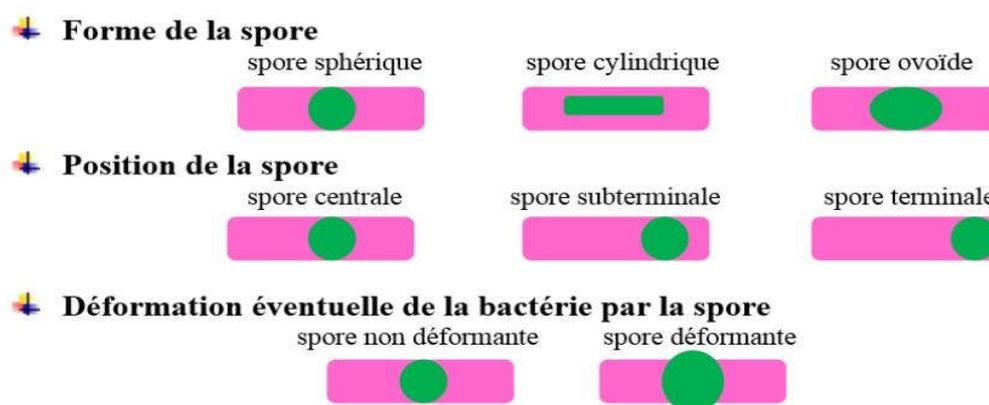


Figure 19 : différents types des spores.

➤ **Mise en évidence** : Les spores sont visibles à la **coloration de Gram** où elles apparaissent comme des espaces vides à l'intérieur des bactéries : seul le contour de la spore apparaît coloré. A l'**état frais**, elles apparaissent comme de petites masses réfringentes au sein de la bactérie, ou libres dans le milieu. Il existe des colorations spéciales basées sur le **caractère acido-alcool-résistant** des spores. Exemple : **coloration au vert de malachite = coloration de Benito-Trujillo**. Après une contre coloration par la fushine, les spores apparaissent **vertes** dans la bactérie **rose**.

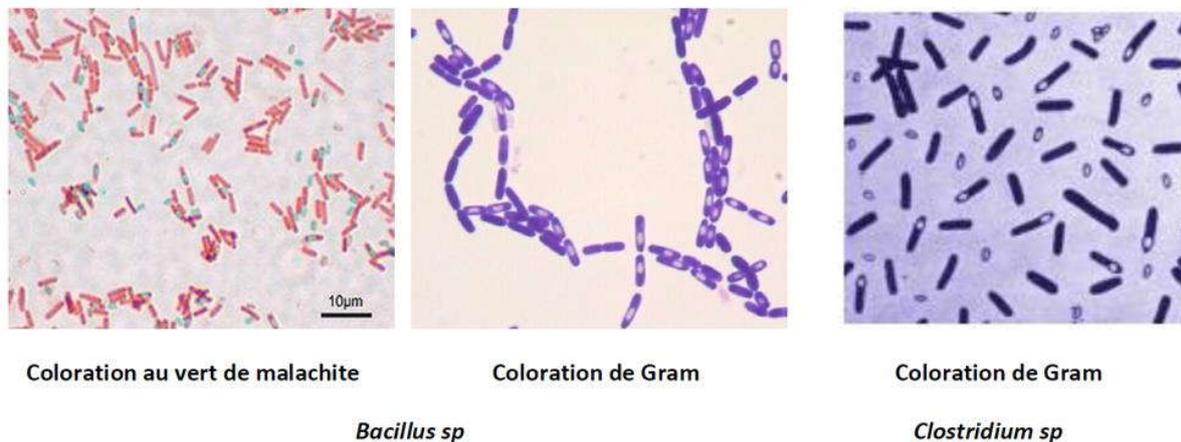


Figure 20 : aspect des spores après différentes colorations

➤ **Les stades de sporulation :**

Des conditions défavorables de croissance entraînent la sporulation ou l'absence de germination de la spore. Il représente le passage de la forme végétative à la forme sporulée. La sporulation dure environ **10.5 heures**, chez *Bacillus megaterium*

Elle est provoquée par l'épuisement du milieu en substrat nutritif et elle peut nécessiter des conditions particulières : **absence d'oxygène** pour les *Clostridium*, **présence d'oxygène** au contraire pour *B. anthracis*. Le processus de sporulation débute à la fin de la phase exponentielle et se déroule en 6 étapes :

Etape 1 : la sporulation débute par l'arrêt de la synthèse d'ADN, l'ARN et des protéines. Le premier changement consiste en la transformation du nucléotide en un filament chromatique axial qui s'étend sur toute la cellule.

Etape 2 : le filament nucléaire se condense à une extrémité et se brise. On remarque une autonomisation du futur noyau de la spore et division cellulaire asymétrique favorisée par un septum transversal subpolaire qui partage la cellule en deux parties inégales : le sporange et la future spore.

Etape 3 : la synthèse du septum se poursuit et elle aboutit à la formation d'une zone lisse, transparente, entièrement autonome, comprenant un noyau, un cytoplasme et une double membrane, l'une cytoplasmique, l'autre préfigurant la future paroi de la spore : c'est la préspore.

Stade 4 : entre les deux membranes limitant la préspore se forme la paroi sporale puis apparaît rapidement le cortex.

Stades 5 and 6 : apparition des tuniques et après maturation la cellule végétative se lyse et libère la spore.

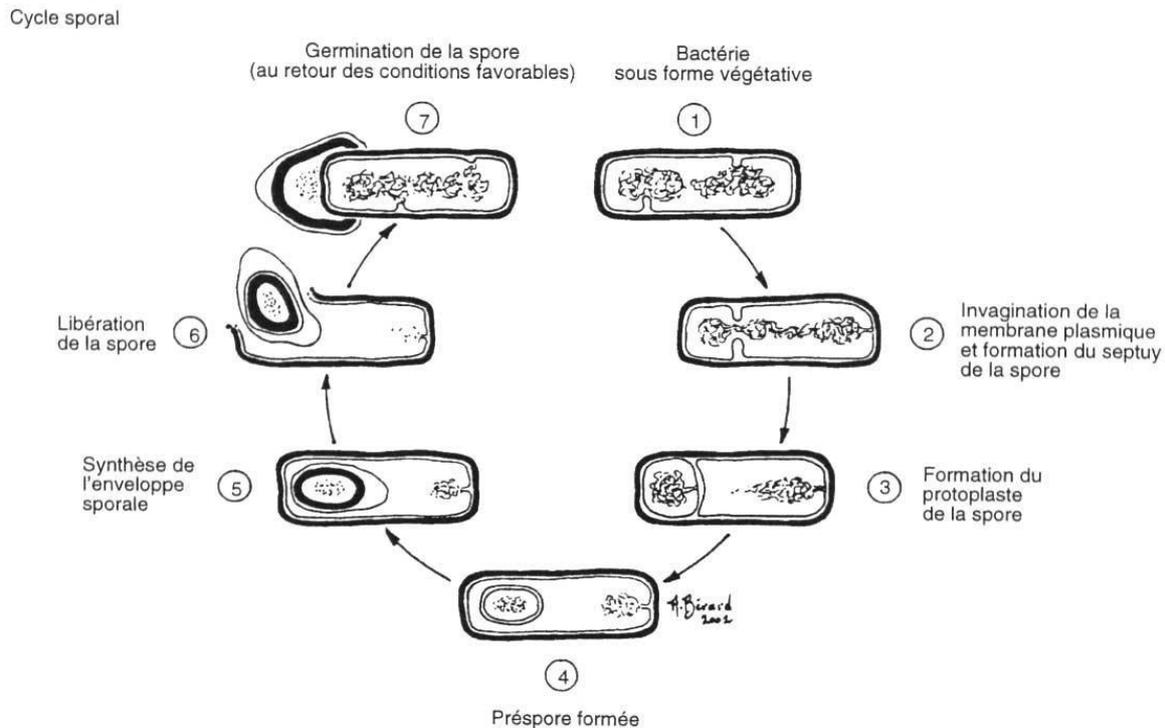


Figure 21 : Etapes de l'endospore formation

La germination : lorsque la spore est placée dans des conditions favorables de croissance, elle subit une série de transformation progressive et devient finalement une nouvelle cellule végétative. Ce processus appelé germination comprend trois stades :

□ **Activation** : correspondant à une lésion des enveloppes sporales par des agents physiques (choc thermique) ou chimiques (acides, lysozyme) ou mécaniques (abrasion, choc). Remarque : l'activation thermique est mise à profit au cours de la tyndallisation qui consiste à chauffer 3 fois le produit à stériliser : 30 min à 60°C (destruction des formes végétatives et induction de la germination d'éventuelles spores), le deuxième chauffage à 60°C et pendant 30 minutes, tue les spores issues de la germination et induit la germination des spores résiduelles. Le troisième chauffage dans les mêmes conditions, détruit les dernières formes végétatives.

□ **Intonation** : débute en présence de conditions favorables d'hydratation et de métabolites effecteurs (alanine, magnésium, adénosine) qui pénètrent à travers les enveloppes endommagées. Des enzymes hydrolytiques dégradent les constituants de la spore ; il y a

libération du dipicolinate de calcium. Le cortex ainsi détruit, la spore s'imbibe d'eau et gonfle.

□ **Excroissance** : L'émergence de la nouvelle cellule végétative, grâce à l'altération des enveloppes et reprise de l'activité de biosynthèse (protéines, ADN).

Propriétés des spores

La spore possède de nouvelles propriétés par rapport à la cellule végétative :

Dans la nature (conditions naturelles) la spore permet de résister aux manques d'eau et de nutriments.

Expérimentalement on a démontré les propriétés suivantes :

- **La thermo résistance** : La spore résiste en général à des températures de **70-80°C pendant 10 minutes**, parfois plus.
- **Résistance aux agents physiques et chimiques** : La spore résiste aux rayons Ultraviolets, aux rayons gamma (Calcium, et SASP). Aux antiseptiques, désinfectants, antibiotiques (la tunique).
- **Synthèse d'antibiotiques** : Certaines bactéries synthétisent des antibiotiques au début de la phase de sporulation. Exemple : *Bacillus licheniformis* synthétise ainsi la Bacitracine ; *Bacillus polymyxa* le polymyxine. Mais aussi des toxines (entérotoxine de *Clostridium perfringens*) ou des substances à activité biopesticide (toxines qui tue des insectes).

La figure suivante englobe tous les constituants de la cellule bactérienne (éléments constants et inconstants) :

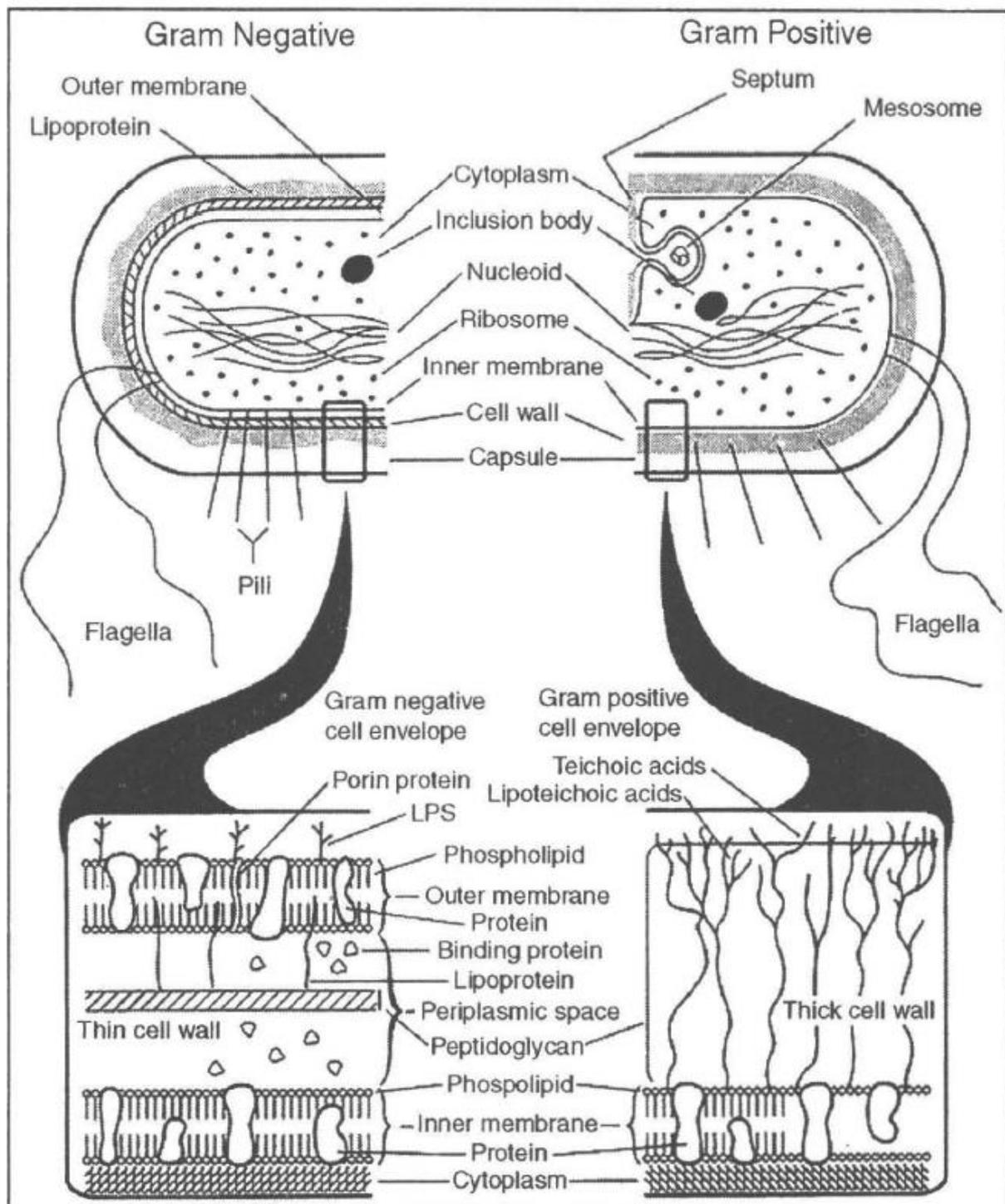


Figure 22 : différents constituants de la cellule bactérienne (Gram positive et Gram négative)

3 Principes de la taxonomie chez les bactéries :

3.1 Introduction

La taxonomie est la science des lois de la classification. C'est au 18^{ème} siècle que Linné a proposé pour la première fois les principes d'une classification dite *Naturelle* pour les