

I- **Les constituants de la cellule bactérienne**

II-1- Schéma général simplifié d'une bactérie

II-2- Éléments constants et inconstants de la structure bactérienne

II- **Les éléments facultatifs de la cellule bactérienne**

IV-1- La capsule

- a) Mise en évidence
- b) Morphologie et structure chimique
- c) Rôles et propriétés

IV-2- Les flagelles

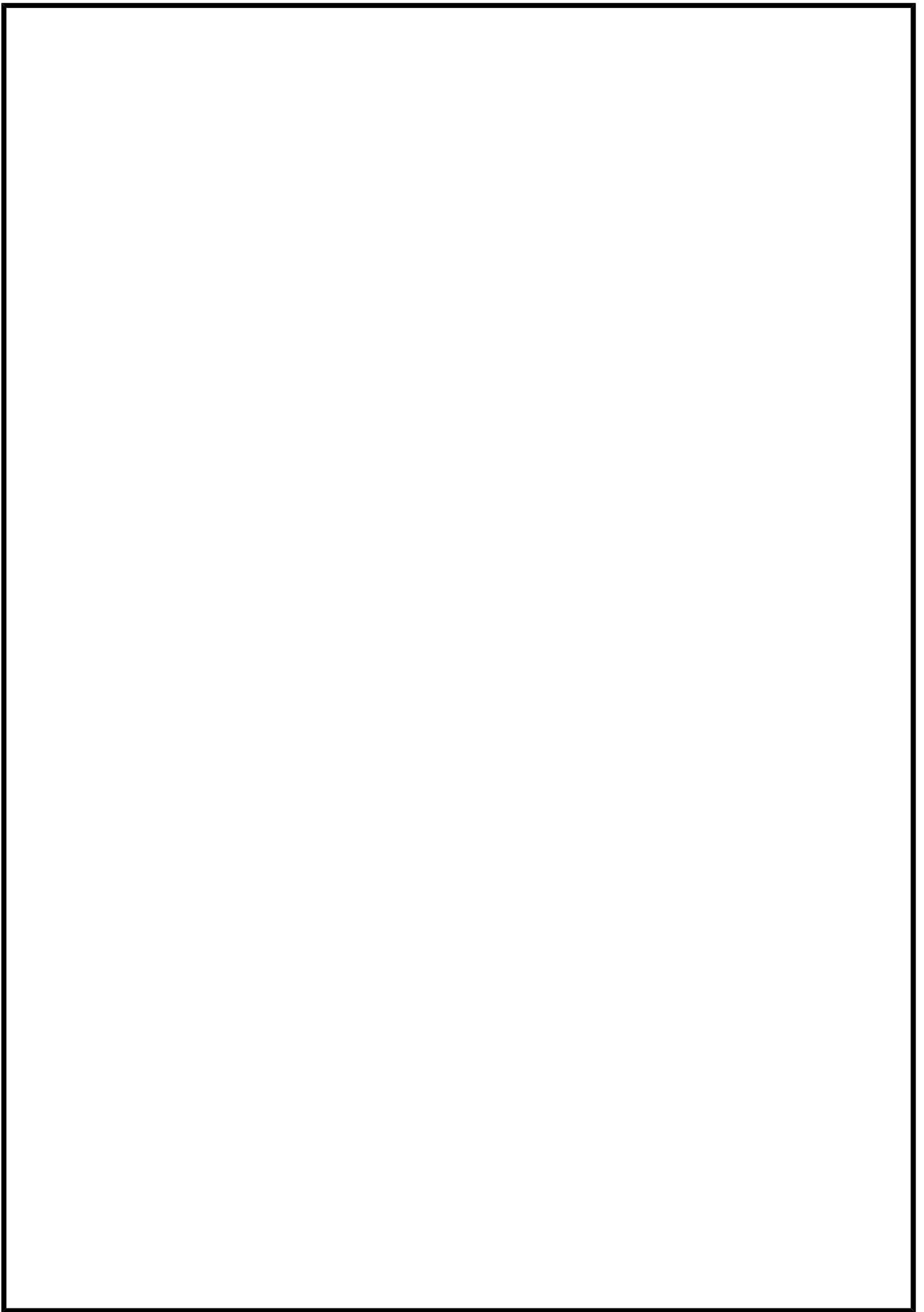
- a) Mise en évidence
- b) Morphologie et mode d'insertion
- c) Architecture moléculaire
- d) Synthèse du flagelle
- e) Fonctionnement du flagelle
- f) Rôle des flagelles

IV-3- Les pili ou fimbriae

IV-4- Les plasmides

IV-5- Les spores

- a) Mise en évidence
- b) Morphologie et structure
- c) Composition chimique
- d) Le cycle sporal
- e) Les étapes de la sporulation
- f) Propriétés de la spore



LES ELEMENTS FACULTATIFS DE LA CELLULE BACTERIENNE

1- Morphologie et structure chimique

De nombreuses bactéries sont capables de synthétiser des polysides de surface . Parmi ces polysides de surface, on distingue de façon quelque peu arbitraire, la capsule et les couches muqueuses ou slime.

- soit une **couche gélatino-muqueuse**, bien définie, entourant un ou plusieurs corps bactériens (ex : Pneumocoques (*Streptococcus pneumoniae*) encapsulés en diplocoques ; *Klebsielle pneumoniae* encapsulée seule)
- soit une **couche diffuse et visqueuse**

Sur milieu solide, les colonies donnent un aspect caractéristique : **type M** (exemple : *Klebsiella pneumoniae*)

- **La capsule** est en général de nature **polysaccharidique**, et quelquefois **polypeptidique** (*Bacillus anthracis* ou *megatherium*).
- **Couche muqueuse ou slime** : couche diffuse, facilement séparable du corps bactérien. La production de slime est fréquente chez les bactéries aquatiques et particulièrement importante chez les bactéries du genre *Zooglea* qui produisent des masses gluantes. Certains polysides produits par des bactéries ont un intérêt industriel et sont produits comme gélifiant notamment en industries alimentaires : *Leuconostoc mesenteroides* produit des dextrans, *Xanthomonas* des xanthanes ...
- **Couche S** : couche de surface cristalline de découverte relativement récente car elle ne peut être mise en évidence que par microscopie électronique. Elle est constituée de sous unités protéiques organisées de façon cristalline selon un système géométrique carré, hexagonal ou oblique (ressemble à la cote de maille des armures) . Elle a été trouvée chez des Archeobactéries (*Methanococcus* par ex) et chez des Bactéria (*Chlamydia*, *Treponema*, *Helicobacter*, *Bacillus Clostridium* ...). La couche S joue un rôle en tant que squelette mais elle pourrait aussi être impliquée dans l'adhésion, dans la résistance aux protéases des macrophages et dans la protection vis à vis des bactériophages.

2- Rôles et propriétés

La capsule n'a pas un rôle vital pour la bactérie (sans elle, elle peut vivre et se multiplier), mais elle peut être utile à la bactérie grâce à ses rôles :

- **De protection** : contre les UV, la dessiccation, les agents physiques et chimiques
- **Dans le pouvoir pathogène** :
 - Elle s'oppose à la phagocytose en diminuant l'adhésion de bactéries aux macrophages
 - Elle exerce un chimiotactisme négatif sur les leucocytes
 - Elle empêche la pénétration des antibiotiques

Ainsi pour certains germes (ex : pneumocoques), une perte de la capsule correspond à une perte de la virulence.

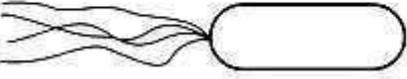
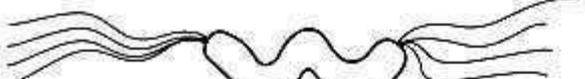
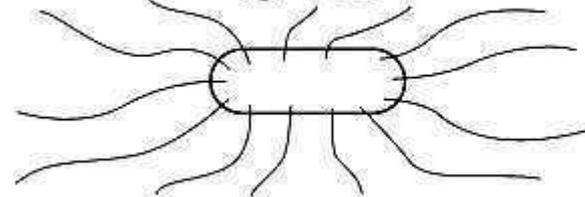
- **Antigénique** : les Ag capsulaires sont responsable de la spécificité sérologique (Ag K). A partir de cette propriété, une classification peut être établie (ex : 70 types sérologiques différents chez *Streptococcus pneumoniae*).

Voir Document 11

3- Morphologie et mode d'insertion

Ils mesurent en moyenne 16 à 20 μm (beaucoup plus que la bactérie) et sont très fins (300 \AA d'épaisseur).

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

Structure	Flagella Type	Example	
	Monotrichous	<i>Vibrio cholerae</i>	Insertions polaires
	Lophotrichous	<i>Bartonella bacilliformis</i>	
	Amphitrichous	<i>Spirillum serpens</i>	Insertion péritriche
	Peritrichous	<i>Escherichia coli</i>	

Ils sont fixés à la bactérie par insertion **dans la membrane cytoplasmique**.

Ils sont mobiles par rotation, comme une hélice, grâce à un mécanisme similaire à un « rotor » fonctionnant grâce à l'énergie fournie par un gradient de protons.

Le mécanisme de rotation s'effectue grâce à un complexe situé dans la paroi.

4- Architecture moléculaire

Le flagelle bactérien est constitué de **3 parties** :

- le **filament hélicoïdal**
- le **crochet**
- le **corpuscule basal**

4-1) Le filament

C'est un **cylindre creux** constitué d'une seule protéine multimérique : la **flagelline** (PM : 30.000 à 60.000 g/mol). La flagelline, **protéine fibreuse**, se positionne en hélice rigide qui tourne à la manière de l'hélice d'un bateau.

4-1) Le crochet

Il lie le filament au corpuscule basal.

Il a la **même composition que le filament**, mais à cet endroit, la flagelline ne possède **pas le même pas d'hélice**, ce qui permet la **formation d'un coude**.

Le crochet est **plus court** que le filament, mais **plus large**. **Très flexible**, il permet d'induire le mouvement de la bactérie.

La **jonction crochet-filament** est assurée par des « **protéines associées au crochet** » = protéines **HAP** (Hook Associated Proteins).

5- Synthèse du flagelle

20 à 30 gènes sont impliqués dans la synthèse des flagelles.

La synthèse du flagelle se fait par un **assemblage séquentiel** des différents composants : disques, du corps basal, puis du crochet et enfin du filament.

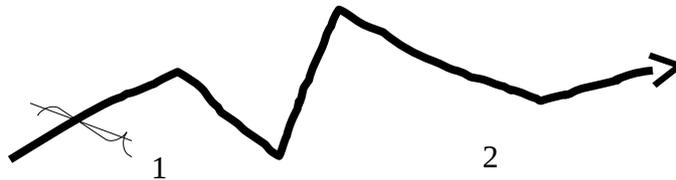
6- Fonctionnement du flagelle

- C'est une **force « proton motrice »** qui est responsable de la rotation (mécanisme pas totalement élucidé).

C'est-à-dire qu'un **gradient de protons** se dispersant au travers des 2 anneaux fournit l'énergie nécessaire à la rotation.

L'ATP ne semble pas être impliqué dans la rotation du flagelle.

- Selon le sens de rotation du flagelle, la bactérie ne se comporte pas de la même manière :



1 : Dans le **sens inverse des aiguilles d'une montre** (CCW), la bactérie **avance** en tournant légèrement sur elle-même

2 : Dans le **sens des aiguilles d'une montre** (CW), la bactérie **culbute** et change alors de direction pour repartir en avant avec les flagelles tournant CCW.

Remarque : pour les ciliatures péritriches :

1 : tous les flagelles sont regroupés à l'arrière du corps bactérien (comme les tentacules d'un poulpe)

2 : les flagelles se dispersent autour du corps bactérien et la bactérie culbute.

7- Rôles des flagelles

7-1 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*).

7-2 Rôle antigénique

Les **antigènes flagellaires (Ag H)** déterminent différents sérotypes (exemple : sérotypage des *Salmonella*. Voir TP). 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.

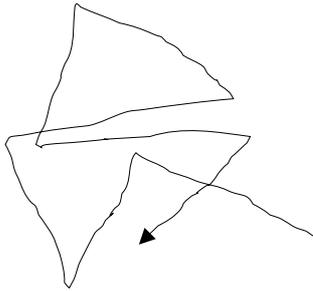
7-3 Fixation des bactériophages

Les flagelles sont le **lieu de fixation de certains bactériophages**.

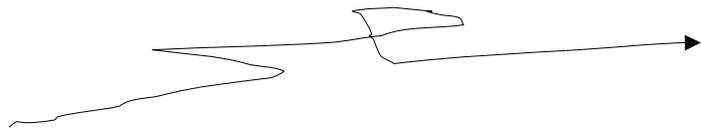
7-4 Le chimiotactisme

Certaines substances attirent les bactéries mobiles, d'autres les repoussent.

Selon la composition du milieu de culture, on distingue **2 types de trajectoires** :



Les mouvements se font **au hasard**, les **courses sont courtes**, les **culbutes sont fréquentes**, et il ne se dégage pas une direction privilégiée.



Les **courses sont plus longues**, les **culbutes moins fréquentes**, et une **direction privilégiée** apparaît en fonction d'un **gradient de substances attractives ou répulsives**.

IV-3- Les pili ou fimbriae

(*Fimbriae* = « **filament** » ou « **fibre** » en latin ; *pili* = « **cheveu** » ou « **structure chevelue** » en latin)

Ce sont des **structures filiformes**, différentes des flagelles, qui sont quasi systématiques chez les Gram (-) et rares chez les Gram (+).

Ils sont de **nature protéique**.

On distingue 2 sortes de pili :

- **Les pili communs ou de type I** : ils sont **nombreux** autour de la bactérie, **courts** (de l'ordre de $1\mu\text{m}$) et **rigides** (*on les appelle également des cils*). Ils sont impliqués dans les **propriétés d'adhésion** des bactéries aux tissus. Ils constituent donc un **facteur de virulence** pour les bactéries pathogènes.
- **Les pili sexuels ou de type II** : ils sont **plus longs** ($10\ \mu\text{m}$ environ) et se terminent par un renflement. Leur nombre varie **entre 1 et 4**. Ils ont un rôle dans la **conjugaison bactérienne** (un des 3 modes de transfert de matériel génétique d'une bactérie à une autre).

Les pili 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 d'ADN.

2 Les plasmides

Ce sont des molécules d'**ADN bicaténaire, extra-chromosomiques**, plus petites que le chromosome bactérien (environ 1.000 à 3.000 pb soit **1/100 du chromosome**), capables d'**autoréplication**.

Certains plasmides peuvent **s'intégrer au chromosome bactérien** : on les appelle des **épisomes**.

Les plasmides apportent du **matériel génétique supplémentaire** à la bactérie, qui code pour des **caractères additionnels**, mais **non indispensables** au métabolisme normal de la cellule bactérienne.

Non indispensables à la survie de l'espèce, ces plasmides confèrent aux bactéries qui les hébergent des avantages sélectifs importants : ils portent des gènes codant des résistances aux antibiotiques, à des métaux lourds, des gènes codant des voies métaboliques nouvelles comme la possibilité d'utiliser des hydrocarbures et des dérivés organiques complexes (très fréquents chez les bactéries du genre *Pseudomonas*). Certaines bactéries portent aussi des gènes codant la synthèse de substances comme des antibiotiques, des toxines et des facteurs de virulence.

Remarque : importance des plasmides portant des gènes de résistance aux antibiotiques dans l'augmentation des cas d'infections nosocomiales.

Ces plasmides peuvent se **transférer d'une bactérie à une** autre par différents mécanismes (voir cours de génétique bactérienne).

Les plasmides sont des outils très utiles en **génie génétique** : on introduit dans une bactérie des **gènes non bactériens** portés par des plasmides, afin de lui faire acquérir de **nouveaux caractères** (exemples : synthèse d'insuline, d'hormone de croissance, vaccin HBV...).

3 Les spores

Ce sont des **structures de résistance** formées par certaines bactéries lorsque les **conditions deviennent défavorables** (carence en éléments nutritifs ...).

Trois genres bactériens sont caractérisés par des **endospores** : *Bacillus*, *Clostridium* et *Sporosarcina*. Ce sont toutes des bactéries Gram (+).

a) Mise en évidence

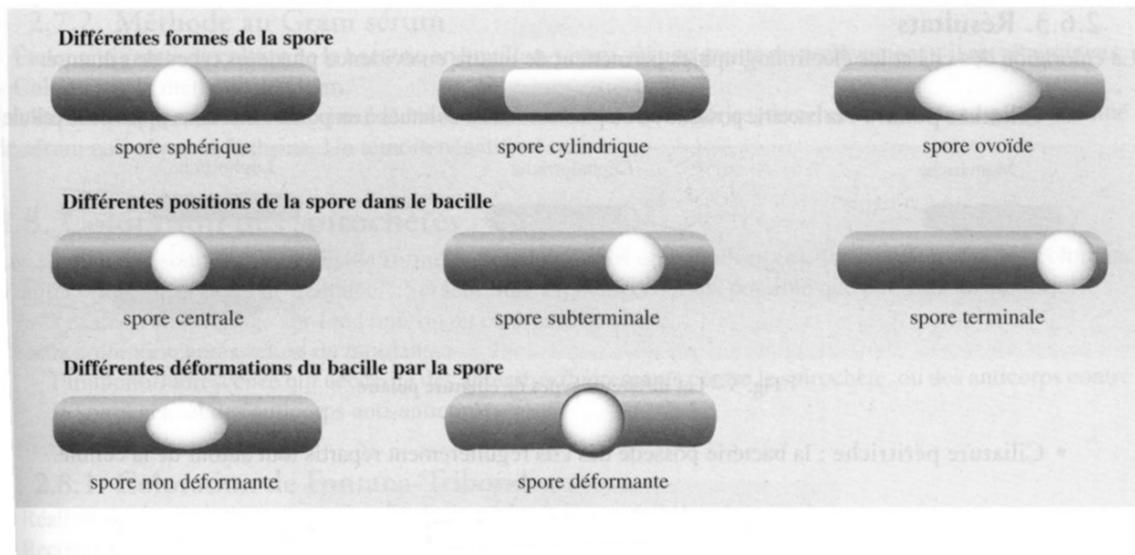
- Les spores sont visibles à la **coloration de Gram** où elles apparaissent comme des espaces vides à l'intérieur des bactéries : seul le contour de la spore apparaît coloré.
- A l'**état frais**, elles apparaissent comme de petites masses réfringentes au sein de la bactérie, ou libres dans le milieu.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

Voir Document 14

b) Morphologie et structure

Les spores sont de petites unités **ovales ou sphériques**.

Elles peuvent **déformer ou non** le corps bactérien. Leur **position** dans la cellule est variable : centrale, terminale, subterminale.



La spore peut-être **libre ou non** (*voir spores de B. anthracis sur Document 14*)

La recherche de tous ces caractères se fait dans un **but taxonomique**.

c) Composition chimique

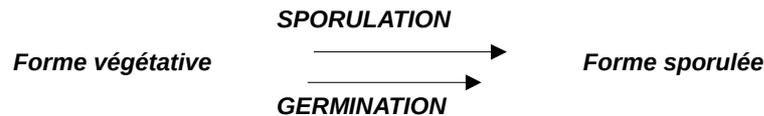
La spore possède de nombreuses enveloppes. **Voir Document 14**

La spore se différencie de la cellule végétative par :

- une faible teneur en eau (**d'où résistance à la dessiccation**)
- une faible teneur en enzymes (activité métabolique réduite)
- la présence de **dipicholinate de calcium** dans une enveloppe particulière : le **cortex**
- une diminution du nombre de liaisons entre NAM et NAG
- la présence de protéines de type kératine dans les tuniques

d) Le cycle sporal

Il représente le passage de la forme végétative à la forme sporulée et inversement :



Afin que la spore **germe**, elle doit se trouver dans des **conditions favorables** : eau, nutriments, pH, force ionique, température convenable, pas d'agents antimicrobiens.

Inversement, des conditions défavorables de croissance entraînent la sporulation ou l'absence de germination de la spore.

e) Les étapes de la sporulation

La sporulation dure environ **7 heures**.

La sporulation :

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 *Bacillus anthracis*. Le processus de sporulation débute à la fin de la phase exponentielle et se déroule en 6 étapes :

- stade 1 formation du filament axial : la division nucléaire n'étant pas suivie d'une division cellulaire, les deux génomes fusionnent donnant un filament chromatique axial
- stade 2 : les deux génomes se séparent et en même temps la membrane cytoplasmique s'invagine près d'un pôle de la cellule pour former un septum de sporulation qui partage la cellule en deux parties inégales.
- Stade 3 : Ce septum va envelopper le cytoplasme de la plus petite partie pour former une préspore caractéristique
- Stade 4 : entre les deux membranes limitant la préspore se forme la paroi sporale puis apparaît rapidement le cortex
- Stades 5 et 6 : apparition des tuniques et après maturation, la cellule végétative se lyse et libère la spore.

f) Propriétés de la spore

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

▪ Thermo résistance :

La spore résiste en général à des températures de **70-80°C pendant 10 minutes**, parfois plus. Cette propriété est due à la présence de **l'acide dipicholinique** et à la **déshydratation de la spore**. (Les protéines et les acides nucléiques à l'état déshydratés sont très résistants à la dénaturation thermique).

Cette propriété entraîne des problèmes importants dans les hôpitaux, les salles de chirurgie et les industries alimentaires (*Clostridium tetani* >> tétanos ; *C. botulinum* >> botulisme)

▪ Résistance aux agents physiques et chimiques :

La spore résiste aux rayons UV, X, ultrasons, antiseptiques, désinfectants, ATB (un ATB bactéricide pour une bactérie peut s'avérer simplement sporostatique pour les spores de la même bactérie). Cela pose également des problèmes dans les hôpitaux.

- **Résistance à la dessiccation et au vieillissement :**

Ces phénomènes semblent dus à la **faible teneur en eau** et au **métabolisme ralenti** : on parle **d'état de dormance**.

- **Synthèse d'antibiotiques :**

Certaines bactéries synthétisent des ATB 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 létales pour des insectes) comme le corps parasporal de *Bacillus thuringiensis* et de *Bacillus sphaericus* .

g) **La germination :**

Placée dans des conditions favorables (eau glucose acides aminés) la spore redonne naissance à une cellule végétative. On distingue 3 stades dans le processus de germination :

- a. **L'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 30 minutes tue les spores issues de la germination et induit la germination des spores résiduelles et le troisième chauffage dans les mêmes conditions détruit les dernières formes végétatives.**
- b. **L'initiation** 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 détruit la pore s'imbibe d'eau et gonfle.
- c. **L'émergence** de la nouvelle cellule végétative : grâce à l'altération des enveloppes