

CHAPITRE I- DIVERSITE DU MONDE MICROBIEN

1- INTRODUCTION

La microbiologie (du grec "*mikros*" = petit, "*bios*" = vie, "*logia*"= science) est la science qui a pour objectif l'étude des microorganismes (du grec: *mikrós* = petit, *organismós* = organisme) ou microbes. Le terme microorganismes (ou microbe) englobe tous les organismes (cellulaire et acellulaire) invisible à l'œil nu (dimension entre 0,1 mm et 10 nm).

2- QUELQUES GRANDES ETAPES DE L'HISTOIRE DE LA MICROBIOLOGIE

2.1. Découverte des microorganismes

Antonie Van Leeuwenhoek (1632-1723) a été le premier à consigner ses observations des microorganismes dans des descriptions et des dessins précis en utilisant des microscopes simples (agrandissaient de 50 à 300 fois). Il observait les milliers de microorganismes dans une goutte d'eau, qu'il nomma "**animalcules**".

2.2. Génération spontanée et biogénèse : D'où viennent ces microorganismes ?

a. Needhams (chercheur britannique, 1713-1781) : la théorie de la génération spontanée a réapparue une deuxième fois après la découverte des μ organismes par Antonie van Leeuwenhoek. Needham a préparé un bouillon de viande dans un flacon, puis il l'a bien fermé avec un bouchon en liège. Après quelques jours Needham a remarqué que le flacon était trouble et après examinaisons il remarque une présence abondante de germes.

Il a expliqué ça par la présence de « **la force vitale** » qui fait **qu'une matière non vivante devient vivante**.

b. Spallanzani (scientifique italien, 1729–1799): a refait l'expérience de Needham mais en prolongeant l'exposition à la température pour presque une heure et en scellant les flacons. Sa préparation reste limpide jusqu'à rupture du col et exposition du mélange à l'air, elle devient trouble. Il a conclu trois choses :

- Needham n'a pas chauffé suffisamment ses flacons jusqu'à élimination totale des microbes ou il n'a pas bien fermé ses flacons.
- Les μ organismes existent dans l'air et peuvent contaminer la préparation
- La génération spontanée des μ organisme n'a pas eu lieu, tout être vivant provient d'un autre vivant préexistant.

Cette théorie n'a pas été facilement acceptée surtout qu'elle a remis en cause la théorie d'Aristote . Elle a été critiquée pour la durée de chauffage qui a détruit la « force de la vie » et l'absence de l'aération pour le développement des μ organismes

c. Louis Pasteur (1822-1895) a réalisé des expériences pour démontrer que les microorganismes ne peuvent provenir que d'autres microorganismes.

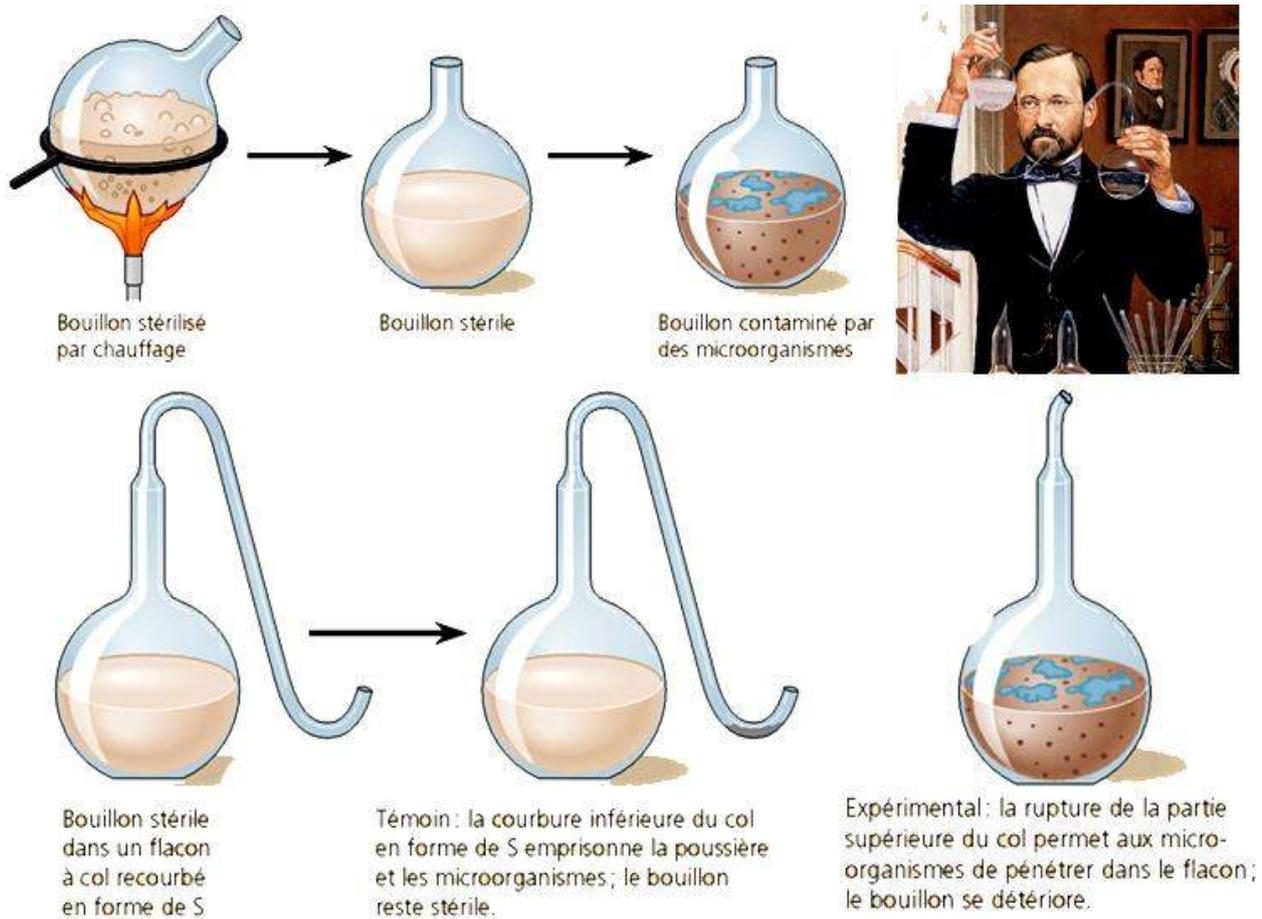


Figure 1. Les expériences de Louis Pasteur infirmant la théorie de la génération spontanée.

La biogénèse devient la théorie acceptée: "tout microorganisme vivant ne peut provenir que d'organismes vivant préexistant" ou "les microorganismes ne se forment pas à partir de la matière organique, mais ils l'utilisent seulement pour la croissance.

2.3. Les branches de la microbiologie d'aujourd'hui et leur importance

La microbiologie moderne est une discipline très large qui en relation avec de nombreuses spécialités, elle comporte :

2.4.1 - La microbiologie médicale : elle s'occupe des maladies humaines et animales. Les microbiologistes médicaux identifient l'agent responsable d'une maladie infectieuse et prennent les mesures pour l'éliminer et étudient la façon dont les micro-organismes provoquent la maladie.

2.4.2.- La microbiologie agronomique : s'intéresse à l'impact des micro-organisme sur l'agriculture. Les microbiologistes s'efforcent de combattre les maladies végétales et essayent d'augmenter la fertilité du sol et le rendement des récoltes.

2.4.3. L'écologie microbienne : étudie la biodiversité microbienne d'un écosystème, les relations entre les différentes populations de micro-organismes et les relations entre les micro-organismes et leurs habitats.

-2.4.4 La microbiologie alimentaire : les microbiologistes essayent d'empêcher la contamination microbienne de la nourriture et la transmission des maladies alimentaires telles que le botulisme et les

salmonelloses. Ils utilisent aussi des micro-organismes pour fabriquer des fromages, des yaourts, des conserves et de la bière.

2.5. La microbiologie industrielle : les micro-organismes sont utilisés pour produire des substances telles que des antibiotiques, des vaccins, des stéroïdes, des alcools, des vitamines, des acides aminés et des enzymes.

2.6.- La génétique microbienne et la biologie moléculaire : se concentrent sur la nature de l'information génétique et sur la façon dont elle régule le développement et le fonctionnement des cellules et des organismes. La technologie de l'ADN recombinant (ADN modifié génétiquement *in vitro*) permet de modifier les microorganismes pour qu'ils produisent de grandes quantités de substance médicinales (ex : hormones).

3- PLACE DES MICROORGANISMES DANS LE MONDE VIVANT

3.1. Système à 2 règnes (Aristote, 300 av. J.C.) : avant la découverte des micro-organismes, le monde vivant est séparé en deux grands groupes (règnes)

	Règne végétal	Règne animal
Source d'énergie	Photosynthèse	Oxydation de matière organique
Substances réserve	Amidon	Graisse et/ou Glycogène
Paroi cellulaire	Paroi cellulosique	Absence
Mobilité	Fixe	Mobile

La découverte des nouvelles formes microscopiques vivantes (algues, champignons, levures, protozoaires, bactéries) rendait difficile leur classement dans le règne animal ou végétal, connus à l'époque. En effet, tout ce qui était mobile était rapproché des animaux et tout ce qui était immobile et photosynthétique (vert) était rapproché des végétaux. Cependant, des microorganismes ayant à la fois des caractéristiques animales et végétales ont posé des problèmes.

3.2. Classification contemporaine : HAECKEL en 1866

Ces problèmes ont partiellement été résolus, en 1866, par Haeckel (zoologiste allemand, élève de Darwin) qui a proposé la création d'un 3ème règne (en plus des règnes animal et végétal), celui des Protistes, pour regrouper les algues, les protozoaires, les champignons et les bactéries. La différence majeure entre les protistes, d'une part, et les animaux et les végétaux, d'autre part, réside au niveau de l'organisation biologique).

Les protistes sont des organismes simples, possédant souvent des cellules pas ou très peu différenciées, du même type et indépendantes. Les animaux et les végétaux, quant à eux, sont des organismes complexes, ayant des cellules bien différenciées qui s'organisent en tissus pour former des organes.

Tableau 1. Classification des protistes

Protistes supérieurs (eucaryotes)	<ul style="list-style-type: none"> - Protozoaires (unicellulaires). - Algues (excepté les algues bleu-vert, la majorité est pluricellulaires, peu sont unicellulaires). - Champignons microscopiques: levures (unicellulaires) et moisissures (pluricellulaires).
Protistes inférieurs (procaryotes)	<ul style="list-style-type: none"> - Bactéries (la majorité est unicellulaires, peu sont pluricellulaires). - Algues bleu-vert ou cyanophycées;

III.1. Les protistes eucaryotes ou supérieurs

A- Les algues: sont des eucaryotes capables de photosynthèse et de reproduction aussi bien sexuée qu'asexuée. Les algues qui intéressent les microbiologistes sont habituellement unicellulaires.

B- Les protozoaires: Ce sont les formes animales les moins évoluées, sans paroi, généralement mobiles, hétérotrophes qui ingèrent leur nourriture par phagocytose. Les formes les plus nombreuses sont aquatiques (rhizopodes, flagellés et ciliés).

C- Les champignons (mycètes): caractérisés par une paroi cellulaire composée de la chitine. Le règne des mycètes comprend des organismes très variés. (les levures, les moisissures et les mycètes charnus)

III-2- Les protistes inférieurs (procaryotes): ne possède pas d'organites (à l'exception des ribosomes). Le matériel génétique est constitué d'un seul chromosome circulaire = nucléoïde (sans enveloppe nucléaire).

3.3) Système à 4 règnes: Dans cette classification COPELAND (1938) a séparé les procaryotes (bactéries et les cyanophycées) de celui de protiste en règne des bactéries ou "Monera"

I. Plantes (Plantae): Vasculaires et bryophytes

II. Animaux (Animalia): Métazoaires

III. Protistes (Protista) : Algues, Protozoaires et Champignons

IV. Monères (Monera) : Bactéries et Cyanophycées

3.4) Système à 5 règnes :

En 1969, **Robert H. Whittaker** décrit une classification à cinq règnes. Quatre règnes eucaryotes (**Animal, Végétal, Champignons et Protistes**). Les procaryotes se regroupent dans le règne des **monères**. Classification basée sur des caractères morphologiques

I. Monères «Monera» : microorganismes procaryotes (bactéries et cyanobactéries)

II. Protistes «Protista»: microorganismes eucaryotes unicellulaires ou en colonies qui sont dépourvus de vrais tissus.

III. Champignons ou mycètes «Fungi»: champignons, (levure et moisissure). Sont des organismes eucaryotes, saprophytes et souvent multinucléés.

IV. Animaux «Animalia» : est constitué des animaux multicellulaires.

V. Végétaux «Plantae» : les plante multicellulaires photosynthétiques.

5) Nouvelle classification à 3 domaines: Carl WOESE en 1979

Le développement des techniques de **biologie moléculaire** a permis de caractériser les gènes qui codent pour les **ARN ribosomiaux (ARNr)**. En comparant une multitude de séquences d'ARNr 16S, appartenant à divers organismes vivants, il est arrivé à diviser les organismes vivants en **trois domaines**. Le domaine des **Bacteria ou Eubacteria**, le domaine des **Archaea** et le domaine des **Eucarya** (animaux, plantes, les mycètes et les protistes)..

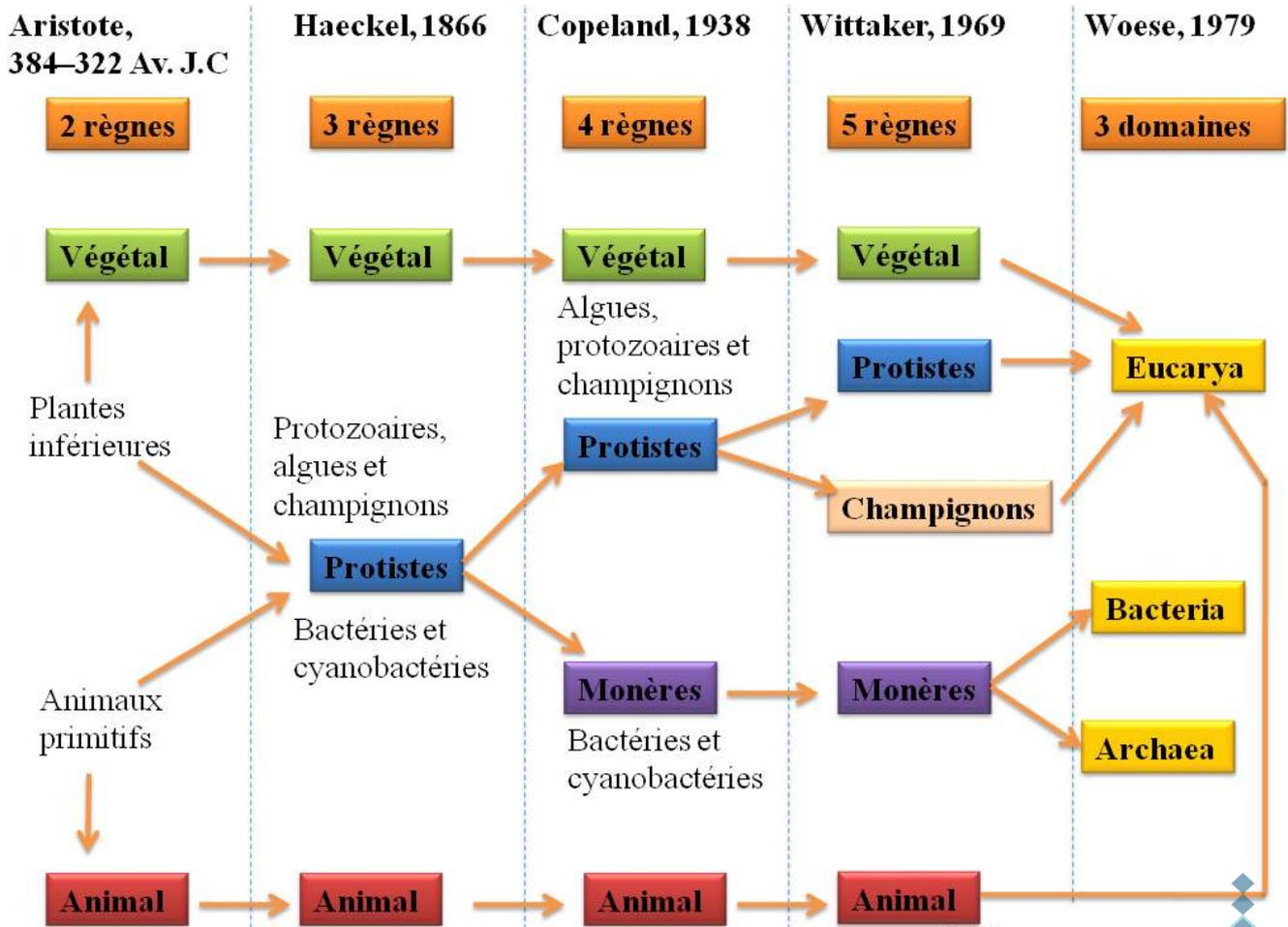


Figure 2. les différentes classifications des être vivants

4- CARACTERISTIQUES GENERALES DE LA CELLULE PROCARYOTE

En 1937 et grâce à l'invention du microscope électronique, **Edward Chatton** mis en opposition deux types de cellules, **la cellule eucaryote (noyau est entouré d'une membrane et qui renferme des d'organites cellulaires)** et **la cellule procaryote (noyau sans membrane et dont l'organisation est très simple)**.

4.1. Cellule eucaryotes : vient de mots grecs signifiant « vrai noyau » (eu = vrai ; karyon = noyau).

4.2. Cellule procaryote : (du grec, *pro*: avant et *karyon*: noyau) = prénoyau: des êtres dépourvus de noyau.

Tableau 1.

Caractéristiques	cellule Procaryote	cellule Eucaryote
Taille typique (diamètre)	1-10 µm	10-100 µm
Appareil nucléaire	nucléoïde (pas de véritable noyau). Pas d'enveloppe nucléaire	vrai noyau entouré de doubles membranes nucléaires (une enveloppe nucléaire)
Histones, nucléole	Absent	Présent
Nombre de chromosomes	généralement 1	> 1
plasmide	Présent (facultatif)	absent (sauf certaines levures)
Division cellulaire	division simple (direct)	mitose + méiose
ARNm et synthèse protéique	couplé au cytoplasme	la synthèse d'ARNm dans le noyau, et la synthèse de protéines dans le cytoplasme
ARNm polycistronique	Présent	Absent
Premier acide aminé initiant la synthèse d'une chaîne polypeptidique	<i>N</i> -formylméthionine	méthionine
Appareil de Golgi, lysosomes, mitochondries, plastides (chloroplastes, etc.), réticulum endoplasmique, vacuole, cytosquelette (microtubules, etc.)	absent	présent
La respiration:	membrane plasmique	Mitochondrie
La photosynthèse:	Chromatophore (chez les phototrophes)	Chloroplastes
La synthèse des lipides:	membrane plasmique	réticulum endoplasmique lisse
Composition chimique de la paroi	Peptidoglycane = muréine (sauf les mycoplasmes et les archéobactéries)	le pectine, la cellulose, la lignine chez les plantes; et la chitine chez les champignons.
Stérols dans la membrane plasmique	Absent	Présent
Endospores	Oui (chez certains genres)	non
Ribosomes	70S	80S (sauf mitochondries et chloroplastes)
Constantes de sédimentation des ARN ribosomiaux	16S, 23S, 5S	18S, 28S, 5,8S, 5S

3. CLASSIFICATION BACTÉRIENNE

1. INTRODUCTION

La systématique a pour but de classer les êtres vivants de manière rationnelle et de leur attribuer un nom. Elle repose sur deux disciplines, **la taxonomie** (ou taxinomie : mot formé des éléments grecs ‘taxi’ arragement, ordre ; ‘nomie’ = lois) **et la nomenclature**. La taxonomie est la science qui permet de classer les organismes en groupes d'affinité ou taxons et la nomenclature est un ensemble de règles gouvernant l'attribution d'un nom à un taxon.

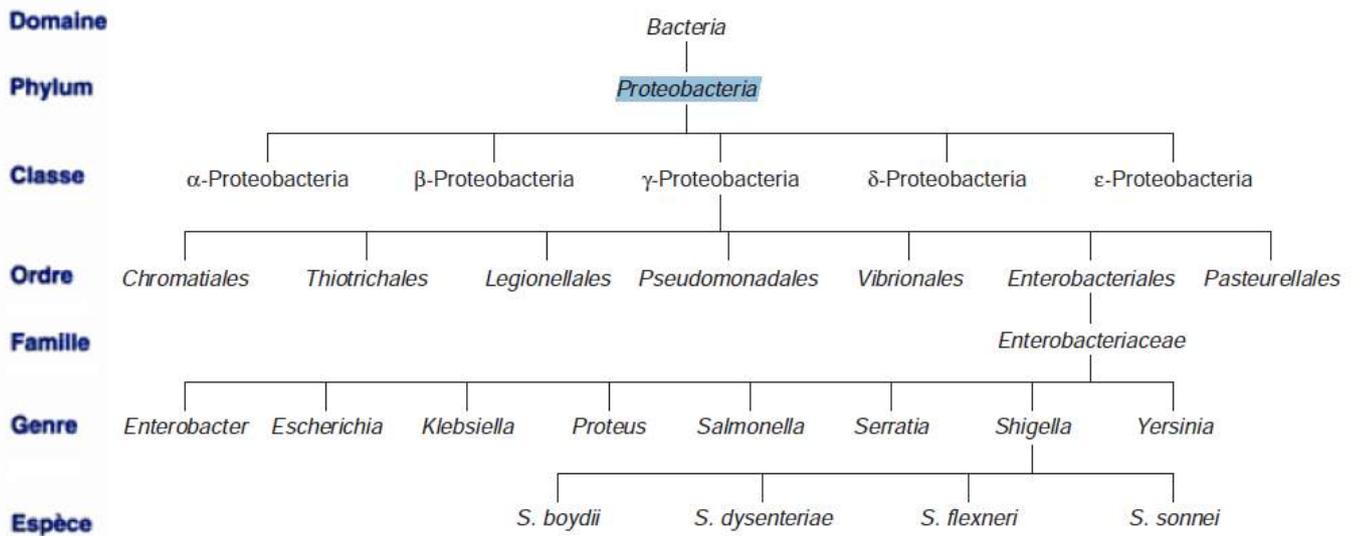
2. LES DIFFERENTS RANGS HIERARCHIQUES

Le monde des procaryotes est divisé en deux domaines (ou empires) : les *Archaea* (ou *Archaeobacteria*) et les *Bacteria* (ou *Eubacteria*).

En théorie, au sein de chacun de ces domaines, on reconnaît les groupes hiérarchiques suivants : phylums (ou divisions), classes, sous-classes, ordres, sous-ordres, familles, sous-familles, tribus, sous-tribus, genres, sous-genres, espèces et sous-espèces. Des rangs hiérarchiques inférieurs à la sous-espèce sont également reconnus pour certaines espèces bactériennes.

A titre d'exemples, les classifications de *Arcanobacterium pyogenes* et de *Salmonella enterica* sont données ci-dessous :

	<i>Arcanobacterium pyogenes</i>	<i>Salmonella enterica</i>
Domaine ou empire	" <i>Bacteria</i> "	" <i>Bacteria</i> "
Phylum ou division	" <i>Actinobacteria</i> "	" <i>Proteobacteria</i> "
Classe	<i>Actinobacteria</i>	<i>Gammaproteobacteria</i>
Sous-classe	<i>Actinobacteridae</i>	
Ordre	<i>Actinomycetales</i>	" <i>Enterobacteriales</i> "
Sous-ordre	<i>Actinomycineae</i>	Aucun
Famille	<i>Actinomycetaceae</i>	<i>Enterobacteriaceae</i>
Sous-famille	Aucune	Aucune
Tribu	Aucune	<i>Salmonelleae</i>
Sous-tribu	Aucune	Aucune
Genre	<i>Arcanobacterium</i>	<i>Salmonella</i>
Sous-genre	Aucun	Aucun
Espèce	<i>Arcanobacterium pyogenes</i>	<i>Salmonella enterica</i>



3. NOMENCLATURE

Le but de la nomenclature est d'attribuer un nom à un taxon de telle manière qu'il n'existe aucun risque de confusion.

Il existe des règles gouvernant la nomenclature bactérienne. Ces règles sont rassemblées dans le "Code International de Nomenclature des Bactéries" établi par le "Comité International de Systématique des Procaryotes" et notamment par sa "Commission Judiciaire".

Le Code de Nomenclature se limite à la réglementation des classes, sous-classes, ordres, sous-ordres, familles, sous-familles, tribus, sous-tribus, genres, sous-genres, espèces et sous-espèces.

3.1. Ecriture des nomenclatures bactériennes

Toutes les nomenclatures sont des mots latins ou latinisés et de tels mots sont traditionnellement écrits en italiques ou ils sont soulignés dans un manuscrit.

1. Les noms des classes et des sous-classes prennent une majuscule. Exemples : la classe des *Actinobacteria*, la sous-classe des *Actinobacteridae*.
2. Les noms des taxons d'un rang hiérarchique supérieur au genre et incluant les ordres sont au féminin pluriel, ils prennent une majuscule, sont formés en rajoutant un suffixe à la racine du nom du genre type : *-ales* pour l'ordre, *-ineae* pour le sous-ordre, *-aceae* pour la famille, *-oideae* pour la sous-famille, *-eae* pour la tribu et *-inae* pour la sous-tribu.
Exemples : l'ordre des *Pseudomonadales*, le sous-ordre des *Pseudomonadineae*, la famille des *Pseudomonadaceae*, la tribu des *Pseudomonadeae*.
3. Les noms des genres et des sous-genres sont au singulier, ils prennent une majuscule, ce sont des noms latins ou latinisés.
Exemples : les genres *Escherichia*, *Staphylococcus*,
Lorsqu'il est suivi d'un nom d'espèce, le nom d'un sous-genre est placé entre parenthèses et il est précédé de l'abréviation "subgen."
Exemple : *Moraxella* (subgen. *Branhamella*) *catarrhalis*.
4. Les noms des espèces sont formés d'une combinaison binaire dont le premier terme est le nom de genre et le deuxième terme est une épithète (épithète spécifique). Le premier terme prend une majuscule et le deuxième terme commence par une minuscule.
Exemples : *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Leptospira interrogans*.
5. Les noms des sous-espèces sont formés d'une combinaison ternaire dont le premier terme est le nom de genre, le deuxième est l'épithète spécifique et le troisième une épithète propre à la sous-espèce (épithète sous-spécifique). Les épithètes prennent une minuscule et elles sont séparées par

l'abréviation "subsp."

Exemples : *Staphylococcus aureus* subsp. *anaerobius*, *Pasteurella multocida* subsp. *multocida*, *Aeromonas hydrophila* subsp. *dhakensis*.

4. CLASSIFICATION PHENETIQUE

Depuis la classification proposée par Cohn en 1872 et jusqu'au début des années 1960, toute la taxonomie bactérienne reposait sur une classification phénétique. Elle est essentiellement basée sur la morphologie et le métabolisme principal des espèces. Les bactéries dans cette classification peuvent être classées selon :

- la coloration de Gram
- la morphologie
- la mobilité
- la capacité à sporuler
- la température de croissance
- les besoins nutritionnels
- le mode respiratoire
- la capacité de photosynthèse
- l'utilisation des différentes sources de carbone ou d'azote

Une classification phénétique a l'inconvénient de ne refléter qu'une quantité d'information réduite. De plus le choix des critères qualifiés "d'importants" est subjectif et il peut varier d'un auteur à un autre ce qui est une source potentielle d'instabilité. La meilleure classification phénétique est celle qui compare le plus d'attributs possible. Des organismes qui partagent beaucoup de caractères forment ainsi un groupe ou taxon.

Le traitement des résultats de l'étude phénétique comportant un nombre important de caractères (plus de 50 caractères rassemblant les données morphologiques et physiologiques) est possible par la taxonomie numérique et cela par le calcul des indices de ressemblances entre chaque deux microorganismes. Il y a deux indices différents:

Coefficient de simple appariement (S_{sm} pour simple matching): est le coefficient le plus utilisé en bactériologie, il représente la proportion de caractères assortis sans tenir compte de l'absence ou de la présence de l'attribut. Il sépare souvent deux espèces entre elles par un niveau de similarité compris entre 80 et 85%.

$$S_{A,B} = \frac{Sm^+ + Sm^-}{Sm^+ + Sm^- + D}$$

$S_{A,B}$ = indice de similarité entre les souches A et B

Sm^+ = nombre de tests positifs similaire entre A et B

Sm^- = nombre de tests négatifs similaire entre A et B

D = Nombre de tests différents entre A et B

➤ **Coefficient de Jaquard:** ce coefficient est calculé en ignorant tout caractère négatif chez les deux organismes.

$$S_{A,B} = \frac{Sm^+}{Sm^+ + D}$$

$S_{A,B}$ = indice de similarité entre les souches A et B

Sm^+ = nombre de tests positifs similaire entre A et B

D= Nombre de tests différents entre A et B

5. CLASSIFICATION PHYLOGENIQUE

Par le passé, les biologistes ont regroupé les organismes vivants en cinq royaumes : plantes, animaux, champignon, protistes et monera (procaryotes) ; récemment, la phylogénie moléculaire a révélé que les cinq royaumes ne représentaient pas cinq lignées majeures de l'évolution. Au contraire, d'après Carl R. Woese en 1978, la vie cellulaire sur terre a évolué selon trois lignées majeures, nommées domaines, deux d'entre eux étant microbiens et composés de cellules procaryotes. La troisième lignée comprend les eucaryotes et inclut les royaumes originaux à l'exclusion des monera. Les deux groupes de procaryotes sont les *Bacteria* et les *Archaea* ; le domaine eucaryote est nommé *Eukarya*. Ces termes définissent les trois domaines du vivant, le mot domaine correspondant au taxon biologique de plus haut rang.

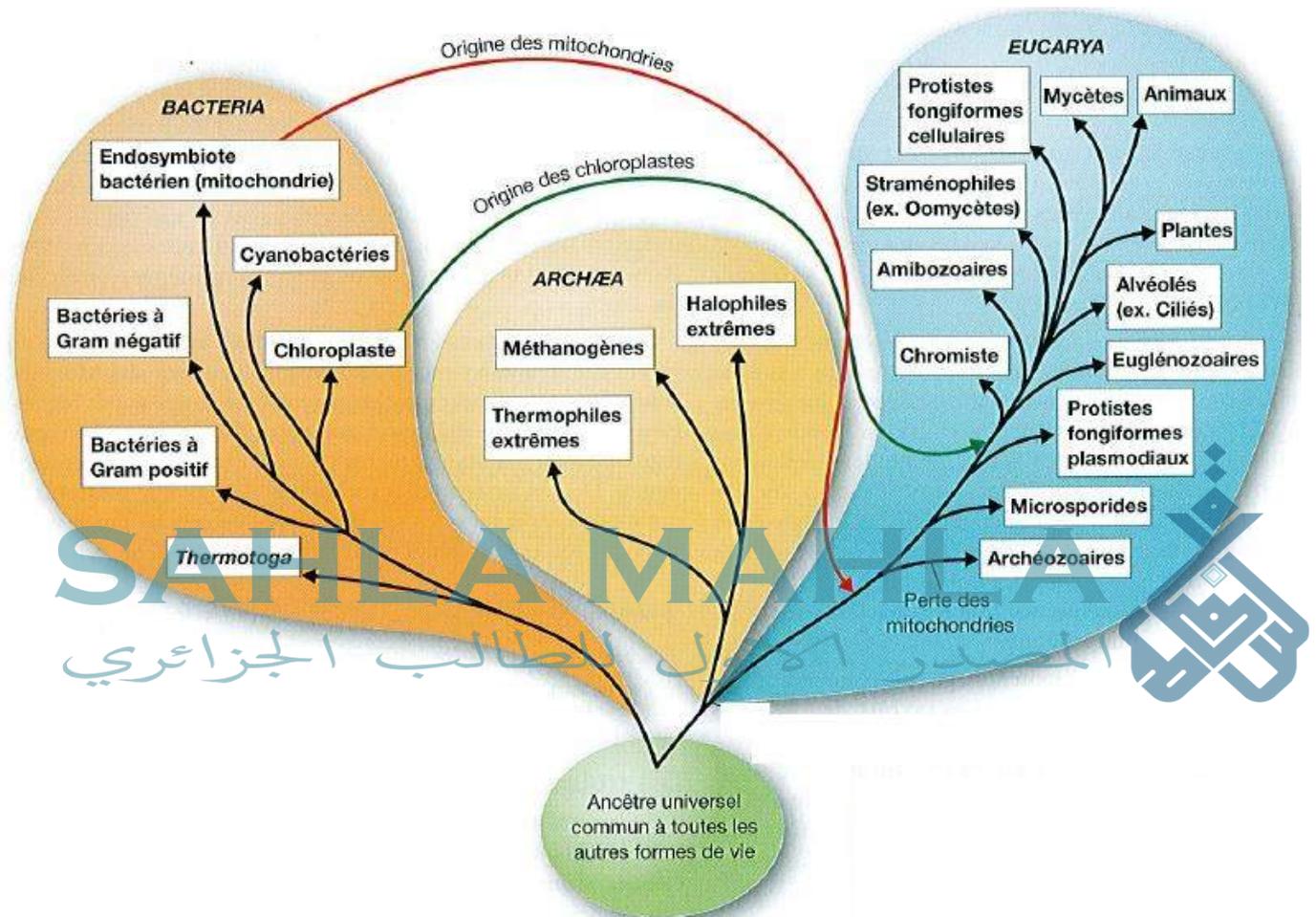


Figure . Arbre phylogénétique universel basé sur les séquences de l'ARNr.

6- CLASSIFICATION DE BERGEY

Le Manuel de Bergey de bactériologie déterminative a été lancé pour la première fois en 1923 par la Société des bactériologistes américains (SAB), appelée aujourd'hui (*American Society for Microbiology*), en composant un comité de rédaction dont David H. Bergey était le président.

Ce conseil, a publié sa première édition du *Manuel* en 1923. La Fiducie du manuel publie actuellement dans le « *Manuel de Bergey de bactériologie systématique* », un document complet et un recueil unique sur la systématique bactérienne.

Sa première édition (1984 - 1989) est composée de quatre volumes:

Volume 1 (1984): Gram-negative Bacteria of general, medical, or industrial importance.

Volume 2 (1986): Gram-positive Bacteria other than Actinomycetes.

Volume 3 (1989): Archaeobacteria, Cyanobacteria, and remaining Gram-negative Bacteria.

Volume 4 (1989): Actinomycetes.

La deuxième édition, plus récente (2001 - 2012) est composée de 5 volumes :

Volume 1 (2001): The Archaea and the deeply branching and phototrophic Bacteria.

Volume 2 (2005): The Proteobacteria. Composé de trois parties, A, B et C.

Volume 3 (2009): The Firmicutes

Volume 4 (2010): The Bacteroidetes, Spirochaetes, Tenericutes (Mollicutes), Acidobacteria, Fibrobacteres, Fusobacteria, Dictyoglomi, Gemmatimonadetes, Lentisphaerae, Verrucomicrobia, Chlamydiae, and Planctomycetes.

Volume 5 (2012): The Actinobacteria.

7. APPORTS DE LA BIOLOGIE MOLECULAIRE A LA CLASSIFICATION PHYLOGENETIQUE .

7.1. Séquençage des acides nucléiques

Les ARNr (ARN ribosomaux) ont été choisis en taxonomie pour trois raisons principales :

- Ils sont présents dans toutes les cellules
- Ils ont une structure bien conservée car toutes modifications importantes pourraient avoir des conséquences importantes sur les synthèses protéiques.
- Ils sont abondants dans la cellule et faciles à purifier.

Les ARNr s'associent à des protéines pour former les ribosomes qui, chez les procaryotes, sont constitués d'une sous-unité 30S et d'une sous-unité 50S. La sous-unité 30S d'un ribosome contient de l'ARNr 16S et la sous-unité 50S contient de l'ARNr 5S et de l'ARNr 23S. L'ARNr 5S est formé d'environ 120 nucléotides, l'ARNr 16S d'environ 1 540 nucléotides et l'ARNr 23S comprend environ 2 900 nucléotides.

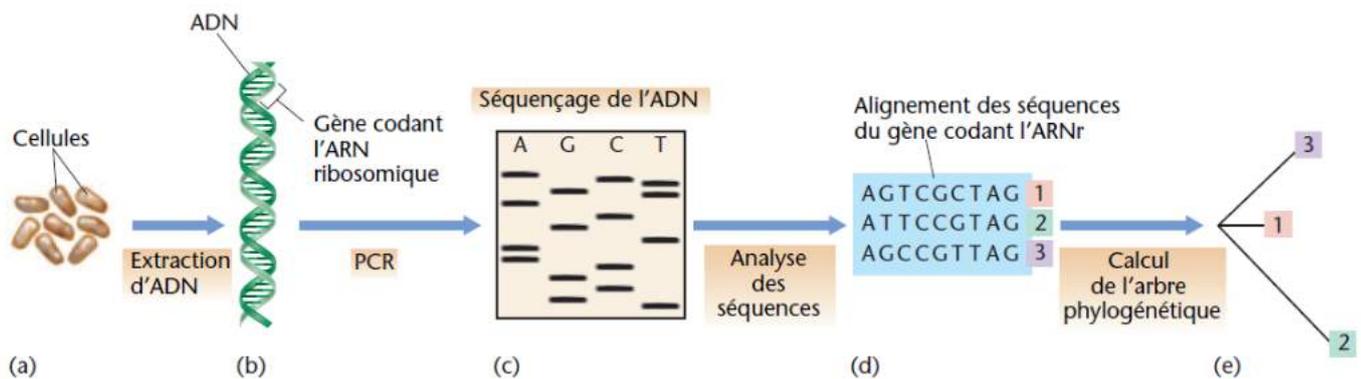
Technique:

FIG2. Séquençage et phylogénie du gène de l'ARN ribosomique (ARNr). (a) L'ADN est extrait de cellules issues d'une culture pure ou d'échantillons environnementaux. (b) Le gène codant l'ARNr est spécifiquement amplifié par la technique d'amplification en chaîne par polymérisation (PCR); (c) Le gène est séquencé. (d) Les séquences obtenues sont alignées par un logiciel informatique. Un algorithme permettant d'identifier les différences effectue une comparaison par paire des séquences d'ARNr des micro-organismes étudiés, afin de calculer un arbre phylogénétique (e). L'exemple représenté illustre les différences suivantes : trois différences entre l'organisme 1 et 2 ; deux différences entre le 1 et le 3 ; quatre différences entre le 2 et le 3. Les organismes 1 et 3 ont un degré de similitude supérieur à celui existant entre les séquences des organismes 2 et 3, et 1 et 2.

7.2. Étude de la teneur en (G+C) de l'ADN

L'introduction du pourcentage de guanine + cytosine dans la taxonomie revient à Chargaff en 1950 qui a montré que le contenu en bases puriques et pyrimidiques de l'ADN peut varier d'un individu à un autre mais est constant pour les individus de la même espèce. Ce pourcentage varie entre 25 et 75% chez les bactéries. Actuellement, on admet que des bactéries dont les G + C diffèrent de plus de 5% ne peuvent appartenir à une même espèce et que des bactéries dont les G + C diffèrent de plus de 10% ne peuvent appartenir à un même genre. Cependant, des valeurs du pourcentage en G + C identiques n'impliquent pas que les bactéries soient proches entre elles car les bases peuvent être disposées de manière très différente sur l'ADN.

La détermination de ce pourcentage peut être effectuée en mesurant la température de fusion de l'ADN ou par chromatographie.

7.3. L'hybridation ADN-ADN

Cette méthode consiste à déterminer le pourcentage de réassociation de l'ADN génomique d'un taxon avec celui des espèces les plus proches. Deux espèces sont considérées différentes si elles ont un taux de ressemblance de l'ADN génomique inférieur à 70%. Deux genres sont considérés différents s'ils ont un taux d'hybridation inférieur à 25%.

- Les techniques récentes de microbiologie moléculaire ont permis de mettre en évidence le faible nombre d'espèces de procaryotes actuellement décrites par rapport au nombre potentiel présent dans les différents environnements étudiés (de 1 à 10 %). La définition actuelle de l'espèce est sur le pourcentage de similitude des séquences d'ARNr 16S, mais il n'existe encore pas de définition précise pour le genre.

4. NUTRITION BACTÉRIENNE

Introduction

Pour étudier les bactéries, il faut être capable de les faire croître en culture pure. Pour cela, il faut connaître les types de nutriments dont elles ont besoin, ainsi que les différentes conditions physiques qui permettent une croissance optimale. Certaines bactéries ont des besoins nutritifs simples, d'autres en ont de très complexes. Il faut donc adapter les conditions de culture selon les besoins de chaque groupe de bactéries.

1. Besoins élémentaires :

Les bactéries se multiplient à partir des aliments présents dans les milieux de culture. Elles ont toutes un certain nombre de besoins communs en plus à l'eau.

Parmi les éléments du tableau périodique, seuls 11 (C, O, H, N, S, P, K, Mg, Ca, Fe et Na) sont considérés comme éléments majeurs et sont en général requis par les bactéries en concentration relativement élevées ($> 10^{-4}$ M). Par leur innombrables combinaisons, ils fournissent l'extrême diversité des composés chimiques utilisés par les microorganismes et ils forment la presque totalité du matériel cellulaire.

1.1. Source de carbone : Le carbone est le composant principal du matériel cellulaire, il forme en moyenne 50% de son poids sec. Cet élément doit être fourni en grandes quantités. Les bactéries peuvent utiliser cet élément sous sa forme minérale (CO_2 , Na_2CO_3 , CaCO_3) mais la majorité des bactéries l'utilise sous sa forme organique (glucose, raffinose, chitines.. etc.). La dégradation des sources de carbone produit l'énergie que les bactéries utilisent dans leurs métabolismes.

1.2. Source d'azote : Après le carbone, il constitue le second élément chimique le plus abondant du matériel cellulaire, il forme en moyenne 12% de son poids sec. Cet élément peut être utilisé sous la forme de N_2 dans le cas des bactéries fixatrices d'azotes (*Azotobacter* et *Clostridium*, *Rhizobium*, ..), sous d'autres formes minérales (NO_2 , NO_3 , KNO_3 , NaNO_3 , NH_4Cl ...etc.) ou sous une forme organique (acides aminés, protéines etc...).

1.3. Éléments minéraux : ces éléments sont ajoutés aux milieux de culture sous formes de sels.

Le phosphore (P) : rentre dans la composition des acides nucléiques (ADN et ARN), de nombreuses coenzymes, des phospholipides et des nucléotides (ATP, NADP)

Le soufre (S) : rentre dans la composition de certains acides aminés (méthionine et cystéine), vitamines (la biotine, la thiamine et l'acide lipoïque) et coenzymes

Le potassium (K) : cation inorganique cellulaire principal, cofacteur enzymatique

Le Magnésium (Mg) : Cofacteur enzymatique, et rentre dans la composition de la paroi, la membrane et les ribosomes.

Le calcium (Ca) : rentre dans la composition de l'endospore la paroi, les exoenzymes (α -amylase, protéase)

Le Fer (Fe) : cofacteur enzymatique et rentre dans la composition de cytochrome

Le Sodium (Na) : élément de transport membranaire.

2. Facteurs de croissance :

Les facteurs de croissance sont des composés organiques, indispensables à la croissance de certaines bactéries qui sont incapables de les synthétiser. Ils appartiennent principalement à trois catégories de substances :

2.1. Les acides aminés indispensables à la synthèse des protéines

2.2. Les bases puriques et pyrimidiques indispensables à la synthèse des acides nucléiques

2.3. Les vitamines qui rentre dans la composition des coenzymes ou précurseurs de coenzymes (exemple : Nicotinamide NAD, transporteur d'électrons).

On classe les bactéries en deux catégories selon leur besoin en ces facteurs de croissances en bactéries **prototrophes ou auxotrophes** (voir types trophiques)

* Les facteurs de croissance sont ajoutés aux milieux de cultures en très faibles quantités (10 mg/l pour les acides aminés et les bases et moins de 1 mg/l pour les vitamines).

* Les facteurs de croissance sont spécifiques, une petite modification dans leur structure = perte de leur efficacité.

3. Types trophiques

La nature de la source de carbone, la source d'énergie et la nature de l'accepteur final d'électrons dans la réaction d'oxydoréduction sont différents d'un microorganisme à un autre et ça permet de définir des catégories qu'on appelle types trophiques (du grec trophus = nutrition) qui sont :

3.1. Source d'énergie et types trophiques

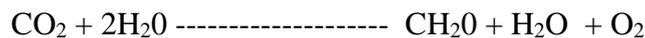
En se référant à la source d'énergie, on peut reconnaître deux grandes classes de bactéries :

A. Les phototrophes : capables d'utiliser l'énergie lumineuse pour leur croissance.

La photosynthèse est le mode de vie caractéristique des végétaux, des cyanobactéries et de quelques espèces bactériennes. Dans chaque cas, grâce à l'énergie lumineuse, le processus conduit à la synthèse d'ATP.

La photosynthèse bactérienne peut donc faire appel à des composés minéraux ou organiques comme source d'électrons mais ce n'est jamais de l'eau comme est le cas chez les plantes et les cyanobactéries.

La réaction de la photosynthèse chez les plantes et les cyanobactéries contenant la chlorophylle (photosynthèse oxygénique) exige un **donneur d'électrons interne** :



La réaction de la photosynthèse chez les bactéries contenant la bactériochlorophylle (photosynthèse anoxygénique) exige un **donneur d'électrons exogène** :

On parle de bactéries :

A.1. photolithotrophes quand le donneur d'électrons est minéral : Bactéries capables de se développer dans un milieu purement minéral ($\text{RH}_2 = \text{H}_2\text{S}, \text{H}_2, \text{S}_2\text{O}_3$ ou S). Ex : *H₂S* pour *Chlorobium* (bactéries sulfureuses vertes) et *Thiosarcina* (bactéries sulfureuses pourpres)

A.2. photoorganotrophes qui nécessitent les composés organiques ($\text{RH}_2 =$ formate, acétate, éthanol, arginine) comme source d'électrons (ex : *Rhodospirillum*).

A. Les chimiotrophes : obtiennent leur énergie de l'oxydoréduction de composés chimiques organiques (chimioorganotrophe) ou minéraux (chimiolitotrophes).

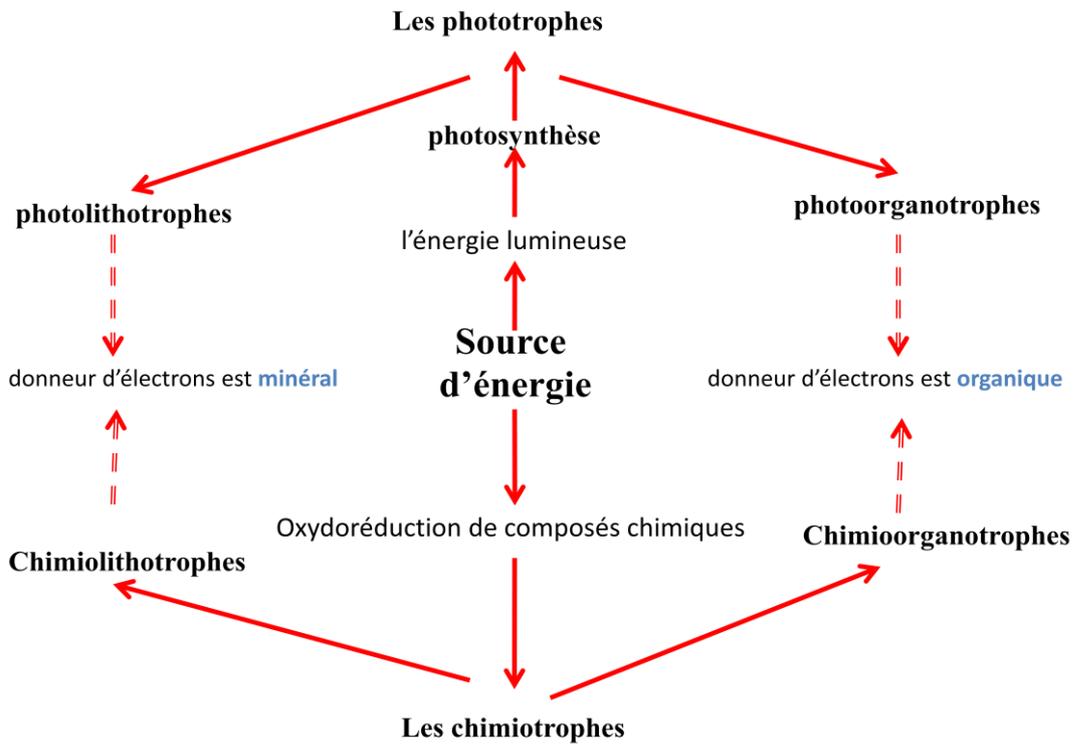
De la même façon, pour classer les bactéries chimiotrophes, elles puisent leur énergie des composés minéraux ou organiques.

B.1. Chimiolithotrophes si le donneur d'électrons est minéral ;

B.2. Chimioorganotrophes si le donneur d'électrons est organique.

La grande majorité des bactéries rentre dans cette dernière catégorie : bactéries pathogènes, bactéries des contaminations alimentaires et les bactéries utilisées dans l'industrie pour la synthèse d'antibiotiques, de vitamines, d'acides aminés, etc.

Les types trophiques selon la source d'énergie son résumés dans le diagramme ci-dessous.



3.2. Source de carbone et types trophiques : Tous les organismes vivants ont besoin de carbone. Environ 50% du poids sec d'une cellule microbienne est composé de carbone, c'est l'élément de base de toutes les classes de macromolécules. Les exigences nutritionnelles permettent de distinguer entre deux catégories de microorganismes :

3.2.1. Bactéries autotrophes : c'est les bactéries qui sont capables de se développer en milieu inorganique contenant le CO_2 comme seule source de carbone (ou des sels de CO_2 comme le CaCO_3 , le NaCO_3 ...etc.). C'est le cas des bactéries phototrophes et quelques bactéries chimiotrophes.

3.2.2. Bactéries hétérotrophes : dans ce cas les bactéries exigent au contraire des composés organiques pour se reproduire.

a. Bactéries prototrophes : Ces bactéries ont besoin d'une seule source de carbone organique. Elles peuvent se développer sur un milieu minimum contenant une seule source de carbone, une seule source d'azote et des sels minéraux. Ces bactéries synthétisent elles mêmes les composés cellulaires à partir des composés organiques simples ex : *Bacillus subtilis* et *E. coli*.

b. Bactéries auxotrophes : c'est des bactéries ayant des exigences nutritives plus complexes à cause de l'absence d'une ou plusieurs enzymes indispensables à la synthèse de certains composés métaboliques importants (acides aminés, vitamines ou nucléotides). Ces composés doivent être apportés dans le milieu de culture sous forme de facteurs de croissance

ex : dans un milieu contenant une source de carbone comme le glucose, une source d'azote et des sels minéraux, *Escherichia coli* se développe normalement (Prototrophe). *Proteus vulgaris*, de la même famille qu'*E. coli* en est totalement incapable à moins que l'on ajoute à ce milieu une faible quantité de Nicotinamide (vitamine) (auxotrophe).

3.3.Types trophiques selon l'accepteur final d'électrons :

Selon la nature de l'accepteur final d'électrons dans les réactions d'oxydoréduction on distingue :

Bactéries aérobie stricte : l'oxygène est l'accepteur final d'électrons.

Bactéries anaérobie strictes : l'accepteur final peut être minérale (respiration anaérobie) ou organique (fermentation).

Bactéries anaérobies facultatives : en présence d'oxygène l'accepteur final d'électrons est l'O₂ et en absence d'oxygène il peut être organique ou minéral.

Bactérie micro-aérophiles : l'oxygène est l'accepteur final d'électrons.

Les différents types trophiques sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1. Les types trophiques

Classe du besoin	Nature du besoin	Type trophique
Source d'énergie	Rayonnement lumineux	Phototrophe
	oxydoréduction de composés organiques ou inorganiques	Chimiotrophe
Donneur d'électrons	Minéral	Lithotrophe
	Organique	Organotrophe
Source de carbone	Composé minéral	Autotrophe
	Composé organique	Hétérotrophe
Facteurs de croissance	Non nécessaires	Prototrophe
	Nécessaires	Auxotrophe

4. Paramètres physico-chimiques nécessaires à la croissance bactérienne

En plus de donner aux bactéries les nutriments dont elles ont besoin, il faut aussi leur apporter les conditions physico-chimiques qui vont permettre le maximum de croissance.

4.1. Influence de la température :

Les mécanismes de croissance dépendent des réactions chimiques qui ont lieu dans la cellule. Les vitesses de réactions sont influencées par la température. Cette dernière va donc avoir une profonde influence sur le développement des bactéries. Chaque espèce bactérienne croît à des températures situées dans un intervalle déterminé. On distingue trois catégories de bactéries :

- **Bactéries psychrophiles (cryophiles) :**

La température optimale de croissance : de 5 à 15°C. La gamme de croissance avec un minimum entre -4 et -8°C, et un maximum de 30°C.

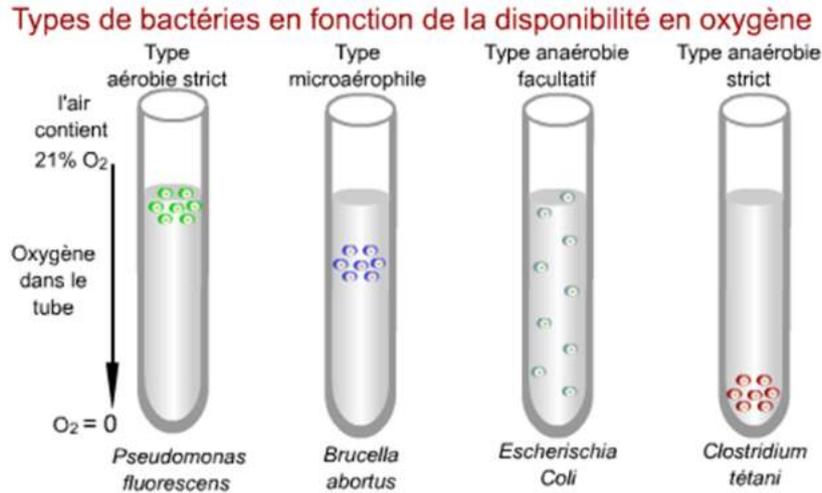
- **Bactéries mésophiles :** la température optimale se situe entre 25 et 40°C. La température minimale voisine 10 à 15°C et la température maximale entre 45 et 50°C.

- **Bactéries thermophiles :** les températures optimales sont élevées entre 45 et 65°C (en général 55°C). La température minimale varie entre 35 et 45°C. La température maximale atteint 75 à 80 °C ou même plus.

4.2. Influence des gaz atmosphériques :

L'oxygène et le CO₂ sont les principaux gaz qui affectent la multiplication des bactéries. Celles-ci réagissent différemment en présence d'oxygène moléculaire. On peut diviser les bactéries en : Aérobie strictes, Anaérobies strictes, Aérobie/anaérobies facultatives et Microaérophiles.

Etude du type respiratoire : La mise en évidence expérimentale des types respiratoire peut être réalisée sur la gélose viande-foie (VF) contenant dans un tube et préalablement régénérée au bain marie puis refroidi jusqu'à 40 à 45°C. l'ensemencement est effectué soit à l'aide d'une pipette Pasteur de bas en haut en spirale, soit en déposant à la surface du tube maintenu à 45°C la suspension de la bactérie à étudier puis mélanger, en faisant subir au tube, tenu verticalement des mouvements en forme de 8. Les tubes sont ensuite refroidi sous l'eau de robinet. Après 24h ou 48h à 37°C, la lecture consiste à étudier le niveau du tube où une croissance bactérienne est visible et en distingue quatre types :



4.3. Influence du pH

Bactéries acidophiles : se développent à pH optimal compris entre 3 et 6 et elles peuvent se développer à un pH plus basique, c'est le cas de la majorité des levures et des champignons et quelques bactéries (ex : *Lactobacillus* se développe à pH 6)

Bactéries Neutrophiles : ce groupe de bactéries se développe dans un pH optimal de 7 à 7,5 ou voisin et c'est le cas de la majorité des bactéries (*E. coli* de pH 4,4 à 8).

Bactéries alcalophiles (ou basophiles) : ce groupe de bactéries se développent préférentiellement à pH alcalin (pH 9 ou plus) ex : *Vibrio*.

4.4. Influence de la pression osmotique

La **pression osmotique** d'un milieu traduit la concentration totale des ions et molécules en solution dans ce milieu.

- Bactéries **non halophiles** supportent jusqu'à 2% du sel (NaCl) pour leur croissance (c'est le cas de la majorité des bactéries)
- Bactéries **légèrement halophiles** nécessitent du sel (NaCl) pour leur croissance. La concentration peut varier de 2-3%
- Bactéries **halophiles modérées** nécessitent de 5 à 20% du NaCl.
- Bactéries **halophiles extrêmes** se développent en présence obligatoire de 12 à 35% du sel mais aucune croissance n'est obtenue en absence du sel.
- **Les bactéries halotolérantes** supportent des concentrations modérées de sels mais non obligatoires pour leur croissance (Ex. : *Staphylococcus aureus*).

4.5. Influence de l'activité de l'eau (la Aw)

L'activité de l'eau ne représente pas la teneur en eau (ou humidité) mais bien la disponibilité de cette eau pour la réalisation des réactions métabolique en particulier les réactions enzymatiques. Elle correspond au rapport entre la pression de vapeur d'eau de l'aliment ou de la solution et la pression de vapeur de l'eau pure à la même température. L'activité de l'eau est inversement proportionnelle à la pression osmotique. Elle est affectée par la présence de sels ou de sucres dissous dans l'eau. La congélation diminue aussi la Aw parce que l'eau libre est piégée sous forme de glace.

Plus l'activité de l'eau est élevée, plus la quantité d'eau libre est grande (1 étant le maximum), plus les micro-organismes se développeront.

5. Croissance des bactéries

1. Introduction

Chez les microorganismes unicellulaires, la croissance conduit à une augmentation du nombre d'individus c'est donc l'équivalent d'une multiplication. Le milieu liquide constitue le milieu favorable à l'étude de la croissance bactérienne.

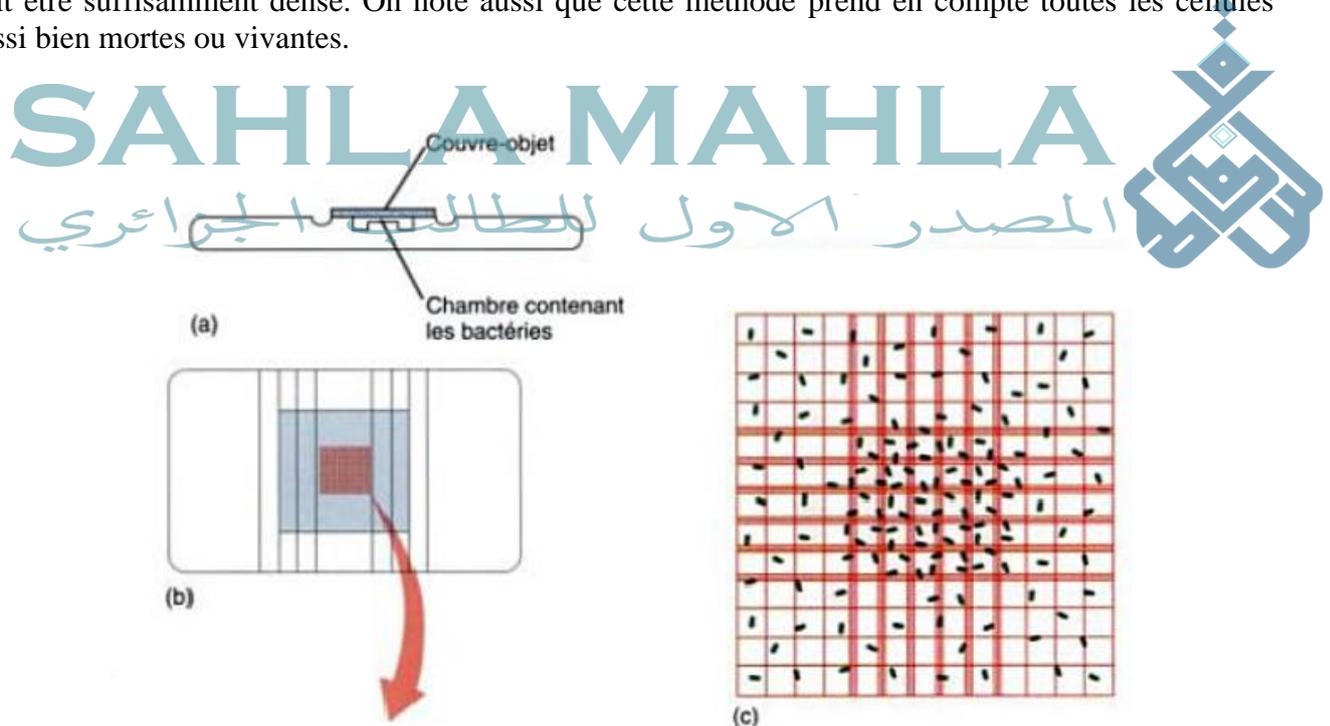
2. Méthodes de mesure de la croissance bactérienne

Les techniques de mesure de la croissance sont basées sur l'évaluation du nombre de bactéries ou de leur masse par unité de volume ou de poids du milieu. On peut dans certains cas utiliser des méthodes indirectes en mesurant un paramètre lié à l'activité métabolique : consommation d'un substrat, une molécule excrétée dans le milieu, etc...

1. Mesure du nombre de cellules

C'est la détermination de la concentration cellulaire exprimée en nombre de bactéries par unité de volume

1.1. Lecture au microscope (numération totale) : technique couramment utilisée pour les bactéries, les levures et les spores de mycètes. On se sert d'un hématimètre de Malassez ou de la cellule de Thoma. Il s'agit d'une lame en verre dont l'une des faces est creusée d'une cavité de profondeur connue et dont le fond porte des quadrillages de surface également connue. La suspension bactérienne est placée dans la cuvette puis recouverte d'une lamelle. Des volumes précis sont ainsi délimités au niveau des quadrillages dans lesquels les cellules sont comptées au microscope. Le nombre de microorganisme dans un échantillon est calculé en tenant compte du volume de la chambre et de la dilution de l'échantillon. Pour obtenir des résultats fiables la population microbienne doit être suffisamment dense. On note aussi que cette méthode prend en compte toutes les cellules aussi bien mortes ou vivantes.



1.2. Dénombrement après culture (numération viable)

1.2.1. Dénombrement en milieu solide : le dénombrement des bactéries viables est une méthode communément utilisée. Un volume fixe (0,1 à 1 ml) de la culture mère ou des dilutions décimales (préparées à partir de la solution mère) est étalé à la surface d'un milieu gélosé ou incorporé au milieu avant sa solidification. Après incubation à une température convenable, le nombre de colonies

apparues correspond au nombre d'unités formant une colonie (UFC) présentes dans le volume analysé de la suspension.

La suspension doit être homogène et ceci par agitation mécanique.

➤ **Expression des résultats :**

$$N = \frac{\sum C_n}{(n_1 \times v_1)d_1 + (n_2 \times v_2)d_2 + \dots + (n_n \times v_n)d_n}$$

C_n : nombre de colonies comptées sur les boîtes retenues

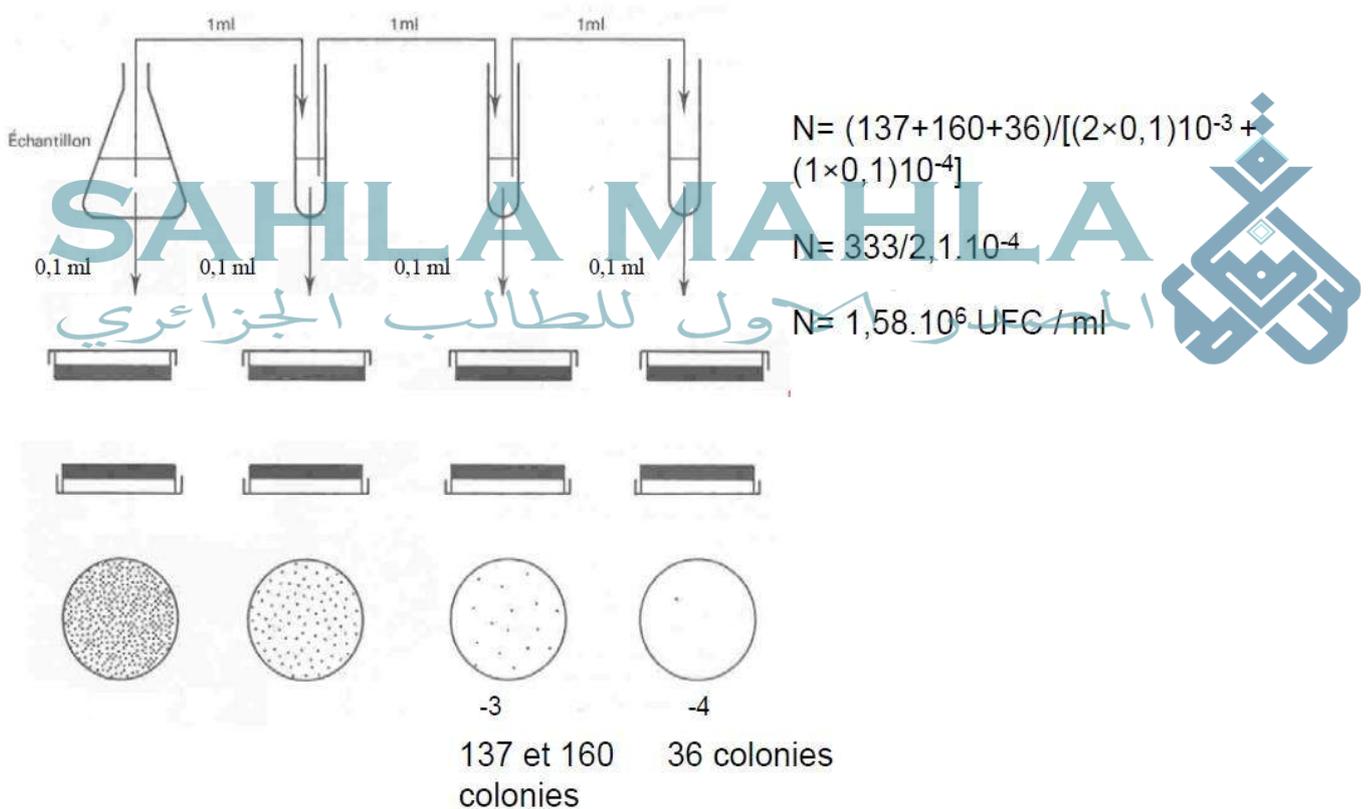
n_n : nombre de boîtes retenues de la n-ième dilution

v_n : volume de l'inoculum de la n-ième dilution

d_n : valeur de la n-ième dilution

Le nombre de colonies retenues après lecture des boîtes devra être compris entre 30 et 300. Il est impossible de compter une boîte contenant plus de 300 colonies. Le risque d'erreur est trop important donc elles sont écartées. Les boîtes contenant moins de 30 colonies sont elles aussi écartées, les colonies sont trop rares et peuvent induire en erreur.

Exemple :



1.2.2. Dénombrement en milieu liquide (Méthode du nombre le plus probable (NPP ou MPN Most Probable Number en anglais), méthode statistique utilisée pour le dénombrement de microorganismes en milieu liquide.

Si les conditions optimales de croissance sont réunies, un seul micro-organisme présent dans l'inoculum introduit dans un milieu liquide se développe en y créant un trouble (et une modification visible du milieu si celui-ci est discriminatif). La lecture des tubes contenant le milieu liquide et ensemencés avec l'inoculum est donc de type binaire :

- résultat négatif si absence de trouble et de modification du milieu : il y avait moins de un micro-organisme présent dans l'inoculum introduit dans le milieu liquide
- résultat positif si présence de trouble (et de modification du milieu si celui-ci est discriminatif) : il y avait au moins un micro-organisme présent dans l'inoculum introduit dans le milieu liquide.

On ensemence donc une série de tubes avec un volume donné du produit à analyser ou ses dilutions, à raison de 1, 2, 3, 5 tubes par dilution testée. Connaissant le nombre de résultats positifs obtenus dans la série de tubes, on peut déterminer le nombre caractéristique

Mise en place du nombre caractéristique

Le nombre caractéristique de la série réalisée est une combinaison de trois chiffres :

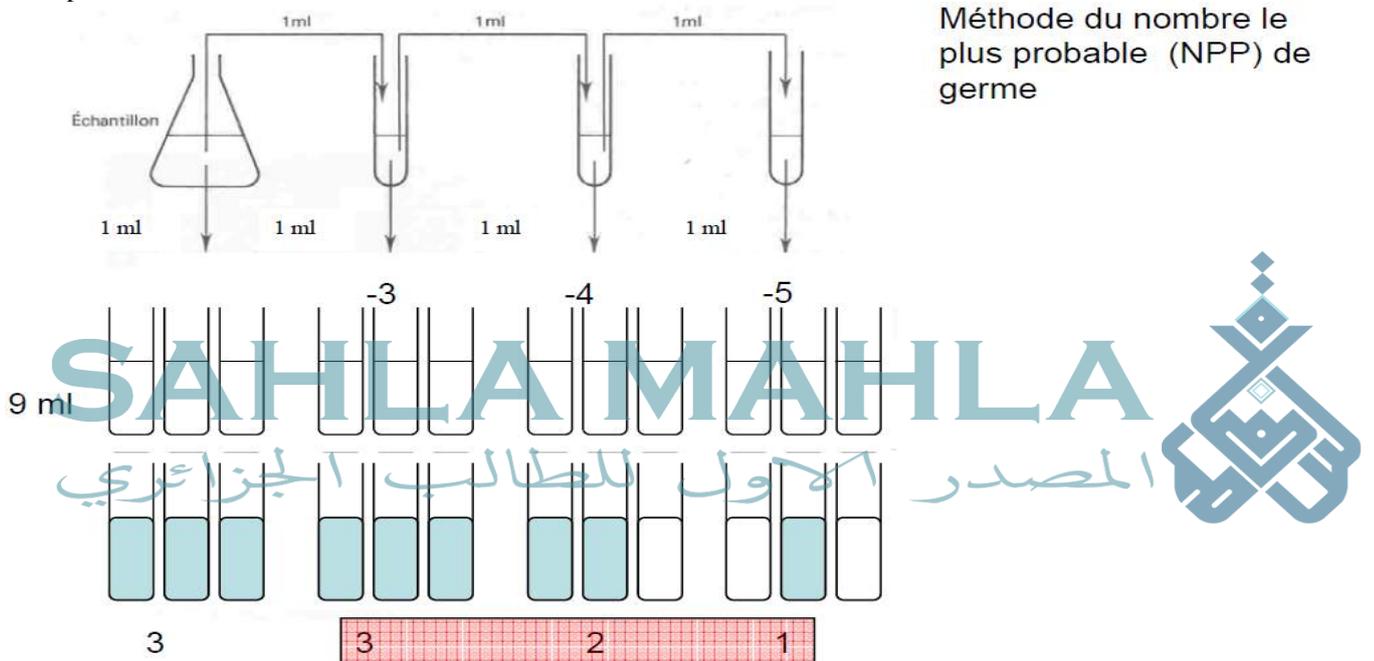
--chaque chiffre correspond au nombre de tubes « positifs » pour une dilution donnée ;

--les trois chiffres correspondent à trois dilutions successives ;

--le chiffre des centaines correspond à la plus faible dilution (donc à la plus forte concentration en micro-organismes), celui des dizaines à la dilution intermédiaire et celui des unités à la plus grande dilution.

--On reporte le nombre caractéristique de la série dans la table statistique de Mac Grady

Exemple :



Exemple : 321 correspond au NPP de 15. Cela signifie qu'il y a statistiquement quinze bactéries dans l'inoculum de la dilution 10^{-3}

Expression du résultat

$$N = \frac{NPP \times k}{V}$$

N : nombre de micro-organismes par ml de produit analysé ou de suspension mère.

NPP : le nombre lu dans la table de Mac Grady.

K : facteur de dilution correspondant au chiffre des centaines du nombre caractéristique.

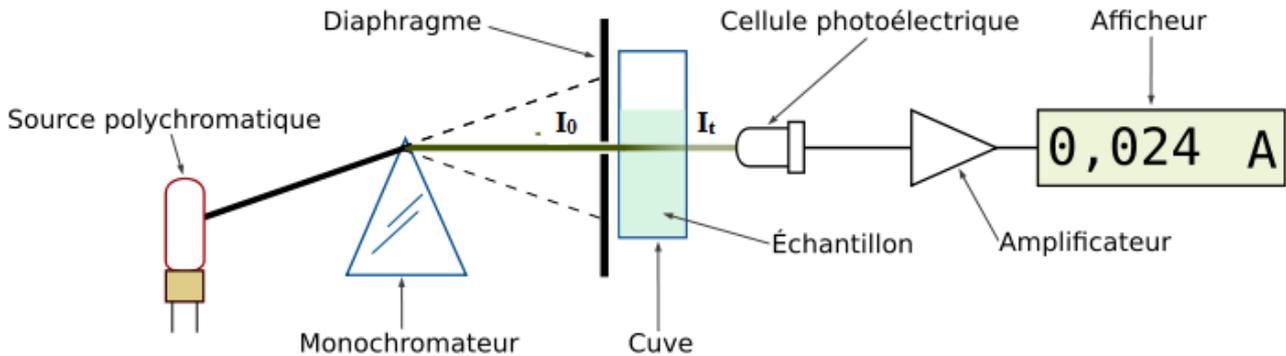
V : volume de l'inoculum (1ml en général)

2. Mesure de la masse :

2.1. Détermination du poids sec : les microorganismes sont récoltés par centrifugation ou par filtration sur membrane d'un volume fixe. Après lavage soigneux, le culot ou le filtre est séché à 100-

110 °C jusqu'à poids constant que l'on exprime généralement en gramme de matière sèche/ litre. Cette méthode est très longue et peu sensible. Elle est utilisée surtout pour les levures et les mycètes.

2.2. Mesure du trouble : c'est le procédé le plus utilisé pour évaluer la masse microbienne. Il s'agit d'une méthode optique générale, basée sur la propriété que présente toute solution d'absorber une partie de l'intensité d'un faisceau de lumière qui la traverse en ligne droite. Des appareils spéciaux, comme le spectrophotomètre qui donne directement la valeur de cette absorbance à une longueur d'onde de 650 nm. Dans le cas où la valeur de la DO dépasse 0,6 on doit diluer l'échantillon analysé pour rester dans le domaine linéaire de la loi de Beer Lambert.



Loi de Beer Lambert : $DO = \text{Log } I_0 / I_t = K \cdot C \cdot l$

DO = Densité optique = A = absorbance

I_0 = intensité de lumière incidente

I_t = intensité de lumière transmise

K = coefficient d'extinction

L = le trajet optique = 1 cm.

C = la concentration en cellules

Cette méthode ne peut pas être utilisée dans le cas de bactéries productrices de pigments diffusibles.

3. Constantes et expression mathématique de la croissance en discontinue (ou en BATCH)

Dans la culture en milieu batch les éléments nutritifs ne sont pas renouvelés, la phase de croissance ne dure que quelques heures.

La croissance d'une bactérie placée dans des conditions idéales de culture peut être définie par deux constantes : le temps de génération et le taux de croissance.

3.1. Temps de génération (G) :

C'est l'intervalle de temps entre deux divisions successives ou celui nécessaire au doublement de la population. Si nous partons d'une cellule bactérienne unique, son accroissement se fait selon une progression géométrique : $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 8$, etc.

Le temps de génération (G) est donc le temps nécessaire au doublement de la population en minutes ou en heures.

$$G = t / n$$

t = temps (connu)

n = nombre de divisions

3.2. Taux de croissance (μ):

On le définit comme étant le nombre de divisions par unité de temps :

$$\mu = n/t$$

t = temps (connu)

n = nombre de divisions

3.3. Expressions mathématique de la croissance

Si on a une population bactérienne à une concentration initiale N_0 elle augmente à chaque génération de la façon suivante :

Après 1 génération : $N_1 = 2N_0$

2 générations : $N_2 = 2N_1 = 2 \times 2N_0 = 2^2 N_0$

3 générations : $N_3 = 2N_2 = 2 \times 2 \times 2N_0 = 2^3 N_0$

n générations : $N_n = 2^n \times N_0 \dots\dots\dots(1)$

On a $\mu = n / t$ donc $n = \mu t \dots\dots\dots(2)$

Si on remplace la formule 2 dans la formule 1 on trouve :

$$N_n = 2^{\mu t} \times N_0$$

$$2^{\mu t} = N_n / N_0 \dots\dots\dots(3)$$

Si On prend la forme logarithmique à base de 2 de la formule 3 :

$$\text{Log}_2 2^{\mu t} = \text{Log}_2 N_n / N_0$$

$$\mu t = \text{Log}_2 N_n / N_0$$

$$\mu t = \text{Log}_2 N_n - \text{Log}_2 N_0$$

$$\text{Log}_2 N_n = \mu t + \text{Log}_2 N_0$$

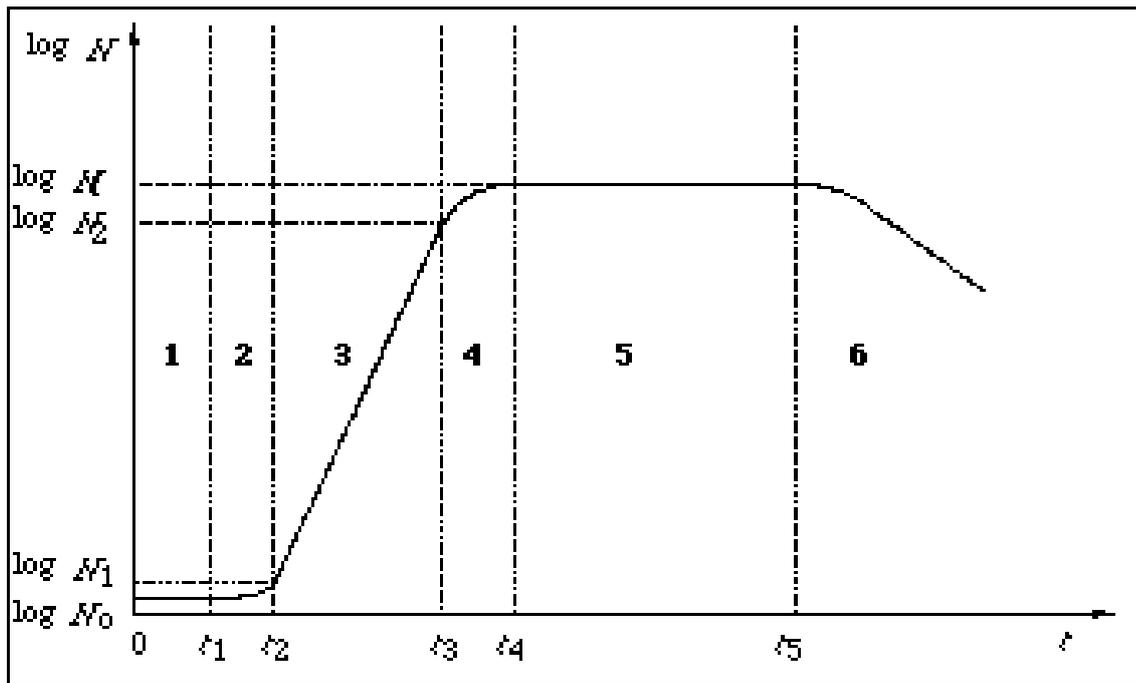
$$y = ax + b$$



4. Courbe de croissance

La représentation graphique de la croissance s'effectue en coordonnées semilogarithmique. Le nombre ou la masse bactérienne étant traduit en nombre logarithmique sur l'ordonnée, le temps en nombre arithmétique sur l'abscisse.

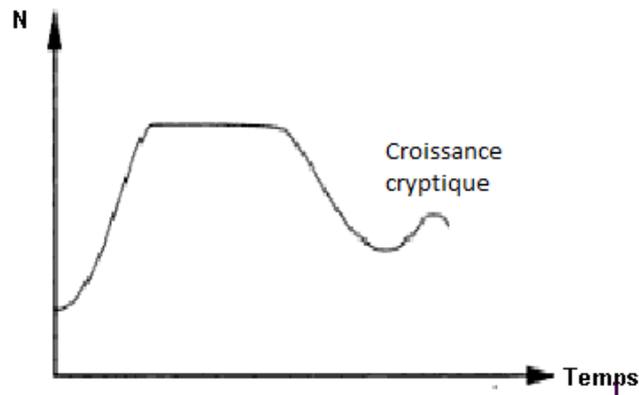
Le graphe $\log N = f(t)$, permet une exploitation précise de la phase de croissance car elle est linéaire. Cette courbe permet de déterminer plus précisément les paramètres de la croissance. On distingue six phases :



Courbe de croissance (culture discontinue)

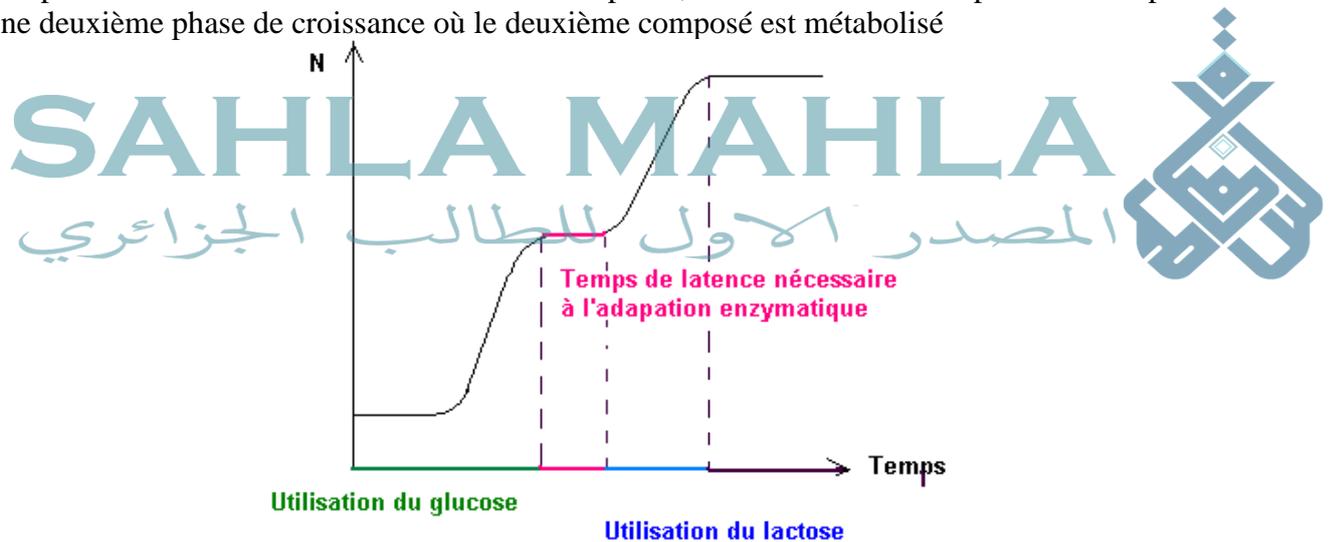
Phase	Nom	Signification physiologique
1	Phase de latence	la croissance n'a pas encore débutée, la bactérie s'adapte au milieu dans lequel elle se trouve (synthèse d'enzymes métaboliques par exemple). La durée de cette phase varie selon le germe étudié, la concentration de l'inoculum, l'état physiologique de la souche (âge), la composition du milieu ... $N=N_0$ et $\mu=0$.
2	Phase d'accélération	N commence à augmenter mais pas de façon linéaire. Certaines bactéries commencent à se diviser mais pas toutes. N et μ augmentent
3	Phase exponentielle de croissance	Chaque cellule se divise pour former deux cellules qui vont à leur tour se diviser pour produire plus de cellules. La vitesse de division est maximale et constante. Donc l'activité physiologique est maximale. Cette phase dure jusqu'à épuisement des éléments nutritifs du milieu . (μ maximale et constante elle est déterminée par la pente de la droite, G diminue et N augmente)
4	Phase de ralentissement	La vitesse de croissance diminue. N continue à augmenter mais certaines bactéries ont stoppé leur développement (μ diminue, G augmente et N augmente faiblement).
5	Phase stationnaire	Le milieu n'est plus favorable à la croissance et la population reste constante. Deux possibilités : _ l'un des nutriments essentiels à la croissance s'épuise dans le milieu _ un ou plusieurs déchets issus du métabolisme s'accumulent dans le milieu et inhibent la croissance. (N maximal et constant, $\mu=0$, G augmente).

6	Phase de déclin	<p>N diminue, μ est négative $\mu < 0$. Les bactéries ne se divisent plus et sont lysées.</p> <p>Dans certains cas, les bactéries survivantes peuvent débuter une nouvelle phase de croissance aux dépens des substances libérées par la lyse. Le phénomène est connu sous le nom de croissance cryptique ou phénomène de cannibalisme..</p>
---	-----------------	--



Phénomène de diauxie ou croissance biphasique

Dans certaines conditions, on peut observer des courbes de croissance plus complexes, avec souvent deux phases de croissance exponentielle séparées par une phase de latence. Cette croissance biphasique ou "*diauxie*", ou *croissance double*, est observée avec certaines bactéries poussant dans un milieu contenant un mélange de deux substrats carbonés. La première phase de croissance correspond à l'utilisation exclusive d'un des composés, elle est suivie d'une période d'adaptation et d'une deuxième phase de croissance où le deuxième composé est métabolisé



Ce phénomène a été remarqué chez *E. coli* cultivé sur un milieu contenant du glucose et du lactose. Le glucose est utilisé lors de la première phase exponentielle et le lactose durant la deuxième phase exponentielle. Ce phénomène est expliqué par l'inhibition de la synthèse de la β -galactosidase par le glucose et ce n'est qu'après épuisement total du glucose que la synthèse de l'enzyme peut avoir lieu durant la deuxième phase de latence.

Les sucres sont classés en deux groupes G1 (utilisé durant la première phase exponentielle) et G2 (utilisé durant la deuxième phase exponentielle) :

G1 : glucose, saccharose, fructose et mannose.

G2 : Lactose, maltose, sorbitol, arabinose et inositol.

5. Les agents antimicrobiens

- **5.1. Définition :** Un agent antimicrobien est un agent qui tue les microorganismes ou inhibe leur croissance. Ils sont de nature physique (la température, les radiations, la filtration ou la centrifugation) ou chimique (divers substances de nature différente).
- **Voir Tp ;**
 - 5.1.1. Les antimétabolites :** ce sont des substances synthétiques ayant une structure similaire aux éléments nutritifs élémentaires ou aux facteurs de croissances. La majorité des antimétabolites ont une action faible sur les bactéries à l'exception des sulfamides. On peut distinguer trois types principaux d'antimétabolites :
 - A. Les analogues de vitamines :** comme les sulfamides, l'aminoprotéines et beaucoup d'autres moins connus, qui sont des inhibiteurs enzymatiques.
 - B. Les analogues d'acides aminés :** ils s'incorporent dans les protéines à la places des acides aminés normales, parafluorophénylalanine au lieu de l'anilines ; 1,2, 3 triazole-3 alanine au lieu de l'histidine, etc.
 - C. Les analogues de bases puriques et pyrimidiques** comme la 5-bromo-uracile à la place de thymine, la 8-azaguanine à la place de la guanine et 5-fluoro-uracil à la place de l'uracile. L'incorporation de ces antimétabolites dans les ARN ou les ADN conduit à des modifications génétiques.

5.1.2. Les antibiotiques

Un antibiotique est une substance chimique organique d'origine naturelle ou synthétique qui inhibe ou tue les microorganismes à de faibles concentrations

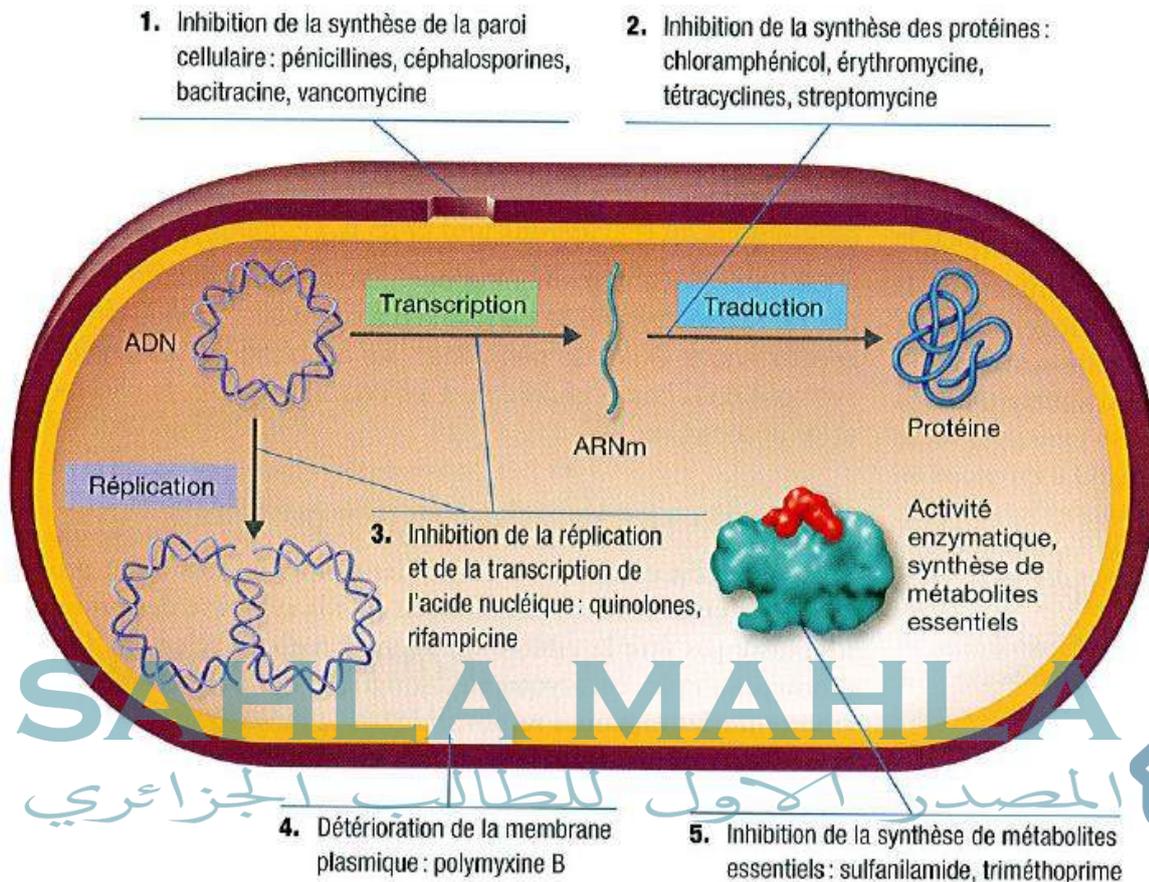
Les antibiotiques constituent un groupe de molécules bioactives très variées qui peuvent être classées selon plusieurs critères: la nature chimique, l'origine, le mécanisme d'action et le spectre d'action. Les molécules présentant des caractères voisins ou identiques sont groupées dans des familles, sous-familles et groupes.

5.3.3.1. Modes d'action des antibiotiques :

- **Inhibition de la synthèse de la paroi cellulaire :** les antibiotiques qui ont une action sur la paroi cellulaire empêchent la synthèse normale du peptidoglycane chez les cellules en phase de croissance, par conséquent, la paroi cellulaire est très affaiblie et la cellule finit par la lyse. Ces antibiotiques n'ont pas d'effet toxique sur les cellules humaines à cause de l'absence de peptidoglycane chez ces les cellules. Parmi les antibiotiques actifs sur la paroi on trouve les pénicillines, les céphalosporines, la bacitracine et la voncomycine.
- **Inhibition de la synthèse des protéines :** ces antibiotiques sont actifs sur les ribosomes qui sont différents de ceux des cellules humaines. Leur action peut être obtenue par :
 - Le blocage du tunnel formé par les deux sous unités 30S et 50S du ribosome et cela empêche le déplacement du ribosome sur l'ARNm (les macrolides ex : erythromycine).
 - La modification de la conformation de la sous- unité 30S. ce qui entraine une mauvaise lecture de l'ARNm (ex : Streptomycine).
 - Nuisance à la fixation de l'ARNt au complexe ribosome-ARNm par la liaison de l'antibiotique à la sous unité 30S de sorte que l'addition de nouveaux acides aminés à la chaîne peptidique en formation n'est plus possible (ex : tétracycline).
 - Inhibition de la formation des liaisons peptidiques dans le polypeptide en formation par la liaison de l'antibiotique à la sous-unité 50S (chloramphénicol).
- **La détérioration de la membrane plasmique :** certains antibiotiques, en particulier les antibiotiques polypeptidiques, influent sur la perméabilité de la membrane plasmique des bactéries, ces

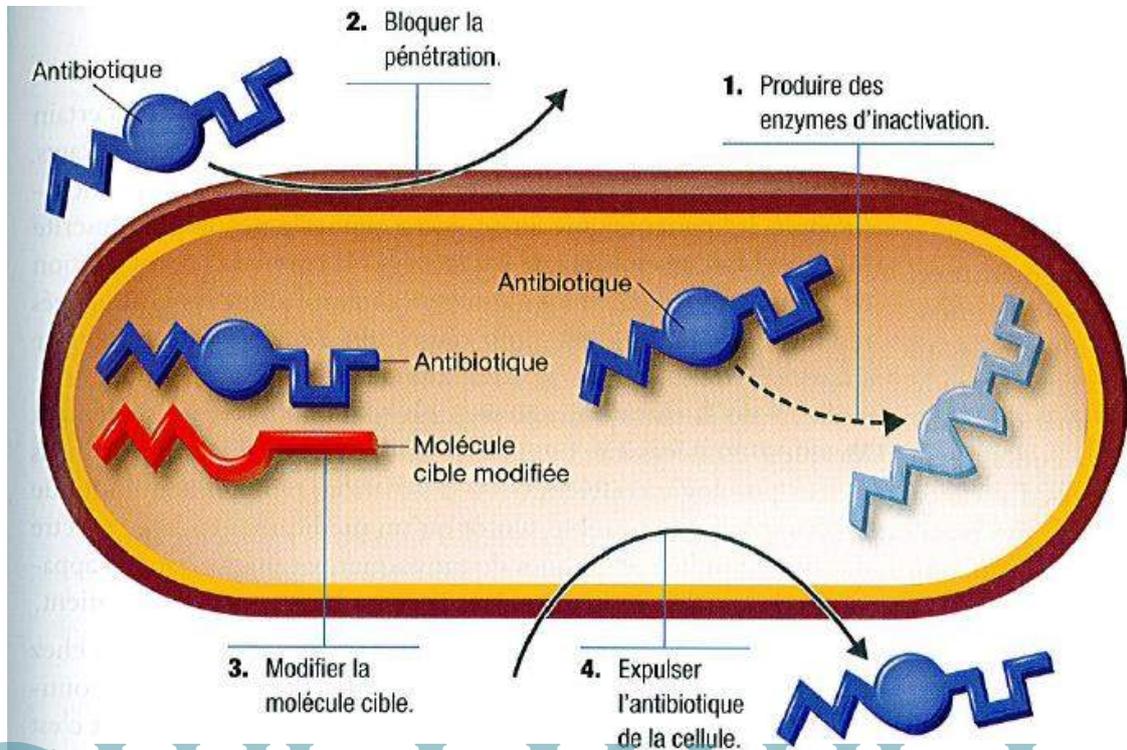
modifications engendrent la rupture de la membrane et par conséquent la perte d'importants métabolites cellulaires. L'action bactéricide se fait à la fois sur les bactéries en phase de croissance ou non, ainsi que sur des protoplastes.

- **Inhibition de la synthèse des acides nucléiques** : certains antibactériens et antiviraux inhibent la synthèse de l'ADN et (ou) de l'ARN dans les cellules microbiennes et dans les virus (ex : la rifampicine et les quinolones).
- **Inhibition de la synthèse des métabolites essentiels** : cette action est obtenue par les antimétabolites qui peuvent substituer un substrat normal et nuire au métabolisme de la bactérie.



5.3.3.2. Mode de résistance aux antibiotiques

Les bactéries possèdent naturellement ou acquièrent des mécanismes de résistances aux antibiotiques. ces mécanismes sont résumés dans la figure ci-dessous.



SAHLA MAHLA

المصدر الاول للطلاب الجزائري



6. NOTIONS DE MYCOLOGIE ET DE VIROLOGIE

I. NOTIONS DE MYCOLOGIE

1. Définition

Ce sont des cellules eucaryotes. Ils se distinguent des plantes par l'absence de chloroplastes, des cellules animales, par la présence d'une paroi cellulaire et des cellules bactériennes par la présence d'un noyau.

Les mycètes sont des chimioorganotrophes. On regroupe, sous le terme des mycètes, l'ensemble des champignons:

- Les levures.
- Les moisissures.
- Mycètes charnus

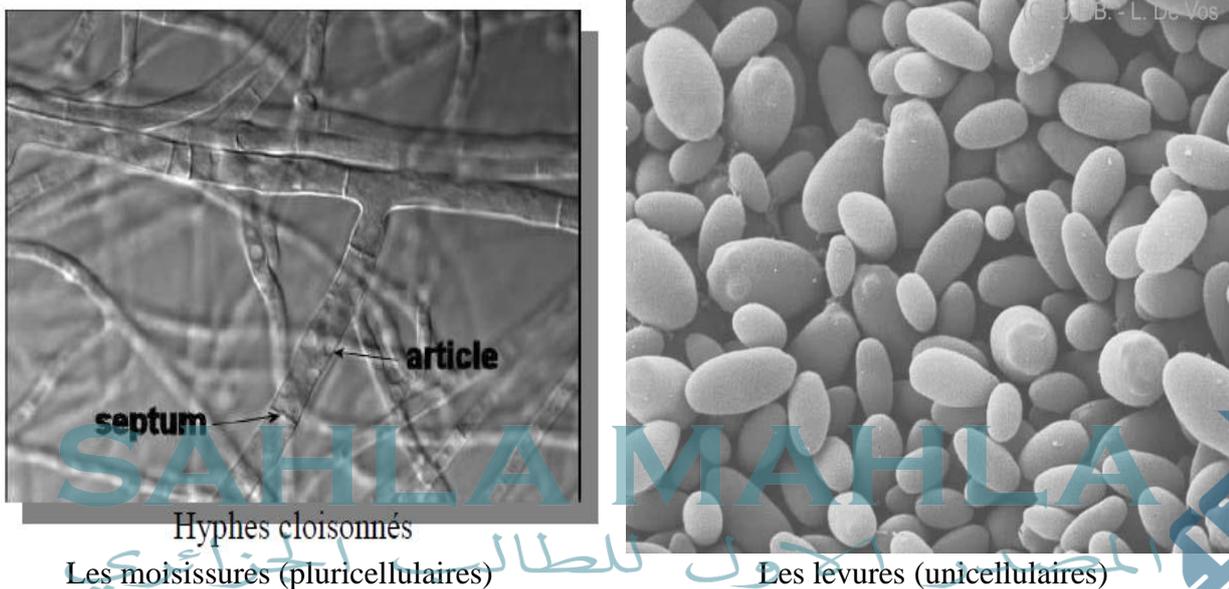


Figure 1. Micromorphologie des levures et des moisissures

2. Les moisissures :

2.1. Morphologie

Ils sont immobiles, pluricellulaires, mais les cellules sont fusionnées avec plusieurs noyaux. Leur paroi est riche en cellulose et en chitine. Le cytosol est limité par la membrane plasmique et contient tous les organites caractéristiques des cellules eucaryotes ainsi que plusieurs noyaux. L'élément structurel de base est appelé **hyphe** (filament mycélien) et l'ensemble des hyphes forment le **mycélium** ou **thalle pluricellulaire**.

Chez la plupart des moisissures, les hyphes sont divisés par des cloisons, ou **septa** (septum au singulier), formant des unités qui ressemblent à des cellules distinctes avec un à plusieurs noyaux. On les appelle alors **hyphes segmentés** ou **septés**. Dans quelques classes de Mycètes, les hyphes ne contiennent pas de cloisons et ont l'aspect de longues cellules continues à noyaux multiples ; ils sont appelés **cénocytes**. Chez les mycètes à hyphes segmentés, il y a habituellement des ouvertures dans les cloisons qui font en sorte que le cytoplasme des cellules adjacentes est continu.

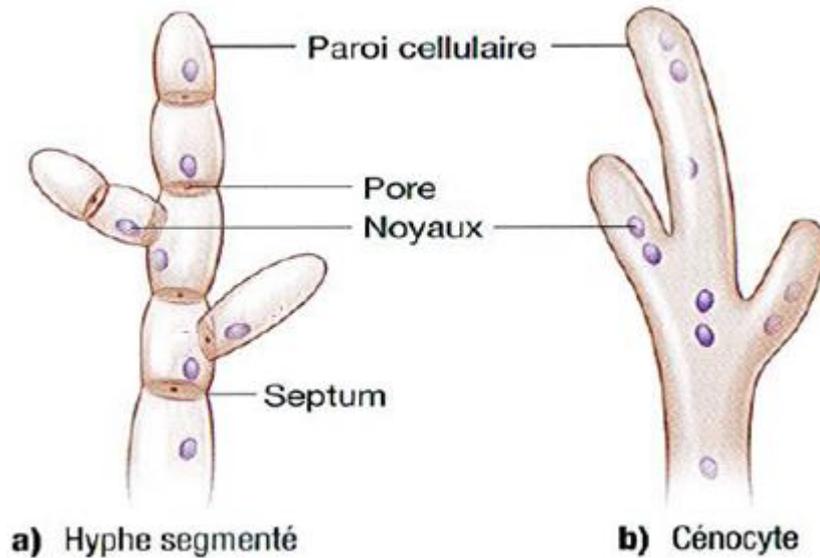


Figure 2. Types des hyphes des mycètes

2.2. Cytologie

A. Paroi fongique

La paroi contient de la cellulose (polysaccharide des parois des cellules végétales) et de la chitine, qui est un polymère de N-acetylglucosamine. D'autres polysaccharides tels les mannanes, galactosanes et chitosane remplacent la chitine dans les parois de certains champignons.

Les parois fongiques contiennent 80 à 90% de polysaccharides associés à des protéines, des lipides, des polyphosphates, et des ions inorganiques.

On peut également parfois trouver dans la paroi de la **mélanine** en grandes quantités. Elle confère certaines résistances face à la lyse enzymatique, aux contraintes mécaniques, aux ultraviolets et à la dessiccation.

2.3. Reproduction

Les mycètes filamenteux peuvent se reproduire de manière asexuée par fragmentation de leurs hyphes. De plus la reproduction chez les mycètes s'effectue par la formation de spores, de manière sexuée ou asexuée.

2.3.1. Spores asexués : les spores asexuées se forment au sein d'un même individu par mitose puis division cellulaire. Les spores asexuées sont deux types :

A. Spores non enfermées dans un sac : les spores asexuées qui ne se développent pas dans un sac se différencient selon leur mode de production par les mycètes :

A.1. Les conidies ou conidiospore : forment des chaînes à l'extrémité d'un hyphe aérien appelé conidiophore. Elles sont produites par exemple par les genres *Aspergillus* et *Penicillium*.

A.2. Arthroconidie ou arthrospore : est un type de spores issue de la fragmentation d'un hyphe segmenté en cellule simple et légèrement épaisses.

A.3. blastoconidie ou Blastospore: constitue par bourgeonnement d'une cellule mère, on l'observe chez toutes les levures.

A.4. Chlamycoconidie ou chlamydospore : apparaît à l'extrémité ou au sein d'un segment de l'hyphe à la suite de la condensation du cytoplasme et de la formation d'une paroi épaisse.

B. Spore enfermées dans un sac ou sporangiospore : elle prend naissance dans un sporange, ou sac, à l'extrémité d'un hyphe aérien appelé sporangiophore. Le sporange peut contenir des centaines de sporangiospores. On trouve ce type de spores asexuées chez *Rhizopus*.

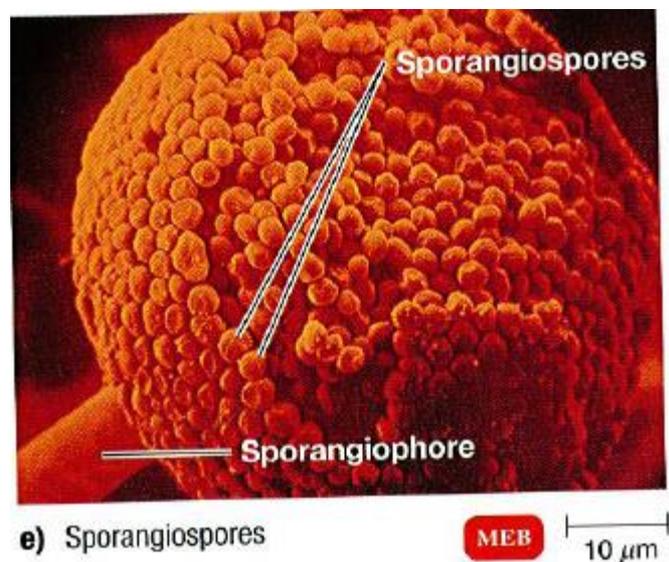
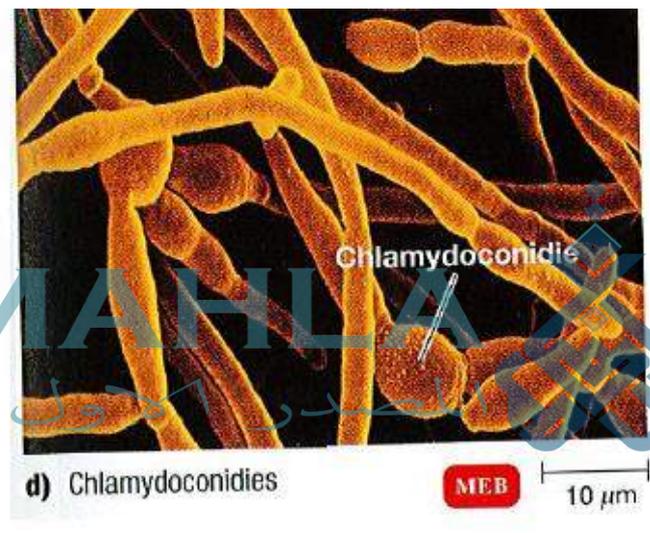
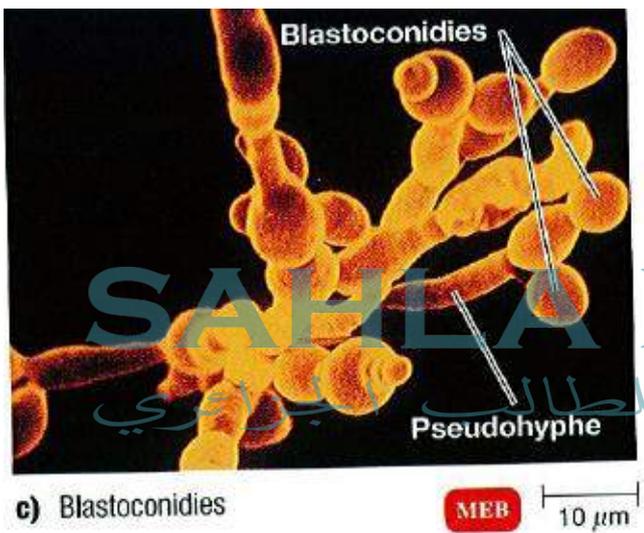
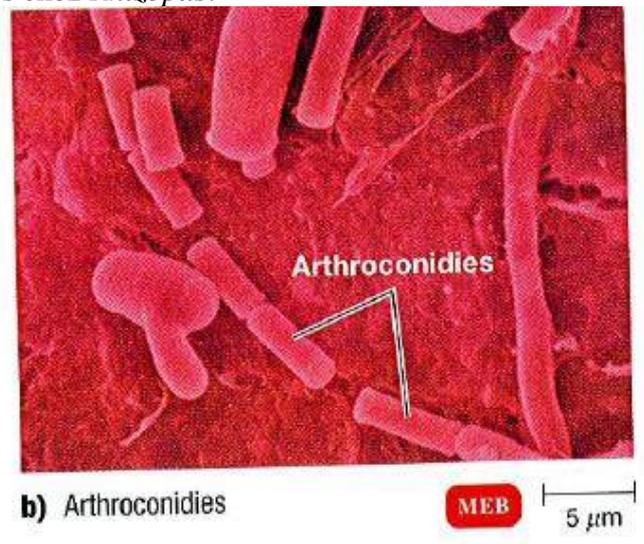
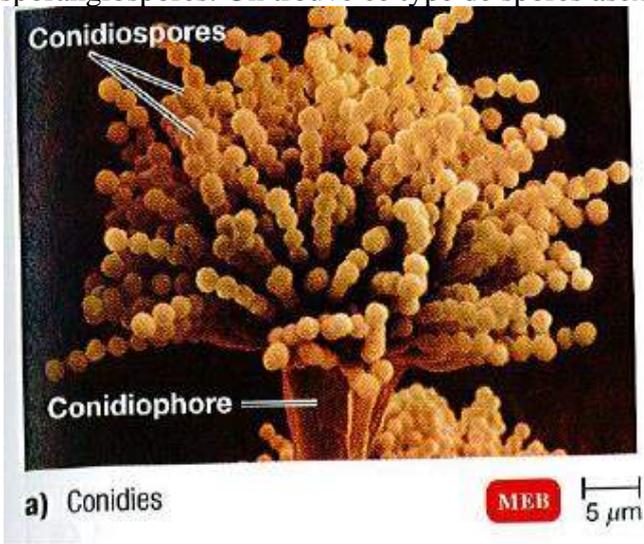


Figure 3. Spores asexuées

2.3.2. Spores Sexuées :

La reproduction sexuée chez les mycètes implique l'union de noyaux compatibles. Certaines espèces fongiques sont autofertilisantes et produisent des gamètes sexuellement compatibles sur le même mycélium (homothallie). D'autres espèces requièrent un croisement entre des mycéliums différents mais compatibles sexuellement (hétérothallie). La reproduction sexuée comprend trois phases :

- A. **Plasmogamie** : le noyau haploïde d'une cellule donneuse pénètre dans le cytoplasme d'une cellule receveuse.
- B. **Caryogamie** : les deux noyaux fusionnent pour former le noyau diploïde d'un zygote.
- C. **Méiose** : le noyau diploïde donne naissance à des noyaux haploïdes.

La fusion des organes reproducteurs conduit à la formation d'une cellule diploïde (caryogamie). Ces noyaux donnent naissance après méiose à des spores qui peuvent alors germer pour former un nouveau mycélium.

2.4. Classification

Le règne des mycètes possède 4 embranchements (phylum ou divisions). La classification est basée sur la structure des filaments et des organes reproducteurs. Les groupes sont hétérogènes, les ancêtres sont différents mais pas le mode de vie.



2.4.1. L'embranchement des Zygomycètes (chytridiomycètes ou Glomeromycota) : les Zygomycètes, sont des moisissures saprophytes dont les hyphes sont cénocytiques (non segmentés). La reproduction peut être sexuée ou asexuée (figure 6).

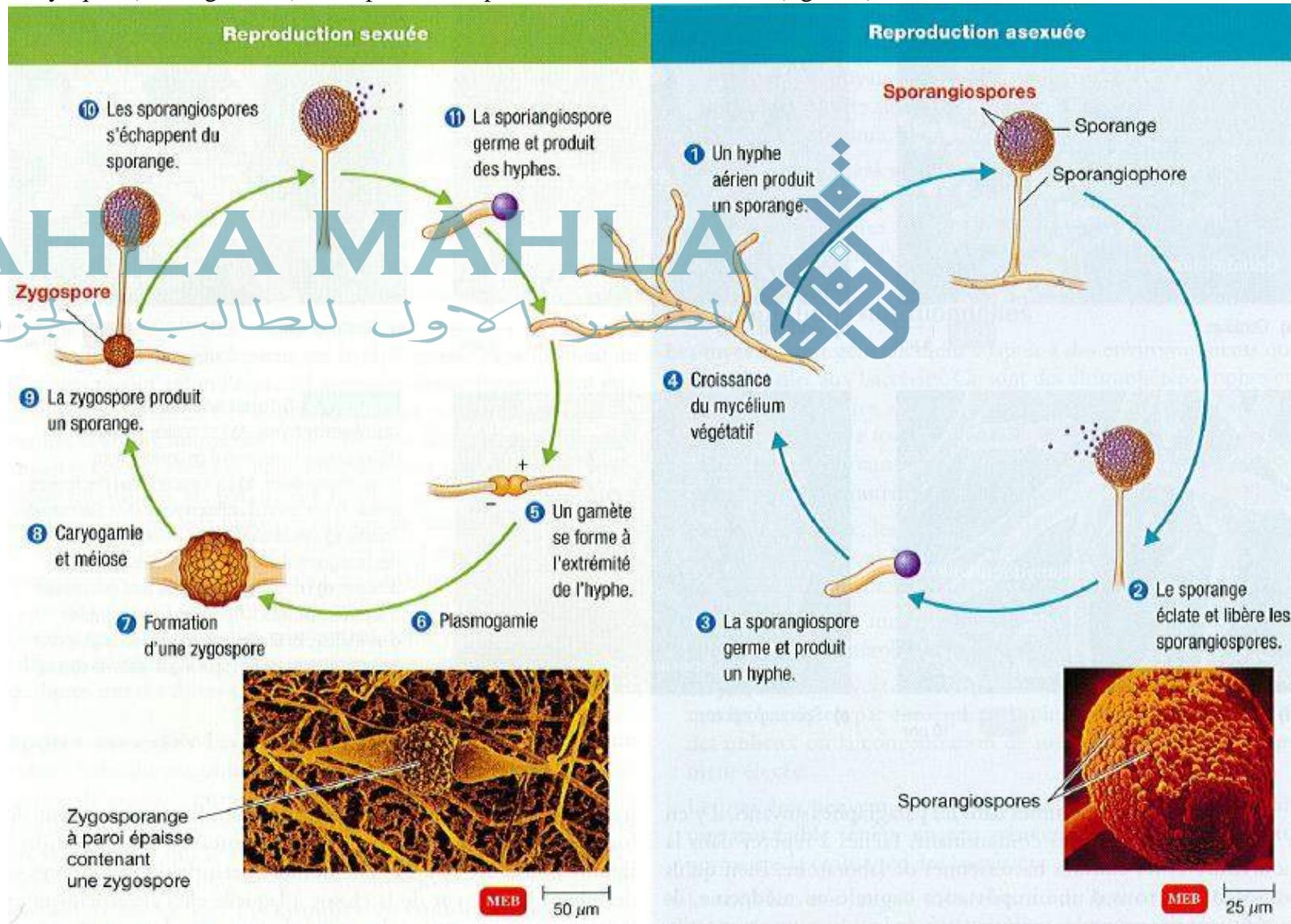


Figure 4. Cycle vital de *Rhizopus*, zygomycète.

2.4.2. L'embranchement des ascomycètes : les ascomycètes, ou mycètes à sacs, comprennent des moisissures à hyphes segmentés et certaines levures. La reproduction peut être sexuée ou asexuée (figure 7).

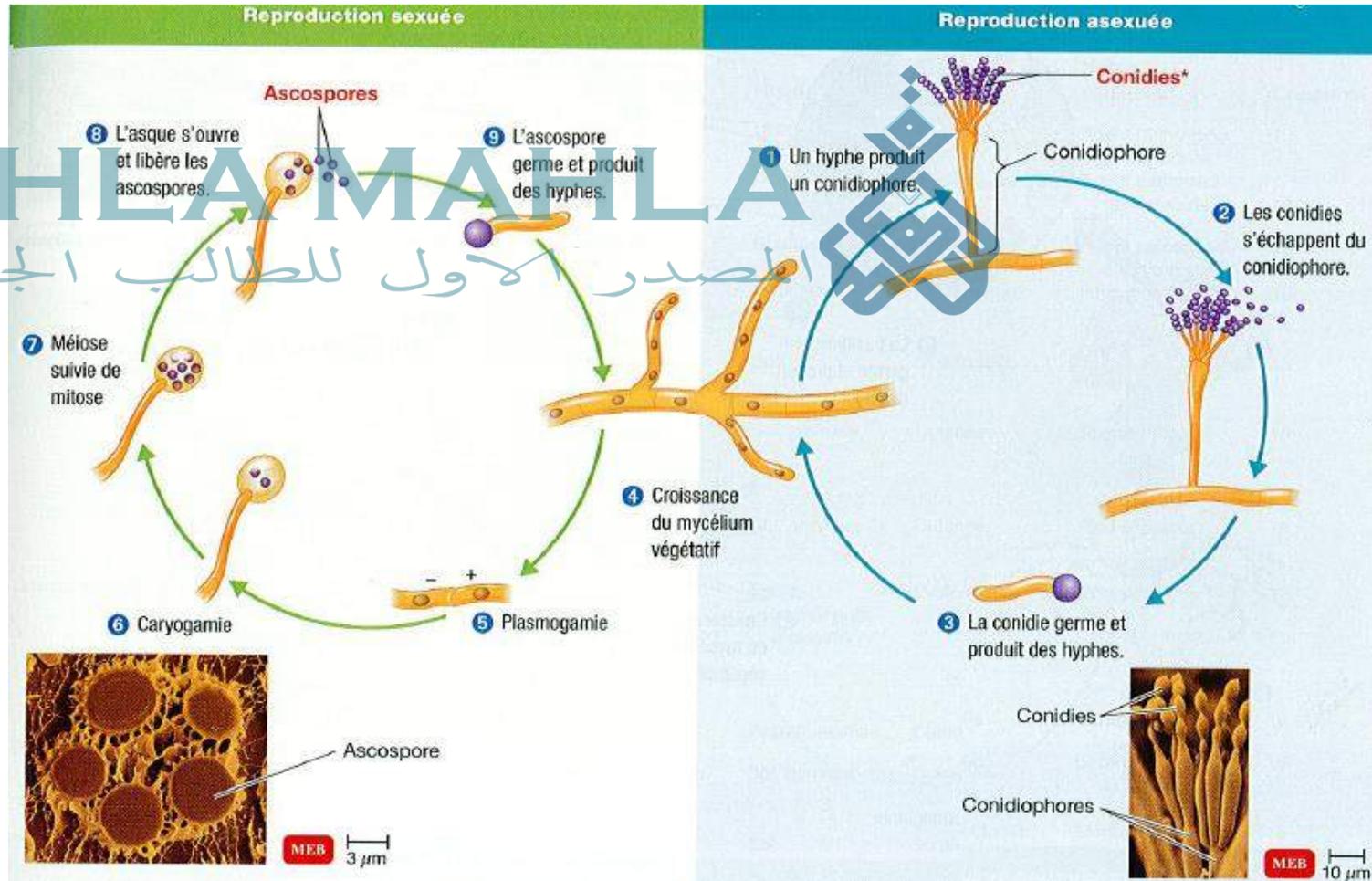


Figure 5. Cycle vital de *Talaromyces*, Ascomycète.

2.4.3. L'embranchement des Basidiomycètes : les Basidiomycètes, ou mycètes à massue, possèdent aussi des hyphes segmentés. Cet embranchement comprend les organismes qu'on appelle champignons à chapeau. Les basidiospores se forment à l'extérieur sur une baside. Il ya habituellement quatre basidiospores par baside (Figure 8).

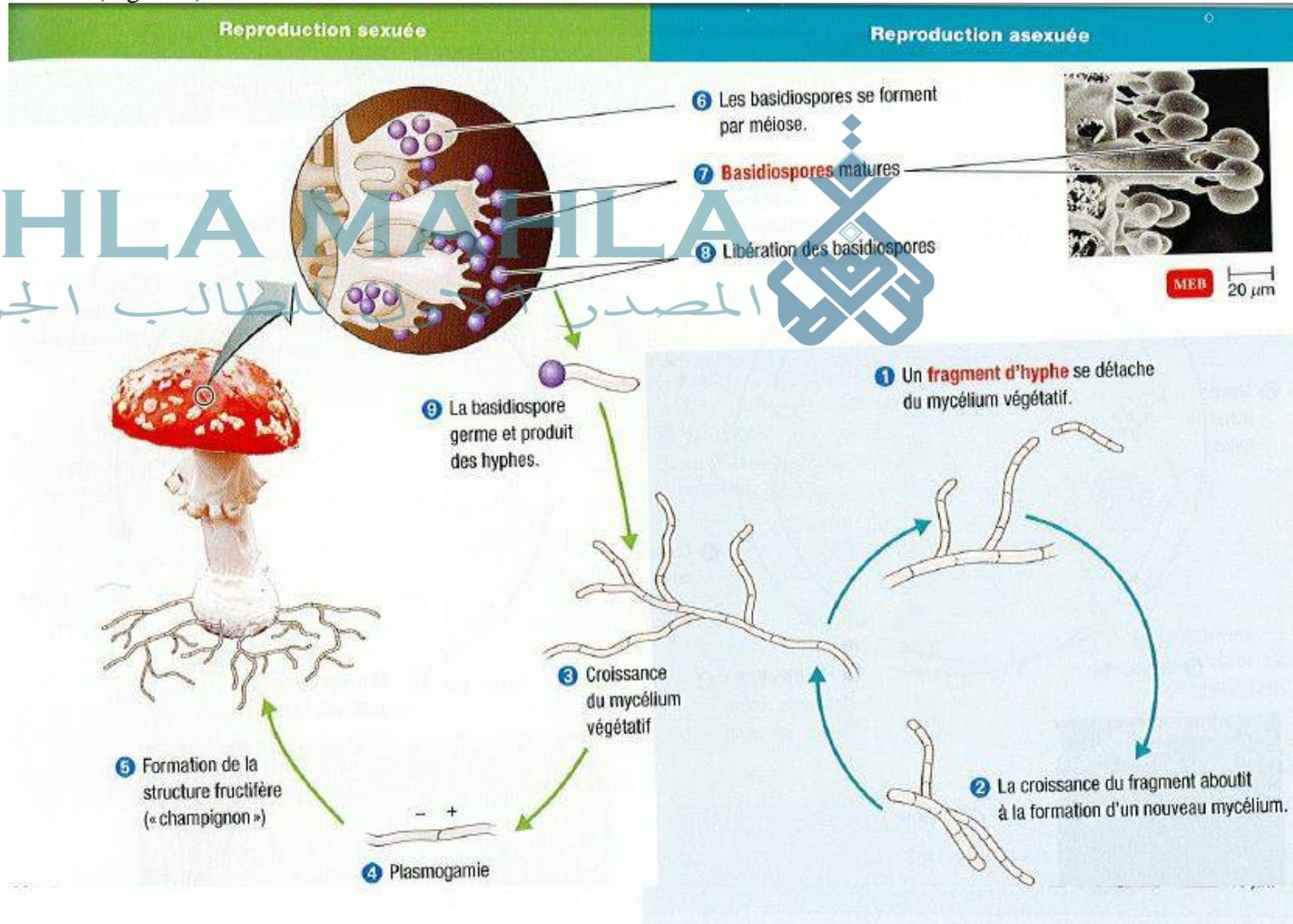


Figure 6. Cycle vital type d'un basidiomycète

2.4.4. L’embranchement des Deutéromycètes : Les Deutéromycètes ou mycètes imparfaits possèdent un mycélium segmenté. La reproduction sexuée est absente ou inconnue.

La plus part de ces deutéromycètes sont des Ascomycètes au stade asexué, quelques-uns sont des Basidiomycètes.

3. Les levures

3.1. Morphologie :

Les levures sont des mycètes unicellulaires, non filamenteuse, qui sont généralement sphériques ou ovales. La cellule (thalle unicellulaire) a une taille très variable selon les espèces. Elles sont observables à l’état frais. Les levures appartiennent aux trois embranchements : Les Ascomycètes, les Basidiomycètes et les deutéromycètes.

3.2 Reproduction

Les levures ont une reproduction sexuée ou asexuée.

* La reproduction asexuée est réalisée par le bourgeonnement. Lors du bourgeonnement il se forme un bourgeon à la surface de la cellule mère. Pendant que le bourgeon grossit, le noyau de la cellule mère se divise (mitose). Un des noyaux obtenus gagne le bourgeon. Une paroi cellulaire commence à se former entre la cellule mère et le bourgeon. Certains levures font des bourgeons qui ne se détachent pas, il se forme alors une courte chaîne de cellules appelée pseudohyphes.

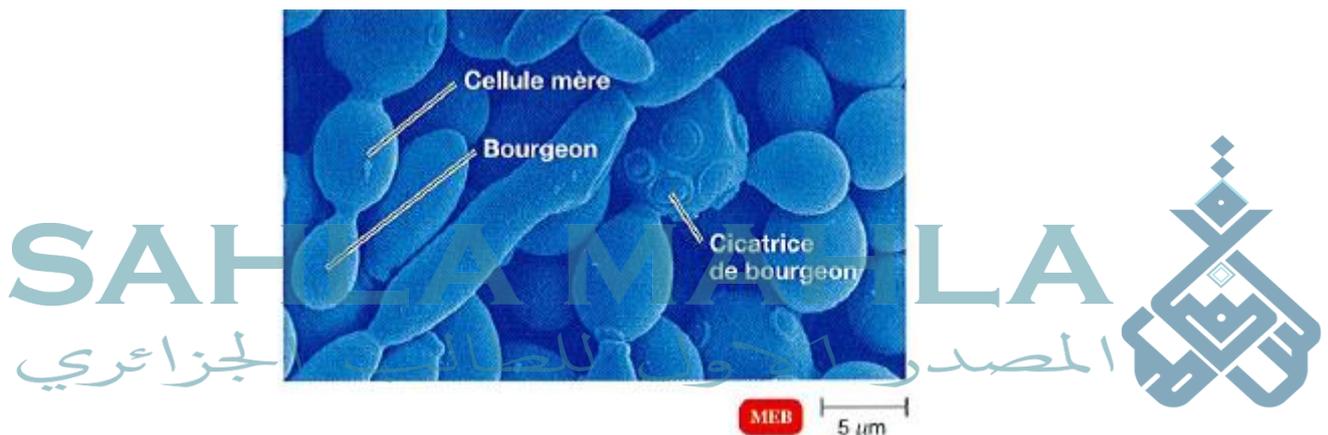


Figure 7. Levure bourgeonnante

3.3. Classification :

La classification des levures est basée sur le mode de reproduction :

Tableau 1. Classification des levures

	Reproduction sexuée	Reproduction asexuée
levures ascosporegène	Ascospore	*Généralement par bourgeonnement *Pparfois scissiparité ou division binaire chez <i>Schizosaccharomyces</i>
Levures ballistosporogènes	basidiospore	Bourgeonnement
Levures anascosporegènes	Absente	Bourgeonnement

II. Les virus

1. Historique

- La découverte des virus remonte à la fin du 19^{ème} siècle. En 1892, **IVANOWSKI**, réussit à transmettre à un plant de tabac sain, une maladie végétale dite mosaïque du tabac par l'intermédiaire d'un filtrat d'un jus provenant d'une plante malade. Cette filtration, éliminant toute bactérie suggéra à cet auteur le rôle d'une toxine filtrable comme responsable de la maladie.
- En 1898, un autre botaniste **BEIJERINCK**, ayant repris les expériences d'IWANOWSKI démontra que ce n'était pas une toxine qui passait à travers les filtres mais bien l'agent infectieux lui-même, responsable de la mosaïque du tabac (le caractère infectieux du filtrat permet de le distinguer d'une toxine).
- A la fin du 19^{ème} siècle les pathologistes étudient les maladies de l'homme et des animaux domestiques reconnaissent qu'un certain nombre de maladies infectieuses n'étaient pas dues à des bactéries ou à des protozoaires mais à des agents inconnus qui traversent les filtres utilisés pour les bactéries.
- En 1935, ils ont réussi à obtenir à l'état pur et cristallisé le virus de la mosaïque du tabac. Une année après on découvre la nature nucléoprotéique des cristaux obtenus. A partir de 1939, grâce au microscope électronique, on a pu préciser la taille des virus et montrer pour la 1^{ère} fois leur forme.
- Le rôle prédominant de l'acide nucléique dans le pouvoir infectieux fut démontré en 1952.
- En 1956, on a démontré que l'acide nucléique purifié extrait des virus de la mosaïque du tabac produit l'infection d'une plante saine.

2. Caractères généraux des virus

Un certain nombre de caractères sont communs à tous les virus :

- **Petite taille** : ce caractère explique :
 1. **Leur filtrabilité** : les virus ont la propriété de traverser les filtres bactériologiques usuels ;
 2. **Leur invisibilité** : les virus ont des dimensions inférieures à la limite de résolution du microscope optique, ce qui pendant longtemps a empêché la connaissance de leur forme et de leur structure ;
- **Parasitisme intracellulaire obligatoire** : dépourvus de tout équipement enzymatique, les virus ne peuvent croître sur les milieux bactériologiques usuels et ne peuvent se multiplier qu'à l'intérieur d'une cellule-hôte vivante ce qui provoque une atteinte profonde de la cellule qui se traduit par une modification importante de son comportement métabolique ou des lésions qui entraînent le plus souvent la mort de la cellule infectée ;

Les virus se reproduisent uniquement à l'intérieur d'une cellule vivante en détournant le métabolisme énergétique de la cellule au profit de la synthèse de leurs constituants viraux

- **Spécificité** : la spécificité des virus est en rapport avec leur constitution chimique et elle est sous l'étroite dépendance du génome viral qui est responsable à la fois du pouvoir infectieux et de l'élaboration des protéines de structure qui constituent les antigènes viraux.

3. Structure générale

Tous les virus sont constitués par une molécule d'acide nucléique enclose à l'intérieur d'une couche de protéines qui forme **la capsid**. L'ensemble capsid et acide nucléique constitue la **nucléocapsid**.

3.1. Le génome viral : le génome d'un virus contient soit de l'ADN, soit de l'ARN, mais jamais les deux à la fois. Le matériel génétique d'un virus peut être monocaténaire, ou bicaténaire. On trouve donc des virus à ADN monocaténaire, virus à ADN bicaténaire, virus à ARN monocaténaire et virus à ARN bicaténaire. Selon le type de virus, l'acide nucléique peut être linéaire ou circulaire. Chez certains (comme le virus de la grippe), l'acide nucléique est segmenté en plusieurs fragments. Le génome viral contient les gènes essentiels codant pour la synthèse des protéines enzymatiques qui entrent dans les différentes phases de son cycle de réplication, et pour le détournement du métabolisme de la cellule hôte ou profit du virus.

3.2. La capsid et l'enveloppe : l'acide nucléique est entouré d'une coque protéique appelé capsid. La structure de la capsid est déterminée par le génome viral. Chaque capsid est composée de sous-unités protéiques, les **capsomères**. Les protéines composant les capsomères sont d'un seul ou de plusieurs types. Les capsomères sont souvent visibles individuellement au microscope électronique. L'arrangement structural des capsomères détermine la morphologie de la capsid, cet arrangement est caractéristique du type de virus.

Chez certains virus la capsid est recouverte d'une enveloppe membraneuse généralement constitué d'un mélange de lipides, de protéines et de glucides.

Selon les virus, les enveloppes sont parfois couvertes de **spicules**, complexes de protéines et de glucides (glycoprotéines) formant des projections proéminentes à la surface.

4. La morphologie générale : La capsid est formée par l'assemblage de molécules de protéines. Cet assemblage se fait d'une façon précise et caractéristique selon deux types bien distincts :

Virus hélicoïdaux : les capsomères sont liés les uns aux autres et forment un ruban continu enroulé en spirale ce qui détermine la structure hélicoïdale est forme un cylindre creux qui entoure le génome viral.

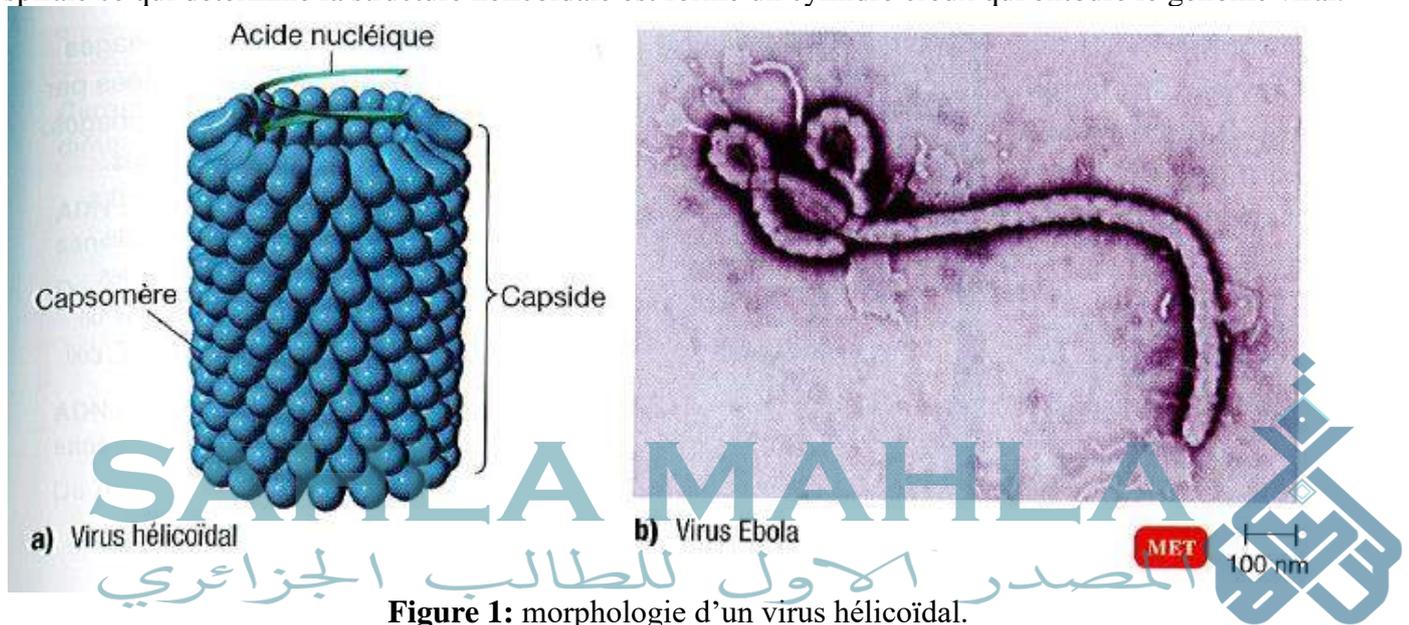


Figure 1: morphologie d'un virus hélicoïdal.

Les virus polyédriques : c'est des virus qui présentent plusieurs faces. La capsid de la plupart de ces virus a la forme d'un icosaèdre, soit un polyèdre régulier composé de 20 faces triangulaire et de 12 sommets. Les capsomères de chacune des faces forment un triangle équilatéral.

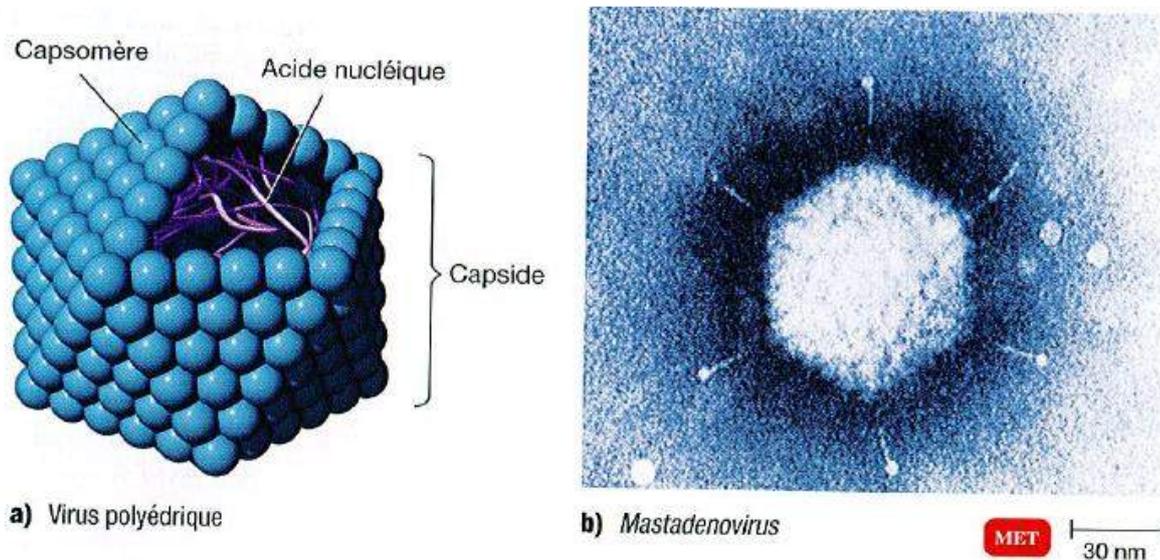


Figure 2 : morphologie d'un virus polyédrique sans enveloppe.

Virus enveloppés : les virus enveloppés sont plus ou moins sphérique. Quand un virus hélicoïdal ou polyédrique possède une enveloppe, il est appelé virus hélicoïdal enveloppé ou virus polyédrique enveloppé.

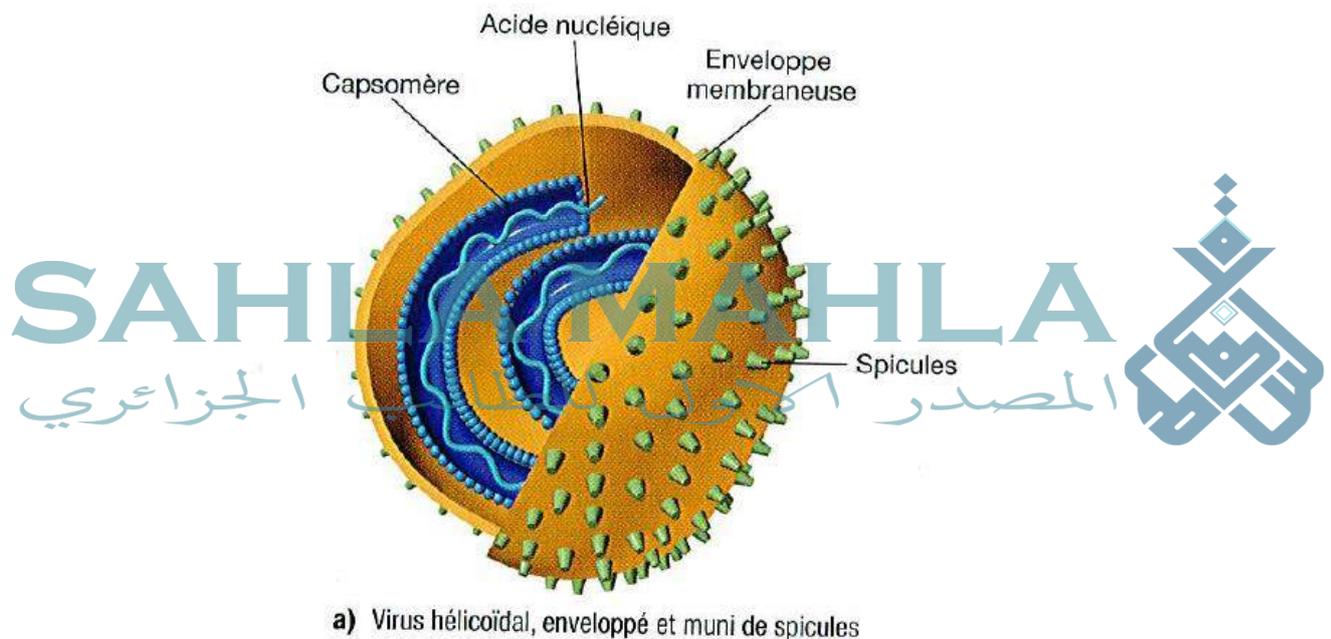


Figure 3: morphologie d'un virus hélicoïdal enveloppé

Les virus complexes : ce type de virus présente des structures complexes dont on compte les bactériophages. Certains d'entre eux possèdent des capsides sur lesquelles d'autres structures sont attachées tels que la gaine et fibres de la queue (figure).

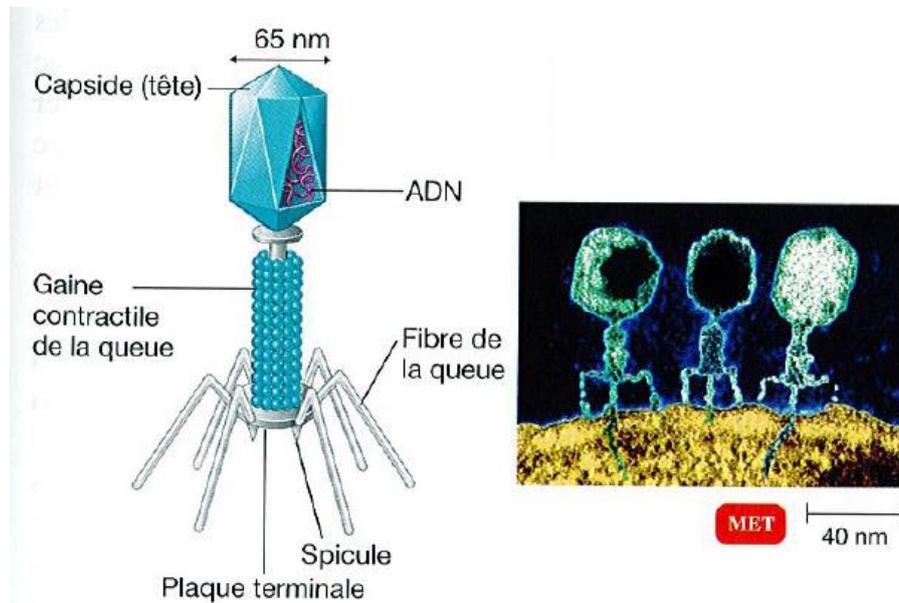


Figure 4: Morphologie d'un virus complexe (bactériophage T-pair)

5. Classification des virus

Le plus ancien système de classification des virus reposait sur la symptomatologie des maladies qu'ils causent, ce système est limité par le fait que le même virus peut causer plus d'une maladie selon le tissu qu'il touche. De plus, ce système regroupait arbitrairement des virus n'infectant pas les humains.

Les virologistes ont formé le Comité International sur la Taxonomie Virale (CITV) en 1996. Depuis lors, le CITV a regroupé les virus en familles sur la base :

Du type d'acide nucléique qu'ils contiennent

De leur mode de répllication

De leur morphologie.

Les noms des genres se terminent par le suffixe **virus**

Le nom de la famille par le suffixe **viridae**

Le nom d'ordre par le suffixe **ales**

Une espèce virale est définie comme un groupe de virus ayant le même bagage génétique et la même niche écologique. On n'utilise pas des épithètes spécifiques pour nommer les virus. Par conséquent, les espèces virales sont désignées par des noms communs descriptifs tels que le virus de l'immunodéficience humaine (VIH), avec -s'il y a lieu- un chiffre qui indique la sous espèces (VIH1).

6. Multiplication des virus

La multiplication des virus suit généralement les mêmes étapes quel que soit la cellule hôte (procaryote ou eucaryote) qui sont l'attachement, la pénétration, la biosynthèse, la maturation et la libération.

6.1. Model de multiplication de bactériophage T-pair

Les phages se multiplient par deux mécanismes : le cycle lytique et le cycle lysogénique.

A. Le cycle lytique : la multiplication de phage comportent les cinq étapes su-citées

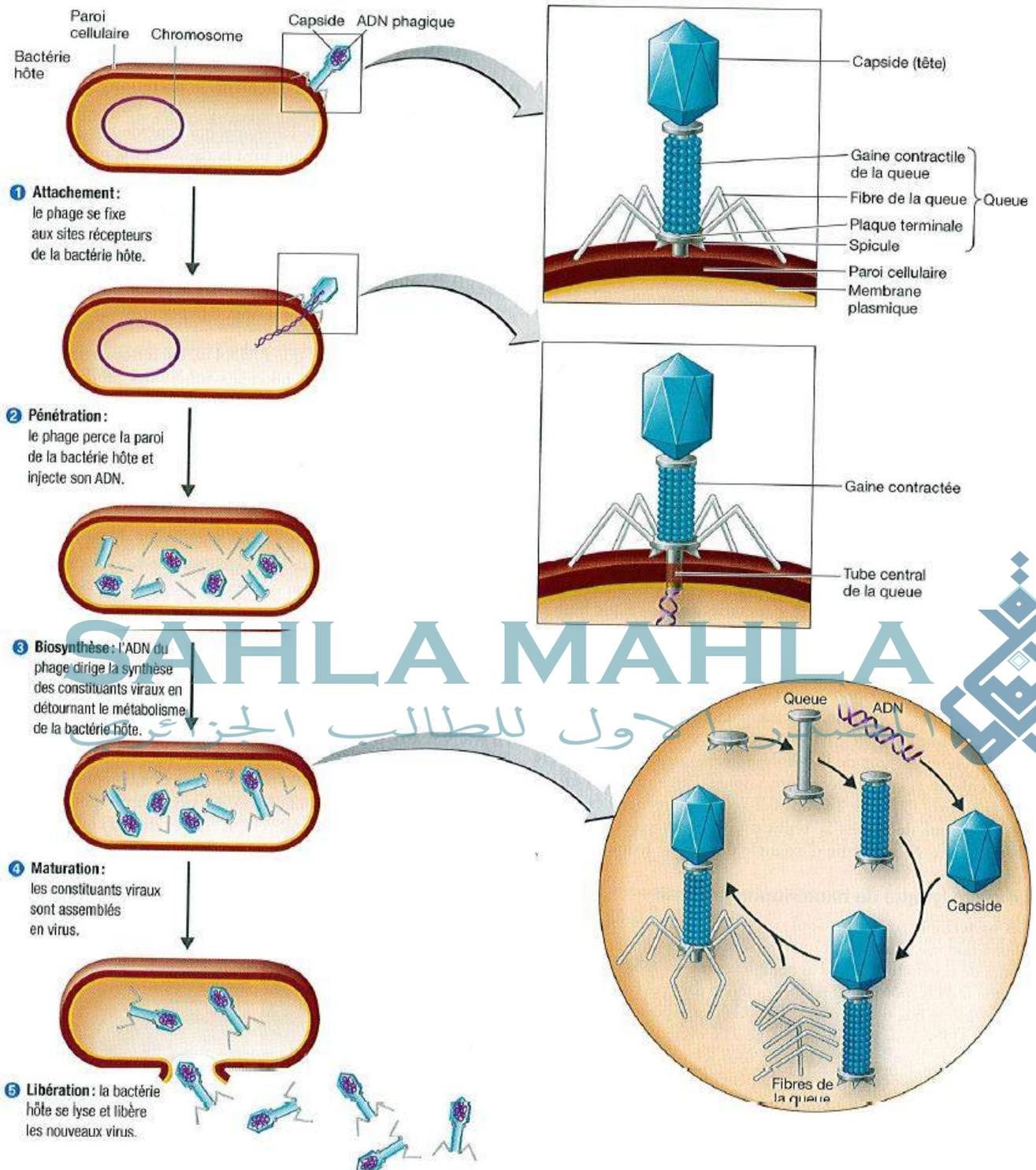
A.1. L'attachement ou adsorption : le bactériophage se lie spécifiquement (par complémentarité) par les fibres de sa queue aux récepteurs situés sur la paroi bactérienne

A.2. La pénétration : le bactériophage injecte son acide nucléique dans la bactérie. Après l'attachement, la queue du phage libère une lysozyme qui dégrade la paroi bactérienne au site de fixation, et la queue se contracte, et le tube central creux traverse la paroi et perce la membrane plasmique. L'ADN logé dans la tête est injecté dans le cytoplasme de la cellule hôte. La capsid vide reste à l'extérieur de la bactérie.

A.3. La biosynthèse : durant cette phase le phage détourne tout le métabolisme de la bactérie à son profit. La synthèse des composants du phage (ADN et protéines) par transcription des différentes régions de l'ADN viral en ARNm a lieu durant cette étape.

A4. La maturation : l'ADN du bactériophage et la capside (tête, queue et fibres) sont assemblés pour donner des virus complets.

A5. La libération : Les virus obtenus sont libérés après lyse de la cellule hôte (grâce à la lysosyme codée par un gène du phage) qui détériore l'intérieur de la paroi bactérienne qui éclate, et les bactériophages nouvellement assemblés sont libérés de la bactérie.

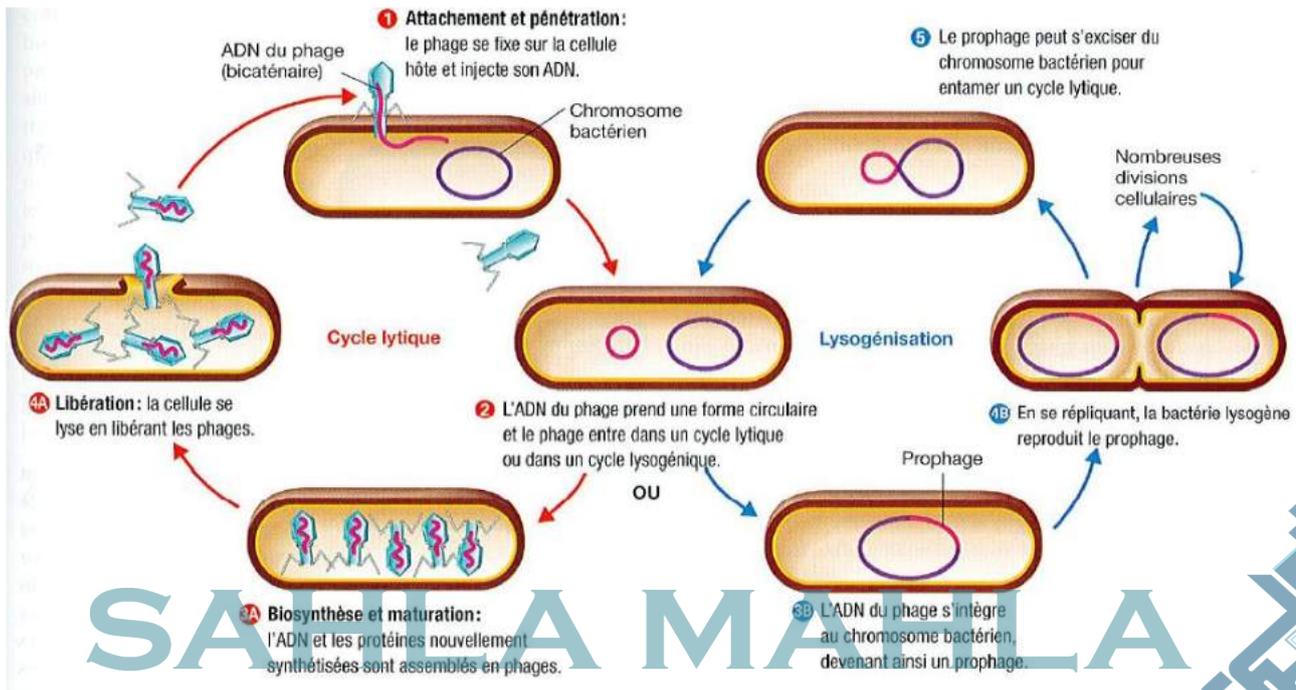


B. Le cycle lysogénique

La réplication de certains virus n'entraîne pas la lyse et la mort de la cellule hôte. Ces virus sont capables d'incorporer leur ADN dans le chromosome de la cellule hôte au cours de d'un processus de lysogénéisation. Certains de ces virus lysogéniques peuvent entamer un cycle lytique (figure).

La lysogénéisation se traduit par trois conséquences importantes :

- * les cellules lysogènes sont immunisées contre toute réinfection par le même phage.
- * la cellule hôte peut présenter de nouvelles caractéristiques.
- * la lysogénie rend possible la transduction localisée (un transfert de matériel génétique, ADN bactérien, d'une bactérie donneuse à une bactérie receveuse, par l'intermédiaire d'un vecteur viral, un bactériophage).



6.1. La multiplication des virus animaux :

6.1.1. L'attachement : le virus se lie à la membrane cytoplasmique de la cellule hôte par les différentes structures présentes chez le virus (ex : les spicules des virus enveloppés).

6.1.2. La pénétration : après l'attachement, la pénétration a lieu fusion ou pinocytose selon que le virus est enveloppé ou non.

A. Les virus non enveloppés pénètrent dans la cellule hôte par pinocytose et cela par l'invagination de la membrane cytoplasmique et la formation d'une vésicule (l'inverse de bourgeonnement)

B. Les virus enveloppés pénètrent dans la cellule par fusion de l'enveloppe avec la membrane cytoplasmique de la cellule puis le virus est libéré dans la cellule hôte.

6.1.3. La décapsidation : c'est la séparation de la capsid de l'acide nucléique par l'action des enzymes codées par le génome virale ou la chromatine de la cellule hôte.

6.2.4. La biosynthèse

A. La biosynthèse des virus à ADN : Généralement, les virus à ADN répliquent leur ADN dans le noyau de cellule hôte en se servant d'enzymes virales, alors qu'ils synthétisent leur capsid et d'autres protéines virales dans le cytoplasme en utilisant les enzymes de la cellule hôte. Une fois produites, les protéines virales migrent vers le noyau et sont jointes à l'ADN nouvellement synthétisé pour former de nouveaux virus. Ces derniers sont transportés le long du réticulum endoplasmique vers la membrane plasmique pour être relâchés à l'extérieur de la cellule hôte.

B. La synthèse des virus à ARN : Cette étape comporte la transcription de l'ARN viral et

La traduction de l'ARNm et la synthèse des protéines virales. Ces étapes sont réalisées dans le cytoplasme de la cellule hôte.

6.2.5. La maturation et la libération : La maturation des virus commence par l'assemblage spontané des protéines de la capsid.

Dans le cas des virus enveloppés, leur libération est réalisée par le bourgeonnement et dans ce cas la cellule hôte reste vivante.

Par contre, dans le cas des virus non enveloppés leur libération résulte de la lyse de la membrane cytoplasmique de la cellule hôte ce qui entraîne généralement la mort de cette cellule.

