

Microbiologie et mycologie



Par Jassiel Nyengani ZULU



African Virtual university
Université Virtuelle Africaine
Universidade Virtual Africana



NOTE

Ce document est publié sous une licence *Creative Commons*.
http://en.wikipedia.org/wiki/Creative_Commons

Attribution

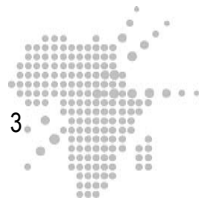
<http://creativecommons.org/licenses/by/2.5/>

License (abréviation « cc-by »), Version 2.5.



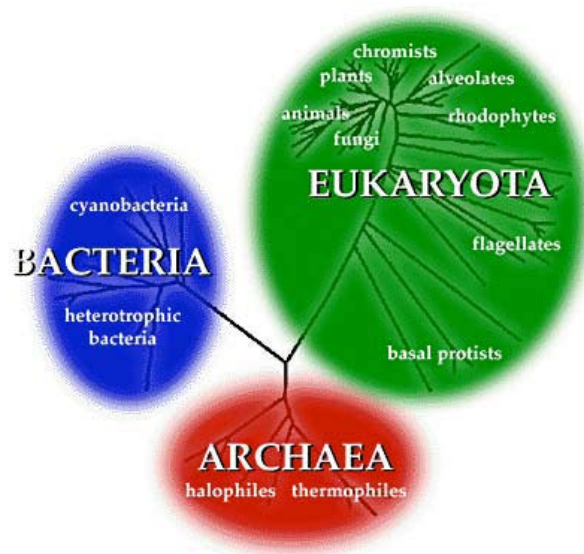
TABLE DES MATIÈRES

I.	Microbiologie et mycologie _____	3
II.	Prérequis/connaissances préalables nécessaires _____	4
III.	Volume horaire/temps _____	4
IV.	Matériels didactiques _____	4
V.	Justification/importance du module _____	4
VI.	Contenu _____	5
	6.1 Vue d'ensemble _____	5
	6.2 Grandes lignes _____	6
	6.3 Représentation graphique _____	8
VII.	Objectif général _____	9
VIII.	Objectifs spécifiques aux activités d'apprentissage _____	10
IX.	Activités d'enseignement et d'apprentissage _____	11
X.	Activités d'apprentissage _____	17
XI.	Glossaire des concepts-clés _____	61
XII.	Lectures obligatoires _____	63
XIII.	Ressources non obligatoires _____	66
XIV.	Liens utiles _____	67
XV.	Synthèse du module _____	69
XVI.	Évaluation sommative _____	70
XVII.	Références bibliographiques _____	72
XVIII.	Auteur principal du module _____	73



I. Microbiologie et mycologie

Par prof. Nyengani zulu, *University of Zambia* (Université de Zambie), département de sciences biologiques à Lusaka et Dr. Modest Diamond Varisanga, *Open University of Tanzania* (Université ouverte de Tanzanie), Faculté de Sciences et des Etudes technologiques et environnementales



Les trois domaines de microbe

BACTÉRIE	EUCARYOTE	ARCHEOBACTÉRIE
Bactérie hétérotrophe	Flagellés	Halophiles
Cyanobactérie	Protistes basaux	Thermophiles
	Animaux	
	Plantes	
	Champignons	
	Chromistes	
	Alvéolés	
	Algues rouges	

Source: <http://www.ucmp.berkeley.edu/alllife/threedomains.html>
(page consultée le 30 mars 2007)



II. Prérequis/connaissances préalables nécessaires

Pour suivre ce module, on doit avoir les qualifications nécessaires relatives aux études secondaires ou l'équivalent pour l'admission en sciences biologiques à l'Université. Des dérogations pourraient s'appliquer si des examens d'admission sont prévus ou pour des enseignants en biologie qui sont en fonction.

III. Volume horaire/temps

Cent vingt heures seront nécessaires pour suivre complètement ce module. Quatre vingt heures seront consacrées à l'étude des bactéries, des virus et des protozoaires. Les quarante heures restant seront consacrées à la mycologie.

IV. Matériel didactique

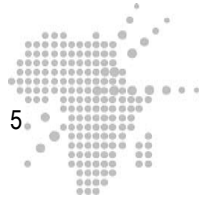
Un accès aux outils suivants est nécessaire pour cette étude :

- une copie papier et du matériel électronique, les CD, CD-ROMS et vidéos ainsi que d'autres outils d'apprentissage;
- des livres de cours pertinents;
- de l'équipement de laboratoire comme un microscope, un autoclave, un four, un incubateur, des boîtes de pétri, du matériel pour les préparations des milieux de culture des champignons et des bactéries, des produits colorants, des manuels d'identification ainsi que d'autres équipements de laboratoire utilisés en microbiologie;

Une disponibilité pour les excursions scolaires est aussi nécessaire

V. Justification/importance du module

Ce module procure à l'étudiant des connaissances de base sur les microorganismes: les bactéries, les virus, les protozoaires et les champignons. Leurs caractéristiques biologiques et leur importance économique au sein de l'environnement sont étudiées en détail. Les aspects théoriques du module seront élaborés avec des expériences pertinentes de laboratoire afin d'en illustrer les concepts et les principes. Le savoir acquis améliorera les compétences d'enseignement de la biologie.



VI. Contenu

6.1 Vue d'ensemble

Ce module a pour objet l'étude d'organismes nommés microorganismes. On ne peut pas les voir à l'œil nu et on les appelle communément microbes. Ce sont des virus, des protozoaires et des champignons. Bien que les virus ne soient pas vraiment des organismes, ils seront étudiés dans cette catégorie pour des raisons pratiques. La mycologie (études des champignons) portera aussi sur certains groupes comme les champignons qu'on peut voir pousser saisonnièrement. L'étude des microbes s'appelle microbiologie. Le module commence par l'histoire de la microbiologie, la découverte des microbes et le développement des techniques de culture stériles. Il explore la diversité des microbes, leurs grandes caractéristiques biologiques et leur importance économique. Les expériences de laboratoires devraient familiariser les étudiants avec les techniques microbiologiques comme la préparation des milieux de culture, l'isolement, l'identification, l'entretien des cultures, les mesures de croissance, les techniques de coloration et la conservation.



6.2 Grandes lignes

Tableau 1: Contenu du module et liste des lectures

Section	Sous-section	sujet	Heures	Travaux Pratiques
6.1		Histoire de la microbiologie	3	Étude personnelle
6.2		Diversité des Microbes	3	Comparaison des micrographies électroniques et de dessin de différents groupes représentatifs
6.3		Bactéries		
	6.3.1	Structure, caractéristiques et classification	4	Étude du dessin du Escherichia coli et examen de la classification des cladogrammes
	6.3.2	Nutrition	4	Préparation de vrais milieux de culture des bactéries
	6.3.3	Croissance et reproduction	4	Études des formes de croissance de différents types de bactéries
	6.3.4	Génétique	6	Étude personnelle et pratique au laboratoire
	6.3.5	Importance économique, isolement, identification et techniques de culture	6	Effets des bactéries sur la croissance des plantes et sur le lait
6.4		Virus		
	6.4.1	Structure et caractéristiques	3	Étude de dessins représentatifs du virus lambda
	6.4.2	Classification	4	Comparaison de dessins de différentes structures de virus
	6.4.3	Croissance et reproduction	6	Visite d'un laboratoire de virologie
	6.4.4	Importance économique	6	Effets sur les humains (Syndrome d'immunodéficience)
	6.4.5.	Isolement, culture et techniques d'identification	4	Démonstrations au Laboratoire de l'université
6.5		Protozoaires		

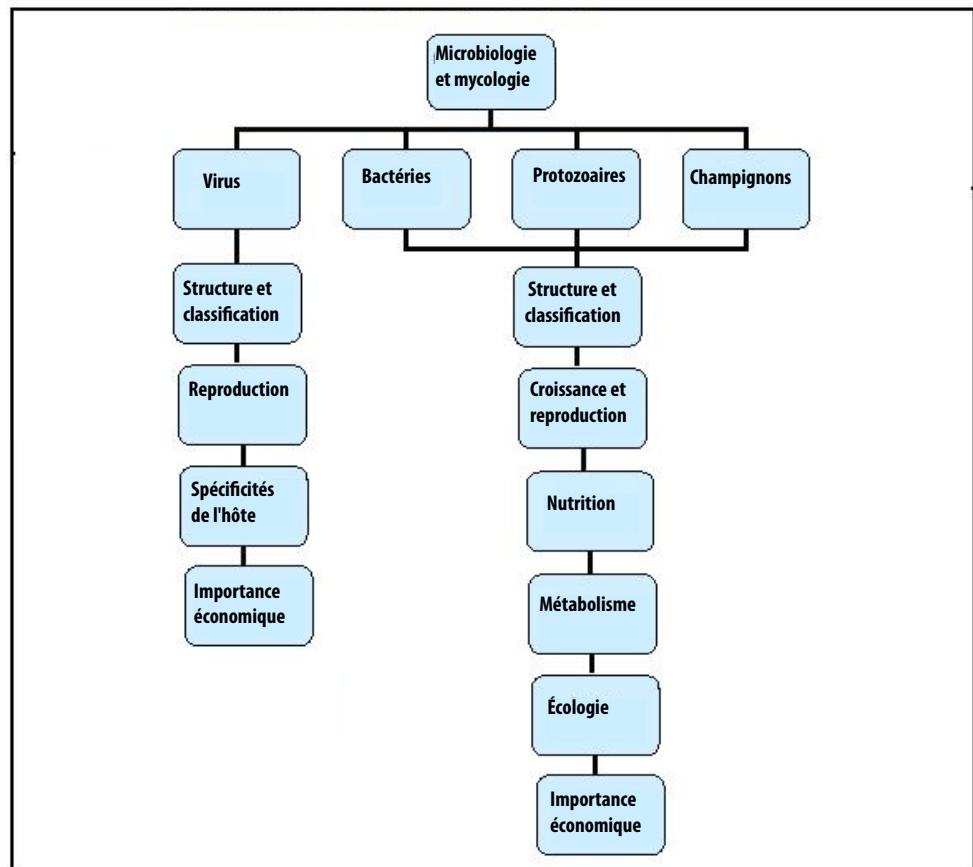


	6.5.1	Structure et caractéristiques	6	Photos et vidéos comparatives
	6.5.2.	Classification	3	Examen de classification des cladogrammes
	6.5.3	Nutrition	4	Exemples de parasites de la malaria
	6.5.4	Croissance et reproduction	6	Le cycle de vie des parasites de la malaria
	6.5.5.	Isolement, culture et techniques d'identification	4.	Visites d'institutions de recherche pour des démonstrations d'identification
	6.5.6	Importance	4	Exemple d'un parasite de la malaria
	Sous-total des heures		80	
6.6		Champignons		
	6.6.1.	Structure et caractéristiques	6	Visite à un laboratoire d'Université pour observer des microplaquettes préparées
	6.6.2	Classification	6	Étude de dessins et d'images de différents types de champignons
	6.6.3	Identification	4	Visites d'institutions de recherche pour des démonstrations d'identification
	6.6.4	Nutrition	6	Étude des effets des déficiences nutritionnelles sur la croissance fongique
	6.6.5	Croissance	5	Visionnement d'une vidéo sur la croissance apicale d'un champignon type
	6.6.6	Reproduction	5	Images et dessins sur les structures de reproduction
	6.67.	Écologie	4	Visite d'une usine de brassage
	6.6.8	Isolation, culture et techniques d'identification	4	Vidéo
	Sous-total des heures		40	



6.3 Représentation graphique

Graphique de sujets traités dans le module





VII. Objectifs généraux

Les objectifs généraux poursuivis par ce module sont :

- Connaître les caractéristiques biologiques des microbes du point de vue de leur structure et classification, les formes de croissance et de reproduction y compris leurs besoins nutritionnels;
- Comprendre les grandes lignes de l'importance économique des microbes;
- Maîtriser les différentes techniques d'isolement, d'identification et de culture des microbes;
- Appliquer les connaissances acquises grâce à ce cours à l'enseignement des sciences biologiques aux élèves du secondaire.

VIII. Objectifs spécifiques des activités d'apprentissage

Unité 1: Les Bactéries

À la fin de cette unité, l'apprenant devrait être en mesure de :

1. décrire comment les microbes ont été découverts;
2. commenter le développement de la technique de culture;
3. classer les bactéries selon leurs caractéristiques;
4. expliquer les exigences nutritionnelles des bactéries;
5. commentez les activités métaboliques des bactéries;
6. décrire les conditions nécessaires pour la croissance optimale des bactéries;
7. expliquer la génétique des bactéries;
8. expliquer l'importance économique des bactéries;
9. démontrer les techniques utilisées pour isoler et colorer les bactéries.

Unité 2: Les Virus

À la fin de cette unité, l'apprenant devrait être en mesure de :

1. décrire la structure de base des virus;
2. comparer la structure des virus à celle des bactéries;
3. énoncer les caractéristiques qui servent à classer les virus;
4. énumérer les groupes taxonomiques des virus;
5. expliquer le processus de reproduction virale;
6. effectuer les techniques biologiques comme la préparation de la ligne de cellules primaires pour la culture virale, la méthode des plages de lyse, l'analyse quantique, la méthode de comptage de virions et l'hémagglutination.
7. commenter l'importance économique des virus.



Unité 3: Les Protozoaires

À la fin de cette unité, l'apprenant devrait être en mesure de :

1. classer les protozoaires selon leurs caractéristiques taxonomiques;
2. commentez les exigences nutritionnelles des protozoaires;
3. commenter la physiologie et le métabolisme des protozoaires;
4. appliquer la technique de culture qui sert à faire croître les protozoaires;
5. expliquer l'impact des protozoaires pathogènes sur les humains.

Unité 4: La mycologie

À la fin de cette unité, l'apprenant devrait être en mesure de :

1. classer les champignons selon leurs caractéristiques;
2. décrire la structure d'un vrai hyphes septés d'un champignon;
3. commenter du modèle de croissance d'un champignon cellulaire et mycélien;
4. expliquer les grands types de nutrition chez les champignons;
5. illustrer les grands types de systèmes de reproduction chez les champignons selon leurs cycles de vie;
6. expliquer les différents modes de nutrition chez les champignons;
7. expliquer le métabolisme du carbone chez les champignons;
8. Décrire les techniques de conservation des cultures;
9. comparer les champignons aux bactéries;
10. expliquer l'importance économique des champignons.



IX. Activités d'enseignement et d'apprentissage

9.1 Pré-évaluation

Microbiologie et mycologie

Fondement: Cette pré-évaluation est destinée à déterminer la capacité de l'apprenant à comprendre les concepts contenus dans ce module et à indiquer si l'apprenant a besoin de plus de lecture avant de suivre l'enseignement contenu dans ce module.

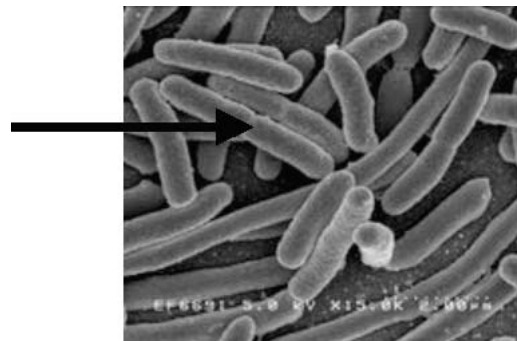
Répondez aux questions suivantes et comparez vos réponses à celles données à la fin de cet exercice.

Questions

Questions à choix multiples

Cochez la ou les réponses justes

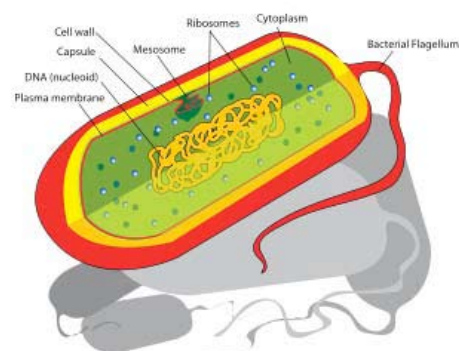
1. Les caractéristiques communes aux membres du monde microbien sont leur
 - a) abondance
 - b) petite taille
 - c) importance économique
 - d) leur capacité de causer des maladies.
2. La micrographie électronique suivante illustre la morphologie générale d'une collection de cellules de bactéries. Lequel de ces groupes suivants décrit le mieux l'organisme pointé avec la flèche?
 - a) Streptococcus
 - b) diplobacille
 - c) streptobacille
 - d) coque



<http://en.wikipedia.org/wiki/Bacteria>
Consulté le 28 Mars 2007.



3. Un antigène est une substance qui
 - a) est produite par la bactérie pour écarter les autres microbes
 - b) est une forme des réactions complémentaires pour la survie des bactéries
 - c) facilite la production d'anticorps spécifiques
 - d) est utilisée par la bactérie pour la digestion d'autres organismes
4. La personne la plus connue pour son travail sur les microorganismes est :
 - a) Antony van Leeuwenhoek
 - b) Louis Pasteur
 - c) John Tyndall
 - d) Charles Darwin
5. La technique de coloration en bactériologie est souvent utilisée pour :
 - a) différencier les différents groupes ou classes de bactéries
 - b) déterminer la taille, la forme ou la position des bactéries
 - c) démontrer les rickettsies qui sont dans les cellules hôtes
 - d) identifier les maladies que causent des bactéries
6. La croissance des bactéries est mesurée par :
 - a) l'augmentation du nombre de cellules dans une population
 - b) la quantité de chaleur produite par l'organisme en culture
 - c) le type de toxine produite par le microbe
 - d) la taille de cellules dans une population
7. Quelle caractéristique anatomique sur la micrographie électronique pourrait être utilisée pour classer l'organisme comme procaryote?



<http://en.wikipedia.org/wiki/Bacteria>
 Consulté le 28 Mars 2007.

La présence de

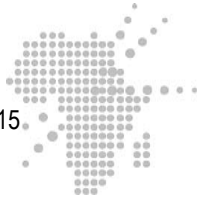
- a. matière nucléaire non contenue dans une membrane
- b. un flagelle bien défini
- c. une paroi de cellule
- d. une membrane plasmique



8. Le «titre» ou «effet» est la dilution à laquelle les hôtes inoculés sont affectés ou tués
 - a. 100%
 - b. 80%
 - c. 50%
 - d. 10%
9. Les nucléoïdes sont associés
 - a. aux virus
 - b. à l'information génétique
 - c. aux procaryotes
 - d. aux champignons seulement
10. Les bactéries qui obtiennent de l'énergie à partir de composés minéraux contenant du fer, de l'azote et du soufre et de matières organiques en décomposition sont
 - a. chimiolithotrophes
 - b. hétérotrophes
 - c. autotrophes
 - d. parasites
11. La présence de virus dans le sang est appelée
 - a. tropisme de cellules
 - b. une condition monocytique
 - c. virémie
 - d. contamination virale
12. Chaque particule de virus est appelée... lorsqu'elle hors de ses cellules hôtes
 - a. virion
 - b. capsid
 - c. bactériophage
 - d. nucléoïde
13. La forme d'un virus est déterminée par
 - a. la capsid nucléaire qui forme sa tête
 - b. le type d'acide nucléique qu'il contient
 - c. La forme de protéine capsid
 - d. Le nombre d'acides nucléiques dans les cellules



14. Les protistes ont une importance médicale parce que
 - a. plusieurs causent des maladies aux humains
 - b. certains sont utilisés pour la fabrication d'antibiotiques
 - c. les protistes entrent en relation de symbiose avec beaucoup d'organismes
 - d. certains sont utilisés pour la fabrication de savon
15. Un exemple de phylum Rhizopode est
 - a. Paramécie
 - b. Amibe Proteus
 - c. Plasmodium vivax
 - d. Colibacille
16. Lequel des combinaisons de mots suivantes n'est pas correcte?
 - a. Plasmodium vivax – malaria
 - b. Amibe– diarrhée sévère
 - c. SIDA- parasite lamblia
 - d. Colibacille – tuberculose
17. Le phylum Sarcomastigophore
 - a. comprend des parasites intracellulaires
 - b. inclue les parasites flagellés et les amiboïdes
 - c. est composé de parasites ciliés
 - d. comporte des amibes uniquement
18. Laquelle de ces maladies est causée par des zooflagellés?
 - a. la lambliaose, la leishmaniose, la maladie du sommeil
 - b. la trichomonose, la malaria, la lambliaose
 - c. la diarrhée flagellée, l'embadomonas, la leishmaniose,
 - d. la diarrhée flagellée, la lambliaose, la leishmaniose
19. Les champignons sont classés selon
 - a. le type de conidie produit
 - b. leur ressemblance mycélienne
 - c. leurs similarités morphologiques
 - d. La similarité des modèles de croissance
20. Un groupe de champignons est appelé «champignon imparfait ». Que signifie le terme?
 - a. champignons qui ne produisent pas de zygosporés dans leur cycle de vie
 - b. champignons dont la reproduction sexuée n'a pas été observée
 - c. champignons qui causent des maladies
 - d. champignons qui montrent une reproduction aussi bien sexuée qu'asexuée



21. Observez très attentivement les organismes qui poussent sur ce tronc d'arbre et répondez aux questions suivantes :



<http://en.wikipedia.org/wiki/ungus>
Consulté le 28/03/2007

L'organisme sur l'image est

- a. un ascomycète
- b. un zygomycète
- c. un basidiomycète
- d. un oomycète

22. La photo suivante montre du fromage persillé infecté par un champignon appelé *penicillium roqueforti*.



<http://en.wikipedia.org/wiki/Ascomycota>
Consulté le 28/03/2007.

Quel message lance la photo ci-dessus?

- a. Les champignons jouent un rôle important dans la transformation d'aliments
- b. Les aliments infectés par les champignons sont abîmés.
- c. Tous les aliments infectés par les champignons doivent être jetés
- d. Le fromage est facilement infecté par les champignons



Clé de correction de la pré-évaluation

1. b. petite taille
2. b. *Diplobacille*
3. c. facilite la production d'anticorps spécifiques
4. a. Antony van Leeuwenhoek
5. b. détermine la taille, la forme et la position des bactéries
6. a. une augmentation du nombre de cellules dans une population
7. a. une matière nucléaire non contenue dans une membrane
8. c. est la dilution à laquelle 50% d'hôtes inoculés sont affectés ou tués
9. b. à l'information génétique
10. c. autotrophes
11. c. virémie
12. a. virion
13. c. la forme de protéine capsidale
14. a. plusieurs causent des maladies aux humains
15. b. amibes proteus
16. c. SIDA-parasite lamblia
17. b. inclue aussi bien les parasites flagellés et amiboïdes
18. a. la lambliaose, la leishmaniose, la maladie du sommeil
19. a. les aspects de leur cycle de leur cycle de vie sexuelle
20. b. champignon dont la reproduction sexuée n'a pas été observée
21. c. un bacidiomycète
22. a. les champignons jouent un rôle important dans la transformation et la production d'aliments comme le fromage et le yogourt

Pré-évaluation sur la microbiologie et la mycologie

Cette pré-évaluation s'inspire du contenu de l'ouvrage *Advanced High Biology*. Si vous obtenez 60% ou moins, il est recommandé de faire plus de lectures pour vous familiariser un peu plus avec le contenu de ce module. Les pages des sites web qui suivent vous aideront à mieux comprendre quelques concepts du module.



X. Activités d'apprentissage

Titre de l'activité: **Éléments de bactériologie**

Résumé de l'activité d'apprentissage

Dans cette activité, vous apprendrez l'histoire de la microbiologie, la découverte des microbes et des microscopes ainsi que l'évolution de la technique de culture stérile. Les microorganismes sont différents dans leur distribution, apparence, physiologie, métabolisme et génétique. La bactériologie est une branche de la microbiologie qui étudie les microbes qui peuvent être classés selon leur structure, leur métabolisme cellulaire ou la composition chimique de leurs cellules. Cependant, cette classification comporte des limites dans la pratique: la classification est-elle faite entre microbes de différentes espèces ou entre souches de même espèce? Une forme plus fiable de classification de bactéries utilise des systèmes moléculaires basés sur des techniques génétiques. Ainsi les microbes procaryotes sont taxonomiquement divisés en deux groupes: **les bactéries** et **les archéobactéries** qui sont indépendants mais viennent d'un ancêtre commun. Le taux de reproduction élevé, la capacité de s'adapter aux conditions environnementales extrêmes et la formation de structures comme les endospores qui leur permettent de s'adapter au climat sont des caractéristiques qui font des bactéries un groupe puissant d'organismes. Les bactéries se servent de flagelles pour se déplacer dans l'environnement. Ils ont besoin d'un film d'eau pour se déplacer. Certaines bactéries ont la capacité d'utiliser l'acide butanoïque ou l'acide propionique dans un environnement qui émet de l'hydrogène. Les archéobactéries assimilent ainsi ce dernier pour leurs réactions métaboliques sinon l'hydrogène s'accumulerait dans l'environnement et les bactéries ne survivraient pas. L'intestin humain contient comme symbiotes des milliers d'espèces de bactéries. La flore intestinale augmente l'immunité, contribue à la production de vitamines, aide à convertir les protéines lactiques en acide lactique et aide aussi à la fermentation de glucides complexes non digestibles. Certaines bactéries du sol peuvent convertir l'azote atmosphérique en composés azotés, créant ainsi une forme d'azote pouvant être absorbée facilement par les plantes, ce que l'azote ne peut pas faire lui-même. Les bactéries manifestent aussi un mode de vie parasitaire en causant aux humains des maladies, comme la fièvre typhoïde et la tuberculose, qui ont causé beaucoup de décès. Les bactéries causent aussi des maladies aux plantes causant ainsi des pertes de tonnes de récoltes dans l'industrie agricole. Les bactéries ont aussi été délibérément exploitées utilement par l'homme malgré leur caractère nocif. Ainsi, les bactéries ont eu et continuent d'avoir un impact énorme sur la vie terrestre. Ils sont à la fois utiles et dangereux. Le savoir acquis dans les textes sera complété par les visites d'institutions et organismes qui cultivent ou travaillent avec des microorganismes comme les stations de traitement d'eau, les usines de traitement des eaux usées, des centres de recherche, des hôpitaux, etc. À la fin de vos visites, vous devrez rédiger un rapport. Au sujet des lectures, notez vos observations et rapportez vos expériences aux fondements théoriques.



Concepts-clés

Bactériologie: Une branche de la microbiologie qui étudie les bactéries

Endospores: Structures dormantes hautement résistantes formées par un certain genre de bactéries Gram-positives comme les bacilles, les clostridium, etc.

Plasmides: Petits segments d'ADN trouvés dans certaines cellules bactériennes. Les plasmides contiennent parfois des gènes de résistance aux antibiotiques.

Système conjugué: Une des recombinaisons génétiques où une bactérie passe de l'ADN à une autre à travers un tube (fibrille sexuelle) qui joint temporairement les deux cellules jointes.

Chémostat: Outil utilisé dans une culture continue de bactéries afin de maintenir les bactéries à une densité constante dans une situation qui est très similaire à la croissance de bactéries en environnements naturels.

Microscopie: Toute technique qui utilise un microscope ou tout autre objet pour produire des images visibles de structures ou détails trop petits pour être vus à l'œil nu.

Lectures obligatoires

Alcamo, I. E. 2001. *Fundamentals of Microbiology*. 6^e éd. Menlo Park, California: Benjamin Cumming. *Fundamentals of Microbiology*. Saunders College Publishing, West Washington Square, Philadelphia, PA 19105.

Frobisher, M., Hinsdill, R.D., Crabtree, K.T. et Goodheart, C.R. 1974.

Nester, E.W., Anderson, D.G., Roberts (Jr), C.E., Pearsall, N.N. et Nester, M.T. 2001. *Microbiology: A Human Perspective*. McGraw-Hill Companies, Inc.

Schopf, J.W. 1999. *Cradle of Life: The Discovery of earth's Earliest Fossils*. Princeton University Press, 367 p.

<http://www.wikipedia.org/wiki/Microbiology>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Bacteria>

<http://gsbs.utmb.edu/bacteria/bacteria.html>

<http://www.emc.maricopa.edu/faculty/farabee/BIOBK/BioBookDiversity2.html>

<http://www.wikipedia.org/wiki/Microbiology>

<http://www.stlcc.cc.mo.us/fp/users/kkiser/History.page.htm>



Lectures non obligatoires

Blake, L. et al. 2002. *Biology 12*. McGraw-Hill Ryerson Ltd.

Mader, S.S. 2004. *Biology*. McGraw-Hill Companies, Inc., 1221 Avenue of the Americas, NY 10020.

<http://www.cbs.dtu.dk/staff/dave/roanoke/genetics980309.html> consultée le 06/04/2007.

Lectures utiles

<http://www.slic2.wsu.edu:82/hurlbert/micro101/pages/101hmpg.html>

<http://www.ucmp.berkeley.edu/bacteria/bacterialh.html>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Microscopy>

http://en.wikipedia.org/wiki/Category:Laboratory_techniques

http://en.wikipedia.org/wiki/Category:Microbiology_techniques

http://en.wikipedia.org/wiki/Deer_Island_Waste_Water_Treatment_Plant

http://bact.wisc.edu/Microtextbook/index.php?module=Book&func=displayarticle&article_id=25

Description détaillée de l'activité d'apprentissage

Dans cette activité, vous apprendrez que «micro» signifie «très petit» et que «biologie» signifie «étude des êtres vivants». La microbiologie est l'étude de petits êtres vivants appelés microorganismes ou microbes. Ils sont trop petits pour être vus à l'œil nu. La microbiologie a commencé par l'invention d'un microscope à lentille unique conçu en 1676 par Antoine van Leeuwenhoek. La découverte de conditions de culture stérile peut être retracée grâce au travail de Robert Koch (1843-1910) qui a inventé des méthodes permettant de purifier les bacilles contenus dans des échantillons de sang et de les faire croître en culture pure en milieu de croissance bactérienne. Koch et ses collègues ont inventé la boîte de pétri qui tient son nom de son assistant Julius Richard Petri. Il a encouragé les techniques de culture et de stérilisation avec la chaleur pour maintenir des conditions stériles, et ces techniques ont contribué énormément et positivement à l'étude et au développement de la microbiologie. Koch est aussi célèbre pour ses postulats selon lesquels «pour établir qu'un organisme est la cause d'une maladie, il doit être (dans tous les cas de cette maladie, préparé et maintenu en culture pure) capable de causer l'infection originale même après plusieurs générations de culture pure, et on doit pouvoir le retrouver à l'intérieur d'un animal inoculé et de la culture. Pour en savoir un peu plus sur l'histoire de la microbiologie et ses techniques, visitez le site web suivant

http://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Koch.

L'étude de la microbiologie est large et comprend l'étude de beaucoup de différents organismes comme les bactéries, les virus, les protozoaires, les algues, les champignons et les parasites multicellulaires.



Sur le site web suivant, il y a des informations sur la morphologie des bactéries <http://en.wikipedia.org/wiki/Bacteria#Morphology#Morphology>.

Les bactéries varient beaucoup quant à leur taille et leur forme. Elles mesurent entre 0,5 à 5,0 micromètres. Les bactéries typiques ont une des trois formes suivantes: tige (bacilles), sphère (coccidie) ou spirale (spirille). La forme en tige peut être divisée à son tour en trois groupes: les vibrions qui ont la forme d'une virgule, les spirilles qui sont celles qui ont une forme spiralée et les spirochètes qui sont celles qui sont en spirale serrée. Sur le même site web, vous apprendrez qu'une cellule de bactérie typique a une enveloppe appelée capsule suivie de la paroi cellulaire. A l'intérieur de la paroi cellulaire, il y a la membrane plasmique qui est pressée contre le cytoplasme. Le cytoplasme contient des ribosomes, des plasmides et de l'acide nucléique en forme d'ADN circulaire. La caractéristique distinctive des cellules procaryotes est que l'acide nucléique n'est pas enveloppé dans une membrane. Les bactéries ont des flagelles et beaucoup de projections plus courtes appelées pili à la surface extérieure de la cellule. Ces structures aident l'organisme à bouger. Les bactéries manquent la plupart d'organites eucaryotes. Un transport électronique se produit à travers la membrane cellulaire entre le cytoplasme et l'espace périplasmique.

Images sur <http://en.wikipedia.org/wiki/Bacteria>

La croissance, qui est une augmentation du nombre de cellules est obtenue par la division de cellules. Une cellule de bactéries atteint une taille optimale, puis se reproduit par fission binaire qui peut aussi être considérée comme forme de reproduction asexuée pour les bactéries. Dans des conditions optimales de croissance, les bactéries peuvent se reproduire de façon exponentielle. La génétique des bactéries est centrée sur un chromosome circulaire unique. Les plasmides sont des éléments d'ADN extra chromosomiques qui peuvent contenir des gènes de résistance aux antibiotiques, ou certainement des facteurs de virulence. Les bactéries ont différentes formes de déplacements. Elles utilisent leurs flagelles ou leur pili pour se déplacer. Les bactéries vagiles peuvent être attirées ou rejetées par des stimuli externes. La chimiotaxie illustre cela sur le lien suivant.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Chemotaxis>.

Le métabolisme des bactéries est classé selon le type d'énergie utilisée pour la croissance (la phototrophie, utilisation de la lumière à travers la photosynthèse ou chimiotrophie qui est l'utilisation de substances chimiques pour l'énergie), le type de source de carbone utilisée (hétérotrophe ou autotrophe), et le type de donneurs d'électrons utilisés pour la croissance (les lithotropes utilisent des donneurs chimiques tandis que les organotrophes utilisent des donneurs organiques). Pour plus de détails, visitez ce site web <http://en.wikipedia.org/wiki/Bacteria>.

Les bactéries peuvent survivre à un mauvais climat et aux aléas environnementaux à travers le développement d'endospores. Elles ont une enveloppe imperméable avec le cytoplasme qui contient de l'ADN et des ribosomes au centre. Elles peuvent entrer en dormance pendant des millions d'années et redevenir actives dans des conditions favorables.



<http://en.wikipedia.org/wiki/Bacteria>.

L'importance économique des bactéries comprend leur utilité et leur virulence en médecine, agriculture, et études biologiques comme le génie génétique. Pour plus de détails, visitez

<http://en.wikipedia.org/wiki/Bacteria>.

L'étude des bactéries exige des connaissances et la compréhension de la croissance des bactéries au laboratoire et hors de leur habitat naturel. Il est donc important de savoir comment préparer un milieu nutritif pour différents champignons. Des recherches poussées ont déterminé les exigences nutritionnelles des bactéries et cela a permis le développement de nombreux milieux de culture de bactéries. Les plus communs milieux de croissance des microorganismes sont des milieux liquides et les milieux solides ou milieux à base de gélose. Une plaque à gélose est un exemple de milieu de croissance de bactéries. C'est une plaque d'essai. Pour plus de détails, visitez

http://en.wikipedia.org/wiki/Growth_medium

<http://en.wikipedia.org/wiki/Ascomycota>

L'étude des bactéries requiert aussi une connaissance de l'utilisation d'un microscope car les cellules des bactéries ne peuvent pas être vues à l'œil nu. Le microscope permet de voir les détails que l'œil humain ne peut voir. Pour plus de détails, allez sur

<http://en.wikipedia.org/wiki/Microscopy>.

Les activités d'apprentissage

Il vous est demandé de lire les informations sur les liens suivants

<http://www.emc.maricopa.edu/faculty/farabee/BIOBK/BioBookDiversity2.html>

- <http://en.wikipedia.org/wiki/Bacteria>
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Microscopy>
- http://en.wikipedia.org/wiki/Category:Laboratory_techniques
- http://en.wikipedia.org/wiki/Category:Microbiology_techniques
- http://en.wikipedia.org/wiki/Deer_Island_Waste_Water_Treatment_Plant
- Frobisher, M., Hinsdill, R. D., Crabtree, K. T. & Goodheart, C. R. 1974.

Fundamentals of Microbiology. Ninth Edition. Philadelphia: Saunders College Publishing

Tout autre ouvrage sur la microbiologie y compris ceux cités dans ce module est utile à consulter.

Ces lectures vous permettront d'avoir une vue d'ensemble des perspectives historiques et des découvertes qui ont contribué à l'étude de la microbiologie, la morphologie, la classification, la physiologie et l'importance économique des bactéries.



Faites un résumé d'environ 100 mots sur chacun des sujets suivants:

1. La découverte des microbes et des microscopes
2. Les principales caractéristiques de classification des bactéries
3. La reproduction sexuée et asexuée des bactéries
4. La génétique des bactéries
5. L'importance des bactéries pour l'environnement, l'industrie agroalimentaire.

Les travaux de laboratoire

Les habiletés techniques sont de rigueur pour ce module. On devra faire des exercices pratiques sous supervision dans un laboratoire central. La partie pratique vous permettra de comprendre l'importance des microorganismes dans l'environnement. Sachez que même si les organismes sur lesquels porteront les exercices n'ont pas d'agents pathogènes connus, on doit quand même faire attention car ils pourraient avoir un potentiel pathogène inconnu. Ainsi, il est vital de connaître les règles strictes de sécurité en laboratoire avant même de connaître les techniques de base d'expérience en laboratoire de microbiologie. Les exercices de laboratoire qui peuvent être faits en microbiologie sont nombreux: microscopie, techniques aseptiques, répartition de bactéries en différents environnements, techniques de culture pure en utilisant des milieux sélectifs, simple coloration de frottis, coloration de Gram, etc. Pour plus de détails, visitez

slc2.wsu.edu:82/hurlbert/micro101/pages/101lab1.html

Voici un exemple d'exercices de laboratoire

Titre: Culture de bactéries et caractéristiques

Vous devez prendre des échantillons d'eau, de sol, de la nourriture avariée ou tout ce qui pourrait être intéressant. Étudiez la diversité morphologique des bactéries en utilisant des plaques à gélose. Utilisez les différentes techniques de coloration pour identifier les bactéries gram positif et gram négatif.

Matériel: microscopes, microplaquettes, nutriments, plaques à culture, incubateurs, tables de travail, pipette Pasteur, microplaquettes d'échantillon, alcool, autoclave, hotte à flux laminaire, anse, source de flamme pour la stérilisation du matériel, coton hydrophile, tissu jersey, tissu en mousseline, différentes colorations de bactéries.

Procédure: On devra apprendre les méthodes d'isolation, de purification, d'identification, de coloration et de maintenance de culture.

Rapport: Selon les tâches attribuées, un rapport pourrait être requis soit sur une lecture particulière, un exercice de laboratoire, ou une visite d'étude. Souvent l'instructeur vous conseillera sur le format du rapport. Cependant, la plupart de rapports scientifiques ont le format suivant:



1. **Titre:** Le titre devrait être concis. c'est le résumé du travail.
2. **Introduction:** Bref énoncé du sujet, son importance et la justification de l'étude.
3. **Objectif(s):** Énoncé des buts de l'étude.
4. **Méthodes:** une explication sur la façon de travailler pour atteindre les objectifs. Cela est important puisque quelqu'un d'autre devrait être en mesure d'utiliser vos méthodes pour obtenir les mêmes résultats.
5. **Résultats:** Les résultats sont mieux présentés sous forme de photos, de tableaux ou de graphiques avec un titre court et clair qui décrit les résultats.
6. **Discussions:** Il est possible d'interpréter les résultats. Des comparaisons avec d'autres travaux publiés sont faites.
7. **Conclusions:** Énoncé où on dit si les objectifs ont été atteints.
8. **Recommandations:** suggestions faites, par exemple si des recherches plus poussées doivent être faites selon les résultats du travail.
9. **Références:** Toutes les références utilisées pour écrire le travail devraient être citées selon le format international acceptable.

Visites d'études et études personnelles

Seul ou en groupe, il est important de faire des visites à différents sites de collecte d'échantillons pour l'étude de bactéries en différents habitats écologiques. Planifiez une visite ou deux d'industries qui se concentrent surtout sur le retrait de microorganismes de l'environnement ou sur l'inclusion de microorganismes dans la culture des aliments. Les centres suivants devraient être intéressants selon leur proximité avec votre lieu de résidence:

1. Un collège d'agriculture pour se concentrer sur l'importance des microorganismes dans le processus de nitrification du sol ainsi que les propriétés pathogènes des microorganismes sur les cultures commerciales (Unité de protection des plantes).
2. *Water Treatment Plants* (Plantes de traitement d'eau) ainsi que *Wastewater Disposal Plants* (plantes d'évacuation des eaux usées) pour étudier comment l'eau est purifiée (plantes de purification) et comment les eaux usées sont évacuées. Pour plus de détails, vous pouvez aller sur http://en.wikipedia.org/wiki/Deer_Island_Waste_Water_Treatment_Plant et lire à propos de *Deer Island Waste Water Treatment Plant*

Objectifs

L'objectif des visites est d'étudier

1. l'importance des bactéries en agriculture;
2. l'importance de la purification d'eau de consommation;
3. l'importance d'une bonne évacuation des eaux usées;
4. l'effet des bactéries pathogènes sur les cultures commerciales et les produits laitiers.



Procédure: elle dépendra des objectifs de la visite.

Rapport

Un rapport sera nécessaire sur les activités des tournées faites. Des méthodes spécifiques pourraient être décrites si elles sont applicables. Le rapport devrait avoir le format décrit ci-dessus dans la section des travaux de laboratoire.

Devoir

1. Écrivez un court résumé de 500 à 800 mots sur l'importance des bactéries en médecine, agriculture et dans la qualité de l'eau.

Votre résumé doit commencer par une description des bactéries, leur répartition dans l'environnement, et un commentaire, exemples à l'appui, des effets des bactéries en médecine, en agriculture et en génie génétique.

2. Décrivez brièvement les méthodes de mesure de la croissance de bactéries.

Vous devrez décrire les deux grandes méthodes: les méthodes de mesure de la masse cellulaire (mesure physique du poids sec ou du volume après centrifugation; mesure chimique de composés chimiques comme l'azote et l'ADN, mesure indirecte de l'activité chimique comme le taux de production du dioxyde de carbone ou l'utilisation de la densité optique. D'autres méthodes sont celles de mesure du nombre de cellules (numérations microscopiques directes; cellules à numération électronique, numérations indirectes de cellules viables ou numérations sur plaque).

3. Expliquez à l'aide du diagramme une courbe type de croissance de bactéries.

Une courbe type de croissance de bactéries est représentée par l'image suivante. Lorsque les bactéries grandissent dans un milieu fermé appelé culture en batch comme dans un tube d'essai, la population de cellules montre toujours ces dynamiques de croissance. Ces dernières sont:

- A. la phase de latence: les cellules s'adaptent à leur nouveau milieu avant de se séparer régulièrement par le processus de fission binaire;
- B. La phase exponentielle: la population de cellules croît de façon logarithmique;
- C. la phase stationnaire: La croissance de cellules est limitée par la présence de métabolites secondaires ou/et la déplétion de nutriments en milieu de croissance;
- D. la phase déclin: les cellules arrêtent de se séparer.

Notez les paramètres des axes x et y. La croissance est exprimée comme un changement de cellules viables en nombre au fil du temps. Les paramètres manipulés (variables) sont sur l'axe x tandis que les résultats de l'expérience sont montrés à l'axe y.

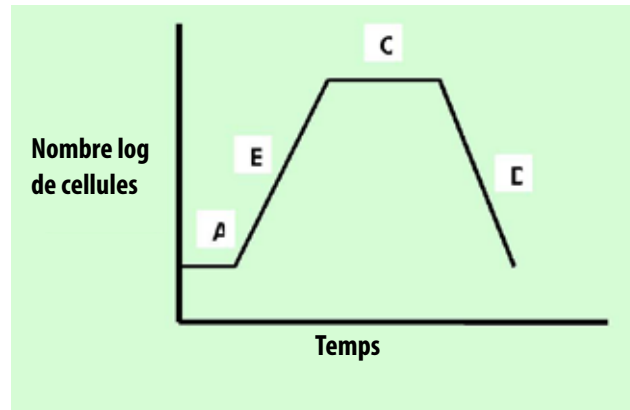


Figure : Courbe-type de croissance de bactéries en culture en batch.

Évaluation formative

Répondez aux questions suivantes qui serviront à tester la compréhension de cette activité d'apprentissage.

1. Définissez chacun des termes suivants.

- plasmide
- biosécurité
- endospore
- megnetosome
- antibiotique
- fimbriae
- pilus

2. Répondez brièvement.

- définissez une culture pure
- définissez une plaque
- expliquez ce que signifie magnification en biologie
- donnez au moins 4 exemples illustrant l'importance des bactéries chez les humains.
- définissez chémostat
- qu'est ce qu'une bactérie pathogène?
- expliquez la technique de coloration de Gram
- comment les bactéries abîment-elles les aliments?



3. Dites pourquoi la classification des bactéries sur la base de leur morphologie est extrêmement difficile. Expliquez.
4. Expliquez les formes morphologiques des bactéries.
5. Décrivez les facteurs qui affectent la croissance des bactéries
6. Donnez les grandes lignes de la classification des bactéries sur la base de la morphologie et la coloration
7. Expliquer pourquoi les anaérobies stricts sont importants pour l'industrie de la conserve.
8. Différenciez
 - mésophile et thermophile
 - conservation et pasteurisation
 - sporulation et germination et germination
 - milieu sélectif milieu différentiel
9. Décrivez comment vous déterminez si les bactéries sont sensibles à un antibiotique
10. Expliquez ce qui se passe durant les quatre phases de croissance de bactéries.



Activité d'apprentissage # 2

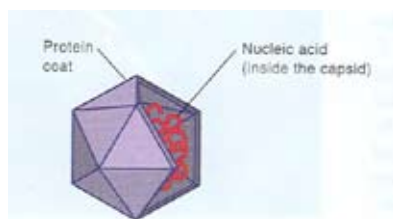
Titre de l'activité: **L'étude des virus**

Résumé de l'activité d'apprentissage

Vous apprendrez que les virus sont beaucoup plus petits en taille que les bactéries. Ils ont des caractéristiques différentes de celles des cellules bactériennes. Les bactéries sont des organismes vivants tandis que les virus sont des agents non biotiques ou des particules qui peuvent infecter toute forme de vie, y compris les bactéries, les archaebactéries et les eucaryotes. Les différents virus ont des formes différentes. Certains sont isométriques ou en forme de tige, d'autres sont hélicoïdes. Les virus contiennent, soit l'acide ribonucléique (ARN), soit l'acide désoxyribonucléique (ADN), mais jamais les deux. Ainsi, on les appelle virus à ARN ou à ADN. La classification des virus est basée sur la structure génomique (ARN ou ADN), la structure des particules, et la présence ou l'absence d'une enveloppe virale. Dans cette activité, vous verrez les différents groupes taxonomiques de virus, leurs méthodes de culture, les techniques de dosage, leur reproduction, et leur importance économique. De nombreux sites web sont mis à votre disposition, ils portent tous sur la structure et les fonctions des virus. Allez sur le site web qui porte sur l'importance des bactéries pour les humains?

<http://en.wikipedia.org/wiki/Virus> pour plus de détails sur les virus.

Différentes structures de virus

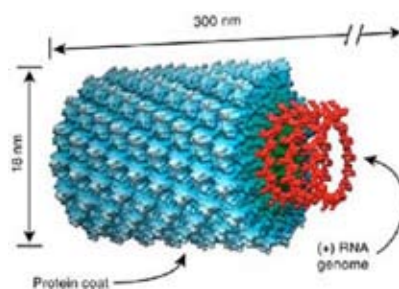


Dessin

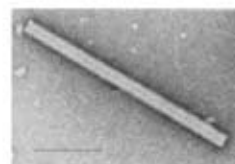


Micrographie électronique

(a) Isométrique (adénovirus)



Dessin

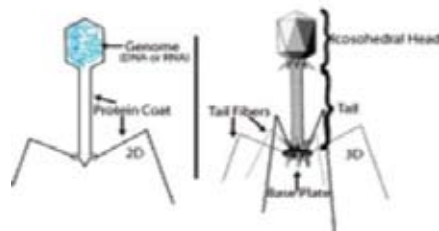


Micrographie électronique

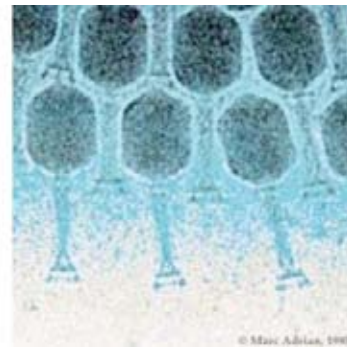


(b) hélicoïdes (tabac, mosaïque)

<http://images.google.com/images?gbv=2&svnum=10&hl=en&sa=X&oi=spell&resnum=0&ct=result&cd=1&q=tobacco+mosaic+virus&sp>
consulté le 14/04/2007.



Dessin



Micrographie électronique

(c) Complexe (bactériophages)

<http://www.wikipedia.org/wiki/Virus#Structure>
Consulté le 14/04/2007.

Le site web suivant <http://en.wikipedia.org/wiki/Capsid>, consulté le 02/04/2007 illustre et décrit clairement les différents types de virus. La section introductive de la page web explique les caractéristiques générales des virus. Visitez le site web suivant http://www.virology.net/Big_Virology/BVFamilyGenome.html qui vous donnera le *Big Picture Book of Viruses*.

Concepts clés

Bactériophages: virus qui infectent les bactéries (*phago* signifie «manger»). Les bactériophages ont été étudiés largement parce que les bactéries qui en sont infectées pouvaient être cultivées plus facilement.

Virion: une particule de virus hors de sa cellule hôte, est composé d'ARN ou d'ADN entouré d'une enveloppe protectrice appelée capsid.

Nucléocapside: La capsid contient l'acide nucléique.

Effet cytopathologique: changements de caractéristiques de l'apparence de cellule observés chez les cellules de culture tissulaire lorsqu'elles sont attaquées par les virus. C'est l'une des méthodes utilisées pour identifier les virus chez les cellules cultivées.

Titre: Le titre ou effet de virus est la dilution à laquelle 50% des hôtes inoculés sont infectés (dose infectieuse 50%) ou tués (dose létale 50%).



Hyperplasie: séparation excessive des virus ou la croissance de cellules anormalement larges à cause de la production de zones gonflées ou déformées de l'organisme.

Lectures utiles

Frobisher, M., Hinsdill, R.D., Crabtree, K.T., and Goodheart, C.R. 1974. *Fundamentals of Microbiology*. Saunders College Publishing, West Washington Square, Philadelphia, PA 19105.

Nester, E.W., Anderson, D.G., Roberts (Jr), C.E., Pearsall, N.N., and Nester, M.T. 2001. *Microbiology: A Human Perspective*. McGraw-Hill Companies, Inc.

Radetsky, Peter. 1994. *The Invisible Invaders: Viruses and the Scientists Who Pursue Them*. Backbay Books.

<http://www.wikipedia.org/wiki/virus> (consulté le 01/04/2007).

http://www.virology.net/Big_Virology/BVHomePage.html -Book of Viruses.
Consulté le 01/04/2007

Lectures non-obligatoires

Blake, L. et al. 2002. *Biology 12*. McGraw-Hill Ryerson Ltd.

Mader, S.S. 2004. *Biology*. McGraw-Hill Companies, Inc., 1221 Avenue of the Americas, NY 10020.

Liens utiles

<http://www.wikipedia.org/wiki/virus>

http://www.microbiologytext.com/index.php?module=Book&func=toc&book_id=4

http://www.virology.net/Big_Virology/BVHomePage.html

Description détaillée de l'activité d'apprentissage

Vous apprendrez que les virus ont été des mystères pour les scientifiques jusqu'à il y a 50 ans, et les études portaient sur les virus qui infectaient les bactéries (les bactériophages). Pour plus d'informations allez sur <http://en.wikipedia.org/wiki/Bacteriophages> consulté le 2/4/2007.

Selon ce site web, il existe une grande diversité de structures et de fonctions de bactériophages. Comme les virus ne sont pas des organismes vivants, on en parle à travers les organismes qu'ils infectent, et chaque particule de virus appelée souvent virion est composée d'acide nucléique (ARN ou ADN) enveloppé de capsid. (<http://en.wikipedia.org/wiki/Capsid> Consulté le 2/4/2007).



Les critères généralement utilisés pour la classification des virus zoophiles sont :

- a) la structure de génome;
- b) la structure de particule;
- c) la présence ou l'absence de l'enveloppe virale;

Selon ces critères, les virus zoophiles sont divisés en beaucoup de familles dont les noms finissent en- *viridae* (14 familles de virus contenant l'ARN et 7 familles de virus contenant l'ADN). D'autres regroupements non taxonomiques de virus comprennent des virus infectant les animaux, les plantes, ou les bactéries). Les regroupements sont basés sur les voies de transmission (kératinisée, respiratoire, sexuelle, etc.) La première difficulté dans l'étude des virus zoophiles n'est pas la purification des virions comme dans le cas de l'obtention de cellules suffisantes pour infecter les tissus hôtes. Certains virus ne peuvent qu'être cultivés dans les tissus vivants des animaux. D'autres pourraient croître dans des œufs de poule embryonnaires. Lorsque les virus zoophiles peuvent croître dans des cellules animales isolées, les cellules hôtes sont cultivées en laboratoire par une technique appelée **culture cellulaire** ou **culture tissulaire**. Afin de quantifier le nombre de virus présents, la méthode communément utilisée est appelée **méthode des plages de lyse**. Beaucoup d'autres méthodes peuvent être utilisées pour le **comptage** du nombre de virions d'un échantillon: La méthode de microscope électronique, l'**analyse quantitative**, et dans le cas de certains virus zoophiles, l'**hémagglutination**.

Les virus sont des parasites obligatoires, ce qui signifie qu'ils ne peuvent pas se reproduire ou exprimer leurs gènes sans l'aide de cellule vivante. La procédure de reproduction chez les virus est divisée en cinq étapes: l'attachement (adsorption), la pénétration, la réplication, l'assemblage et le rejet. Les virus attaquent beaucoup de plantes et d'animaux, causant ainsi d'énormes pertes. Par exemple, le site web qui suit explique comment le virus du syndrome respiratoire et reproductif chez les porcs a causé d'énormes pertes économiques aux États-Unis. Voici plusieurs conséquences de l'infection d'une cellule par un virus, et en dernier ressort, cela pourrait aider à déterminer la pathologie de la maladie causée par le virus. Cependant, les virus sont aussi utilisés utilement pour la production de vaccins, comme porteurs de gènes dans la production d'organismes génétiquement modifiés, et d'autres études moléculaires de cellules.



Les infections des plantes par les virus pourraient se manifester par le retard dans la croissance, la déformation, la formation de mosaïque sur les feuilles, le jaunissement, ou le flétrissement.



Activités d'apprentissage

Lectures

Gelderblom, H. R. (1996). Structure and Classification of Viruses in Medical Microbiology 4th ed. Samuel Baron eds. The University of Texas Medical Branch at Galveston (voir: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/bv.fcgi?mmed.chapter.2252>)

Prescott, L. (1993). Microbiology, Wm. C. Brown Publishers.

Villarreal, Luis P. (2005). "Viruses and the Evolution of Life." Washington, ASM Press.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Virus> Wikipedia, the free encyclopaedia, consulté le 01/04/2007.

<http://www-micro.msb.le.ac.uk/109/structure.html>-University of Leicester online notes. Virus Structure. Consulté le 01/04/2007.

http://www.virology.net/Big_Virology/BVHomePage.html -Big Book on Virus. Consulté le 01/04/2007.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Bacteriophages>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Capsid>

http://en.wikipedia.org/wiki/Porcine_Reproductive_and_Respiratory_Syndrome_Virus

http://en.wikipedia.org/wiki/Virus_classification.

Les références citées ci-dessus vous donneront une vue d'ensemble sur l'étude des virus. La documentation contient par exemple les caractéristiques générales des virus, leur classification, leur culture, leur reproduction et leur importance économique. Pour évaluer votre compréhension des concepts, faites des résumés sur les sujets suivants :

- structure des virus;
- classification des virus et critères utilisés pour leur classification;
- culture et différentes techniques de numération: méthode de plaque de lyse, analyse quantiques, et l'hémagglutination;
- méthode de reproduction des virus;
- importance des virus en environnement;



Travaux pratiques de Laboratoire

Titre: Morphologie et classification virale

Dans cet exercice, vous devrez observer les microplaquettes sur la morphologie des virus. Organisez une visite d'un laboratoire de virologie où vous devrez examiner quelques échantillons de plantes ou de cellules cultivées infectées. Pour plus de détails, allez sur http://en.wikipedia.org/wiki/Virus_classification. Ce site web explique en détail la classification de différents virus.

Matériel: Microscope, microplaquettes, variété de milieux, boîtes de pétri, incubateurs, tables de travail stériles, pipettes Pasteur de tailles variées, microplaquettes d'échantillons, plantes infectées ou cellules cultivées.

Procédure: vous examinerez des microplaquettes ou des échantillons actifs (plantes infectées ou cellules cultivées)

Rapport: Selon les grandes lignes données à l'activité d'apprentissage numéro 1.

Visites/Études personnelles

Faites une visite d'une ferme locale, de préférence de tabac ou de manioc, afin d'identifier les cultures infectées. Notez les symptômes observés et les conditions dans lesquelles elles poussent. Des études pareilles devraient être faites dans une station de recherche (agricole ou de bétail) ou dans un laboratoire de virologie qui fonctionne.

Objectifs: Ils dépendront du but, mais généralement, l'objectif est d'examiner les symptômes causés par les virus sur des cultures commerciales importantes et les animaux domestiques, et de noter les effets sur leurs hôtes.

Procédure: Elle dépendra de l'objectif. Cependant, il sera important de travailler, dans une station de recherche, avec un virologue qui organisera des activités pour une démonstration sur quelques exercices que l'expert devra faire au moment de faire la requête.

Rapport: Vous devrez faire un rapport sur les activités et les observations que vous avez faites. S'il y a lieu, des méthodes spécifiques devraient être décrites en détail.



Devoir

Selon les explications de l'activité d'apprentissage numéro 1.

Exemples

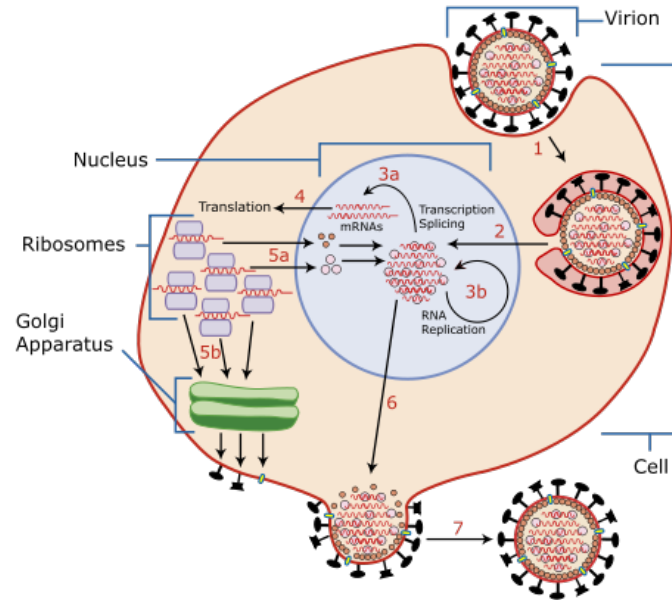
1. Avec l'aide de diagrammes décrivez la structure d'un virus. Votre réponse doit contenir les éléments suivants:

- la taille, la composition d'acide nucléique;
- les formes (isométrique, hélicoïde et complexe) et la gaine/queue si présente;
- l'entassement de protéines dans la capside et les outils d'attachement;
- comparaison des virus nus et de virus enveloppés;

2. Décrivez la classification des virus.

Vous devez indiquer les éléments de réponse suivants:

- Critères pour la classification de virus;
 - Le suffixe de grandes familles;
 - Les grands groupes de virus contenant l'ADN ou l'ARN;
 - les regroupements non taxonomiques basés sur les voies de transmission, les organismes infectés et les maladies causées.
3. Expliquez l'établissement d'une lignée cellulaire primaire pour la culture de virus. vous devrez inclure dans votre réponse ce qui suit:
- définition de lignée cellulaire primaire;
 - Le matériel nécessaire pour établir une lignée cellulaire en termes de sources, produits chimiques/réactifs, équipements et conditions;
 - grandes lignes de la procédure suivie pour la maintenance de telles lignées cellulaires.
4. Chez les virus pathogènes, il y a beaucoup d'étapes critiques en réplication qui déterminent la nature de maladie causée. Décrivez ce qui se passe à chaque étape. Premièrement, il faut connaître les étapes, ensuite décrire chacune d'elles. Les étapes sont:
- l'entrée;
 - la réplication primaire;
 - l'étape de dissémination;
 - tropisme de cellules et de tissus;
 - les réactions immunitaires des hôtes (cellule de réplication secondaire/ endommagement de tissu);
 - la persistance qui contraint la clairance des virus par les hôtes.



La réplication des virus

Un virus est attaché à la cellule hôte et entre par endocytose. La capside se dissocie et l'ARN viral est transporté au noyau. Dans le noyau, les complexes viraux de polymérase virale transcrivent et répliquent l'ARN. Les ARN messagers migrent vers le cytoplasme où ils sont traduits en protéines. Ensuite, Les virions nouvellement synthétisés bourgeonnent à partir des cellules infectées.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Virus>

Consulté le 9/4/2008



Évaluation formative

Évaluez-vous en répondant à ces questions

1. Écrivez de courtes notes sur les sujets suivants:
 - a. les antigènes;
 - b. les capsides;
 - c. les lyses;
 - d. les atténués;
 - e. les bactériophages;
2. Comparer
 - a. l'ARN à brin positif et l'ARN à brin négatif;
 - b. infections productives et abortives;
 - c. viroïdes et prions;
 - d. infections chroniques et latentes en termes de virion?
3. Pour qu'un virus se multiplie, il doit évidemment infecter une cellule. Commentez.
4. Donnez les grandes lignes des étapes de la réplication virale.
5. Décrivez les méthodes appliquées en stérilisation et la désinfection des virus;
6. Décrivez les critères taxonomiques les plus importants dans la classification virale.
7. Expliquez les attributs d'un bon vaccin.
8. Répondez brièvement à ce qui suit:
 - a. Nommez au moins quatre virus parmi les types ARN et ADN et indiquez dans chaque cas les maladies qu'ils peuvent causer;
 - b. donnez les fonctions des interférons;
 - c. commentez la classification d'infections virales en utilisant les résultats des réactions immunitaires;
9. Commentez l'importance agricole des virus.

Le site suivant donne des informations au sujet d'une vidéo qui pourrait aider à répondre à ces questions.

<http://www.microbiologybytes.com/video/index.html> (consulté le 02/04/2007).



Activité d'apprentissage # 3

Titre de l'activité : **Les Protozoaires**

Résumé de l'activité d'apprentissage

Cette activité va porter sur un autre groupe de microorganismes appelés protozoaires. Vous apprendrez la biologie des protozoaires, leur classification leur nutrition, leur respiration, leur croissance, leur reproduction, leur excrétion et leur importance économique. Les protozoaires sont des organismes unicellulaires qui sont souvent trouvés dans la boue au fond des étangs et des fossés. Le contenu des cellules des protozoaires est enveloppé dans une membrane limite fine. Ils ont une structure simple équipée d'une couche extérieure claire appelée ectoplasme et une couche intérieure plus granulaire appelée endoplasme. L'endoplasme contient des organites similaires à ceux retrouvés chez les animaux d'espèce supérieure. Ces sont par exemple les noyaux, la mitochondrie, l'appareil de Golgi, le réticulum endoplasmique, les ribosomes et les vacuoles. Les protozoaires sont libres ou sous forme de parasites. Les protozoaires parasites se trouvent dans les plantes et dans les animaux à tous les niveaux phylogénétiques, et les parasites intracellulaires peuvent être trouvés dans presque tous les types de cellules. Les protozoaires parasites sont des microparasites du fait de leur petite taille. Ils se divisent en cellules hôtes définitives et causent généralement des maladies aiguës et non des maladies chroniques.

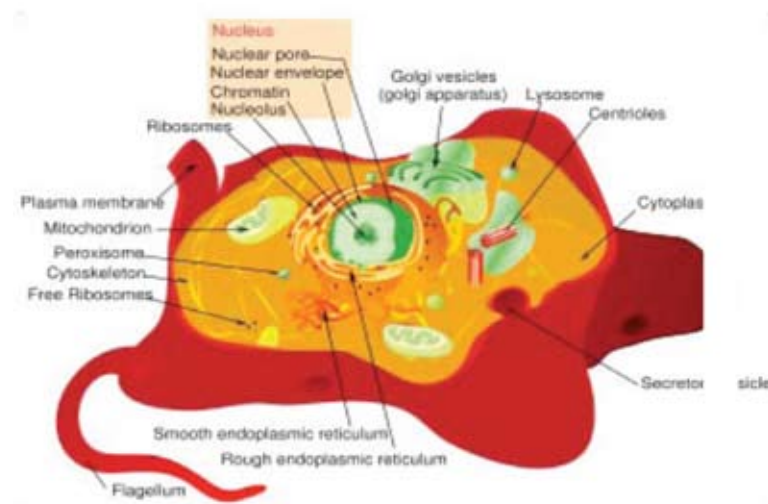


Image d'une structure d'une cellule eucaryote généralisée.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Eukaryotes> Consulté le 18/04/2007



Concepts clés

Protozoologie: branche de la biologie qui étudie les protozoaires

Pseudopode: infrastructure complexe de microtubules, de microfilaments et d'autres organites associés à la membrane de cellule chez les protozoaires flagellés et ciliés.

Hyperparasitisme (polyparasitisme): une situation dans laquelle un parasite est paralysé par un autre parasite (c'est-à-dire un parasite parasité).

Mérogonie (Schizogonie): type de reproduction asexuée chez le phylum apicomplexe dans lequel, après la division nucléaire, le noyau individuel se déplace vers les cellules périphériques; et lorsque la division nucléaire est complète, la membrane cytoplasmique entoure chaque noyau, et les cellules filles bourgeonnent des parents.

Bradizoïte: étape de cycle de vie des protozoaires de la famille des Sarcocystidae. En particulier, ce terme est utilisé pour définir le mérozoïte qui se forme dans le kyste de tissu de l'hôte intermédiaire (et rarement de l'hôte définitif). Cette étape infectieuse affecte rarement de nouvelles cellules chez les hôtes intermédiaires, mais c'est une étape infectieuse pour les hôtes définitives.

Gamétocyte: étape de cycle de vie de certains protozoaires (apicomplexes) qui sont destinés à devenir des gamètes (macro ou micro).

Trophozoïte: étape de développement des protozoaires durant laquelle l'organisme est considéré comme mature, végétatif ou sous forme d'alimentation active.

Lectures utiles

<http://en.wikipedia.org/wiki/Protozoa>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Flagellate>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Amoeboid>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Sporozoans>

http://en.wikipedia.org/wiki/Malaria#Distribution_and_impact

<http://en.wikipedia.org/wiki/Cryptosporidiosis>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Coccidia>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Cryptosporidiosis>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Toxoplasmosis>

<http://www.tulane.edu/~wiser/protozoology/notes/intes.html> Intestinal Protozoa, consulté 19/04/2007.

Frobisher, M., Hinsdill, R.D., Crabtree, K.T. and Goodheart, C.R. 1974. Fundamentals

of Microbiology. Saunders College Publishing, West Washington Square, Philadelphia, A19105.

Nester, E.W. Anderson, D.G., Roberts (Jr.), C.E., Pearsall, N.N., and Nester, M.T.

2001. Microbiology: A Human Perspective. McGraw-Hill Companies, Inc.



Lectures non obligatoires

Blake, L. et al. 2002. Biology 12. McGraw-Hill Ryerson Ltd.

Mader, S.S. 2004. Biology. McGraw-Hill Companies, Inc., 1221 Avenue of the Americas, Y10020.

Liens utiles

<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs094/en/>

Description détaillée de l'activité d'apprentissage

Vous apprendrez que les protozoaires, qui appartiennent au règne des protistes, constituent un groupe de cellules eucaryotes. Ce sont des noyaux membranaires comme les autres organites membranaires qui caractérisent les animaux d'espèce supérieure. Les protozoaires sont des organismes qui ont été traditionnellement considérés comme faisant partie du monde microbien. Ils sont microscopiques, organismes unicellulaires qui manquent de capacité photosynthétique, sont souvent vagiles au moins à certaines étapes de leur cycle de vie, et se reproduisent le plus souvent par division asexuée. Les protozoaires ont des structures spécialisées pour le mouvement comme les cils, les flagelles ou les pseudopodes. Comme, ils vivent en environnement aquatique, dans l'eau, dans l'oxygène, d'autres petites molécules diffusent facilement en cellules à travers la membrane cellulaire. De plus, les protozoaires se nourrissent par pinocytose (ingestion de fluide dans une cellule, formant une vésicule interne) ou par phagocytose (ingestion de particules solides d'aliments, formant ainsi une vacuole digestive). La classification de protozoaires montre qu'ils ne sont pas des groupes unifiés, mais se présentent comme des continuums évolutifs. On les regroupe sous le nom de **protozoaires** parce ce sont des organismes eucaryotes monocellulaires et manquent de chlorophylle. Les protozoaires sont divisés en trois phyla: Sarcomastigophore, **Ciliophores**, et **Apicomplexe**. Le phylum Sarcomastigophore est divisé en deux sous-phyla: les **Rhizopodes** ou protozoaires amiboïdes comme l'*Entamoeba dysenteriae*, et les **Mastigophores** ou **cinétoplastes**, protozoaires flagellés comme la *Trypanosoma brucei*. Les **Ciliophores** sont des protozoaires ciliés comme les *Balantidium coli*. Les apicomplexes sont des protozoaires qui forment des spores comme le plasmodium *falciparum*. Tous ces parasites sont intracellulaires parce qu'ils pénètrent dans l'hôte. Les Ciliophores font exception et vivent dans la lumière du grand intestin. La majorité des protozoaires sont libres et sont trouvés en milieu marin, dans l'eau douce, ou en milieu terrestre. En milieu terrestre, les protozoaires sont abondants dans des sols boueux au fond des étangs et des fosses, et dans ou sur les plantes et les animaux. Les habitats spécialisés de protozoaires comprennent les intestins des termites, des coquerelles des ruminants et des animaux. Il y a beaucoup de maladies causées par les protozoaires à part celles considérées importantes par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) comme la malaria, la maladie du sommeil, la maladie de Chagas et la leishmaniose. Les protozoaires sont importants



dans la chaîne alimentaire (ex ils mangent les bactéries et les algues et servent à leur tour d'aliments à de plus grandes espèces). Les protozoaires aident à maintenir un équilibre écologique dans le sol en nourrissant de nombreuses bactéries et algues (un seul paramecium peut ingérer jusqu'à 5 millions de bactéries par jour). D'autres protozoaires sont importants dans l'épuration des eaux usées parce que la plupart de nutriments qu'ils consomment sont métabolisés en dioxyde de carbone et en eau, ce qui a pour résultat une grande diminution d'eaux usées.

Certaines espèces par contre sont des parasites vivant dans ou sur d'autres organismes. Les hôtes de protozoaires parasites sont compris entre les organismes monocellulaires comme les algues et les vertébrés complexes comme les humains. Tous les protozoaires ont besoin d'humidité pour survivre peu importe l'habitat. Si on prend l'exemple de l'amibe, la respiration est faite principalement par l'absorption de l'oxygène venant de l'eau avoisinante à travers la surface entière de l'ectoplasme. C'est à partir de là que l'oxygène diffuse dans d'autres parties cellulaires. L'amibe vit sur des microorganismes comme des diatomées ou des fragments de matières organiques pourries. Les aliments sont contenus dans ce qu'on appelle vacuoles digestives dans l'endoplasme. L'amibe assimile les aliments dans leur protoplasme pour leur croissance. Lorsqu'un stade maximal de croissance est atteint, les noyaux cellulaires se divisent en deux suivis du clivage cytoplasmique dans un processus appelé scission binaire. Deux cellules filles identiques naissent par reproduction asexuée. Néanmoins, la reproduction sexuée est aussi possible chez les protozoaires, mais elle est possible à travers un processus appelé conjugaison. Si les conditions de croissance deviennent défavorables, les cellules s'arrondissent et libèrent une enveloppe protectrice appelée kyste. L'excrétion est obtenue par une vacuole contractile qui croît lentement en accumulant des déchets jusqu'à ce qu'elle les rejette à travers l'ectoplasme. Un autre exemple de protozoaire est l'organisme unicellulaire appelé paramecium.

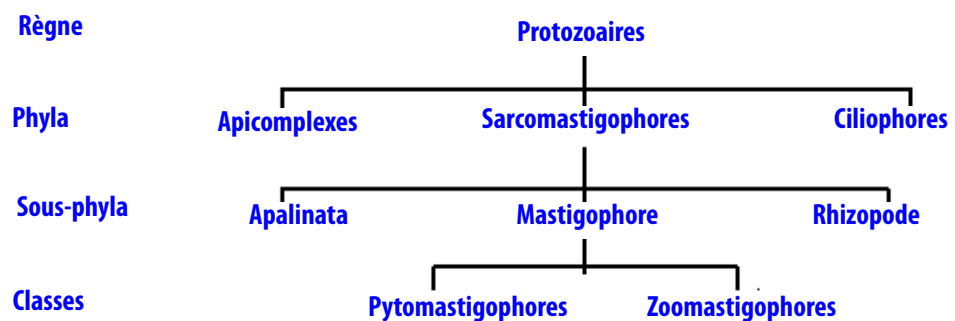


Image de classification abrégée de protozoaires parasites



Activités d'apprentissage

Lectures

Lisez les ouvrages et les textes des liens suivants

on6. Curd, C.R. 1992. *Protozoa and the water industry*. Cambridge University Press, MA.

Protozoaires:

<http://en.wikipedia.org/wiki/Protozoa>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Flagellate>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Amoeboid>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Sporozoans>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Coccidia>

<http://www.tulane.edu/~wiser/protozoology/notes/intes.html>

Cox, F. E. G. 2001. *Modern parasitology*, Blackwell Science

Curd, C.R. 1992. *Protozoa and the water industry*. Cambridge University Press, MA.

Ces lectures vous permettront d'avoir une vue d'ensemble sur la morphologie, la classification, la reproduction, l'écologie et l'importance économique des protozoaires. À l'aide de ces lectures faites de brefs résumés sur les sujets suivants:

1. La classification de protozoaires (notez les caractéristiques distinctives des grandes phyla: Sarcomastigophores, ciliophores, apicomplexes et microspores).
2. L'écologie des protozoaires (commentez les formes parasites et non parasites en utilisant des exemples pour illustrer comment l'environnement favorise leur subsistance).
3. La croissance et la reproduction (types et cycles de vie de protozoaires qui causent des maladies et de ceux qui n'en causent pas).
4. La respiration (surtout comment les organismes acquièrent de l'oxygène de l'environnement pour générer de l'énergie).
5. La nutrition (notez le mode d'alimentation et les types de source d'aliments).
6. L'excrétion (notez comment les cellules expulsent leurs déchets dans l'environnement).
7. L'importance économique (spécialement en médecine, en écosystème et en traitement de déchets).



Les travaux pratiques de laboratoires

Titre : La diversité et la morphologie des Protozoaires

Dans cet exercice, on vous demandera d'examiner différents échantillons (eau, sang, selles, etc.) pour la diversité des protozoaires et pour apprendre leur morphologie et leur cycles de vie.

Matériel: Microscope, échantillons, boîte de pétri, microplaquettes, solution saline.

Procédure: Pour détecter la présence de protozoaires chez les humains et les animaux domestiques, vous devrez collecter des échantillons de selles et de sang en utilisant les procédures recommandées. Vous examinerez les différentes microplaquettes ou les échantillons réels contenant des protozoaires. Faites des observations et comparez les notes des lectures que vous avez faites. Pour la microscopie pratique, visitez le site web suivant: <http://www.micro.agnet.fsu.edu/primer/virtual/virtual.html>

Vous pourrez faire un exercice virtuel. Ce site explique ceci: «Ce tutoriel java interactif explore l'effet de l'agrandissement (équivalent au changement des objectifs du microscope) sur la capacité de résoudre les caractéristiques d'un échantillon. Nous donnons, sur les images, les tailles réelles des échantillons afin que les apprenants comprennent les agrandissements remarquables des échantillons qu'ils examinent. Chaque agrandissement est accompagné d'une description de caractéristiques disponibles à la résolution. Les échantillons en vedette dans ce module comprennent des puces d'ordinateurs, des roches linaires, les supraconducteurs et les surfaces de disques compacts.

Rapport: Selon les grandes lignes données à l'activité d'apprentissage numéro 1.

Visites/études personnelles

Visitez une station de recherche (agricole ou de bétail), ou si possible une station de traitement d'eaux usées.

Objectif: Les objectifs d'une telle visite varient selon le but.

Procédure: elle varie aussi selon l'objectif.

Rapport: On vous demandera d'écrire un rapport basé ce que vous avez noté lors des visites. S'il y a lieu, des méthodes spécifiques seront décrites.

Devoir

Selon les explications de l'activité d'apprentissage numéro un



Exemples de devoirs

1. Commentez l'écologie des protozoaires et expliquez leur importance écologique.

Votre réponse doit tenir contenir les éléments suivants:

- Les protozoaires agissent comme des producteurs aussi bien dans l'eau douce que dans les écosystèmes marins. Ils font partie du plancton (Gr. plankt, wandering), les organismes qui sont suspendus dans l'eau et servent d'aliments aux organismes hétérotrophes).
 - Ils ont des relations symbiotiques comprises entre le parasitisme et le mutualisme (la formation du récif corallien se fait avec des protistes symbiotiques photosynthétiques qui vivent dans les tissus des coraux.
 - L'eau polluée est souvent riche en faune protozoaire. L'abondance et la diversité relatives des protozoaires peuvent indiquer la pollution organique et toxique (indiquent la qualité de l'environnement).
 - Les protozoaires symbiotes comme les ciliés qui sont dans la panse et le réticulum des ruminants, ainsi que dans le caecum et le colon des équidés sont supposés aider les animaux à la digestion de la cellulose.
 - Les protozoaires sont utilisés dans les études lors de projets variés de recherche parce qu'ils ont une petite taille et ont un court temps de régénération, et aussi parce qu'il est facile de les maintenir en laboratoire.
2. La malaria est l'une des plus grandes maladies causées par les protozoaires. La malaria chez l'humain est causée par un parasite protozoaire du genre plasmodium. Pour une stratégie de contrôle efficace, il est important de comprendre son cycle de vie. Décrivez le cycle de vie du plasmodium.

Pour votre réponse, référez-vous à ce qui suit:

- a. Le cycle de vie implique deux stades de développement: la phase asexuée qui se déroule chez l'humain, et la phase sexuée qui se déroule chez la femelle d'espèces variées de moustiques du genre Anopheles.
- b. Le cycle à l'intérieur de l'homme. Les parasites plasmodium sont introduits dans la salive des moustiques lorsqu'elles piquent.
 - Les parasites subissent une courte période de multiplication dans certaines cellules /tissus dans le corps, spécialement dans les cellules du foie. Cela s'appelle cycle exoérythrocytaire ou préérythrocytaire.
 - La descendance asexuée entre et se développe dans les globules rouges (la phase trophozoïte).
 - Les parasites se multiplient d'une façon asexuée dans les globules rouges formant ainsi de nombreux petits segments.
 - Les segments formés sortent du sang, et chaque segment est un parasite nouveau actif et est appelé mérozoïte.



- Les mérozoïtes attaquent les autres érythrocytes et le processus de multiplication est répété (les hôtes sentent des frissons et la fièvre caractéristiques de la malaria).
 - Après plusieurs cycles de développement asexué, des gamétocytes particuliers commencent à apparaître dans le sang du patient (ils sont plus gros que les formes asexuées).
 - Les gamétocytes ne subissent d'autre développement dans les érythrocytes humains, et ils meurent s'ils ne sont pas aspirés par un moustique.
- c. Le cycle à l'intérieur d'un moustique
- Lorsqu'un moustique anophèle pique une personne qui a des gamétocytes de malaria matures dans son sang, la phase sexuée du parasite commence
 - Après la fécondation du gamétocyte femelle par le mâle dans l'estomac du moustique, les zygotes vagiles envahissent les cellules qui sont à l'intérieur de l'estomac du moustique et s'y multiplient, formant une poche (oocyste) où les parasites continuent leur développement par scission.
 - La poche se rompt, libérant de nombreux nouveaux et jeunes parasites qui, après un voyage d'environ 12 jours, atteindront les glandes salivaires du moustique, et seront injectés par piqûre de l'insecte à l'homme.
3. Caractériser la classification des protozoaires, en indiquant comment chaque phylum ou sous-phylum cause des maladies. Pour votre réponse, référez-vous à ceci:
- Indiquez les critères de classification des protozoaires
 - Les grands phyla et sous-phyla:
 - Phylum: Sarcomastigophore. Il comprend deux sous-phyla dans lesquels on trouve la plupart des protozoaires qui causent des maladies humaines.
 - Sous-phylum: Mastigophore. Il comprend les protozoaires flagellés, la plupart unicellulaires qui ont plus ou moins un flagelle à une certaine époque de leur cycle de vie. Les flagelles sont utilisés pour la locomotion, pour la cueillette de nourriture et comme récepteurs sensoriels. Les mastigophores qui causent des maladies plus que les autres sont les *giardia*, les *lamblia*, la *leishmania*, Les *Trichomonas vaginalis*, les *Trypanosoma rhodesiense* et les *Trypanosoma gambiense*.
 - Sous-phylum: Rhizopodes se déplacent par pseudopodie et changent de forme pendant leur mouvement. Ex: L' *Entamoeba dysenteriae*.
 - Ciliophores ou ciliés comprennent les organismes qui ont des cils. La plupart d'entre eux sont libres ou vivent en symbiose comme le *Balantidium coli*.
 - Phylum: Les apicomplexes causent certaines maladies humaines parmi les plus graves. La malaria est causée par une des quatre espèces de protozoaires, et elle est transmise par le moustique Anophèle femelle. Les chats sont les hôtes définitifs de *Toxoplasma gondii*, les hommes servant d'hôtes intermédiaires. Un autre exemple d'apicomplexe est le *Cryptosporidium parvum* qui cause une maladie diarrhéique appelée cryptosporidiose.



- Phylum: La microspore qui comprend les protozoaires intracellulaires qui infectent les personnes immunodéprimées, spécialement les personnes ayant le virus du SIDA.

Évaluation formative

1. Définissez les caractéristiques principales des Protozoaires
2. Comparez les différents modes de locomotion des Protozoaires
3. Donnez la signification des termes suivants:
 - commensal
 - hétérotrophe
 - cytosquelette
 - pseudopodium
 - Mérozoïte
 - Schizogonie
4. Différenciez les sporozoïtes et les mérozoïtes?
5. Quelles sont les conditions environnementales essentielles pour la survie des Protozoaires?
6. Donnez les grandes lignes de la pathophysiologie de la trichomonose.
7. Donnez une description détaillée du cycle de vie du plasmodium à l'intérieur de l'homme
8. Donnez les grandes lignes de la classification des Protozoaires cliniquement importants en donnant les noms de leurs genres et espèces ainsi que les maladies qu'ils causent.
9. Bien qu'on ne s'intéresse pas aux protozoaires, ils jouent un rôle écologique important dans beaucoup de communautés. commentez.
10. Donnez une maladie causée par chacun des protozoaires suivants et indiquez comment elles sont transmises à l'humain.
 - *Entamoeba dysenteriae*
 - *Acanthamoeba*
 - *Giardia lamblia*
 - *Trichomonas vaginalis*
 - *Trypanosoma gambiense*
 - *Balantidium coli*
 - *Espèces de plasmodium*
 - *Toxoplasma gondii*



Activité d'apprentissage # 4

Titre de l'activité: **Mycologie**

Résumé de l'activité d'apprentissage

Cette activité d'apprentissage portera sur les caractéristiques générales des champignons, la structure mycélienne et l'organisation, les types de nutrition, la reproduction, l'écologie, la classification et l'importance économique. Les champignons ont été initialement classifiés parmi les plantes, et l'étude des champignons appelée mycologie a donné naissance à une branche de la botanique. Cependant, les champignons sont maintenant considérés comme ayant des caractéristiques uniques qui justifient leur appartenance à un règne propre à eux appelé Mycètes. Plus de 60 000 espèces de champignons sont connues. Les documents sur les fossiles portent à croire que les champignons existent depuis 550 millions d'années ou plus. Ils sont compris entre des organismes monocellulaires minuscules invisibles à l'œil nu comme les levures, et les champignons qu'on peut voir pousser. Les champignons sont classés premièrement selon le type de spores et les organes de fructification qu'ils produisent, bien que la biologie moléculaire commence à attirer l'attention sur leur taxonomie. Beaucoup de biologistes divisent le règne des Mycètes en cinq phyla (au singulier: phylum): Les Chytridiomycètes, Zygomycètes (champignons zygosporés), Ascomycètes et les Basidiomycètes (champignons à chapeau). Le cinquième phylum, celui des Deutéromycètes (champignons imparfaits) est utilisé par certains taxonomistes pour les champignons qui, apparemment, ne se reproduisent uniquement pas par spores asexuées. Les champignons sont des membres de différents groupes d'organismes eucaryotes qui, contrairement aux animaux et aux plantes, se nourrissent en absorbant des nutriments provenant d'une source extérieure. La majorité des champignons croissent en absorbant des aliments de substrats comme le sol, le bois, les matières organiques pourries comme les hétérotrophes. D'autres sont des parasites obligatoires qui se nourrissent de nutriments dérivés de plantes vivantes et de tissus d'animaux. Les champignons sont des Multinucléés, ce qui signifie qu'une cellule peut contenir plusieurs noyaux. Ils puisent leur énergie dans la respiration de la même façon que les plantes et les animaux d'espèces supérieure. La couche extérieure d'une cellule de champignon est une paroi de l'alvéole faite en chitine suivie en dessous par une membrane cellulaire (le cytoplasme) qui contient toutes les organelles qu'on trouve dans une cellule animale. Les champignons unicellulaires se reproduisent par scission binaire, tandis que les champignons multicellulaires se reproduisent par croissance de l'étendue de l'hyphe apical. Les champignons ayant des hyphes sont appelés mycélium. Les mycélia libèrent leurs métabolites secondaires dans l'environnement à travers la membrane cellulaire. Les champignons sont diversifiés dans leurs modes de reproduction à tel point que certains se reproduisent exclusivement asexuellement tandis que d'autres combinent le mode asexué et le mode sexué. De plus, d'autres emploient des hormones dans la reproduction sexuée. Les champignons sont bénéfiques, mais aussi nuisibles. Du point de vue écologique, ils sont utiles pour la décomposition et le recyclage de nutriments dans un écosystème. Économiquement, les champignons servent d'aliments. Ils sont aussi utilisés pour donner au fromage ses différentes



saveurs. Les champignons sont aussi importants dans la cuisson, la brasserie et en médecine comme source d'antibiotiques.

Au cours des dernières années, les champignons ont fait l'objet d'études approfondies parce qu'ils sont utilisés en applications biotechnologiques, en transformation industrielle, agricole et écologique. Les champignons sont préoccupants parce qu'ils endommagent des productions fermières en causant des maladies aux plantes et aux animaux, entraînant ainsi des pertes de millions de dollars. Les infections de champignons chez les hommes causent des maladies parmi les plus chroniques.



Les champignons aident à la décomposition de matières organiques mortes (sur l'image, un tronc d'arbre mort) et ils aident à continuer le cycle de nutriments à travers un écosystème.

<http://www.ucmp.berkeley.edu/fungi/fungi.html>

Consulté le 02/04/2007

Concepts clés

Mycologie: Étude de champignons, la personne qui étudie les champignons est appelée mycologue.

Hyphe: Cellule longue et filamenteuse de champignons, constituant le mode principal de la croissance végétative. Un hyphe consiste en une ou plusieurs cellules entourées de parois cellulaires tubulaires. Chez la plupart de champignons, les hyphes sont divisés en compartiments par des cloisons transversales internes.

Septa: Ces sont des cloisons qui divisent les hyphes. Habituellement, ils laissent une ouverture appelée pore septal au centre. C'est pour cette raison qu'on dit que les hyphes ont des compartiments et non des cellules parce qu'aucun compartiment n'a de protoplasme exclusivement pour lui. Le singulier de septa est septum.



Mycélium: Une collection de hyphes d'un champignon qui se développe à un endroit est appelé mycélium.

Gamétange: L'organe de champignon où les gamètes sont produits. Un gamétange est une structure haploïde, et la formation de gamètes n'implique pas la méiose.

Les champignons monoïques: Espèces fongiques qui produisent des organes sexuels mâles et femelles dans le même thalle (hermaphrodites).

Thalle: C'est un organisme dont on ne peut distinguer les racines, la tige et les feuilles.

Dioïque: Champignons qui produisent des organes sexuels mâles et femelles sur des thalles séparés.

Hétérocaryose: Le mot vient du grec: *heteros* signifie autre, et *karyon* signifie grain. Il signifie avoir plusieurs noyaux génétiquement différents à l'intérieur du même mycélium de champignons. Ces noyaux peuvent être différents, soit suite à l'accumulation de mutations, soit suite à la fusion d'hyphes génétiquement distincts. Cela peut conduire à des individus qui ont des noyaux différents dans des parties différentes de leur mycélium.

L'hyphe dicariotique: Un hyphe des noyaux haploïdes jumelés.

Spore: Une spore est une cellule reproductrice qui se développe dans un nouvel organisme sans qu'elle se fusionne avec une autre cellule reproductrice. Les spores qui ne sont pas contenues dans une capsule sont appelées conidies.

Sporange: Capsule qui produit des spores appelées sporangiospores.

Asci: C'est une capsule qui produit un type spécial de spore appelé ascospores.

Baside: C'est une capsule qui produit une sorte de spore appelées basidiospores.

Lectures utiles

Alexopoulos, C. J. and C. W. Mims. 1996. Introductory Mycology, 4th Ed.) J.W.

Deacon, J. W. 2005. Fungal Biology (4th ed). Malden, MA: Blackwell Publishers.

Hawksworth, D.L. (1974): Mycologist's Handbook. Kew: U.K., CAB International.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Fungus> 02/04/2007

<http://en.wikipedia.org/wiki/Ascomycota> 02/04/2007

<http://www.kcom.edu/faculty/chamberlain/Website/Lects/Fungi.htm> Lecturer notes on Fungi. consulté le 02/04/2007

<http://pathmicro.med.sc.edu/mycology/myucology-1.htm>. A book of Mycology. consulté le 02/04/2007



Lectures non obligatoires

Blake, L. et al., (2002): Biology 12. McGraw-Hill Ryerson Ltd.
Mader, S.S. 2004 Biology. McGraw-Hill Companies, Inc., 1221 Avenue of the Americas, NY 10020.

Liens utiles

<http://mycology.cornell.edu/fteach.html>
<http://pathmicro.med.sc.edu/mycology/mycology-1.htm>
A book of Mycology. Consulté le 02/04/2007

Description détaillée de l'activité d'apprentissage

Classification

Le terme mycologie est dérivé du grec myke qui signifie champignon, et logos qui signifie étude. Ainsi, mycologie signifie littéralement étude des champignons. Cependant, le terme est généralement utilisé pour désigner l'étude d'un groupe d'organismes appelés champignons. Les champignons sont supposés être monophylétiques et de provenir d'un ancêtre algoïde qui a perdu sa capacité de faire de la photosynthèse. Cependant, au fil du temps, la découverte de techniques moléculaires dans la détermination de liens entre les organismes a permis de découvrir que les champignons viennent d'un groupe polyphylétique d'organismes qui, dans certains cas, sont des parents très éloignés.

Ainsi les champignons ne sont pas regroupés parce qu'ils sont apparentés mais parce qu'ils partagent une combinaison de caractéristiques dont les grandes lignes seront données plus loin. Whittaker (1969) a proposé un système à cinq règnes qui est encore le système accepté de classification d'organismes. Il place les champignons dans un autre règne appelé «cinquième règne». Le règne des mycètes est divisé en myxomycètes, les myxomycoses et les eumycètes, les vrais champignons. Le plus récent système de classification basé en partie par les recherches moléculaires est résumé plus loin.

Phylum: Les Chytridiomycètes sont représentés par un groupe de champignons aquatiques primitifs qui comprend environ 800 espèces. Ils produisent des gamètes vagiles assistés par les flagelles. La paroi de leur alvéole est principalement en chitine. Ce groupe a été classé dans les Eumycètes après un travail moléculaire sur l'ADN ribosomique. Le phylum de Chytridiomycètes comprend la classe des Chytridiomycètes, les Chytridiales et les Blastocladales.



Phylum: Les Zygomycètes sont caractérisés par la formation de spores sexuées appelées zygospores. Ils résultent de la fertilisation entre deux noyaux haploïdes pour former un zygote diploïde. Le zygote subit immédiatement la méiose, formant des cellules haploïdes appelées zygospores. Les enveloppes extérieures de ces cellules sont différemment sculptées et se trouvent entre les bourgeons terminaux de l'hyphe mère. Deux classes sont reconnues dans ce phylum: Trichomycètes et Zygomycètes. Les espèces d'un zygomycète peuvent être déterminées à partir du type de zygospore produit. Un exemple de Zygomycète est la moisissure de pain, les *rhizopus nigricans*.

Phylum: Les Ascomycètes sont aussi appelés «champignons sacs» parce qu'ils ont des spores sexuées, les ascospores qui sont enfermées dans un sac qui a la forme d'un tube appelé asci. La formation d'ascospores est similaire à celle des zygospores, la seule différence est que les ascospores formées par méiose sont entassées dans l'asci. La *Neurospora crassa* est une moisissure ascomycète qui est largement utilisée dans l'étude de la génétique. Les Ascomycètes comprennent des ordres unicellulaires Saccharomycetales et Schizosaccharomycetales, les levures. Les ascomycètes filamenteux comprennent les ordres Eurotiales dont les organes de fructification sont les cléistothèces, les sordariales; les xylariales dont les organes de fructification sont les périthèces; les pezizales dont les organes de fructification sont les apothécies; et les dothideales dont les organes de fructification sont les ascostroma.

Phylum: Les basidiomycètes sont appelés «champignons club». Leurs spores sexuées, les basidiospores sont formées à partir des basides. Les basidiomycètes comprennent certains champignons dont l'agrégation de l'hyphe produit des champignons à structure visible à l'œil nu. Ces champignons sont de l'ordre des agaricales. Ce groupe comprend les Téléomycètes qui comprennent la rouille, et les Ustomycètes qui comprennent le charbon.

Phylum: Les Deutéromycètes sont aussi appelés «champignons imparfaits». Leur phase sexuée n'a pas encore été découverte. Lorsque la phase sexuée est découverte, les champignons sont retirés de ce groupe et classés dans le groupe des Ascomycètes. Les ordres de ce groupes sont les Moniliales dont les conidies viennent des conidiophores qui sont produits sur le mycélium (*Alternaria tenuis*), les Sphaeropsidales dont les conidies sont dans les conidiophores et sont produites en pycnide, les Melaconiales dont les conidies sont dans des conidiophores et sont produites en acervuli, les *Sterlia* qui produisent un mycélium stérile, et donc pas de conidie; mais d'autres structures mycéliennes doivent être utilisées pour leur propagation comme les *scelerotia*.

Phylum: Les lichens et les mycorhizes sont des exemples d'associations bénéfiques entre deux organismes différents. Pour les lichens il y a association entre les algues (autotrophes) et les champignons (hétérotrophes). Les algues donnent aux champignons une source de carbone tandis que les champignons donnent aux algues des nutriments provenant du substratum. Il en est de même pour la formation de mycorhizes, il y a association des champignons et des racines de plantes. Les champignons donnent aux racines des plantes les nutriments minéraux tandis que les plantes donnent aux champignons une source de carbone. C'est le mutualisme.

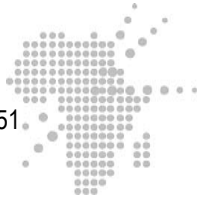


Structure

Deux formes structurales existent chez les champignons: la forme unicellulaire représentée par les cellules de levure et la structure à forme de filaments. Les filaments individuels sont appelés hyphes. Collectivement les hyphes sont appelés mycélium. Ce dernier est la phase végétative des champignons qui, subséquentement, donne naissance aux structures reproductives. Qu'ils soient sous forme de cellules de levure ou sous forme de filaments constitués en hyphes, les champignons ont des parois cellulaires externes poreuses et en chitine, tandis que les parois cellulaires des plantes sont en cellulose. À l'intérieur de la paroi cellulaire, il y a une membrane cellulaire spiralée afin d'augmenter l'aire de surface et permettre l'échange de matières. Ces structures sont appelées lomasomes. La membrane cellulaire encadre le cytoplasme qui suspend les organites caractéristiques à une cellule eucaryote. Ces organites sont: le noyau membranaire, l'appareil de Golgi, les réticula endoplasmiques, les ribosomes et les vésicules. Deux types d'hyphes sont représentés par différents groupes de champignons. Les champignons d'espèce inférieure n'ont pas de cloisons transversales appelées *septa* (septum au singulier). De tels hyphes sont dits non cloisonnés, et donc coenocytiques parce que leurs noyaux sont allongés dans un cytoplasme. Les hyphes de l'espèce supérieure de champignons ont des *septa* qui divisent les filaments tubulaires en compartiments. Cependant, les *septa* laissent un pore au centre à travers lequel le protoplasme peut couler. Chaque compartiment de l'hyphe contient un ou plusieurs noyaux. Les vacuoles sont caractéristiques d'anciens segments d'un hyphe.

Nutrition

Contrairement aux plantes, les champignons n'ont pas de chlorophylle permettant de fabriquer leurs aliments. Ils dépendent d'autres organismes pour leur source de carbone; ce sont des hétérotrophes qui peuvent être soit saprobiontes, symbiotes ou parasites. Comme **saprophytes**, ils obtiennent leur source de carbone d'autres organismes ou des tissus d'organismes morts comme matière organique. Lorsqu'ils sont **symbiotes**, les champignons vivent habituellement en symbiose avec un autre organisme différent. D'autres champignons sont **parasites**. Ces derniers trouvent leurs aliments du protoplasme d'un autre organisme appelé hôte. Les champignons ont un mode commun de nutrition qui implique un relâchement d'enzymes vers le substratum dans l'environnement. Le substrat est digéré à l'extérieur de la cellule, et l'absorption des produits (en forme de monomères) a lieu à travers la paroi cellulaire poreuse et la membrane sélectivement perméable pour, finalement, une assimilation par les cellules. Des enzymes de types variés sont produits selon le type de champignon et de la complexité du substrat. Un seul enzyme est nécessaire pour digérer par exemple un disaccharide, tandis qu'il faut deux enzymes pour diviser une molécule d'amidon en ses unités monomères. Il faut trois types d'enzymes pour digérer la cellulose cristalline. Cette sorte de digestion qui a lieu à l'extérieur de la cellule est appelée digestion extracellulaire. En plus de source de carbone, les champignons ont aussi besoin de nutriments minéraux comme suppléments à leur métabolisme, comme les organismes de haute espèce ont besoin d'azote, de potassium et de phosphore, etc.



Respiration

Les champignons transforment leur source de carbone pour produire de l'énergie pour le métabolisme dans la mitochondrie comme toutes les cellules eucaryotes, à travers les voies métaboliques suivantes: la glycolyse, le cycle de Krebs ; et la chaîne de transport électrique est la voie principale utilisée pour la production d'énergie cellulaire.

La croissance et le développement

Les champignons unicellulaires se reproduisent par scission binaire. Les champignons mycéliens se reproduisent par extension apicale. Le compartiment apical a une très mince paroi cellulaire à l'extrémité qui lui permet de s'étendre en longueur à l'aide de pression interne due à la turgescence cytoplasmique. Après l'atteinte d'un volume maximal, le compartiment apical subit une division nucléaire et cytoplasmique, ce qui donne naissance à deux compartiments.

Reproduction

Chez les champignons, la reproduction sexuée ou asexuée pourrait avoir lieu par production de spores souvent produites dans des structures spécialisées appelées conidiophores qui portent des conidies ou dans des sporanges qui contiennent des sporangiospores ou dans des organes de fructification à formes variées comme les asci qui contiennent des ascospores, ou les acervuli d'où naît une autre sorte de conidies. Les types de reproduction varient avec les types de champignons. Cependant, les champignons se reproduisent le plus souvent par reproduction asexuée soit par fragmentation de cellules, par scission binaire ou par bourgeonnement. L'autre méthode de reproduction chez les champignons est la reproduction parasexuée. Afin d'en apprendre plus sur les différentes méthodes de reproduction des champignons, consultez le site web donné pour les lectures obligatoires, vous y trouverez les cycles de vie des champignons représentatifs des différents groupes taxonomiques.

Importance

Les champignons sont importants en industrie alimentaire. Les champignons, structures macroscopiques des basidiomycètes, sont des délices dans beaucoup de pays. Des espèces variées dont le penicillium sont utilisées pour ajouter de la saveur au fromage. Le goût du fromage dépendrait donc de l'espèce de champignon dont le fromage est inoculé. La levure est aussi utilisée comme levain de pâte en cuisine et dans la fermentation de vin et de bière. Dans les systèmes écologiques, les champignons jouent un rôle important dans la décomposition des matières et des déchets organiques, et contribuent ainsi au recyclage de nutriments et à la dépollution des déchets. Ils sont aussi importants en recherche parce que plusieurs générations de champignons peuvent être produites en peu de temps. La médecine a énormément bénéficié de l'exploitation des champignons. Comme champignons mycorhiziens, ils vivent en symbiose avec les plantes; celles-ci apportent aux champignons une source de carbone tandis que ces derniers apportent aux plantes du phosphore.

Cependant, les champignons sont aussi nuisibles parce qu'ils causent des maladies aux plantes et aux animaux, et causent des pertes de profits estimées en milliards.



Un grand nombre de champignons causent diverses maladies aux plantes, mais peu d'espèces causent des maladies à l'Homme et aux animaux, et si c'est le cas, ils causent des maladies persistantes.

Activités d'apprentissage

Lectures

Alexopoulos, C. J. and C. W. Mims. 1996. *Introductory Mycology*, 4th Ed. Deacon, J.W. 2005. *Fungal Biology* (4th ed). Malden, MA: Blackwell Publishers.

Hawksworth, D.L. 1974. *Mycologist's Handbook*. Kew: U.K., CAB International. 8015iv.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Fungus>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Ascomycota>

<http://www.kcom.edu/faculty/chamberlain/Website/Lects/Fungi.htm> Lecture notes on Fungi. consulté le 02/04/2007).

<http://pathmicro.med.sc.edu/mycology/mycology-1.htm> A book of Mycology. consulté le 02/04/2007

Ces lectures vous donnent des informations sur les caractéristiques, la structure, la nutrition, la reproduction et l'importance économique des champignons. À partir de ces lectures, préparez des résumés sur:

1. les caractéristiques générales des champignons;
2. la structure mycélienne, l'organisation et la croissance;
3. les types de nutrition des champignons (le saprophytisme, le parasitisme, la symbiose);
4. les méthodes de reproduction (asexuée, sexuée, parasexuée);
5. les grandes divisions de champignons, les cycles de vie correspondant et les types de spores comme les ascospores, les basidiospores, les zygosporés et les oospores;
6. la méthode de collecte, de culture, de conservation et d'identification des champignons;
7. L'importance économique en recherche, et comme décomposeurs (maladies des plantes et des animaux, valeur nutritive, en médecine, en fermentation, en brasserie, en cuisine).



Travaux pratiques en laboratoire

Titre : La diversité et la morphologie des champignons

Vous devrez examiner les différents échantillons de divers groupes représentatifs de champignons.

Objectifs

À la fin de cet exercice pratique, l'apprenant devrait être en mesure de

1. comprendre la diversité des champignons;
2. comprendre la biologie des champignons;
3. comparer les sous-groupes des champignons en termes de structures physique et reproductive;
4. comprendre l'écologie des champignons.

Matériel

Les cultures fongiques sélectionnées (plaques), microscopes, lamelles couvre-objet, microplaquettes, échantillons de *saprolegnia*, de *rhizopus* ou de *mucor*, de *candida*, d'*agaricus* et de *phoma*, y compris les échantillons de lichens et de mycorhizes en forme de microplaquettes préparées.

Procédure

- examinez les groupes représentatifs pour les caractéristiques distinctives. Structures (conidiophores, sporanges, pycnides, ect.)
- examinez les champignons à structure visible qui poussent et trouvez les basides et les basidiospores.
- examinez les microplaquettes préparées de lichens et les mycorhizes. Trouvez les associations physiques entre les deux organismes différents vivant ensemble.

Rapport

Vous devrez suivre le format de rapport dont les grandes lignes ont été données à l'activité d'apprentissage numéro 1. Votre rapport devrait contenir (dans la section résultat) des images des échantillons observés.

Visites et études personnelles

Afin d'atteindre les objectifs de cette activité d'apprentissage, vous devrez organiser des visites individuelles ou en groupes à différents endroits où les champignons poussent. Vous pourrez ainsi apprendre leurs caractéristiques morphologiques, les groupes distinctifs et leurs environnements écologiques. Pour les applications biologiques, vous devrez visiter des institutions et des organismes qui étudient les champignons, comme des boulangeries; des usines de brasserie, de fabrication de fromage, et des centres de production de vin et de bioéthanol. Votre rapport devrait contenir les noms



des champignons communément utilisés, les méthodes d'exploitation des champignons et la méthode de conservation de l'inoculum, et pour chaque technologie, donnez la procédure utilisée pour obtenir les résultats requis. Racontez votre expérience sur la théorie contenue dans les notes et lectures.

Objectif

Après les visites, l'apprenant devrait être en mesure de

- faire état de son savoir théorique et de son expérience sur le terrain.

Procédure

Elle dépendra de l'objectif de la visite

Rapport

Vous devrez faire un rapport basé sur vos observations sur le terrain. S'il y a lieu, des méthodes spécifiques devraient être décrites.

Devoir

Comme expliqué à l'activité d'apprentissage numéro 1.

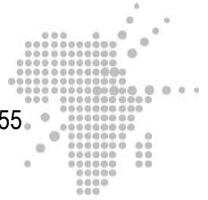
Exemples de devoir:

1. Question: Commentez l'importance économique des champignons. Donnez les aspects nuisibles et bénéfiques des champignons.

Aspects nuisibles:

Agents qui causent des maladies.

- Le *candida albican* est une levure qui attaque les membranes muqueuses causant des infections buccales ou vaginales appelées muguets ou candidoses. Il est aussi indexé pour les «allergies au levure».
- La dermatophytose (teigne ou favus) qui attaque le cuir chevelu, la peau (glabre) et les ongles est causée par un groupe de champignons appelés dermatophytes (ex: *trichophyton rubrum*, *T. interdigitale*, *Epidermophyton floccosum*).
- L'*aspergillus flavus* qui croît dans les arachides, par exemple, génère de l'aflatoxine qui endommage le foie, et est hautement cancérigène.
- La maladie hollandaise de l'orme est causée par le *ceratocystis ulmi* et est transmise par les coléoptères.
- Une maladie du maïs qui se caractérise par un enrroulement du feuillage est causée par le *cochliobolus heterophus*.
- La rouille brune qui est causée par *Puccinia graminis* détruit des tonnes de blé chaque année.
- L'*unicula necator* est responsable de la maladie du blanc des vignes.
- *Penicillium italicum* attaque les oranges.
- Certains champignons comme le *penicillium* et le *rhizopus* abîment les aliments stockés.



- L'ergot (*Claviceps purpurea*) qui attaque le blé et le seigle est, lorsque ces derniers sont consommés, une menace directe pour les hommes parce qu'il produit des alcaloïdes hautement toxiques et cancérigènes.
- Les champignons comme les *epidermophyton* causent des infections de la peau mais ne sont pas très dangereux pour des personnes ayant un bon système immunitaire. Cependant, si le système immunitaire est affaibli, ils peuvent être dangereux. Par exemple, le *pneumocystis jiroveci* est responsable d'infections sévères de poumons chez les sidéens.

Effets bénéfiques des champignons

Les champignons sont reconnus et utilisés en alimentation dans beaucoup de pays. La fermentation du sucre par les levures est la plus ancienne et grande application de cette technologie. Beaucoup de types de levure sont utilisés en alimentation: en boulangerie, dans la fermentation de la bière et du vin, etc.

- La moisissure *penicillium chrysogenum* (*Penicillium notafum*) produit un antibiotique appelé pénicilline qui a déclenché, au cours du siècle, une révolution dans le traitement d'infections bactériennes.
- Le *tolypocladium niveum* est un immunodépresseur qui secrète de la cyclosporine, un médicament administré pendant la transplantation d'organes pour prévenir le rejet, et aussi prescrit pour les maladies auto-immunes comme la sclérose en plaques.
- Les moisissures sont les plus utilisées en biologie génétique et cellulaire (Ex: la *neurospora crassa*). Certaines ont été utilisées pour la production de l'insuline humaine et de l'hormone de croissance humaine ainsi que pour la fabrication du vaccin de l'hépatite B.
- Les enzymes de *Penicillium camemberti* jouent un rôle dans la fabrication de fromage (par exemple le Camembert et le Brie), et les enzymes de *penicillium roqueforti* contribuent à la fabrication du fromage Gorgonzola, Roquefort et Stilton.

Exemples d'agents pathogènes chez les plantes, les animaux et les humains



- A. Le *septoria tritici* est un champignon qui cause ces symptômes chez les cultures de blé.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Septoria-tritici.jpg>

Consulté le 8/4/2008



- B. *L'entomophthora music* est un champignon qui croît à l'intérieur de l'insecte et qui le tue. Les entomophthorales constituent un ordre de champignons qui ont traditionnellement été classés parmi les zygomycètes. La plupart des espèces des *entomophthorales* causent des maladies aux insectes. Le nom « *entomophthorale* » vient du grec et signifie « destructeur d'insectes » (entomo: insecte, *phthor*: destructeur).

<http://en.wikipedia.org/wiki/Entomophthorales>
Consulté le 8/4/2008



- C. La teigne est une infection de la peau, elle n'est pas causée par une larve mais, par un champignon parasite (épidermomycose). Il peut vivre dans n'importe quelle partie du corps.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Ringworm> consulté le 8/4/2008



Exemples d'effets bénéfiques des champignons



A. Cuves de fermentation contenant les levures utilisées en brasserie de la bière.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Samadams2.jpg>

Consulté le 19/04/2007



B. Les aliments cuits au four

http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Baked_food.jpg

Consulté le 8/4/2008

Les microorganismes qui libèrent du dioxyde de carbone comme partie de leur cycle de vie sont utilisés comme levains. Une variété de levures est souvent utilisée (ex: la levure de boulanger). L'utilisation de levain est un processus basé sur la fermentation qui produit un changement dans la composition chimique de la pâte. La levure produit des dérivés comme l'éthanol et quelques produits d'autolyse qui contribuent à la saveur caractéristique du pain à la levure.

http://en.wikipedia.org/wiki/Leavening_agent#Biological_leaveners



2. Question: Donnez les grandes lignes de conditions de croissance des champignons.

Dans vos réponses, tenez compte de ce qui suit:

- Les champignons préfèrent un milieu humide, avec une humidité relative de plus de 70 % (-entre 6oC à 50oC, la température optimale étant entre 20 et 35oC). certains champignons peuvent vivre en environnements de source chaude.
- Les conditions de PH varient: entre 2,2 et 9,6 (PH optimum: 5,5);
- Ces conditions sont nécessaires pour le fonctionnement optimal d'enzymes extracellulaires et l'absorption de produits de digestion.
- La plupart de champignons ont besoin d'oxygène et sont de nature aérobie, mais d'autres champignons comme les levures peuvent vivre dans des conditions extrêmes. Les anaérobies n'ont pas besoin d'oxygène et sont utilisés dans la fermentation d'alcool.

3. Question: Les champignons causent des maladies aux humains, de quelle façon?

Pour vos réponses, tenez compte des éléments suivants:

Selon l'organisme, les champignons causent des maladies chez les humains de façons suivantes:

- comme réaction allergique aux spores fongiques lorsque ces dernières sont inhalées. Les cellules végétatives peuvent aussi causer des maladies comme le rhume des foins, l'asthme qui est une maladie du système respiratoire causée par des allergies et qui a comme symptômes la toux, une soudaine difficulté respiratoire et une sensation de lourdeur sur la poitrine;
- comme réactions aux toxines produites par quelques espèces de champignons (certains champignons produisent des toxines cancérigènes, par exemple l' *aspergillus* produit des aflatoxines; l'ergot est causé par le *claviceps purpurea*, etc.);
- la croissance de champignons sur ou dans le corps humain causant des maladies ou des mycoses appelées histoplasmosse, maladie grave des poumons causée par l'*histoplasma capsulatum*; la coccidioïdomycose, une maladie respiratoire chez les humains et les animaux domestiques causée par l'inhalation des spores d'un champignon appelé *Coccidioides immitis*; et la candidose causée par des levures appelées *candida albicans*;
- les champignons causent des maladies aux plantes, détruisant des tonnes de cultures chaque année. Une pénurie d'aliments dans un ménage peut entraîner la malnutrition.



4. Question: commentez les différentes sortes de relations symbiotiques que les champignons ont avec d'autres organismes. Expliquez comment ces relations sont bénéfiques pour chacun des partenaires.

Voici les deux types de ce genre de relations:

Le lichen

- C'est une association des champignons avec des organismes photosynthétiques comme les algues ou les cyanobactéries.
- Le champignon donne à l'autre organisme une protection et une plateforme de croissance.
- Le champignon fournit aussi de l'eau absorbée et des minéraux à l'autre organisme.
- Le membre photosynthétique fournit au champignon des nutriments organiques comme une source de carbone.

La mycorhize

- Ce sont des relations bénéfiques et mutuelles entre les champignons et les racines de certaines plantes.
- Les champignons augmentent la surface d'absorption de la racine, permettant ainsi une meilleure absorption du phosphate inorganique dans des sols pauvres en phosphate, permettant ainsi aux plantes partenaires de se développer dans des sols où ces plantes ne survivraient pas seules.
- Les champignons obtiennent à leur tour des nutriments organiques synthétisés de la plante partenaire.

Évaluation formative

1. Écrivez de courtes notes sur chacun des sujets suivants de la mycologie.
 - a. Paroi cellulaire en chitine.
 - b. Reproduction par bourgeonnement.
 - c. La reproduction parasexuée.
 - d. L'hétérocaryose.
2. Décrivez les caractéristiques générales
 - a. des levures
 - b. des champignons filamenteux.
3. Comparez les modes de nutrition
 - a. des champignons et des plantes
 - b. des champignons et des animaux



4. Décrivez la structure et la fonction de chacune des parties de champignon.
 - a. Extrémité hyphale.
 - b. Le stolon
 - c. Les rhizoïdes.
 - d. Le conidiophore.
5. Comparez l'ascocarpe de l'ascomycète et le basidiocarpe du basidiomycète.
6. Expliquez comment les spores asexuées suivantes sont produites
 - a. conidie
 - b. sporangiospores
 - c. pycnidiospores
7. Répondez brièvement aux questions suivantes:
 - a. Décrivez un lichen
 - b. Commentez la mycorhize
 - c. Expliquez la nature particulière du champignon imparfait.
 - d. Commentez le rôle des champignons dans un écosystème.
 - e. Comparez le rhizomorphe au filament mycélien.
8. Donnez les grandes lignes du cycle de vie du rhizopus.
9. Cherchez sur internet des images d'une variété de champignons. Donnez une brève description taxonomique sous chaque image d'organisme représentatif de chaque groupe de champignons suivants:
 - a. Chytridiomycètes
 - b. Zygomycètes
 - c. Ascomycètes
 - d. Basidiomycètes
 - e. Deutéromycètes.
10. Commentez le fait que les champignons soient à la fois bénéfiques et nuisibles.



XI. Glossaire des concepts clés

SPORANGE: capsule faite de filaments fongiques entremêlés qui contiennent des sporangiospores.

ASCI: capsule qui produit un type spécial de spores appelées ascospores.

BASIDE: capsule qui produit un type de spores appelées basidiospores.

THALLUS: organisme dont on ne peut distinguer les racines.

TECHNIQUE ASEPTIQUE: procédures utilisées pour prévenir la contamination par les microorganismes.

BACTERIOLOGIE: branche de microbiologie qui étudie les bactéries.

BACTÉRIOPHAGE: virus qui infecte les bactéries.

BRADIZOÏTE: phase du cycle de vie des Protozoaires de la famille des *Sarcocystidae*.

CHEMOSTAT: outil utilisé lors de la culture en continu des bactéries afin de maintenir leur population à une densité constante; et cette situation est très similaire à la croissance des bactéries dans leur environnement naturel.

CONJUGAISON : méthode de reproduction chez un organisme monocellulaire selon lequel une cellule passe l'ADN à une autre à travers un tube de conjugaison appelé fibrille sexuelle qui joint temporairement les deux cellules. La contamination de cultures ou milieux stériles, et la propagation de microorganismes dans un environnement.

EFFET CYTOPATHOLOGIQUE: Changements de l'apparence des cellules de culture tissulaire lorsque ces dernières sont attaquées par des virus.

DICARIOTIQUE: hyphe qui contient des noyaux haploïdes jumelés.

DIOÏQUE: espèces de champignons qui produisent des organes sexuels mâles dans des thalli séparés.

ENDOSPORES: structures dormantes très résistantes formées par un certain genre de bactéries gram-positives comme les bacilles et les clostridium.

GAMÉTANGE: organe ou cellule trouvée chez certains champignons multicellulaires dans lesquels les gamètes (pour les mâles: anthéridie, pour les femelles: oogone) sont produits.

GAMETOCYTE: phase de cycle de vie de certains Protozoaires (Apicomplexes), qui est destinée à devenir gamète (macro ou micro).

HÉTÉROCARYOSE: terme utilisé en mycologie pour désigner plusieurs noyaux génétiquement différents à l'intérieur d'un même mycélium de champignon.



HYPERPLASIE: division cellulaire excessive ou développement de cellules anormalement grandes résultant de la production de zones gonflées ou déformées de l'organisme. *Sarcocystidae*: coccidies formant des kystes tissulaires. Tige et feuilles.

HYPHE: longue cellule filamenteuse de champignon, constituant la plus grande partie végétative d'un champignon.

MEROGONIE (SCHIZOGONIE): type de reproduction asexuelle chez le phylum Apicomplexe dans lequel une cellule subit plusieurs divisions nucléaires avant que le cytoplasme se divise à leur proximité pour former des cellules individuelles parentes. Le parasite de la malaria se reproduit rapidement dans les tissus de son hôte de cette façon.

MICROSCOPIE: Toute technique de production d'images visibles de structures ou de détails trop petits pour être vus à l'œil nu humain.

MONOÏQUE: espèces de champignons qui produisent des organes sexuels mâles et femelles dans le même thalle, assumant ainsi une condition hermaphrodite.

MYCELIUM: nombreux hyphes qui forment le corps végétatif d'un champignon capable de se nourrir et de se reproduire.

MYCOLOGIE: branche de la biologie qui se spécialise dans l'étude des champignons.

NUCLÉOCAPSIDE: capsid virale qui contient de l'acide nucléique.

PLASMIDES: Petites quantités d'ADN circulaire que contiennent des cellules de bactéries. Les plasmides contiennent des gènes de résistance aux antibiotiques. Ils sont capables de faire une répllication indépendante.

PROTOZOLOGIE : branche de biologie qui étudie les Protozoaires.

PSEUDOPODIA: infrastructure complexe de microtubules, de microfilaments et d'autres organites associés à la protrusion cytoplasmique utilisée pour la locomotion et/ou l'alimentation des Protozoaires.

SPORE: cellule reproductrice qui se développe dans un nouvel organisme sans fusion avec une autre cellule reproductrice.

TITRE: Le titre d'un virus ou «effet» est la dilution à laquelle 50% des hôtes inoculés sont infectés (dose infectieuse 50%) ou tués (dose létale 50%).

TROPHOZOÏTE: phase de développement de protozoaires dans lequel l'organisme est dit mature et donc actif et en mesure de se nourrir.

VIRION: particule de virus lorsqu'il se trouve à l'extérieur de ses cellules hôtes; le virion consiste en ADN ou ARN enveloppé d'une couche protectrice appelée capsid.



XII. Lectures obligatoires

Lecture obligatoire # 1

Titre: Microscopie

URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Microscopy>

Résumé: vous trouverez par ce lien une description détaillée de techniques de microscopie optique comme le fond clair, l'éclairage oblique, le fond sombre, le contraste de phase, le contraste interférentiel différentiel, et d'autres informations y relatives. Il y a aussi une description d'autres types de microscopie comme des microscopes électroniques et des microscopes-sonde à balayage.

Importance: Les microbes sont trop petits pour être vus à l'œil nu. Ainsi, l'étude des microbes exige une connaissance de l'utilisation du microscope ou autres outils d'agrandissement afin d'apprécier le monde des microbes.

Lecture obligatoire # 2

Titre: Microbiologie et bactériologie

URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Bacteria>

Résumé: Vous trouverez sur ce lien un manuel en ligne qui porte sur les différents aspects de la biologie des bactéries. Le manuel comprend des sujets sur la classification, l'identification et l'importance des microbes en biotechnologie et en industrie.

Importance: grâce à ce lien, vous en apprendrez sur la découverte, la diversité et la biologie des bactéries. Les connaissances acquises vous permettront de rationaliser le rôle des bactéries en environnement et en industrie.

Lecture obligatoire # 3

Titre: Microbiologie

URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Bacterial_growth

http://en.wikipedia.org/wiki/Microbial_metabolism

Description: Ces liens vous donneront accès à un livre de microbiologie en ligne. À partir de la table des matières, vous pourrez acquérir des connaissances sur trois sujets importants en bactériologie comme

- a. la croissance des bactéries: http://en.wikipedia.org/wiki/Bacterial_growth



- b. La nutrition des bactéries (sources d'énergie, azote, carbone, oxygène, etc.)
- c. Les conditions environnementales chez les microbes.

Importance: Les liens vous aideront à atteindre une partie des objectifs d'apprentissage du module au sujet de la nutrition, la croissance et les conditions environnementales pour la croissance des bactéries.

Lecture obligatoire # 4

Titre: Techniques de laboratoire

URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Category:Laboratory_techniques

Résumé: Ce site web vous donnera accès à une liste de techniques de laboratoire qui sont généralement utilisées en microbiologie. Cliquez sur la technique que vous voulez voir, et le site web vous donnera le lien où sont donnés les détails de cette technique.

Importance: La culture en laboratoire est un préalable à l'étude efficace des microorganismes; et pour accomplir cette culture, on doit connaître quelques techniques, particulièrement celles qui permettront à l'apprenant d'étudier et de manipuler les microorganismes en laboratoire, hors de leur habitat naturel.

Lecture obligatoire # 5

Titre: Virus

URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Virus#Discovery>

Résumé: Ce lien présente un autre groupe de microbes, les virus. Il donne une documentation de base sur les virus, décrivant leur découverte, origines, classification, structure, répllication, formes de vie, maladies et épidémies qu'ils causent, dépistage, purification et diagnostic, prévention et traitement, potentiel d'utilisation en traitement et ses applications.

Lecture obligatoire # 6

Titre: Protozoaires

URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Protozoa>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Flagellate>

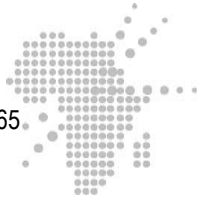
<http://en.wikipedia.org/wiki/Amoeboid>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Sporozoans>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Coccidia>

<http://www.tulane.edu/~wiser/protozoology/notes/intes.html>

Résumé: Ces sites web devraient être tous lus afin d'avoir une vue d'ensemble sur les



Protozoaires. Chaque site web porte sur la classification d'un groupe spécifique de Protozoaires et la description de leur biologie. Le site web porte aussi sur l'importance des Protozoaires, mettant en évidence leurs effets médicaux sur la santé humaine.

Importance: La morphologie et la structure des Protozoaires sont bien illustrées, ce qui rend le texte descriptif facile à comprendre. Les cycles de vie de certains Protozoaires sont amplement illustrés par le site web qui suit:

<http://www.tulane.edu/~wiser/protozoology/notes/intes.html>

Lecture obligatoire # 7

Titre: Les champignons

URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Fungus>

Résumé: Le lien contient l'essentiel sur les champignons, leurs caractéristiques (morphologie, spores, etc.), des documents sur les fossiles et les relations phylogénétiques. Le lien contient aussi des descriptions détaillées de chacun des grands groupes de champignons.

Importance: Le lien renvoie à un texte qui fait une bonne présentation de l'étude des champignons. Il présente aussi la dernière classification des champignons basée sur l'approche moléculaire.



XIII. Ressources non obligatoires

Ressource # 1

Titre: Le grand livre d'images de virus

URL: http://www.virology.net/Big_Virology/BVHomePage.html

Résumé: Ce lien vous donne accès à un livre d'images de virus qui sert aussi bien comme catalogue d'images de virus sur Internet que de ressource éducatif pour ceux qui veulent en savoir plus sur les virus. Il est aussi lié à d'autres cours et tutoriels de virologie en ligne.

Importance: Le lien contient beaucoup de matières sur la structure des virus et leurs regroupements taxonomiques. Une grande variété de sources est donnée dans ce livre.



XIV. Liens utiles

Lien utile # 1

Titre: Livre en ligne de Todar sur la bactériologie

URL: <http://www.textbookofbacteriology.net/>

Résumé: Ce lien vous donne accès à un livre en ligne qui porte sur la microbiologie générale. Il porte aussi sur des aspects pertinents de la bactériologie médicale avec des échantillons spécifiques d'agents pathogènes.

Importance: Il est important d'élargir vos horizons en microbiologie en lisant un livre qui aiguisé vos connaissances en microbiologie.

Lien utile # 2

Titre: Techniques de bactériologie

URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Category:Bacteriology_techniques

Résumé: Ce lien vous donnera accès à une liste de techniques bactériologiques qui sont généralement utilisées. Cliquez sur la technique que vous voulez voir, et vous trouverez le site qui donne des détails sur cette technique.

Importance: La culture en laboratoire est un préalable à l'étude efficace des microorganismes; et pour accomplir cette culture, on doit connaître quelques techniques, particulièrement celles qui permettront à l'apprenant d'étudier et de manipuler les microorganismes en laboratoire.

Lien utile # 3

Titre: Malaria

URL: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs094/en/>

Résumé: C'est un site de l'Organisation Mondiale de la Santé qui contient de l'information actualisée sur la malaria. On y trouve une définition de la malaria, la situation en Afrique, ses effets pendant la grossesse, les traitements et les coûts économiques causés par la malaria.

Importance: Vous auriez remarqué que les parasites protozoaires sont capables de survivre et de se reproduire dans presque toutes les espèces animales. Ainsi, les Protozoaires forment un groupe de microorganismes qui ont développé des relations complexes et intégrées avec leurs hôtes. L'étude du plasmodium qui cause la malaria en est un exemple.



Lien utile # 4

Titre: Microbiologie et immunologie

URL: <http://pathmicro.med.sc.edu/mycology/mycology-1.htm>

Résumé: Le lien contient de la matière d'un cours de l'*University of South Carolina School of Medicine* (Études médicales de l'Université de la Caroline du Sud). Le premier chapitre de ce cours de mycologie porte sur la classification des champignons, leur morphologie, l'importance des maladies qu'ils causent dont le diagnostic et le traitement.

Importance: La connaissance des champignons, en tant qu'organismes qui affectent la vie humaine, est importante parce qu'elle permet de comprendre les effets négatifs des champignons sur la santé humaine, et leurs effets sur l'économie nationale. Ainsi, la connaissance de certaines infections fongiques en termes de leur étiologie, pathologie, diagnostic et traitement est nécessaire pour l'étude de la mycologie.

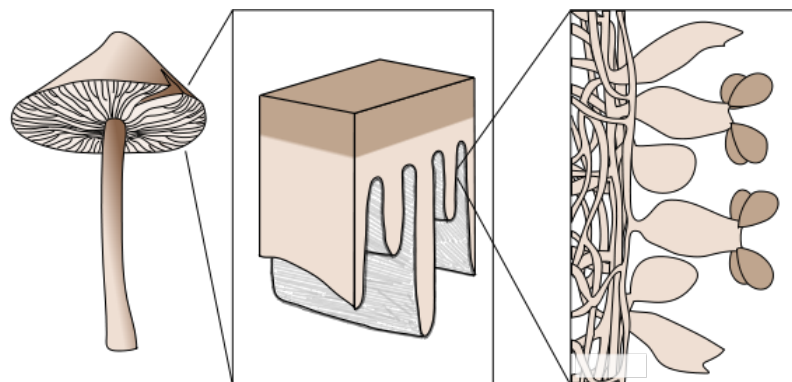
Lien utile # 5

Titre: Ressources mycologiques sur Internet: Ressources pour l'enseignement

URL: <http://mycology.cornell.edu/fteach.html>

Résumé: C'est une source très riche de différents aspects de la mycologie. Le lien porte sur des sujets variés. Vous devrez identifier un sujet particulier et l'étudier grâce aux liens donnés.

Importance: Il est important de connaître la classification des champignons, leur structure et les types d'association, la reproduction, les exigences écologiques et leur utilité. Des liens variés traitent de ces derniers aspects y compris la culture des champignons.



Représentation schématique de la base, de la famille des basidiomycètes.

http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Basidium_schematic.svg

Consulté le 8/4/2008



XV. Synthèse du module

Le module porte sur les microbes. Ces derniers sont tellement petits qu'on doit utiliser un microscope pour les voir. L'étude de ces organismes s'appelle microbiologie. Il comprend des organismes comme les bactéries, les protozoaires et les champignons. Bien que les virus ne soient pas des organismes, mais des matières qui deviennent actifs une fois à l'intérieur d'une cellule hôte, ils sont aussi considérés comme des microbes pour des raisons pratiques. Les microorganismes sont importants pour les humains parce qu'ils ont des effets directs sur les animaux, les humains, les plantes, la production d'aliments et de boissons. Ils maintiennent aussi l'écosystème dans un état stable. Ainsi, la connaissance de leur biologie est utile pour les exploiter et les contrôler efficacement. La biologie des organismes comprend leur morphologie et structure, leur croissance et développement, leur nutrition, leur respiration et leur reproduction. Il est aussi important d'étudier leur taxonomie et d'être en mesure de les identifier. Afin d'étudier un microorganisme, il est important de se familiariser avec la technique aseptique et d'être en mesure de préparer un milieu de croissance dans lequel on cultivera les organismes.



XVI. Évaluation sommative

Comme il est exigé pour l'accomplissement de ce module, vous passerez un examen qui consiste en questions variées. Les questions sont destinées à tester vos capacités de rappel du contenu du module; votre compréhension des différents concepts ainsi que vos capacités d'analyse de différentes données, de leur évaluation et de leur application. La forme des questions varie. Il y aura quelques questions de choix multiples, des questions auxquelles vous devrez répondre brièvement et d'autres questions descriptives et explicatives de concepts. Voici un modèle de questions qui pourraient être posées.

1. Lesquelles de ces types de cellules ne sont pas des microorganismes?
 - A. globules rouges
 - B. protozoaires
 - C. levures
 - D. archaebactéries
2. La croissance de moisissure est favorisée par
 - A. l'état de l'acidité
 - B. les conditions aérobies
 - C. l'humidité
 - D. toutes ces réponses
3. La levure de bière et de boulanger est importante pour
 - A. les brasseries commerciales
 - B. le levain du pain
 - C. les expériences dans le projet de génome humain
 - D. la production d'acide
4. Les «cellules au repos» hautement résistantes produites par les bacilles et le clostridium sont appelées
 - A. spores reproductives
 - B. graines
 - C. endospores
 - D. cellules végétatives
5. La matière génétique des bactéries est composée de
 - A. ATP
 - B. ADN
 - C. ribosomes
 - D. protéines



6. Donnez la signification des termes suivants:
 - A. trophozoïte
 - B. chémostat
 - C. capsid
 - D. mérozoïte
 - E. anthéridie
7. Répondez brièvement aux questions suivantes:
 - A. Décrivez les deux mécanismes de base qui produisent des changements génétiques chez les bactéries.
 - B. Donnez une liste des trois morphologies cellulaires les plus communes dans l'importance clinique des bactéries.
 - C. Expliquez l'importance économique des protozoaires.
 - D. Expliquez le mode de nutrition des champignons.
 - E. Donnez les caractéristiques communes à tous les virus.
8. Comparez les termes suivants:
 - A. cellules eucaryotes et procaryotes.
 - B. Lichens et mycorhizes.
 - C. Conditions hétérocaryoses et dicariotiques.
 - D. L'importance des protozoaires et celle des virus.
9. Faites la classification des Protozoaires.
 En dessous de chaque catégorie, indiquez les caractéristiques particulières à chaque groupe d'organismes.
10. Donnez les grandes étapes du cycle de vie lytique de virus en utilisant l'exemple de bactériophage.
 Donnez une explication pour chaque étape citée.
11. Dessinez la structure de l'Escherichia coli.
 Décrivez le contenu cytoplasmique d'une cellule.
12. Donnez les grandes caractéristiques de la subdivision de champignons suivants: les Basidiomycètes, les Ascomycètes, les Oomycètes et les Deutéromycètes.
13. Expliquez les étapes de la réplication de l'ADN adénovirus.
14. Décrivez la classification des Protozoaires.
 Identifiez le genre de protozoaire qui cause des maladies.
 Donnez une liste d'agents pathogènes dans chaque cas.
15. Expliquez l'importance économique des champignons en écosystème.



XVII. Références bibliographiques

- Albach, R.A. and Booden, T. 1978. Amoebae. In: *Parasitic Protozoa, Vol II* (ed. J.P. Kriep). Academic Press. London.
- Alexopoulos, C. J and Mims, C. W. 1996. *Introductory Mycology*, 4th Ed.
- Carroll, G.C. and Wicklow, D.T. 1992. *The Fungal Community: Its Organization and Role in the Ecosystem*. Marcel Dekker, Inc., N.Y.
- Cox, F. E. G. 2001. *Modern parasitology*. Blackwell Sciences.
- Curd, C.R. 1992. *Protozoa and the water industry*. Cambridge University Press, MA.
- Deacon, J.W. (2005). *Fungal Biology* (4th ed). Malden, MA: Blackwell Publishers.
- Frobisher, M., Hinsdill R. D., K., Crabtree T. and Goodheart, C.R. 1974. *Fundamentals of Microbiology*. Ninth Edition. Philadelphia: Saunders College Publishing.
- Frobisher, M., Hinsdill, R.D., Crabtree, K.T. and Goodheart, C.R. 1974. *Fundamentals of Microbiology*. Saunders College Publishing, West Washington Square, Philadelphia, PA 19105.
- Gelderblom, H.R. 1996. *Structure and Classification of Viruses in Medical Microbiology*. Samuel Baron ed. University of Texas Medical Branch at Galveston.
- Harkonen, M., Niemella, T. and Mwasumbi, L. 2003. *Tanzanian Mushrooms. Edible, harmful and other fungi*. Botanical Museum, Finnish Museum of Natural History, Helsinki.
- Isaac, S., Frankland, J.C., Watling, R. and Whalley, A.J.S. 1993. *Aspects of Tropical Mycology*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Mader, S.S. 2004. *Biology*. McGraw-Hill Companies, Inc.. 1221. Avenue of the Americas, NY 10020.
- Michael M., John M. 2006. *Brock Biology of Microorganisms*, 11th ed., Prentice Hall.
- Nester, E.W., Anderson, D.G., Roberts, E.C. (Jr), Pearsall, N.N. and Nester, M.T. 2001. *Microbiology: A Human Perspective*. McGraw-Hill Companies, Inc.
- Radetsky, P. 1994. *The Invisible Invaders: Viruses and the Scientists Who Pursue Them*. Backbay Books.



XVIII. Auteur principal du module

Prof Jassiel Nyengani Zulu

Adresse e-mail: jassielzulu@yahoo.co.uk

Professeur Jassiel Nyengani Zulu est zambien et a fait ses études universitaires à L'université *Imperial college London* (Université Impériale de Londres) d'où il est sorti docteur en phytopathologie en 1978. Il est chargé de cours à l'University of Zambia (Université de Zambie) où il a enseigné l'écologie, la biologie végétale, la mycologie et la phytopathologie au premier cycle. Il forme aussi des étudiants de 2^e et 3^e cycles depuis 1978. Il a aussi fait la révision des programmes à tous les niveaux. Il a aussi été affecté à divers postes administratifs de l'Université comme vice-doyen, chef de département de sciences biologiques au *School of Natural Sciences* (École des Sciences Naturelles) et par intermittence comme doyen de cette dernière. Actuellement, il est professeur agrégé de sciences biologiques.

Auteur subsidiaire du module

Dr. Modest Diamond Varisanga

Adresse e-mail: Varisangamd@hotmail.com
varisangamd@yahoo.com

Dr. Modest Diamond Varisanga est tanzanien a obtenu un doctorat en biotechnologie en 2001 en plus de sa spécialisation en médecine vétérinaire obtenue en 1993. Il est professeur titulaire, examinateur et coordinateur en zoologie à la faculté de sciences, technologie et études environnementales à l'*Open University* de Tanzanie (Université ouverte de Tanzanie)

MICROBIOLOGIE ET MYCOLOGIE

Lectures Obligatoires

Source: [Wikipedia.org](https://www.wikipedia.org)

Table des matières

Mycologie	5
Histoire de la mycologie	5
Taxinomie et Systématique des champignons	6
Rangs taxinomiques des champignons	7
Taxinomie	8
Un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre.	8
Étymologie	9
Différences entre taxinomie et systématique	9
Historique de la taxinomie	9
Origine et évolution des modèles	10
Tendance et prospective	11
La notion d'espèce	12
Binôme latin	12
Citation d'auteurs	13
Homonymie	13
Informatique	13
Sciences humaines	13
Microbiologie	13
Historique	14
Classification	14
Caractéristiques	15
Les procaryotes	15
Les eucaryotes	16
La taille des micro-organismes	17
La culture des micro-organismes	18
Richesse du milieu	18
Diversité du milieu de culture	19
La stérilisation	20
La chaleur	20
La filtration	21
Radiation et agent chimique	21

Notion de culture pure	22
Technique des stries	22
Technique de suspension dilution	22
Identification des bactéries	22
Critères morphologiques	22
Critères biochimiques	24
Critères génétiques	24
Systématique bactérienne	25
Les agents antibactériens	26
Les agents physiques	26
Les agents chimiques	26
Les antibiotiques	26
Les résistances aux antibiotiques	27
La croissance bactérienne	27
Diauxie	27
Micro-organisme	28
Histoire et évolution	29
Découverte	30
Habitats	30
Importance	30
Maladies et immunologie	30
Besoins des micro-organismes	31
Recherche sur les espèces <i>extrêmophiles</i>	32
Extrêmophile	32
Différents types d'extrêmophiles	33
Intérêt de l'étude des extrêmophiles	34
Quelques exemples d'extrêmophiles	34
Extrêmophilie polaire	35
Bacteria	35
Histoire	36
Structure cellulaire	37
Intracellulaire	38

Extracellulaire	38
Endospores	39
Croissance et reproduction	40
La division cellulaire	40
Croissance et culture des bactéries	40
Paramètres influant sur la croissance microbienne	41
Génétique	42
Matériel génétique	42
Variation génétique	42
Morphologie et association des bactéries	43
Mobilité des bactéries	45
Métabolisme	47
Bactéries et écosystème	49
Écosystème aquatique	49
Bactérie du sol	49
Environnements extrêmes	50
Interactions avec d'autres organismes	50
Mutualistes	50
Pathogènes	51
pour l'Homme	51
pour les plantes	52
Importance des bactéries dans l'industrie et les technologies	52
Classification et Identification	53
Classification phénotypique	54
Chimiotaxonomie	54
Classification moléculaire	54
Identification des espèces bactériennes	55
Anecdotes	56
Les plus anciennes bactéries en vie	56
Recherche de bactéries extraterrestres	56

Mycologie

La **mycologie** (du grec ancien *μύκης*; « champignon ») est la science étudiant les champignons. Assez proche de la botanique qui étudie les plantes, elle englobe traditionnellement l'étude des myxomycètes, bien qu'il s'agisse d'organismes n'ayant pas la même structure que les champignons (récemment sortis du règne des champignons car ils n'ont pas de paroi cellulaire). De même les Oomycètes, bien qu'à présent rattachés aux Straménopiles, sont toujours étudiés par les mycologues.

Histoire de la mycologie □



Elias Magnus Fries

Les anciens n'ont laissé aucun document vraiment scientifique concernant les champignons et deux auteurs seulement méritent d'être mentionnés : Pline l'Ancien pour son *Historia naturalis* et Dioscoride pour les usages thérapeutiques de quelques champignons dans *De re medica*. Ces textes, ne mentionnant qu'une vingtaine d'espèces n'ont toutefois qu'un intérêt archéologique, hormis d'avoir légué à la science des mots comme *Myco*, *Amanita*, *Boletus* ou *Tuber*.

L'étude des champignons remonte sans doute au XVI^e siècle avec la classification publiée en (1526) par l'humaniste italien Hermolaus (1454-1493)^[1], puis les œuvres de botanistes qui, comme Matthioli (1569), s'appliquèrent à commenter Dioscoride. En 1564, Junius^[2] décrit *Phallus impudicus* récolté en Hollande, Solenander (1524-1601 Reiner Solenander) décrit *Fistulina hepatica* (langue de bœuf) en Allemagne et l'académicien italien Fabi Columna^[3] (1599) décrit et illustre le Clathre grillagé *Clathrus cancellatus*. En 1592, l'Italien Porta^[4] est le

premier à oser affirmer que les champignons se reproduisent par des *semences*. Puis Clusius (1526-1609) fait peindre 86 aquarelles représentant 42 espèces de champignons comestibles répartis en 22 genres, 58 espèces de champignons vénéneux en 25 genres et 5 espèces nouvelles. Au total 105 espèces dont 6 amanites, 9 russules, 7 lactaires, 12 tricholomes et 14 bolets. Telle est la base de la mycologie.

L'étude scientifique des champignons débute avec le Suédois Linné (1707-1778) et son ouvrage *Species plantarum* (1753), encore que les champignons n'y occupent pas une place vraiment séparée du reste des plantes. C'est le botaniste français Paulet (1740-1826) qui le premier a proposé (en 1795) le mot « **mycologie** » pour désigner la science étudiant les champignons (terme qui s'imposa devant *fungologie*).

Le premier ouvrage exclusivement consacré aux champignons a été publié en 1801 par le Sud-africain Persoon (1755-1837) (*Synopsis methodica fungorum*), mais on retiendra surtout le travail d'un autre Suédois, Fries (1794-1878), qui publia les trois volumes de son *Systema Mycologicum* entre 1821 et 1832 ; puis le travail de l'Italien Saccardo (1845-1920) qui publia un monumental ouvrage de classification à la fin du XIX^e siècle *Sylloge fungorum omnium hucusque cognitorum*.

Le travail important des mycologues et des botanistes du XIX^e siècle aboutit au Code international de nomenclature botanique (CINB), créé à Vienne en 1905 et qui fait toujours jurisprudence. On remarquera que, même si les champignons constituent aujourd'hui un règne du vivant séparé de celui des plantes, on continue de leur appliquer la nomenclature botanique.

Taxinomie et Systématique des champignons □



Régis Courtecuisse

La taxinomie est la science qui a pour objet de décrire et de définir les unes par rapport aux autres les espèces vivantes, et de les regrouper en entités appelées taxons, genres, tribus, familles, etc., afin de pouvoir les nommer (voir nomenclature) et les classer (voir systématique et classification scientifique).

La systématique est la science qui a pour objet de dénombrer et de classer les taxons dans un certain ordre, selon des principes divers. Elle est encore souvent un peu sous-estimée, passant pour être la plus simple, n'ayant longtemps exigé que peu de moyens d'investigations.

Ceci est encore plus vrai pour la systématique mycologique qui se trouve privée d'un grand nombre des moyens qui ont permis aux autres branches de l'histoire naturelle de faire des progrès rapides. Les champignons étant de poussée capricieuse et éphémère, leur récolte reste soumise au hasard, nécessitant de nombreuses visites infructueuses. De plus, ils exigent l'observation *in vivo* car beaucoup de caractères essentiels disparaissent. Enfin, très peu d'espèces peuvent être cultivées pour observer leur croissance en culture pure, ou tenter des fécondations expérimentales instructives. Il faut donc en moyenne une quinzaine d'années pour pouvoir étudier vivantes la plupart des espèces d'un genre donné.

Voir les pages:

- Classification systématique des champignons
- Classification phylogénétique des champignons

Rangs taxinomiques des champignons □

La taxinomie des champignons est soumise à une hiérarchie similaire à celle des plantes, les divers suffixes utilisés permettant de visualiser les rangs taxinomiques de cette hiérarchie. Sachant que le sommet de la hiérarchie est le **domaine** (en l'occurrence, celui des Eucaryotes ou *Eukaryota*), suivi du **règne** (ici les *Fungi* ou champignons), le reste de la nomenclature se fait selon les terminaisons latines suivantes :

- *-mycota* : division (ou embranchement);
- *-mycotina* : subdivision (sous-embranchement);
- *-mycetes* : classe;
- *-mycetidae* : sous-classe;
- *-ales* : ordre;
- *-ineae* : sous-ordre;
- *-aceae* : famille;
- *-oideae* : sous-famille;
- *-ieae* : tribu;
- *-inae* : sous-tribu (les notions de tribu et sous-tribu sont rarement utilisées).

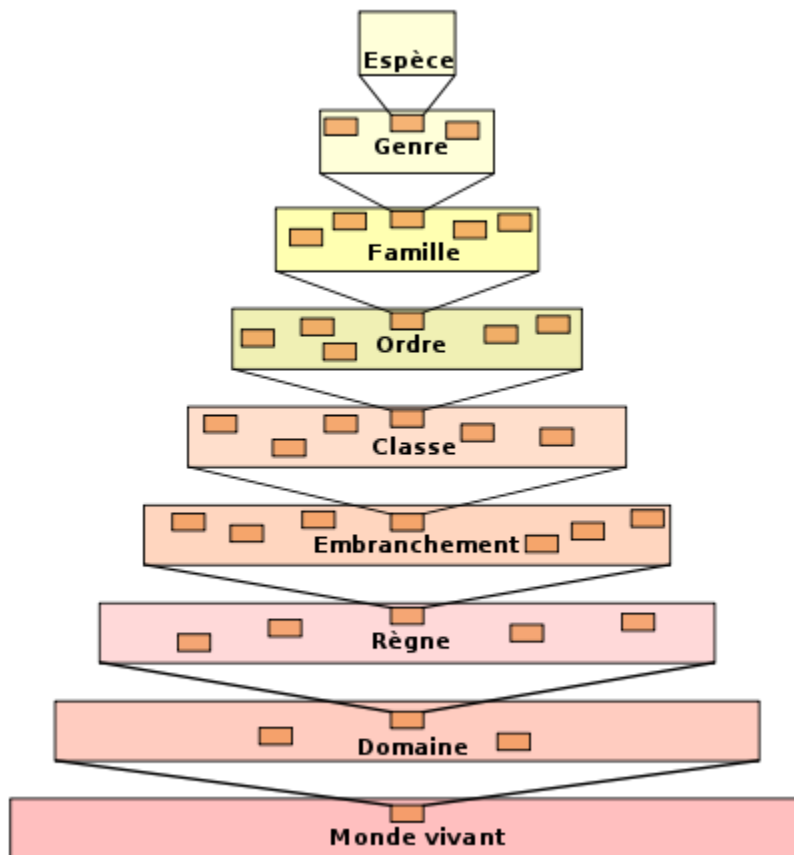
Suivent le genre (éventuellement divisé en sous-genres, sections, sous-sections, séries et sous-séries) et l'espèce (divisions possibles : sous-espèce, variété, sous-variété, forme, subforme, forme spéciale, race), le tout permettant de définir un individu.

Si l'ensemble des taxons est clairement défini, ce que l'on met dedans l'est beaucoup moins, d'autant que les études sur l'ADN entraînent de profonds bouleversements. À titre d'exemple, on précisera que, jusque dans les années 1990, on classait les champignons en quatre divisions : Gymnomycètes, Deutéromycètes, Mastigomycètes, Amastigomycètes. Aujourd'hui, il y a

toujours quatre divisions, mais ce ne sont plus les mêmes : Chytridiomycètes, Zygomycètes, Ascomycètes, Basidiomycètes.

Taxinomie

Un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre.



La classification hiérarchique du vivant regroupe les êtres vivants dans des groupes de plus en plus vastes.

La **taxinomie** (ou **taxonomie**) est la science qui a pour objet de décrire les *organismes vivants* et de les regrouper en entités appelées taxons afin de les identifier puis les nommer, et enfin les classer. Elle complète la systématique qui est la science qui organise le classement des taxons et leur relations. Parmi ces méthodes, les plus récentes incluent une nouvelle approche conceptuelle de la classification mais aussi des méthodes d'analyse d'éléments empiriques restés longtemps ignorés de la science avant l'arrivée, au cours de la seconde moitié du XX^e siècle, des découvertes de la biologie moléculaire.

La taxinomie s'étend maintenant à d'autres sciences, entre autres les sciences humaines, les sciences de l'information ou l'informatique^[1].

Émile Littré, dans son Dictionnaire de la langue française (version 1872-1877) précisait que le mot « *taxinomie* » pouvait aussi être utilisé, et l'usage du terme « *taxonomie* », formé sur *taxon* au lieu de *taxis* est très répandu. Ce mot aurait été créé par le botaniste suisse A. P. de Candolle, dans son *Traité élémentaire de la botanique* publié en 1813^[2]. Pour le TLFI : « l'Académie des Sciences déconseille l'anglicisme taxonomie ». Le *Grand dictionnaire terminologique* confirme que taxinomie est recommandé par plusieurs auteurs considérant « taxonomie » comme « un calque de l'anglais *taxonomy* ». Cependant la plupart des dictionnaires anglais affirment que le mot *taxonomy* dérive du français^[3]

Étymologie □

Le mot *taxinomie* provient du grec ταξινομία (*taxinomia*), lui-même composé de τάξις (*taxis*) « placement », « classement », « ordre » (racine que l'on retrouve en sanscrit : *taksh* = « tailler », « faire », « former »), et de νόμος (*nomos*) qui signifie « loi », « règle »).

Différences entre taxinomie et systématique □

Dans la plupart des disciplines de la biologie, le terme taxinomie est inséparable de celui de systématique, science qui a pour objet de *dénombrer* et de *classer* les taxons dans un certain ordre, basé sur des principes divers.

Dans la pratique, le terme « systématique » désigne aussi bien la méthode utilisée (on dira par exemple la « systématique phylogénétique ») que le résultat obtenu avec cette méthode (la « systématique des Agaricales »). Dans le sens concret de résultat, les deux sciences sont peu distinctes et souvent confondues, car pratiquées simultanément par les mêmes personnes. Les taxinomistes ont de tout temps été nommés systématiciens, car après avoir étudié et décrit des organismes, ils ont tout naturellement essayé de les classer à partir du bas niveau des espèces (*alpha taxonomy* ou « taxinomie primaire »).

Ceux qui utilisent surtout le sens de méthode, les phylogénéticiens notamment, nomment souvent le résultat classification ou encore « taxinomie ».

Historique de la taxinomie □

Le terme fut créé en 1813, sous l'orthographe de « taxonomie », par le botaniste suisse Augustin Pyrame de Candolle (1778-1841) dans sa *Théorie élémentaire de la botanique ou exposition des principes de la classification naturelle et de l'art de décrire et d'étudier les végétaux*^[4], pour désigner dans sa « théorie des classifications » à la fois la méthode et ce qu'il a qualifié de « bases de la botanique philosophique » (*Mémoires et souvenirs*, Livre III, § 11^[5]).

Bien que, comme la méthode de Jussieu, elle utilise les binômes linnéens et préconise la « méthode naturelle » opposée au « système artificiel » de Carl von Linné, la taxinomie proposée

par de Candolle s'en écarte par l'importance donnée aux coupures. Alors que pour Linné et Jussieu, la nature « *ne fait pas de saut* », Candolle insiste sur les discontinuités qui sont à la base de la notion de taxon, à la fois *entité* et *coupure*.

Le terme est devenu d'usage courant aujourd'hui, soit dans la graphie originale, mais étymologiquement contestée, de taxonomie, soit sous la graphie corrigée par Émile Littré de taxinomie, mais l'autre graphie reste néanmoins très répandue, notamment en raison de sa conservation dans la traduction anglaise, *taxonomy*. Sur la controverse étymologique, voir Fischer et Rey (1983)^[6].

Origine et évolution des modèles □

Toutes les classifications se présentent sous la forme d'un arbre (classement arborescent), depuis une racine incluant tous les êtres vivants existants ou ayant existé, jusqu'aux individus.

Chaque nœud de l'arbre définit un taxon, qui groupe tous les sous-taxons qu'engendre le nœud.

Mais, par le passé, il n'en a pas toujours été ainsi. Le naturaliste suédois Carl von Linné (1707 - 1778) posa les fondations de la systématique, et fut l'auteur d'une classification dont les grands principes furent la base de la systématique scientifique jusqu'au milieu du XX^e siècle.

La systématique classique (parfois dite « linnéenne », dont l'ordre hiérarchique interne des taxons était fondé à l'origine sur des critères de ressemblance « morphologique » et d'affinités supposées. Bien que fortement anthropocentrique et reflétant des causes de la diversité des êtres vivants (création divine) telles qu'on les pensait voici 250 ans, elle fait encore, en ce début du XXI^e siècle, partie du bagage culturel commun de tous les naturalistes. Mais par la suite, au fur et à mesure de l'avancée des connaissances, notamment à partir des travaux de Lamarck et Darwin, cet ordre a rapidement eu l'ambition de donner par surcroît une image de l'évolution.

L'anthropocentrisme fut battu en brèche avec Charles Darwin qui recommande en 1859 une classification purement généalogique. S'il y a eu évolution, les espèces doivent être classées selon leur degré d'apparemment évolutif. Mais il faudra attendre près d'un siècle pour que nous y arrivions vraiment, et d'abord pour que nous acceptions la généalogie comme inaccessible (qui descend de qui ?) pour mieux nous concentrer sur la phylogénie (qui est plus proche de qui ?).

Dans la deuxième moitié du XX^e siècle, la systématique dite phylogénétique s'est développée à partir d'une méthode de reconstruction qui a connu un développement foudroyant: la cladistique, initiée par Hennig en 1950. Cette méthode est fondée globalement sur des relations évolutives pour laquelle le critère fondamental du choix de la classification est qu'elle doit refléter strictement la phylogénie, c'est-à-dire les degrés d'apparemment entre espèces. La notion même d'une telle phylogénie est une conséquence de la théorie de l'évolution, et le succès prédictif des arbres phylogénétiques une des preuves de cette théorie.

L'approche phylogénétique actuelle fait appel aux données de la cladistique, mais ses exigences se résument à n'accepter que des taxons monophylétiques, c'est-à-dire correspondant à un clade

donné. Elle demande que les taxons soient limités à ceux qui respectent les deux conditions suivantes :

- tous les individus du taxon descendent d'un individu ancestral particulier ;
- tous les descendants de cet ancêtre particulier sont dans le taxon.

On parle alors seulement de taxon monophylétique ou clade. Cette contrainte a amené des modifications fondamentales de la classification scientifique, certaines renversant le « sens commun » modelé par l'héritage culturel. Ainsi les dinosaures n'ont pas disparu, la systématique moderne incluant les oiseaux dans le groupement « dinosaures ».

Parmi d'autres exemples, les taxons traditionnels comme *reptiles*, *poissons*, *algues*, *dicotylédones*, *pongidés*, n'ont pas droit de cité en systématique phylogénétique, car considérés polyphylétiques (origines multiples) ou paraphylétiques (incomplets). D'autres ont survécu avec quelques séquelles, comme *champignons*. Enfin, certains ont surmonté la tempête, comme *animal* (métazoaires) ou *mammifères*. Remarquons qu'il n'y avait rien d'évident à ce que tous les animaux multicellulaires partagent un ancêtre commun qui les sépare de tout végétal ou champignon.

À part cela, sa structure reste fondamentalement de type linnéen et sa nomenclature également.

Il y a plusieurs approches techniques pour élaborer les arbres phylogénétiques.

- L'approche cladistique cherche en particulier à déterminer les caractères propres à une branche, qui « signent » un apparentement.
- L'approche phénétique, une classification basée uniquement sur des mesures de distance entre taxons (évaluées par exemple en comptant les différences de séquences d'ADN) sans chercher à faire une interprétation phylogénétique.
- L'approche probabiliste qui construit des arbres phylogénétiques en utilisant des modèles d'évolution des caractères (le plus souvent moléculaires, mais pas obligatoirement).

Selon les publications, on trouve à ce jour des classifications de tout type, depuis la classification traditionnelle à peine remaniée, jusqu'aux classifications strictement phylogénétiques en passant par différents mélanges, par exemple gardant les catégories, mais s'alignant sur les découvertes récentes en matière de phylogénie.

Tendance et prospective □

D'importants progrès en génomique ont été permis par l'analyse génétique automatique et le développement des outils et modèles informatiques. Ils imposent et permettent la redéfinition de certaines espèces ou groupes d'espèces et permettraient une meilleure connaissance et suivi des espèces.

Paul Hebert (Université de Guelph (Ontario) a proposé^[7] de constituer une sorte de bibliothèque^[8] des espèces en utilisant des *codes-barres génétiques* identifiant potentiellement chaque espèce vivante connue à partir d'un marqueur (chez l'animal, une région de 648 paires de bases dans un gène (CO1) de l'ADN mitochondrial). Fin 2007, 160 organisations, de 50 pays,

s'étaient associées à ce projet, la base de donnée comprenant déjà plus de 318 000 séries décrivant près de 33 900 espèces. Cette approche a des limites (confusions en cas d'hybridation ou si une espèce a divergé récemment, informations sur l'espèce, mais non sur sa position dans l'arborescence phylogénétique) mais présente un intérêt pour les besoins de traçabilité (aliments, dont par exemple les poissons souvent vendus sous des noms différents pour une même espèce), pour de nombreuses études en écologie, pour les industries biotechnologiques. Ce travail permet aussi de corriger des erreurs en taxinomie. Par exemple, un seul nom désignait en fait 3 espèces différentes de sangsues médicinales européennes (dont *Hirudo medicinalis*, *Hirudo verbana*)^[9] susceptibles d'être commercialisées, alors qu'une seule a été bien étudiée pour ses propriétés.

La notion d'espèce □

Un concept important de classification, assez stable, est celui d'espèce. Ce groupement est relativement bien défini, du moins pour les espèces à reproduction.

L'espèce se définit comme une communauté d'êtres vivants interféconds (ou *interfertiles*, capables de se reproduire entre eux), pouvant échanger du matériel génétique et produisant des descendants eux-mêmes féconds (en effet, certains individus du même genre mais appartenant à des espèces différentes peuvent se croiser pour donner un individu hybride, mais celui-ci est le plus souvent stérile). Dans le cas de la multiplication strictement asexuée, on parle abusivement d'espèces à la place de lignée, le groupement étant alors purement phylogénétique. Le cas des entités à la limite du vivant (virus, prions) est encore différent ; elles sont en général exclues des classifications. Une autre difficulté à citer est celle des symbioses strictes, comme les lichens (qui combinent un organisme de nature fongique, et un organisme capable de photosynthèse, de nature végétale), mais en général, un des deux partenaires est capable de vivre sans s'associer à l'autre, et l'on peut les classer dans deux espèces distinctes, avec comme caractéristique d'une des deux espèces de ne pouvoir survivre sans l'autre.

Stricto sensu, le concept d'espèce suppose implicitement une hypothèse forte qui est la transitivité des interfécondations possibles ; en d'autres termes, on suppose que si X1 est interfécond avec X2, X2 avec X3, etc., X1 sera interfécond avec Xn quelle que soit la longueur de la chaîne. Konrad Lorenz signale que cette supposition n'est pas toujours vraie, en particulier chez des oiseaux marins entre continents. Il faut d'ailleurs bien que ce genre de discontinuité existe pour qu'un phénomène de spéciation commence à apparaître lui aussi.

Binôme latin □

Les espèces sont nommées selon le système binominal mis en place par Carl von Linné. Un nom d'espèce est la combinaison de deux mots latins (jusqu'à trois dans certaines disciplines, pour une sous-espèce, variété ou forme) généralement écrits en italiques : un nom de genre, suivi d'une ou deux épithètes spécifiques.

Au-dessous du rang de genre, tous les noms de taxons sont appelés combinaisons. On distingue plusieurs catégories de combinaisons :

- Entre genre et espèce (sous-genre, section, sous-section, série, sous-série, etc.), les combinaisons sont infragénériques et binominales: nom de genre, puis après indication du rang, une épithète infragénérique, par exemple le cèpe appartient à la section « *Boletus* sect. *Edulis* » ;
- Au rang d'espèce, les combinaisons sont spécifiques et binominales ;
- Au-dessous de l'espèce, les combinaisons sont infraspécifiques et trinominales.

Pour les détails, voir nom binominal et rang taxinomique.

Citation d'auteurs □

Lorsque la précision est nécessaire, on fait suivre le binôme de la citation d'auteurs et de la date (l'année suffit) de la publication princeps. Par exemple, « *Panthera leo* Linnaeus, 1758 » désigne le taxon au rang d'espèce, appelé en français « lion », telle que défini et nommé par Carl von Linné à cette date. Voir les détails sur les pages citation d'auteurs en botanique et citation d'auteurs en zoologie

Homonymie □

Informatique □

En informatique, le terme taxinomie (*taxonomy* en anglais) désigne une *méthode de classification* des informations dans une architecture structurée de manière évolutive. Le terme est couramment employé pour des systèmes de gestion de contenu (CMS).

Sciences humaines □

Le terme taxonomie peut désigner une représentation hiérarchique de concepts, d'objets ou encore de disciplines.^[10]

Microbiologie

La **microbiologie** est une sous-discipline de la biologie basée sur l'étude des micro-organismes.

Les micro-organismes constituent un groupe extrêmement diversifié d'organismes microscopiques, unicellulaires et répartis dans les trois domaines du vivant (bactérie, archée et eucaryote). Ils se distinguent les uns des autres par leur forme, leur taille et leur mode de vie.

Les virus, incapables de se reproduire sans détourner la machinerie cellulaire d'un autre organisme, ne sont pas considérés par tous les spécialistes comme vivants. La microbiologie étudie parfois leurs actions sur les micro-organismes mais n'a pas pour but de les étudier en tant qu'entités. Cette étude est réalisée dans une autre discipline de la biologie : la virologie.

On parle aussi maintenant de « *microbiologie moléculaire* », dans le domaine des biotechnologies notamment^[1].

Historique []

- Dès l'Antiquité, on postulait l'existence d'agents infectieux transmissibles invisibles à l'œil nu.
- 1546 : Jérôme Fracastor impute la transmission des maladies à des germes vivants, qu'il appelait « *seminaria* ».
- 1677 : Découverte des bactéries par le microscopiste hollandais Antoine van Leeuwenhoek.
- 1828 : Christian Gottfried Ehrenberg utilise pour la première fois le terme bactérie.
- 1840 : Le pathologiste allemand Jacob Henle propose une « théorie des germes » pour les maladies.
- 1857-1876 : Louis Pasteur met en évidence les rôles des micro-organismes dans la fermentation lactique et alcoolique. Il développe les techniques de pasteurisation et de stérilisation lui permettant la mise en place de cultures pures de micro-organismes. La possibilité de culture a permis de démontrer que la génération spontanée était une aberration.
- 1877-1895 : Louis Pasteur démontre que des maladies sont la conséquence de la présence de ces micro-organismes. Premières recherches systématiques sur l'origine de certaines maladies, ainsi que la vaccination (connue depuis Edward Jenner pour la variole - maladie virale).
- 1873-1882 : Robert Koch met en évidence le bacille responsable de la tuberculose (*Mycobacterium tuberculosis*). Koch a établi les règles (toujours utilisées) qui permettent de démontrer rigoureusement qu'une bactérie donnée est à l'origine d'une infection.
- 1884 : Hans Christian Gram développe une technique de coloration qui est la plus utilisée dans l'étude et la classification des bactéries en deux grands groupes : les bactéries à Gram positif et celles à Gram négatif.
- 1912 : Paul Ehrlich découvre le premier traitement efficace (dérivé d'arsenic) contre la syphilis. C'est la première fois qu'on traite avec un agent chimiothérapeutique une maladie bactérienne.
- 1917 : Découverte des bactériophages par Frederick Twort et Félix d'Hérelle.
- 1928 : Frederick Griffith découvre la transformation bactérienne et établit les fondements de la génétique moléculaire.
- 1929 : Alexander Fleming découvre les propriétés antibactériennes de la pénicilline produite par *Penicillium*. L'humanité entre dans l'ère des antibiotiques.
- 1944 : Albert Schatz et Selman Waksman découvrent un autre antibiotique: la streptomycine qui sera bientôt utilisée contre la tuberculose.
- 1960 : François Jacob, David Perrin, Carmen Sanchez et Jacques Monod proposent le concept d'opéron pour le contrôle de l'expression des gènes bactériens.
- 1977 : Carl Woese étudie l'ARN ribosomique pour découvrir une troisième forme de vie, les Archaea, distincte génétiquement des bactéries et des eucaryotes.
- 1986 : En utilisant une enzyme de la bactérie *Thermus aquaticus*, Kary Mullis invente la technologie de PCR (Polymerase Chain Reaction). La technique de PCR est devenue l'outil de base de la biologie moléculaire.
- 1995 : Séquençage complet du premier génome bactérien (*Haemophilus influenzae*) par Craig Venter et ses collègues du TIGR. La microbiologie entre dans l'ère de la génomique.

Classification []

L'analyse de l'anatomie des différents micro-organismes recensés a permis de les classer en deux grands groupes : les **procaryotes** (munis d'un proto-noyau) et les **eucaryotes** (possédant un vrai noyau)

- procaryotes (groupe polyphylétique comprenant en fait des taxons de rangs distincts)
 - archaea, (anciennement archéobactéries)
 - eubactéries
- eucaryotes (groupe monophylétique ou taxons simples)
 - algues unicellulaires
 - champignons unicellulaires
 - protozoaires

Des analyses génétiques ont prouvé que les archaea sont aussi différentes des eubactéries que des eucaryotes d'un point de vue phylogénétique, mais on ignore toujours quel a été le point de départ de la différenciation de ces trois groupes.

Caractéristiques []

Les procaryotes []

Les procaryotes (*Prokaryota* ou *Prokarya*), du grec *pro* (avant) et *caryon* (noyau), sont des organismes dont la cellule ne possède pas de noyau cellulaire ni d'autres organites, ils appartiennent à au moins deux taxons distincts :

- Les archéobactéries ou archées sont un groupe particulier, car il ne comprend essentiellement que des espèces anaérobies (n'ayant pas besoin d'oxygène, voire souvent ne tolérant pas l'oxygène), vivant dans des environnements extrêmes : on parle d'organisme extrémophile. Les environnements extrêmes sont à la limite des conditions tolérées par les cellules biologiques (milieu salin très acide ou très alcalin, milieu à température proche de l'ébullition). Les archéobactéries ne sont pas que des extrémophiles, ce sont aussi des organismes plus communs qui vivent dans des conditions de vie classique comme les marais ou les rumens des ruminants. Il ne faut pas associer systématiquement archéobactéries à des organismes extrêmes même si on retrouve parmi eux la plupart des extrémophiles.
- On retrouve les eubactéries dans notre quotidien, sol, nourriture... Ce sont les bactéries les plus connues. Cependant certaines eubactéries sont aussi extrémophiles.

Ces micro-organismes ont des mécanismes pour résister à ces conditions.

Autres règnes []

La systématique moderne phylogénétique amène à reclasser parmi les procaryotes des espèces autrefois classées dans le règne animal, végétal, ou même fongique (normalement des espèces toutes eucaryotes selon la classification moderne du vivant).

De plus, les espèces eucaryotes multicellulaires (végétales comme animales) ne peuvent vivre sans la présence de certaines bactéries dans le milieu intercellulaire ou dans des organes

cavitaires: elles participent à la synthèse (notamment chez les plantes fourragères qui utilisent des bactéries de la famille *Rhizobium* pour la synthèse et l'assimilation de l'azote) ou la dégradation (par exemple pour la digestion) de certains composés organiques et à la lutte active contre d'autres espèces bactériennes ou virales (pathogènes à cause de leur développement anarchique non symbiotique).

De même la **microbiologie** s'intéresse de plus en plus aux « espèces » pseudo-cellulaires (organites) présentes dans le noyau ou le cytoplasme de tous les eucaryotes et un grand nombre de procaryotes, où ils « vivent » en symbiose endogène (endocytose), et permet de penser que leur origine est celle des archéobactéries ou d'espèces encore plus anciennes.

Ce mode de colonisation des êtres cellulaires eucaryotes ou procaryotes est proche de celle utilisée dans un autre domaine du vivant, les virus, toujours classés dans aucun règne, aujourd'hui étudiés activement par la virologie moderne, surtout pour les besoins de la médecine (traitements antiviraux, ou thérapie génique), mais aussi en botanique et zoologie pour les besoins agricoles (organismes génétiquement modifiés). Dans certains cas, des bactéries sont utilisées comme vecteurs de culture et de transport de ces virus (souvent aussi génétiquement modifiés) chargés d'opérer les modifications génétiques cellulaires.

L'étude fondamentale des procaryotes est essentielle donc pour comprendre l'évolution de toutes les autres espèces des cinq règnes classiques et s'appuie aussi maintenant sur la recherche plus récente en virologie et biologie moléculaire.

Les eucaryotes □

Les eucaryotes ont un système membranaire interne enfermant des organites (noyau, plaste, mitochondrie...) ; ils présentent un cytosquelette interne (actine, tubuline) absent chez les procaryotes, qui leur confère une taille souvent plus importante que les procaryotes.

On estime que chaque groupe d'eucaryotes a eu un ancêtre parmi les procaryotes (archéobactéries ou eubactéries), et que les mitochondries (et peut-être aussi d'autres organites comme les chloroplastes) présents dans le noyau des eucaryotes actuels ont aussi eu au moins un ancêtre procaryote distinct qui aurait colonisé cette ancienne bactérie pour vivre en symbiose (endosymbiose) avec elle et former tous les eucaryotes qui ne peuvent plus vivre sans elles.

En effet, on retrouve dans les mitochondries un cytosquelette interne spécifique, une structure membranaire externe complexe, un matériel génétique interne spécifique logé dans une zone plasmique appelée proto-noyau (dépourvu de membrane mais tout de même structurée), même si les mitochondries ne peuvent se multiplier seules sans le concours de la cellule hôte (les mitochondries auraient perdu leurs facultés de reproduction qui ne leur étaient plus nécessaires, puisque la cellule hôte leur fournit pratiquement tout le matériel nécessaire à leur croissance et leur division).

Algues []

Contrairement aux champignons et aux protozoaires, les algues ont des pigments chlorophylliens leur permettant de réaliser la photosynthèse.

Elles sont donc des organismes vivant immobile et autotrophes.

Les algues sont présentes dans le sol, les plantes, l'eau douce et l'eau de mer.

Champignon []

Les champignons sont présents dans le sol, plantes, débris végétaux, lichen, parasites de l'homme, des animaux et des plantes.

Remarque : une levure, eucaryote unicellulaire, est un champignon. Il existe de nombreuses espèces de levures comme *Saccharomyces cerevisiae* (levure de boulangerie), la famille des *Candida* (responsables des candidoses), *Rhodotorula* (parfois retrouvée dans la choucroute qu'elle colore en rouge), *Schizosaccharomyces*, etc.

Les champignons sont "absorbotrophes" : ils se nourrissent par absorption. Ils sécrètent des enzymes qui digèrent des polymères dans le milieu extérieur, ce mécanisme chimique transforme par exemple les glucides en monomères (petites molécules) qui sont ainsi absorbés.

Protozoaire []

Les protozoaires sont des êtres unicellulaires dépourvus de paroi cellulaire (contrairement aux algues). On en trouve dans le sol, l'eau douce, l'eau de mer, mais également comme parasites de l'homme et des animaux. Les protozoaires se nourrissent par pinocytose et endocytose car ils n'ont pas de paroi cellulaire.

Autres règnes []

Bien que non classés parmi les *microbes*, les règnes végétaux (avec affinité avec les algues) et animaux (avec affinité avec les protozoaires) sont aussi classés parmi des eucaryotes. Ils ne sont pas classés comme micro-organismes car ils ne vivent pas ni ne se reproduisent à l'état unicellulaire.

La taille des micro-organismes []

Comme signalé au début, les micro-organismes sont de très petite taille (d'où leur nom) :

- procaryotes (bactéries) : de l'ordre de 0,5 à 3 μm (pour la largeur), pas de limite en longueur ; le pouvoir séparateur de l'œil humain est de 100 μm (10^{-4}m soit 0.1 mm), ces micro-organismes sont donc tous invisibles à l'œil nu.

- eucaryotes : très variable de 2 à 200 μm (pour la largeur), pas de limite en longueur ; certains eucaryotes sont visibles à l'œil nu (notamment les algues), d'autres ne sont visibles que sous forme d'agrégats (cas des champignons, dont les parois plasmiques émettent des filaments sur une grande longueur relativement à leur taille). Tous les eucaryotes ne s'agrègent pas ainsi (notamment les protozoaires, invisibles à l'œil nu).

Le rapport surface sur volume est directement influencé par la taille : si l'on considère une forme simple telle que la sphère, la surface est proportionnelle au carré de la taille ($4\pi r^2$ si r est le rayon de la sphère), alors que le volume est proportionnel au cube de la taille ($4/3\pi r^3$), le rapport surface/volume est donc inversement proportionnel à r ($3/r$).

Ceci conditionne la vitesse à laquelle le micro-organisme se nourrit : la nourriture passe à travers la membrane plasmique, donc la vitesse d'absorption est proportionnelle à la surface, mais la quantité à nourrir est proportionnelle au volume. La vitesse à laquelle entrent et sortent les nutriments et les déchets est donc inversement proportionnelle à la taille. Donc plus la bactérie est petite, plus elle va pouvoir se nourrir à grande vitesse. Elle compense sa petite taille par une multiplication à très grande vitesse (taux de croissance très rapide).

La culture des micro-organismes □

Richesse du milieu □

Les micro-organismes ont besoin :

- D'une source d'énergie.
 - Pour les chimiotrophes, elle provient de la dégradation de composés chimiques (par exemple du glucose)
 - Pour les phototrophes, de la lumière.
- D'une source de carbone
 - Pour les autotrophes, il suffit de CO_2 atmosphérique (carbone minéral).
 - Pour les hétérotrophes, elle provient de molécules organiques (CH_4 , oses...)
- De macroéléments (Ainsi appelés en raison de leur concentration dans le milieu de culture)

C, H, O, N, S, Na, Mg, P, K

Les éléments carbone, azote, phosphore doivent être présents aux proportions 100/10/1 pour un milieu correct.

- De microéléments

Cu, Co, Zn, Cl, Fe...
- D'une source d'azote

D'origine minérale (sel d'ammonium)

- De facteurs de croissance

Vitamines, acides aminés

- De dioxygène ou oxygène moléculaire

Pour les aérobies strictes

— ou —

d'absence de dioxygène (ou oxygène moléculaire) anaérobies stricts; pour ces micro-organismes, le peroxyde d'oxygène (H_2O_2) formé par la réaction entre l' O_2 et l' H_2O les empoisonnent, car ils ne possèdent pas une catalase dégradant H_2O_2 à l'inverse des individus aérobies.

Il existe également des micro-organismes aérobies facultatifs capables de se multiplier en présence ou en l'absence d'oxygène grâce à leur capacité à utiliser la fermentation et des bactéries microaérophiles qui ne se développent qu'à une certaine pression en dioxygène.

- De facteurs physico-chimiques:
 - Pour le *facteur température*, on distingue trois catégories de micro-organismes selon leur optimum de croissance. Les psychrophiles ont leur optimum à 15 °C, les mésophiles à 37 °C, les thermophiles à 65 °C.
Il faut descendre au-delà de -18 °C pour arrêter toute croissance microbienne. À 3 °C il y a peu de risques lié aux bactéries pathogènes (mésophiles, donc virulentes à la température du corps) ou toxigènes, seules quelques bactéries vivant à ces températures peuvent être dangereuses (listéria).
 - Pour le *facteur pH*, on considère que les bactéries préfèrent la neutralité excepté pour les bactéries lactiques. Pour les levures et moisissures, le pH optimum est plus acide. (pH=5)

Diversité du milieu de culture □

On distingue deux sortes de milieux de culture :

- Synthétiques : milieux dont on peut donner la composition chimique complète. Les milieux synthétiques sont utilisés en recherche fondamentale.
- Empiriques : milieux dont on ne connaît que partiellement la composition.

et parmi ces 2 types de milieux, il existe des milieux sélectifs (qui vont permettre de sélectionner le type de micro-organismes qui pourront s'y multiplier). On peut ainsi choisir de ne laisser se développer qu'un genre de bactérie donné (ex: milieu mFC pour les coliformes fécaux ou gélose au sang pour certains pathogènes) ou au contraire de favoriser le développement des levures-moisissures en ajoutant un antibiotique au milieu. La température à laquelle on incubera les milieux inoculés constitue également un facteur de sélection comme mentionné plus haut.

Les milieux de culture peuvent contenir des extraits de levure (cellules de levure déshydratées et lysées) qui fournissent une source d'acides aminés, de vitamines et d'azote, des extraits de malt apportant une source de carbone, des peptones (protéines animales, de poisson, de caséine de lait) source d'azote organique qui intéresse les individus hétérotrophes.

Ces milieux sont soit liquides, soit solides. Pour solidifier le milieu on utilise fréquemment la gélose ou agar-agar, un polymère de sucre tiré d'une algue rouge présentant la propriété de former avec l'eau un gel solide si la température est inférieure à 60°C.

La stérilisation □

La stérilisation est l'opération qui consiste à éliminer les micro-organismes d'un objet et ce, de manière durable. En microbiologie, le but de la stérilisation est d'une part maîtriser les micro-organismes introduits dans le milieu d'étude, et d'autre part éviter la contamination du milieu extérieur et des personnes (voir aussi l'article sur l'hygiène).

Il existe trois façons pour stériliser un milieu de culture. Une destruction par la chaleur, par une méthode de filtration ou par l'emploi de radiation et d'agent chimique (gaz)

La chaleur □

On distingue les procédés à chaleur « sèche » ou « humide ».

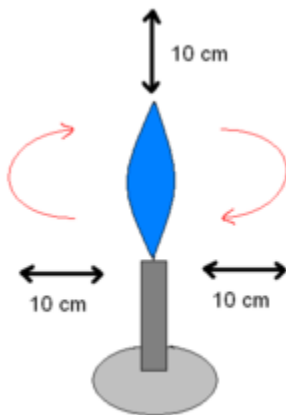


Figure 1 : Zone de stérilité d'un bec Bunsen.

- Chaleur sèche :
 - Bec Bunsen : tout l'air qui se trouve dans un globe virtuel de 15 cm de rayon de la flamme d'un bec Bunsen, est passé une fois dans la flamme. Ceci crée une enceinte fictive stérile. Les microbiologistes travaillent avec une flamme oxydante qui crépite.
 - Four Pasteur ou four Poupinel : C'est un four classique utilisé à 180°C pendant 90 minutes au minimum.

- Chaleur humide :
 - Autoclave : cette technique consiste à faire bouillir de l'eau dans une enceinte close pour augmenter la pression et donc dépasser les 100°C d'ébullition (principe de l'autocuiseur). Ceci est réalisé à 134°C pendant 18 minutes .

Cas particuliers : la pasteurisation et tyndallisation []

La pasteurisation est un procédé pour la conservation des aliments par lequel un aliment est chauffé à une température définie pendant une période de temps définie avant d'être refroidi rapidement. Les températures de pasteurisation varient entre 70 °C et 85 °C. Cette technique ne détruit qu'une partie de la flore bactérienne. Ce n'est, en aucun cas, une technique de stérilisation.

La tyndallisation est une série de chauffages brefs à des températures de 70°C à intervalles réguliers (3 chauffages d'une heure, 24 h entre 2 chauffages), ceci afin de laisser aux formes résistantes la possibilité de germer pour les tuer au chauffage suivant. Par exemple, la destruction des germes pathogènes du lait se fait par un cycle de 63°C pendant 30 minutes suivie de 73°C pendant 15 minutes.

L'ébullition n'est pas une méthode de stérilisation. Les formes sporulées des bactéries peuvent résister jusqu'à 8h30 à 100°C.

La filtration []

La filtration est une technique qui consiste à faire passer un liquide à travers un filtre dont les pores ont un diamètre de 0,2 µm ; les micro-organismes sont trop gros pour passer et sont donc retenus par le filtre. Pour forcer ce liquide à traverser le filtre on utilise deux solutions:

- mise en pression du liquide par l'intermédiaire d'un piston.
- aspiration du liquide en créant par exemple une enceinte dépressurisée de l'autre côté du filtre.

Cette technique est intéressante lors d'utilisation de produits thermolabiles (c'est-à-dire qui ne résistent pas à la chaleur) comme certains acides aminés aromatiques, vitamines, hormones de croissance, acides nucléiques et une bonne partie des antibiotiques. Cependant les filtres de 0.2 µm colmatent vite. On peut contourner ce problème en augmentant la surface du filtre ou en utilisant un procédé de filtration tangentielle.

Dans certains cas le filtre ayant servi à stopper les micro-organismes peut être déposé sur un milieu de culture solide afin de permettre la multiplication des germes, ceci dans le but de procéder à leur dénombrement et à leur identification.

Radiation et agent chimique []

Ces techniques sont utilisées par les industries dont l'alimentaire. Elles sont très pénétrantes car les radiations et certains gaz traversent le plastique et tuent les micro-organismes.

Les rayons ultraviolets ne sont cependant pas une bonne technique de stérilisation car ils sont non pénétrants, donc ils ne passent pas au travers de matériaux comme le plastique et le verre. De plus certains micro-organismes sont capables de réparer les dommages infligés par les ultraviolets si le produit est éclairé après application de rayons ultraviolets; c'est le phénomène dit "de photo-réparation".

On peut dans certains cas utiliser le rayonnement gamma, beaucoup plus pénétrant et puissant que les ultraviolets.

Notion de culture pure □

Technique des stries □

Elle est basée sur la notion d'UFC (Unité Formant une Colonie). Chaque unité cellulaire (une cellule, un groupe de cellules ou un morceau d'hyphe) va donner une colonie.

Sur un milieu de culture, il y a formation d'un monticule de bactéries ou de levures avec une forme particulière (la colonie). La forme de ce monticule est déterminée par l'organisation de la colonie, qui elle-même est déterminée génétiquement. Les champignons vont, eux, développer un thalle c'est-à-dire ce que l'on peut par exemple observer sur les confitures ayant "moisi". L'UFC est utilisée aussi pour le dénombrement bactérien en utilisant des cultures sur boîte à partir de tubes préparés par dilutions en cascades de la suspension bactérienne mère.

L'observation macroscopique de l'aspect des colonies permet de différencier les colonies de bactéries contaminantes de celles qu'on cherche à isoler.

Technique de suspension dilution □

Cette technique sert à évaluer le nombre de microorganismes qui se trouvent dans un milieu liquide (eau de puits, boissons, eau de piscine...) ou dans un milieu solide (sol, aliments...). Elle peut aussi servir à isoler une souche pure à partir d'un mélange.

Il s'agit simplement d'une suite de dilutions suivie d'un prélèvement d'un aliquot qui sera étalé sur un milieu de culture qui pourra être sélectif ou non. Il suffira ensuite de compter le nombre de colonies, et connaissant le volume de l'aliquot (en général 1 mL sur une boîte), on en déduira la quantité approximative de bactéries dans le milieu (on considère qu'1 UFC correspond à 1 bactérie).

Identification des bactéries □

L'identification des bactéries se fait suivant une clé dichotomique qui va des caractères les plus vastes aux plus pointus pour aboutir à une espèce bactérienne donnée.

Critères morphologiques □

L'étude de la morphologie bactérienne est le premier acte effectué par un laboratoire de diagnostic pour identifier une bactérie. L'observation de la morphologie bactérienne permet une orientation préliminaire du diagnostic.

Macroscopique []

À l'œil nu, on peut distinguer les caractéristiques d'une colonie :

- La forme du relief
- La taille
- La couleur
- L'aspect (collant, filamenteux...)
- L'odeur
- La transparence
- L'allure des contours

Il existe trois grands types de colonies:

- colonies de **TYPE S** (Smooth=lisse): contours lisse et réguliers, semi-bombée, surface brillantes, crémeuses.
- colonies de **TYPE M** (Muqueux): contours lisse et réguliers, très bombées, surface très brillantes, filantes.
- colonies de **TYPE R** (Rough=rugueux) : contours irréguliers, plates rugueuses et mates, sèches.

Microscopique []

Coloration de Gram []

Les bactéries étant en général quasiment transparentes, on commence par préparer un étalement sur lame de microscope auquel on applique une coloration de Gram. Les bactéries à Gram positif apparaîtront mauves alors que celles à Gram négatif apparaîtront roses. Il existe d'autres colorations, comme par exemple celle au vert de malachite permettant de mettre en évidence les formes sporulées. La coloration de Gram permet de déterminer le type de paroi cellulaire.

Forme []

La forme est extrêmement diverse au sein du monde bactérien. Si on excepte les bactéries dépourvues de paroi (Mycoplasmes), qui peuvent être très polymorphes, la diversité est relativement restreinte pour les bactéries d'intérêt médical et vétérinaire. Parmi celles-ci, on distingue principalement des formes sphériques (cocci), cylindriques (bacille), spiralées (spirille), enroulées (spirochète) à appendice bourgeonnante ou filamenteuse.

Mode de groupement []

Elles peuvent se regrouper en chaînes (*Streptococcus*, *Enterococcus*, *Lactococcus*...), en amas asymétriques ou grappes (*Staphylococcus*), en amas cubiques réguliers (sarcines), en palissades ou en paquets d'épingles (*Corynebacterium*)... Le mode de groupement, à condition de

l'apprécier sur une culture jeune effectuée en milieu liquide et de tenir compte de l'aspect prédominant, est également un élément important pour orienter l'identification.

Taille []

Les plus petites bactéries ont une taille de 0,1 à 0,2 micromètre (*Chlamydia*) alors que certaines ont un diamètre supérieur à 10 micromètres. La plus grande bactérie connue (*Thiomargarita namibiensis*) peut atteindre un diamètre de 750 micromètres.

Présence de spore []

Toutes les bactéries n'ont pas la possibilité de sporuler. La totalité des bacilles à Gram + sporulent en situation de stress. Pour mettre en évidence les spores au microscope optique, il suffit de les colorer au vert de malachite ou à l'encre de chine. Mais on peut les deviner à la coloration de Gram (absence de coloration). Les spores sont présents chez les Bacillus.

Mobilité []

Les bactéries peuvent être équipées d'un ou plusieurs flagelle(s) leur permettant de se déplacer. Pour définir le mode de déplacement des bactéries, on parle de chimiotactisme. La bactérie évoluant dans un milieu se déplace selon des gradients de concentration pour se rapprocher de sa "nourriture"

Capsule []

La capsule est formée de polymères (polysaccharides ou protides) disposés en couches à la périphérie de la bactérie. Celle-ci permet à la bactérie d'adhérer aux surfaces (coloniser les surfaces) et d'échapper au système immunitaire car les antigènes de surface sont recouverts par la capsule qui les rend indétectables (pouvoir pathogène).

Critères biochimiques []

On identifie aussi une bactérie en observant si elle utilise tel ou tel substrat. On la met donc en contact dans un milieu de culture avec un glucide, ou un peptide, ou d'autres substrats plus complexes. On peut révéler l'utilisation de ce substrat par virage (changement de couleur) d'un indicateur de pH car un glucide utilisé donne un produit acide, un peptide donne un produit basique, etc.

Chaque famille de bactéries a des caractères propres, on peut donc les rassembler facilement avec des caractéristiques de base comme l'utilisation du glucose avec ou sans oxygène, la réduction des nitrates, etc. Ensuite, on dispose de galeries d'identifications biochimiques qui sont parfois vendues par des sociétés spécialisées. Ces tests sont assez longs, de un à deux jours.

Critères génétiques []

On peut citer des techniques de génie génétique comme:

- la PCR (Polymerase Chain Reaction) pour cibler un gène présent uniquement chez une famille ou un genre bactérien par réhybridation spécifique de courtes séquences d'ADN (oligonucléotides amorces) synthétiques précises.
- les puces à ADN qui utilisent le même principe mais ayant une précision allant jusqu'à la souche même.

Systematique bacterienne []

La systematique permet d'identifier une souche bacterienne inconnue grace à differents examens et à l'utilisation de milieux de culture spécifiques.

La coloration de Gram et les tests de la catalase et de l'oxydase permettent de déterminer la famille. Des milieux de cultures spécifiques permettent d'arriver au genre et à l'espèce. Des examens supplémentaires tels que le sérogroupage peuvent être utilisés dans certains cas.

Coques à Gram positif et catalase positive []

- Famille des Micrococcaceae
 - Genre Micrococcus
 - Genre Staphylococcus

Coque à Gram positif et catalase négative []

- Famille des Streptococcaceae
 - Streptocoques des groupes Lancefield A, B, C, D (Enterococcus), F & G

Coque à Gram négatif []

Gram négatif regroupe les bactéries à paroi fine qui ne retiennent pas le bleu de gentiane/cristal elle apparaît au microscope optique en rose après que l'on ajoute de la fushine (genre neisseria, par exemple).

Bacille à Gram positif []

- Genre Bacillus
- Genre Listeria
- Genre Clostridium

Bacille à Gram négatif []

Oxydase négative []

Famille des Enterobacteriaceae :

- Genre des Salmonella
- Genre des Escherichia

- Sérogroupage des Escherichiae Coli
- Sérogroupage des autres Escherichia
- Genre Shigella
- Genre Klebsiella
- Genre Enterobacter
- Genre Serratia
- Genre Proteus
- Genre Morganella
- Genre Providencia
- Genre Hafnia

Oxydase positive []

- Pseudomonas
- Vibrio
- Aeromonas

Les agents antibactériens []

Les agents physiques []

On peut citer les agents suivants :

- La chaleur : à partir de 65°C, les protéines sont dénaturées, cependant certains micro-organismes sont capables de supporter des températures plus élevées.
- Le pH : qu'il soit trop acide ou trop basique.
- Les hautes pressions : à partir de 6 000 bars. Ainsi, c'est avec un traitement par la pression que l'on stérilise les jus de fruits produits en industrie.
- L'Aw : moins il y a d'eau libre dans un milieu, moins les bactéries pourront se développer (*Staphylococcus aureus* se développe à partir d'une Aw de 0,83)
- Les UV : pour une longueur d'onde voisine de 260 nm, ils détruisent tous les micro-organismes. Peu efficaces à travers les plastiques, ils sont utilisés pour stériliser l'air.
- Les rayons gamma : comme les UV, ils sont très efficaces. Ils peuvent traverser tous les plastiques et servent donc à la stériliser les instruments comme les fils chirurgicaux par exemple. Leur utilisation a été tentée pour les produits alimentaires, sans succès auprès du public.

Les agents chimiques []

à suivre

Les antibiotiques []

Les antibiotiques sont des substances chimiques qui ont une action spécifique avec le pouvoir de limiter la prolifération de bactéries spécifiques. Elles sont dépourvues de toxicité pour les autres cellules (champignons et autres eucaryotes). Ces molécules peuvent avoir une action drastique,

c'est-à-dire bactéricide; leur efficacité peut être également limitée à empêcher le développement des bactéries (on parle alors d'action bactériostatique).

Voir l'article détaillé *Antibiotique*.

Les résistances aux antibiotiques □

Voir l'article *Antibiotique > Les résistances aux antibiotiques*.

La croissance bactérienne □

C'est le pouvoir ou la capacité des bactéries à augmenter leur nombre ; il est en fonction du type de bactéries (thermophyles / mésophyles / psychrophyles / psychrotrophes / etc.) Quand des bactéries sont incubées dans un milieu liquide adéquat, elles continuent généralement à se multiplier de façon exponentielle jusqu'à ce qu'un facteur nécessaire à leur croissance approche de l'épuisement et devienne limitant ou que des produits métabolites inhibiteurs (acides organiques, alcools, ammoniaque, etc.) s'accumulent exagérément. Cette culture, pratiquée sans addition de nutriment ni élimination de déchets en cours de croissance, s'appelle une culture en milieu discontinu ou en batch qui constitue un système clos. Une culture de ce type se comporte comme un organisme multicellulaire avec une limitation de croissance génétiquement déterminée.

On peut représenter graphiquement la croissance d'une culture de ce type en portant le logarithme du nombre de cellules viables en fonction du temps. La courbe obtenue pourra être divisée en quatre phases : 1- phase de latence = x, 2- phase de croissance logarithmique de x à X, 3- phase stationnaire = X et 4- phase de décroissance exponentielle de X à 0.

Diauxie □

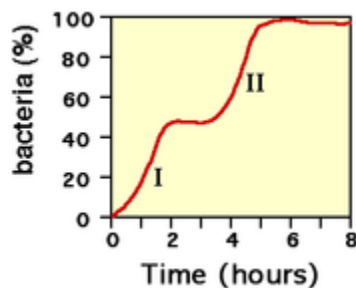


Figure 4 : Courbe de croissance dans un milieu contenant deux glucides (par exemple : I : utilisation du glucose et II : utilisation du lactose).

En présence de deux sources de carbone, les bactéries exhibent une courbe de croissance biphasique. Ceci s'explique par la consommation de la source de carbone la plus facilement

assimilable, puis une adaptation pendant laquelle les enzymes permettant de dégrader la deuxième source de carbone sont synthétisées, puis consommation de la deuxième source de carbone. L'analyse de ce comportement a permis à Jacques Monod de définir la notion d'opéron.

Micro-organisme



Bactérie *Escherichia coli* grossie 10 000 fois au microscope électronique.



Culture d'*Escherichia coli* dans une boîte de Pétri.



Salmonelles (*Salmonella typhimurium*), en rouge, sur une culture de cellules humaines.

Un **micro-organisme** (du grec μικρός, *mikrós*, « petit » et de ὄργανισμός, *organismós*, « organisme ») ou **microbe** est un organisme vivant microscopique, c'est-à-dire qu'il est généralement invisible à l'œil nu et ne peut être observé qu'à l'aide d'un microscope.

Les micro-organismes sont représentés par diverses formes de vies dont les bactéries, les champignons, les archéobactéries, et les protistes ; des plantes microscopiques (appelées algues

vertes) ; et des animaux tel que le plancton, le planaire et l'amibe. Certains microbiologistes incluent les virus mais d'autres ne les considèrent pas comme des êtres vivants^{[1],[2]}.

Familièrement, le mot *microbe* désigne un micro-organisme (le plus souvent une bactérie) responsable d'une maladie.

Depuis 1872 (Ferdinand Julius Cohn) les « bactéries » sont différenciées des levures, des moisissures, des infusoires ou des parasites. Le mot *microbe* (littéralement *petite vie*) a été introduit par le chirurgien français Charles Sédillot en 1878 pour désigner tous ces êtres vivants infiniment petits, un mois avant que Pasteur et ses collaborateurs fassent une communication à l'Académie de médecine, la **Théorie des germes** et ses applications à la médecine et à la chirurgie, dans laquelle des êtres vivants microscopiques sont déclarés responsables de maladies : « Si j'avais l'honneur d'être chirurgien ... » 30 avril 1878).

Les micro-organismes sont présents dans toute la structure de la taxonomie. Il est possible de distinguer d'une part les micro-organismes procaryotes qui ne possèdent pas de noyau comme les bactéries et les Archaea, et d'autre part les micro-organismes eucaryotes possédant un noyau. Les eucaryotes microscopiques comprennent les champignons comme les levures et les deux types de protistes, algues et protozoaires.

Les micro-organismes sont souvent décrits comme unicellulaires, quelques protistes unicellulaires sont visibles à l'œil nu et quelques espèces multicellulaires sont microscopiques.

La taille moyenne des cellules bactériennes est de 0,5 à 1 µm, mais il existe certaines bactéries ayant une taille de plus de 50 µm. Les cellules eucaryotes ont un diamètre allant de 5 à 20 µm.

Les micro-organismes unicellulaires étaient les premières formes de vie à se développer sur Terre, il y a approximativement quatre milliards d'années.

En améliorant le microscope, Antoine van Leeuwenhoek permit la découverte des bactéries, il est le précurseur de l'étude des micro-organismes et de la biologie cellulaire.

On trouve les micro-organismes dans tous les types d'environnement présents dans la nature : ils colonisent tous les écosystèmes, comme les sols, les eaux douces et les eaux marines, l'air, mais aussi des environnements plus hostiles tels que les pôles, les déserts, les geysers, le fond des océans, etc. Les micro-organismes rencontrés dans des environnements extrêmes sont qualifiés d'extrémophiles. De nombreux micro-organismes sont associés aux plantes ou aux animaux avec lesquels ils peuvent entretenir des relations de symbiose, de commensalisme ou de parasitisme. Certains micro-organismes peuvent être pathogènes, c'est-à-dire entraîner une maladie chez les plantes ou les animaux.

Histoire et évolution □

Les micro-organismes ont été les premières formes de vie à se développer sur Terre, il y a environ 3,4 à 3,7 milliards d'années. Le transfert horizontal de gènes, de pair avec un haut taux de mutation et de nombreux autres moyens de la variation génétique, permet aux micro-

organismes d'évoluer rapidement (par sélection naturelle), de survivre dans des environnements nouveaux et répondre à des stress environnementaux.

Cette évolution rapide est importante dans la médecine, car elle l'a conduit à l'évolution récente de « *super-microbes* » - des bactéries (notamment pathogènes) rapidement devenues résistantes aux antibiotiques modernes.

Certains microbes dont ceux dits extrêmophiles ont acquis au cours de l'évolution des moyens de résistance face au système immunitaire de leur hôte ou face au stress environnemental (acides, pression, température, froid, oxydants, métaux lourds, radioactivité, etc.), soit en s'adaptant à l'un ou l'autre de ces « facteurs de stress », soit en entrant en sommeil ou en se protégeant par « *enkystement* ».

Un même microbe peut ainsi se présenter sous plusieurs formes, *Toxoplasma gondii* offre par exemple - selon le contexte - 3 formes :

- tachyzoïte ; forme active à haut taux de reproduction ;
- mérozoïte ; se reproduisant moins vite, mais protégé dans des kystes cellulaires ;
- sporozoïte ; forme très protégée logée dans des oocystes.

Découverte □

Antoine van Leeuwenhoek a été l'un des premiers à observer les micro-organismes à l'aide d'un microscope de sa conception. Il a ainsi fait l'une des plus importantes contributions à la biologie et a ouvert la voie aux domaines de la microbiologie et de la bactériologie.

Habitats □

Les micro-organismes sont présents dans presque tous les habitats existants dans la nature, y compris dans des environnements hostiles tels que les pôles, les déserts, les geysers, les rochers et la mer profonde. Certains types de micro-organismes, appelés extrêmophiles, se sont adaptés aux conditions extrêmes de vie.

Importance □

Les micro-organismes sont indispensables à l'Homme et à l'environnement. Ils participent au cycle du carbone et au cycle de l'azote et accomplissent un rôle vital dans presque tous les écosystèmes, tel que le recyclage d'autres organismes.

Maladies et immunologie □

Les micro-organismes peuvent aussi être la cause de nombreuses maladies infectieuses. On distingue ainsi les bactéries pathogènes, provoquent des maladies comme la peste, la tuberculose et le charbon, les protozoaires sont quant à elles responsables de maladies comme le paludisme, la maladie du sommeil et la toxoplasmose et enfin les champignons provoquent des maladies telles que la teigne, la candidose ou histoplasmoses. Toutefois, d'autres maladies comme la

grippe, la fièvre jaune ou le SIDA sont causés par des virus pathogènes, qui ne sont généralement pas classés comme des organismes vivants et ne sont donc pas des micro-organismes au sens stricte du terme.

Besoins des micro-organismes □

Pour se nourrir, les micro-organismes ont besoin de :

- substances organiques :
 - glucides (sucres) : glucose, lactose... apport de carbone et d'énergie.

Utilisation soit par respiration (dégradation totale : gaz), soit par fermentation (composés divers issus du « découpage » plus ou moins importante des sucres.

Les produits de ces fermentations sont des déchets et sont donc rejetés dans le milieu naturel.

- Protides : apport de substances azotées.
 - Dégradation plus ou moins importante des protéines avec libération d'acides aminés, peptides, voire ammoniac : c'est la protéolyse.
- Lipides : éventuellement — apport de carbone et d'énergie.
 - Libération d'acides gras : appelée la lipolyse.
 - La quantité de lipides a un effet protecteur sur la destruction des bactéries par de hautes températures.
- Substances minérales : sels
- Facteurs de croissance : vitamines
- Eau

Par le froid, on stoppe la croissance de la majorité des micro-organismes qui vont se maintenir en état de dormance, sans multiplication.

L'importance du temps de chauffe permet, pour une température donnée, de parvenir à une destruction plus ou moins complète ; une augmentation de température impliquant une diminution du temps de chauffe. Les principaux traitements thermiques sont la pasteurisation et la stérilisation.

À une température favorable adaptée et optimale, on permettra le développement de certaines espèces :

- psychrophiles : température optimale de 12 à 15 °C
- psychrotrophes : température optimale de 25 à 30 °C
- mésophiles : température optimale de 30 à 45 °C
- thermophiles : température optimale de 55 à 75 °C

L'interaction de micro-organismes différents peut varier :

- la métabiose : succession sur un même milieu de micro-organismes ; les premiers préparent le « terrain » pour les suivants, puis stoppent leur multiplication et enfin disparaissent.
- la symbiose : développement sur un même milieu et en même temps de plusieurs espèces microbiennes, ces espèces se favorisant mutuellement.
- l'antibiose : il en existe plusieurs formes
 - par compétition, lié au nombre et à la virulence d'une espèce ; la plus combattive occupant le milieu, celui-ci devient impropre au développement de l'espèce la plus faible.
 - par inhibition : les antibiotiques
 - par parasitisme : les bactériophages ou virus dont la multiplication est 25 à 100 fois plus rapide que celle des bactéries.

L'activité des micro-organismes dans la biosphère et leur rôle dans les cycles biogéochimiques sont essentiels pour toute les formes de vie sur Terre.

La microbiologie est la science qui étudie les micro-organismes.

Recherche sur les espèces *extrêmophiles* □

- 2007. Une équipe de biologistes de l'Université du Massachusetts (États-Unis) a découvert un microbe se reproduisant à 121 °C ; Trouvé proche d'une cheminée située dans les profondeurs de l'Océan Pacifique, la "Souche 121" a survécu jusqu'à la température de 130 °C. C'est l'organisme connu vivant sur terre résistant à la plus forte température.
Précédemment on connaissait *Pyrolobus fumarii* qui mourait après 1 heure d'incubation à 121 °C.

Extrêmophile



Les thermophiles, sont un type d'organismes extrémophiles se développant dans les sources chaudes comme le Grand Prismatic Spring, au Parc national de Yellowstone

Un organisme est dit **extrêmophile** lorsque ses conditions de vie normales sont mortelles pour la plupart des autres organismes : températures proches ou supérieures à 100 °C (hyperthermophiles) ou inférieures à 0 °C (psychrophiles), pressions exceptionnelles (grands fonds marins), milieux très chargés en sel (halophiles), milieux très acides ou hyper-alcalins, milieux radioactifs ou anoxique (sans oxygène) ou non-éclairé.

Beaucoup d'extrémophiles appartiennent au taxon des Archaea ou des Bactéries, bien qu'il existe aussi des extrémophiles eucaryotes unicellulaires et métazoaires, (insectes, crustacés, poissons...). On réserve toutefois le terme aux organismes unicellulaires.

Des organismes extrémophiles peuvent par exemple être isolés de sources chaudes sulfureuses, de cheminées hydrothermales sous-marines, de sédiments, dans les glaces de l'Antarctique ou de l'Arctique, dans des eaux saturées en sel (lac ou Mer Morte), dans des gisements pétroliers...

Quelques êtres vivants, appelés polyextrémophiles, cumulent même plusieurs de ces résistances (exemple de *Deinococcus radiodurans*, *Kineococcus radiotolerans*, ou de *Sulfolobus acidocaldarius*).

Parfaitement adaptés à ces conditions très spéciales, les extrémophiles sont rares dans les conditions plus ordinaires. En effet, même lorsqu'ils sont capables de supporter ces conditions (car dans bien des cas leur métabolisme spécial nécessite les conditions extrêmes), ils supportent mal la concurrence d'organismes banals. Il arrive que l'on distingue *extrémophilie* et *extrémotolérance*, selon que l'organisme a besoin des conditions exceptionnelles, ou bien qu'il les supporte mais qu'on le trouve dans des conditions plus ordinaires.

Il faut bien distinguer le cas des extrémophiles-vrais (qui vivent normalement ou exclusivement en conditions extrêmes), des cas relativement banals d'organismes capables de provisoirement prendre une **forme résistante** aux conditions défavorables (en suspendant leurs fonctions vitales, en se protégeant par la formation d'un kyste ou d'une spore). Certaines bactéries comme *Deinococcus radiodurans* sont capables de s'autoréparer en condition extrêmes, mais ne les exigent pas pour vivre.

Différents types d'extrémophiles □

- Acidophile : organisme vivant dans des environnements acides (pH optimum de croissance proche de 3).
- Alcalophile : organisme vivant dans des environnements basiques (pH optimum de croissance proche de 9 et plus).
- Halophile : organisme vivant dans des milieux très salés (forte concentration en NaCl).
- Métalotolérant : organisme tolérant de hautes concentrations en métal (cuivre, cadmium, arsenic, zinc).
- Psychrophile ou psychrotolérant : organisme vivant dans des environnements froids (abysses, glaciers, voire réfrigérateur où ils peuvent affecter l'hygiène alimentaire en rendant moins efficace la chaîne du froid).

- Piézophile ou barophile : organisme vivant dans des environnements soumis à des pressions élevées (fonds océaniques profonds jusqu'à -11 000 mètres ; fosse des Mariannes)
- Radorésistant : organisme pouvant survivre à des radiations ionisantes élevées.
- Thermophile : organisme vivant dans des environnements chauds avec des optimums de croissance proche de 60 °C.
- Hyperthermophile : organisme vivant dans des environnements très chauds avec des optimums de croissance proche de 90 °C à plus de 100 °C.
- Xérophile : organisme capable de résister à la dessiccation (ayant besoin de peu d'eau pour survivre).

Intérêt de l'étude des extrêmophiles □

Les extrêmophiles sont un sujet d'étonnement et d'étude à plusieurs titres :

- Leurs particularités offrent des perspectives technologiques variées (protéines thermostables, enzymes de lessives à l'eau froide, par exemple) et un vaste champ d'études biologiques. Les protéines et enzymes extrêmes constituent un marché en plein essor (biotechnologie et industrie chimique). L'exemple le plus spectaculaire est la Taq polymérase provenant de *Thermus aquaticus* qui est largement employé pour les réactions de PCR.
- L'apparition de la vie a peut-être eu lieu dans un environnement extrême. L'atmosphère primitive de l'époque, sans oxygène et sans ozone, laissait passer les UV du soleil qui pouvait entraîner la formation de radicaux libres toxiques pour les cellules. Le chimiste Günter Wächtershäuser pense que la vie est apparue dans un milieu chaud sulfuro-ferreux en absence d'oxygène. Ce milieu est proche de celui des cheminées hydrothermales où vivent de nombreux micro-organismes hyperthermophiles. Cependant, les preuves fossiles de l'existence d'une forme de vie au niveau de site hydrothermaux fossilisés ne sont pas encore confirmées.
- Ils illustrent les capacités étonnantes d'adaptation de la vie, ce qui crédibilise l'idée de formes de vie sur des planètes en apparence non viables.

Quelques exemples d'extrêmophiles □

- *Pyrolobus fumarii* isolée de cheminée hydrothermale sous-marine se multiplie encore à 113 °C.
- Une souche surnommée *Strain 121*, proche des Archaea des genres *Pyrodictium* et *Pyrobaculum*, a été isolée d'échantillons hydrothermaux et serait capable de survivre à 121 °C.
- *Sulfolobus acidocaldarius* isolé de sources chaudes acides, est à la fois acidophile (croissance à un pH de 2-3) et hyperthermophile (optimum de croissance vers 80 °C).
- *Deinococcus radiodurans*, radorésistant à 1 500-3 000 fois la tolérance humaine.
- *Bacillus infernus* a été isolée à 2 700 mètres sous la surface du sol.
- *Ferroplasma acidarmanus* peut croître à pH proche de 0.

- *Desulforudis audaxviator* a été trouvé à - 1500 m puis - 2800 m de profondeur, dans le sol d'une mine d'or (Bassin du Witwatersand, Afrique du Sud) où elle supporte une température de 60 °C et un pH de 9,3^[1].
- *Haloarcula marismortui* isolée de la Mer morte, est très halophile et se développe dans une eau à 300 g/l de NaCl (10 fois la salinité de l'océan).
- Les poissons de la famille des *Nototheniidae*, vivent dans l'Océan Austral et sécrètent des protéines « *antigel* » dans leur sang.
- Le ver de Pompéi *Alvinella pompejana*, des cheminées hydrothermales sous-marines, présente des capacités de thermorésistance exceptionnelles pour un eucaryote pluricellulaire (tolère une température de 20 à plus de 80 °C chez l'adulte).

Extrêmophilie polaire □

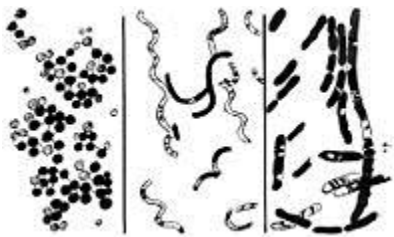
On a découvert en 2004 un nombre important de micro-organismes sous des roches de l'Arctique et du continent Antarctique.

Ce milieu était jusqu'alors considéré comme particulièrement hostile au développement de la vie, d'une part en raison des températures extrêmes, mais aussi à cause de vents extrêmement violents et surtout du rayonnement ultraviolet.

Bacteria

La plupart des bactéries possèdent une paroi cellulaire glucidique, le peptidoglycane. Les bactéries les plus grosses mesurent plus de 2 µm et on considérait jusqu'à il y a peu que les plus petites mesuraient 0,2 µm, mais on a depuis peu découvert des "ultramicrobactéries", y compris en eau douce ^{[2],[3],[4]}.

Elles présentent de nombreuses formes : sphériques (coques), allongées ou en bâtonnets (bacilles), des formes plus ou moins spiralées. L'étude des bactéries est la bactériologie, une branche de la microbiologie.



□ Coques à gauche, *Spirillum* au centre, bacille à droite.

Les bactéries sont ubiquitaires et sont présentes dans tous les types de biotopes rencontrés sur Terre. Elles peuvent être isolées du sol, des eaux douces, marines ou saumâtres, de l'air, des profondeurs océaniques, des déchets radioactifs^[5], de la croûte terrestre, sur la peau et dans l'intestin des animaux. Il y a environ 40 millions de cellules bactériennes dans un gramme de sol et 1 million de cellules bactériennes dans un millilitre d'eau douce. On estime qu'il y aurait (à un instant donné) quatre à six quintillions (4×10^{30} à 6×10^{30}), soit entre 4 et 6 mille milliards de

milliards de milliards de bactéries dans le monde^[6], représentant une grande partie de la biomasse du monde^[6]. Cependant, un grand nombre de ces bactéries ne sont pas encore caractérisées car non cultivables en laboratoire^[7]. Les bactéries ont une importance considérable dans les cycles biogéochimiques comme le cycle du carbone et la fixation de l'azote de l'atmosphère.

Chez l'Homme, il a été calculé que 10^{12} bactéries colonisent la peau, 10^{10} bactéries colonisent la bouche et 10^{14} bactéries habitent dans l'intestin, ce qui fait qu'il y a dix fois plus de cellules bactériennes que de cellules humaines dans le corps humain^[8]. La plupart de ces bactéries sont inoffensives ou bénéfiques pour l'organisme. Il existe cependant de nombreuses espèces pathogènes à l'origine de beaucoup de maladies infectieuses comme le choléra, la syphilis, la peste, l'anthrax, la tuberculose. Le plus souvent, les maladies bactériennes mortelles sont les infections respiratoires: la tuberculose à elle seule tue environ 2 millions de personnes par an, principalement en Afrique subsaharienne^[9]. Des bactéries peuvent entraîner des troubles respiratoires ou intestinaux alors que d'autres peuvent être responsables de l'infection d'une blessure. Les infections bactériennes peuvent être traitées grâce aux antibiotiques, qui le plus souvent inhibent une de leurs fonctions vitales (par exemple, la pénicilline bloque la synthèse de la paroi cellulaire).

Les bactéries peuvent être très utiles à l'Homme lors des processus de traitement des eaux usées, dans l'agroalimentaire lors de la fabrication des yaourts ou du fromage et dans la production industrielle de nombreux composés chimiques^[10].

Histoire □

Les bactéries étant microscopiques, elles ne sont donc visibles qu'avec un microscope. Antoine van Leeuwenhoek fut le premier à observer des bactéries, grâce à un microscope de sa fabrication, en 1668^[11]. Il les appela « animalcules » et publia ses observations dans une série de lettres qu'il envoya à la Royal Society^{[12],[13],[14]}.

Le mot « bactérie » apparaît pour la première fois avec le microbiologiste allemand Christian Gottfried Ehrenberg en 1828^[15]. Ce mot dérive du grec *βακτηριον*, qui signifie « bâtonnet ».

Au XIX^e siècle, les travaux de Louis Pasteur ont révolutionné la bactériologie. Il démontra en 1859 que les processus de fermentation sont causés par des micro-organismes et que cette croissance n'était pas due à la génération spontanée. Il démontra aussi le rôle des micro-organismes comme agents infectieux^[16]. Pasteur conçut également des milieux de culture, des procédés de destruction des micro-organismes comme l'autoclave et la pasteurisation.

Le médecin allemand Robert Koch et ses collaborateurs mirent au point les techniques de culture des bactéries sur milieu solide. Robert Koch est un des pionniers de la microbiologie médicale, il a travaillé sur le choléra, la maladie du charbon (anthrax) et la tuberculose. Il démontra de façon claire qu'une bactérie pouvait être l'agent responsable d'une maladie infectieuse et il proposa une série de postulats (les postulats de Koch, toujours utilisés aujourd'hui^[17]) confirmant le rôle étiologique d'un micro-organisme dans une maladie. Il obtint le prix Nobel de médecine et de physiologie en 1905^[18].

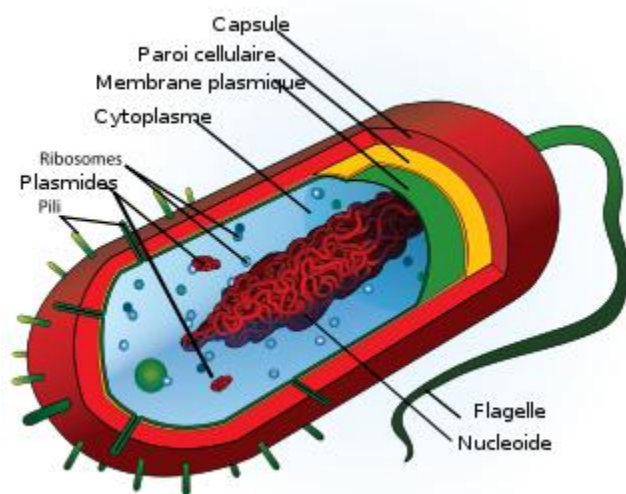
Bien qu'on savait au dix-neuvième siècle que les bactéries sont la cause de nombreuses maladies, il n'y avait pas d'antiseptique disponibles^[19]. En 1910, Paul Ehrlich développa le premier antibiotique, par l'évolution des colorants sélectifs teintés *Treponema pallidum*—le spirochaete qui cause la syphilis—en composés qui tuent l'agent pathogène de façon sélective^[20]. Ehrlich a reçu en 1908 le prix Nobel pour ces travaux sur l'immunologie, et pionnier de l'usage de colorant pour détecter et identifier les bactéries, son travail étant la base de la coloration de Gram et de la coloration de Ziehl-Neelsen^[21].

Les microbiologistes Martinus Beijerinck et Sergei Winogradsky initièrent les premiers travaux de microbiologie de l'environnement et d'écologie microbienne en étudiant les communautés microbiennes du sol et de l'eau et les relations entre ces micro-organismes.

Si les bactéries étaient connues au XIX^e siècle, il n'existait pas encore de traitement antibactérien. En 1909, Paul Ehrlich mit au point un traitement contre la syphilis avant l'utilisation de la pénicilline en thérapeutique suggérée par Ernest Duchesne en 1897 et étudiée par Alexander Fleming en 1929.

En 1977, Carl Woese grâce à ses travaux de phylogénie moléculaire divisa les procaryotes en deux groupes : les Bacteria et les Archaea^[22].

Structure cellulaire □



□ Schéma de la structure cellulaire d'une cellule bactérienne typique.

En tant que procaryote (organisme sans noyau), les bactéries sont des cellules relativement simples, caractérisées par une absence de noyau et d'organites comme les mitochondries et les chloroplastes, elles n'ont pas non plus de réticulum endoplasmique ou d'appareil de golgi^[23].

Une caractéristique importante des bactéries est la paroi cellulaire. Les bactéries peuvent être divisées en deux groupes (Gram négatif et Gram positif) basé sur la différence de la structure et de la composition chimique de la paroi cellulaire mise en évidence grâce à la coloration de

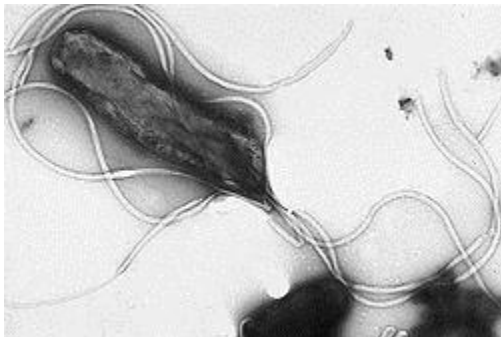
Gram. Les bactéries à coloration de Gram positif possèdent une paroi cellulaire contenant un peptidoglycane (ou muréine) épais et des acides teichoïques alors que bactéries à coloration de Gram négatif présentent un peptidoglycane fin localisé dans le périplasme entre la membrane cytoplasmique et une membrane cellulaire externe. La paroi donne à la bactérie sa forme et la protège contre l'éclatement sous l'effet de la très forte pression osmotique du cytoplasme. Le peptidoglycane assure la rigidité de la paroi. Il existe toutefois des bactéries sans paroi : ce sont les mycoplasmes.

Intracellulaire □

Les bactéries étaient vues comme de simples sacs de cytoplasme, mais de nombreux niveaux de complexité structurelle ont été découverts depuis, comme la découverte du cytosquelette procaryote^{[24],[25]}, et la localisation spécifique de protéines dans le cytoplasme bactérien^[26]. Ces compartiments subcellulaires ont été nommés « hyperstructure bactériennes » (« *bacterial hyperstructures* » en anglais)^[27].

Les bactéries possèdent un chromosome sous forme de filament d'ADN, support de l'hérédité. Le chromosome bactérien est en général circulaire. En plus de cet ADN génomique, les cellules bactériennes contiennent souvent des molécules d'ADN circulaire extra-chromosomiques appelées plasmides. Les cellules contiennent aussi de nombreux ribosomes permettant la synthèse protéique grâce au mécanisme de la traduction. Le cytoplasme des procaryotes contient souvent des substances intracellulaires de réserve qui sont des stocks de nutriments sous forme de glycogène, amidon ou poly-b-hydroxybutyrate (PBH). Certaines espèces de bactéries aquatiques possèdent des vésicules à gaz qui assurent la flottabilité des cellules. D'autres espèces, les bactéries magnétotactiques, ont la particularité de présenter un magnétosome.

Extracellulaire □



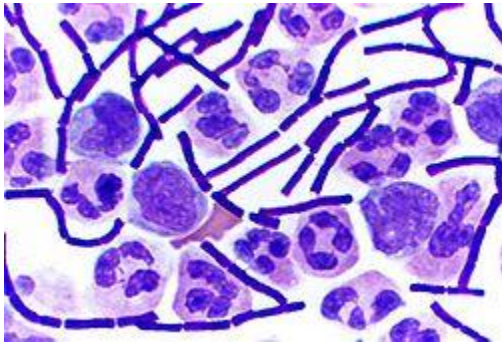
☞ *Helicobacter pylori* micrographie électronique montrant de nombreux flagelles à la surface de la cellule.

Beaucoup de bactéries possèdent des structures extra-cellulaires comme des flagelles utilisés pour la mobilité des cellules, des fimbriae permettant l'attachement et des pili sexuels indispensables au phénomène de conjugaison. Les bactéries hétérotrophes peuvent utiliser leurs flagelles pour se diriger vers des zones riches en substances organiques (nutriments) grâce au phénomène appelé chimiotactisme.

Quelques bactéries peuvent fabriquer de fines couches externes à la paroi cellulaire, généralement constituées de polysaccharides (des sucres). Quand la couche est compacte, on parle de capsule. Les capsules constituent par exemple une barrière de protection de la cellule contre l'environnement externe et aussi contre la phagocytose. Elle facilite aussi l'attachement aux surfaces et la formation de biofilms. *Klebsiella*, *Bacillus anthracis*, *Streptococcus pneumoniae* sont des exemples de bactéries capsulées. Quand la couche est diffuse, on parle de couche mucoïde. Quand la couche est plus épaisse, on parle de glycocalyx. Le glycocalyx permet aux bactéries d'adhérer à un support.

Certaines bactéries qualifiées de bactéries engainées produisent une couche externe dense et rigide : la gaine. Ce phénomène est courant chez les bactéries de l'eau qui forment des chaînes filamenteuses (*Sphaerotilus natans* par exemple). La gaine protège les cellules contre les turbulences de l'eau. Les bactéries du groupe *Cytophaga* – *Flavobacterium* produisent une couche muqueuse qui leur permet de rester en contact étroit avec un milieu solide. D'autres bactéries comme les *Spirillum* peuvent s'envelopper d'une couche protéique appelée la couche S.

Endospores □



Bacillus anthracis (colorés en violet) se développent dans un liquide céphalorachidien.

Quelques bactéries, Gram positif, comme *Bacillus*, *Clostridium*, *Sporohalobacter*, *Anaerobacter* et *Heliobacterium* peuvent fabriquer des endospores leur permettant de résister à certaines conditions de stress environnemental ou chimique^[28]. La formation d'un endospore n'est pas un processus de reproduction. Les *Anaerobacter* peuvent faire jusqu'à sept endospores en une seule cellule^[29]. Les bactéries à endospores ont une zone centrale de cytoplasme contenant l'ADN et ribosomes entouré par une couche du cortex et protégé par un manteau imperméable et rigide.

Les bactéries à endospores peuvent survivre dans des conditions physiques et chimiques extrêmes, tels que des niveaux élevés de rayonnement UV, les rayons gamma, les détergents, les désinfectants, une forte chaleur ou pression et à la dessiccation^[30]. Ces organismes pourraient rester viable durant des millions d'années^{[31],[32]}. Les endospores peuvent même permettre aux bactéries de survivre à l'exposition au vide et au rayonnement dans l'espace^[33].

Les bactéries à endospore peuvent également causer des maladies: par exemple, la maladie du charbon peut être contractée par l'inhalation d'endospores *Bacillus anthracis*, et la contamination des plaies profondes avec la perforation par *Clostridium tetani* responsable du tétanos^[34].

Croissance et reproduction □

La division cellulaire □

Deux cellules identiques sont produites à partir d'une cellule mère. La croissance cellulaire se manifeste par un accroissement du volume cellulaire, suivi de la synthèse d'un septum transversal au milieu de la cellule, aboutissant à la séparation des deux cellules filles. La division bactérienne est précédée par la duplication du chromosome bactérien grâce à la réplication de l'ADN.

Quelques bactéries présentent des structures reproductives plus complexes mais toujours de manière asexuée, facilitant la dispersion : *Myxococcus* élabore des fructifications, tandis que *Streptomyces* forme des hyphes aériens.

Quand elles se trouvent dans un milieu propice les bactéries peuvent se multiplier à une allure vertigineuse. Une population de bactérie peut doubler toutes les 20 minutes en fonction de : la disponibilité en nutriments, la présence de bactéries concurrentes, la présence de prédateurs (par exemple des paramécies), la présence de bactériophages, la présence d'antibiotiques (inhibant par exemple la synthèse de la paroi bactérienne, entraînant donc leur mort) produits par des champignons ou des actinomycètes (bactéries filamenteuses).

Croissance et culture des bactéries □



Colonies bactériennes sur milieu solide gélosé en boîte de Pétri.



Dans la nature, depuis des milliards d'années, les biofilms et concrétions bactériennes contribuent au cycle de nombreux éléments, à la formation de « filons » riches en métaux (par bioconcentration), ainsi qu'à la formation et dégradation des roches.

Au laboratoire, les bactéries peuvent être cultivées en milieu de culture liquide ou en milieu solide. Le milieu de culture doit apporter les éléments nutritifs ou nutriments élémentaires à la bactérie. Les milieux de culture gélosés solides sont utilisés pour isoler des cultures pures de cellules bactériennes. Dans le cas des bactéries se divisant rapidement, une cellule bactérienne dispersée sur un milieu gélosé va se multiplier et, au bout de 24 à 48 heures, devenir un amas de bactéries, appelé une colonie bactérienne, visible à l'œil nu.

Le temps de génération est le temps nécessaire à une bactérie pour se diviser. Le temps de génération correspond donc au temps nécessaire pour qu'une population de cellules double en nombre. Ce temps est très variable selon les espèces de bactéries et les conditions environnementales. Au laboratoire, dans des conditions idéales, il est par exemple de 20 minutes pour *Escherichia coli*, 100 minutes pour *Lactobacillus acidophilus*, 1 000 minutes pour *Mycobacterium tuberculosis*.

La croissance d'une population bactérienne dans un milieu de culture liquide non renouvelé, peut être observée dans le temps. Les cellules se divisent, et leur nombre augmente avec le temps. Si on relève le nombre de bactéries à différents intervalles au cours de la croissance, on obtient une courbe de croissance. Elle présente quatre phases principales :

- La phase de latence correspond à une période d'adaptation de la bactérie au milieu
- Au cours de la phase de croissance exponentielle, les bactéries se développent de façon maximale avec un taux de croissance maximal et constant
- Après une phase transitoire de ralentissement, le nombre de bactéries n'évolue plus : c'est la phase stationnaire. Les divisions bactériennes qui se font encore sont compensées par la mort de bactéries
- La dernière phase est la phase de mortalité ou de déclin. Les bactéries ne se divisent plus, elles meurent et peuvent être lysées. Le milieu de culture n'apporte plus les conditions nécessaires au développement des bactéries. On observe une courbe de décroissance exponentielle progressive.

Paramètres influant sur la croissance microbienne □

Certaines conditions environnementales (paramètres physico-chimiques) influencent la croissance des micro-organismes. Parmi celles-ci figurent le pH (acidité et alcalinité), la température, la présence d'O₂, de CO₂, la disponibilité de l'eau.

La plupart des micro-organismes tolèrent une gamme de pH permettant la croissance. Le pH optimal de croissance de beaucoup de bactéries est proche de la neutralité (pH 7). Les micro-organismes acidophiles se développent à des pH acides, alors que les micro-organismes alcalinophiles se développent à des pH basiques.

De même, les bactéries peuvent être distinguées selon leur aptitude à croître en fonction de la température. Les mésophiles se développent généralement à des températures comprises entre 20 et 45 °C. Les psychrophiles possèdent des températures optimales de croissance inférieures à 15 °C, alors que les bactéries thermophiles croissent de façon optimale à des températures comprises entre 45 et 70 °C. Les micro-organismes ayant des températures optimales de croissance supérieures à 70 °C sont qualifiés d'hyperthermophiles.

Génétique □

Matériel génétique □

La plupart des bactéries possèdent un unique chromosome circulaire. Il existe toutefois de rares exemples de bactéries, comme *Rhodobacter sphaeroides* possédant deux chromosomes. Les bactéries du genre *Borrelia* ont la particularité d'avoir un génome linéaire et segmenté, ce qui est exceptionnel chez les procaryotes. La taille du génome peut être très variable selon les espèces de bactéries étudiées. Le génome de la souche de *Escherichia coli* séquencé en 1997 est constitué de 4,6 Mpb (4 600 000 paires de bases), il code 4 200 protéines. Le génome d'une autre souche de *E. coli* séquencé en 2001 comprend 5,5 Mpb codant 5 400 protéines.

Certaines bactéries présentent un tout petit génome, comme la bactérie parasite *Mycoplasma genitalium* avec un génome de 580 000 paires de bases et la bactérie endosymbiotique d'insecte, *Candidatus Carsonella ruddii* avec un génome de seulement 160 000 paires de bases^[35]. Au contraire, la bactérie du sol *Sorangium cellulosum* possède un génome constitué de 12 200 000 paires de bases^[36]. Chose peu commune, les Spirochètes ainsi que des *Streptomyces* présentent la particularité d'avoir un chromosome linéaire^[37].

Les bactéries contiennent également souvent un ou plusieurs plasmides, qui sont des molécules d'ADN extra-chromosomique. Ces plasmides peuvent conférer certains avantages aux bactéries, comme la résistance à des antibiotiques ou des facteurs de virulence. Les plasmides sont généralement des ADN double brin circulaire. Ils se répliquent indépendamment du chromosome. Le chromosome bactérien peut d'autre part intégrer de l'ADN de virus bactérien (bactériophage). Ces bactériophages peuvent contribuer au phénotype de l'hôte^[38]. Par exemple, les bactéries *Clostridium botulinum* et *Escherichia coli* O157:H7 synthétisent une toxine codée par un gène qui provient d'un phage qui s'est intégré au génome de ces bactéries au cours de l'évolution^[39].

Variation génétique □

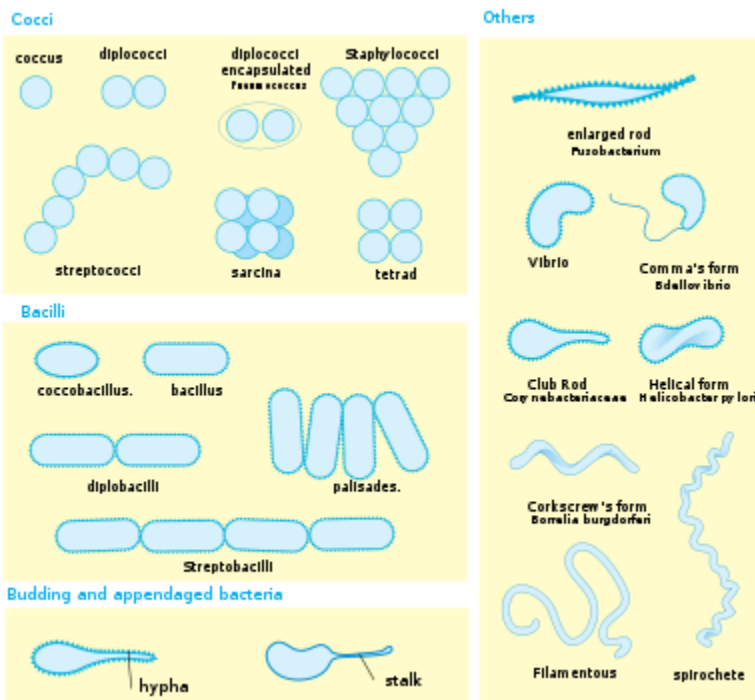
Les bactéries sont des organismes asexués, après la division bactérienne, les cellules filles héritent d'une copie identique du génome de leur parent. Cependant, toutes les bactéries sont

capables d'évoluer par modification de leur matériel génétique causé par des recombinaisons génétiques ou des mutations. Les mutations (changement ponctuel aléatoire de l'information génétique d'une cellule) proviennent d'erreur durant la réplication de l'ADN ou de l'exposition à des agents mutagènes. le taux de mutation varie grandement selon les espèces ou les souches bactériennes^[40].

Quelques bactéries peuvent également transférer du matériel génétique entre les cellules. Il existe 3 mécanismes de transfert de gènes entre les cellules : la transformation, la transduction, et la conjugaison.

Au cours de la transformation, c'est un plasmide qui est transféré dans la cellule bactérienne, alors qu'au cours de la transduction, le transfert d'ADN a lieu par l'intermédiaire d'un bactériophage. Au cours de la conjugaison, deux bactéries peuvent se rapprocher, grâce à des structures spéciales, les pili, et il y a alors un transfert d'ADN d'une bactérie à une autre. L'ADN étranger peut être intégré dans le génome et être transmis aux générations suivantes. Cette acquisition de gènes, provenant d'une bactérie ou de l'environnement, est appelé transfert horizontal de gènes (HGT pour *horizontal gene transfer*)^[41]. Le transfert de gènes est particulièrement important dans les mécanismes de résistance aux antibiotiques^[42].

Morphologie et association des bactéries □



Les bactéries présentent une grande diversité de morphologies et d'arrangements cellulaires.

Les bactéries présentent une grande diversité de tailles et de formes. Les cellules bactériennes typiques ont une taille comprise entre 0,5 et 5 µm de longueur, cependant, quelques espèces comme *Thiomargarita namibiensis* et *Epulopiscium fishelsoni* peuvent mesurer jusqu'à 500 µm

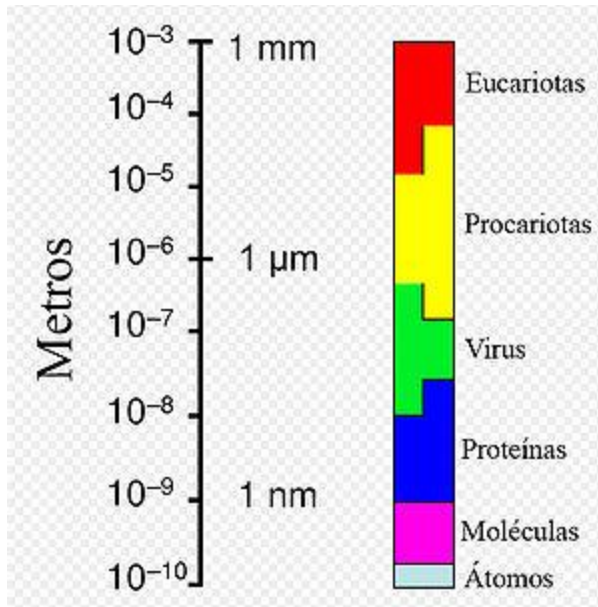
(0,5 mm) de long et être visibles à l'œil nu^[43]. Parmi les plus petites bactéries, les Mycoplasmes mesurent 0,3 μm , soit une taille comparable à certains gros virus^[44].

La plupart des bactéries sont soit sphériques, appelées coques (*pl. cocci*, du grecque *kókkos*, grain), ou soit en forme de bâtonnets, appelés bacilles (*pl. bacilli*, du Latin *baculus*, bâton). Il existe aussi des formes intermédiaires : les coccobacilles. Quelques bactéries en forme de bâtonnets sont légèrement incurvées comme les *Vibrio*. D'autres bactéries sont hélicoïdales. Ce sont des spirilles si la forme est invariable et rigide, des spirochètes si l'organisme est flexible et peut changer de forme. La grande diversité de formes est déterminée par la paroi cellulaire et le cytosquelette. Les différentes formes de bactéries peuvent influencer leur capacité d'acquérir des nutriments, de s'attacher aux surfaces, de nager dans un liquide et d'échapper à la prédation.



Escherichia coli observée au microscope électronique.

Beaucoup d'espèces bactériennes peuvent être observées sous forme unicellulaire isolée alors que d'autres espèces sont associées en paires (diploïdes) comme les *Neisseria* ou en chaînette, caractéristique des Streptocoques. Dans ces cas, les coques se divisent selon un axe unique et les cellules restent liées après la division. Certains coques se divisent selon un axe perpendiculaire et s'agencent de façon régulière pour former des feuillets. D'autres se divisent de façon désordonnée et forment des amas comme les membres du genre *Staphylococcus* qui présentent un regroupement caractéristique en grappe de raisins. D'autres bactéries peuvent s'allonger et former des filaments composés de plusieurs cellules comme les Actinomycètes. D'autres organismes comme les cyanobactéries forment des chaînes appelées trichomes. Dans ce cas, les cellules sont en relation étroite et les échanges physiologiques sont favorisés.

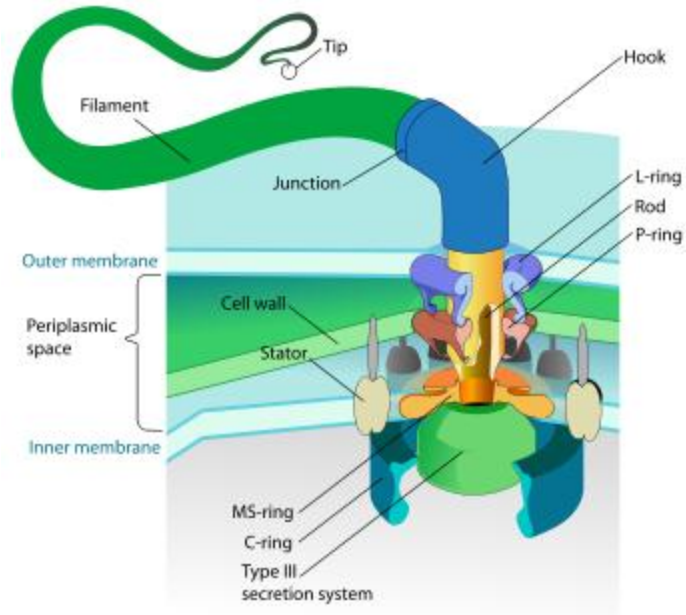


Gamme de tailles montrant les cellules procaryotes en relation avec d'autres organismes et biomolécules.

En dépit de leur apparente simplicité, les bactéries peuvent aussi former des associations complexes. Elles peuvent s'attacher aux surfaces et former des agrégations appelées biofilms. Les bactéries présentes dans le biofilm peuvent présenter un arrangement complexe de cellules et de composants extra-cellulaires, formant des structures secondaires comme des microcolonies, dans lesquelles se forme un réseau de canal facilitant la diffusion des nutriments.

Au sein des biofilms des relations s'établissent entre bactéries, conduisant à une réponse cellulaire intégrée. Les molécules de la communication cellulaire ou « lang » sont soit des Homosérine lactones pour les bactéries à Gram négatif, soit des peptides courts pour les bactéries à Gram positif. De plus au sein de biofilms établis, les caractéristiques physico-chimiques (pH, oxygénation, métabolites) sont néfastes au bon développement bactérien et constituent des conditions stressantes. Les bactéries mettent en place des réponses de stress qui sont autant d'adaptation à ces conditions défavorables. En général les réponses de stress rendent les bactéries plus résistantes à toute forme de destruction par des agents mécaniques ou des molécules biocides.

Mobilité des bactéries □



Flagelle d'une bactérie Gram-. La base entraîne une rotation du crochet et des filaments.

Certaines bactéries sont mobiles et peuvent se déplacer grâce à un ou plusieurs flagelles, d'autres bactéries peuvent se déplacer par glissement.

Les flagelles des bactéries sont de longs appendices protéiques flexibles. Leur nombre et leur position peuvent différer selon les espèces de bactéries. La flagellation (ou ciliature) polaire monotriche correspond à la présence d'un seul flagelle à un pôle de la bactérie (exemple des *Vibrio*). La flagellation polaire lophotriche correspond à la présence de plusieurs flagelles au pôle de la bactérie (*Pseudomonas* par exemple). D'autres bactéries comme *Escherichia coli* produisent des flagelles sur toute la surface cellulaire et possèdent donc une flagellation péritriche.

Beaucoup de bactéries (comme *Escherichia coli*) ont deux modes distincts de circulation : mouvement vers l'avant (natation) et mouvement de rotation ou mouvement de « roulis » également et appelé « lang » en anglais. Le tumbling leur permet de se réorienter et leur fait faire un mouvement en trois dimensions, évoluant vers un mouvement de marche au hasard^[45]. Les flagelles d'un groupe de bactéries, les spirochaetes, se trouvent entre deux membranes dans l'espace périplasmique^[46].

Le filament du flagelle est constitué d'une protéine, la flagelline. Le type de rotation du flagelle peut déterminer le type de mouvement de la bactérie.

Les bactéries mobiles peuvent réagir à des stimuli, être attirées par des substances nutritives comme les sucres, les acides aminés, l'oxygène, ou être repoussées par des substances nuisibles. Il s'agit de la chimiotaxie, phototaxis et magnétotaxis^{[47],[48]}. Ce comportement est appelé le chimiotactisme. Des chimiorécepteurs de nature protéique sont présents au niveau de la

membrane plasmique et du périplasma des bactéries et peuvent détecter différentes substances attractives ou nocives.

Les ions de cuivre bloquent la rotation des flagelles. Pour le faire repartir, on recourt à l'acide éthylènediaminetétraacétique, capable de capturer les ions et donc d'en libérer le flagelle.

Métabolisme □



□
Une cyanobactérie : *Anabaena spherica*.

Le métabolisme d'une cellule est l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent au niveau de cette cellule. Pour réaliser ce processus, les bactéries, comme toutes les autres cellules, ont besoin d'énergie. L'ATP est la source d'énergie biochimique universelle. L'ATP est commune à toutes les formes de vies, mais les réactions d'oxydo-réduction impliquées dans sa synthèse sont très variées selon les organismes et notamment chez les bactéries. Les bactéries vivent dans pratiquement toutes les niches environnementales de la biosphère. Elles peuvent ainsi utiliser une très large variété de source de carbone et/ou d'énergie.

Les bactéries peuvent être classées selon leur type de métabolisme, en fonction des sources de carbone et d'énergie utilisés pour la croissance, les donneurs d'électrons et les accepteurs d'électrons.

L'énergie cellulaire des chimiotrophes est d'origine chimique alors que celle des phototrophes est d'origine lumineuse. La source de carbone des autotrophes est le CO_2 , tandis que des substrats organiques sont la source de carbone des hétérotrophes. Il est aussi possible de distinguer deux sources possibles de protons (H^+) et d'électrons (e^-) : les bactéries réduisant des composés minéraux sont des lithotrophes alors que celles réduisant des substances organiques sont des organotrophes.

Les bactéries peuvent être divisées en quatre grands types nutritionnels en fonction de leurs sources de carbone et d'énergie :

- Les photoautotrophes utilisent la lumière comme source d'énergie et le CO_2 comme source de carbone.

- Les photohétérotrophes se développent par photosynthèse. Ils assimilent le CO₂ en présence d'un donneur d'électrons.
- Les chimioautotrophes utilisent des substrats inorganiques réduits pour l'assimilation réductrice du CO₂ et comme source d'énergie.
- Les chimiohétérotrophes utilisent des substrats organiques comme source de carbone et d'énergie.

Chez les chimiohétérotrophes, les substrats sont dégradés en plus petites molécules pour donner des métabolites intermédiaires (pyruvate, acétylCoA...) qui sont eux-mêmes dégradés avec production de CO₂, H₂O et d'énergie. Ces réactions productrices d'énergie sont des réactions d'oxydation d'un substrat hydrogéné, avec libération de protons et d'électrons grâce à des déshydrogénases. Le transfert de protons et d'électrons à un accepteur final est réalisé par toute une série d'enzymes qui forment une chaîne de transport électronique. L'énergie ainsi produite est libérée par petites étapes dans le but d'être transférée dans des liaisons chimiques riches en énergie (ATP, NADH, NADPH). Suivant la nature de l'accepteur final d'électrons, on distingue les processus de la respiration et de la fermentation. La respiration peut être aérobie quand O₂ est l'accepteur final de protons et d'électrons, ou anaérobie (respiration nitrate, et respiration fumarate par exemple). Dans tous les cas, l'accepteur final d'électrons doit être une molécule oxydée (O₂, NO₃⁻, SO₄²⁻).

Chez les organismes aérobies, l'oxygène est utilisé comme accepteur d'électrons. Chez les organismes anaérobies, d'autres composés inorganiques comme le nitrate, le sulfate ou le dioxyde de carbone sont utilisés comme accepteurs d'électrons. Ces organismes participent à des processus écologiques très importants lors de la dénitrification, la réduction des sulfates et l'acétogénèse. Ces processus sont aussi importants lors de réponses biologiques à la pollution, par exemple, les bactéries réduisant les sulfates sont responsables de la production de composés hautement toxiques à partir du mercure (méthyl et diméthylmercure) présent dans l'environnement. Les anaérobies (non respiratoires) utilisent la fermentation pour fournir de l'énergie à la croissance des bactéries. Au cours de la fermentation, un composé organique (le substrat ou la source d'énergie) est le donneur d'électrons tandis qu'un autre composé organique est l'accepteur d'électrons. Les principaux substrats utilisés lors de la fermentation sont des glucides, des acides aminés, des purines et des pyrimidines. Divers composés peuvent être relargués par les bactéries lors des fermentations. Par exemple, la fermentation alcoolique conduit à la formation d'éthanol et de CO₂. Les bactéries anaérobies facultatives sont capables de leur métabolisme entre la fermentation et différents accepteurs terminaux d'électrons, selon les conditions du milieu où elles se trouvent.

Selon leur mode de vie, les bactéries peuvent être classées en différents groupes :

- Les aérobies strictes peuvent vivre uniquement en présence de dioxygène ou oxygène moléculaire (O₂).
- Les aéro-anaérobies facultatives peuvent vivre en présence ou en absence de dioxygène.
- Les anaérobies ne peuvent vivre qu'en absence de dioxygène. Les aéro-tolérants sont des organismes anaérobies qui peuvent tout de même survivre en présence d'oxygène.
- les microaérophiles requièrent de l'oxygène pour survivre mais à une concentration faible.

Les bactéries lithotrophes peuvent utiliser des composés inorganiques comme source d'énergie. L'hydrogène, le monoxyde de carbone, l'ammoniac (NH_3), les ions ferreux ainsi que d'autres ions métalliques réduits et quelques composés du soufre réduit. Le méthane peut être utilisé par les méthanotrophes comme source de carbone et d'électrons. Chez les phototrophes aérobies et les chimiolithotrophes, l'oxygène est utilisé comme accepteur terminal d'électrons, alors qu'en condition anaérobie, ce sont des composés inorganiques qui sont utilisés.

En plus de la fixation du CO_2 lors de la photosynthèse, quelques bactéries peuvent fixer l'azote N_2 (fixation de l'azote en utilisant une enzyme : la nitrogénase. Des bactéries aérobies, anaérobies et photosynthétiques sont capables de fixer l'azote. Les cyanobactéries qui fixent l'azote, possèdent des cellules spécialisées (les hétérocystes).

Bactéries et écosystème □

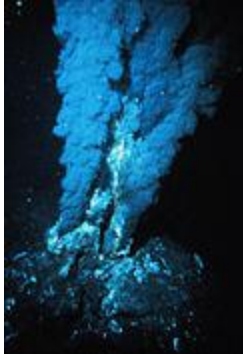
Les bactéries, avec les autres micro-organismes participent pour une très large part à l'équilibre biologique existant à la surface de la Terre. Ils colonisent en effet tous les écosystèmes et sont à l'origine de transformations chimiques fondamentales lors des processus biogéochimiques responsables du cycle des éléments sur la planète.

Écosystème aquatique □

Les eaux naturelles comme les eaux marines (océans) ou les eaux douces (lacs, mares, étangs, rivières...) sont des habitats microbiens très importants. Les matières organiques en solution et les minéraux dissous permettent le développement des bactéries. Les bactéries participent dans ces milieux à l'autoépuration des eaux. Elles sont aussi la proie des protozoaires. Les bactéries composant le plancton des milieux aquatiques sont appelées le bactérioplancton.

Bactérie du sol □

Le sol est composé de matière minérale provenant de l'érosion des roches et de matière organique (l'humus) provenant de la décomposition partielle des végétaux. La flore microbienne y est très variée. Elle comprend des bactéries, des champignons, des protozoaires, des algues, des virus, mais les bactéries sont les représentants les plus importants quantitativement. On peut y retrouver tous les types de bactéries, des autotrophes, des hétérotrophes, des aérobies, des anaérobies, des mésophiles, des psychrophiles, des thermophiles. Tout comme les champignons, certaines bactéries sont capables de dégrader des substances insolubles d'origine végétale comme la cellulose, la lignine, de réduire les sulfates, d'oxyder le soufre, de fixer l'azote atmosphérique et de produire des nitrates. Les bactéries jouent un rôle dans le cycle des nutriments des sols, et sont notamment capables de fixer l'azote. Elles ont donc un rôle dans la fertilité des sols pour l'agriculture. Les bactéries abondent au niveau des racines des végétaux avec lesquels elles vivent en mutualisme.



Une cheminée hydrothermale

À la différence des milieux aquatiques, l'eau n'est pas toujours disponible dans les sols. Les bactéries ont mis en place des stratégies pour s'adapter aux périodes sèches. Les *Azotobacter* produisent des cystes, les *Clostridium* et les *Bacillus* des endospores ou d'autres types de spores chez les Actinomycètes.

Environnements extrêmes □

Les bactéries peuvent aussi être rencontrées dans des environnements plus extrêmes. Elles sont qualifiées d'extrémophiles. Des bactéries halophiles sont rencontrées dans des lacs salés, des bactéries psychrophiles sont isolées d'environnements froids comme des océans Arctique et Antarctique, des banquises. Des bactéries thermophiles sont isolées des sources chaudes ou des cheminées hydrothermales.

Interactions avec d'autres organismes □

En dépit de leur apparente simplicité, les bactéries peuvent entretenir des associations complexes avec d'autres organismes. Ces associations peuvent être répertoriées en parasitisme, mutualisme et commensalisme. En raison de leurs petites tailles, les bactéries commensales sont ubiquitaires et sont rencontrées à la surface et à l'intérieur des plantes et des animaux.

Mutualistes □

Dans le sol, les bactéries de la rhizosphère (couche de sol fixée aux racines des plantes) fixent l'azote et produisent des composés azotés utilisés par les plantes (exemple de la bactérie *Azotobacter* ou *Frankia*). En échange, la plante excrète au niveau des racines des sucres, des acides aminés et des vitamines qui stimulent la croissance des bactéries. D'autres bactéries comme *Rhizobium* sont associées aux plantes légumineuses au niveau de nodosités sur les racines.

Il existe de nombreuses relations symbiotiques ou mutualistes de bactéries avec des invertébrés. Par exemple, les animaux qui se développent à proximité des cheminées hydrothermales des fonds océaniques comme les vers tubicoles *Riftia pachyptila*, les moules *Bathymodiolus* ou la crevette *Rimicaris exoculata* vivent en symbiose avec des bactéries chimiolitho-autotrophes.

Buchnera est une bactérie endosymbiote des aphides (puceron). Elle vit à l'intérieur des cellules de l'insecte et lui fournit des acides aminés essentiels. La bactérie *Wolbachia* est hébergée dans les testicules ou les ovaires de certains insectes. Cette bactérie peut contrôler les capacités de reproduction de son hôte.

Des bactéries sont associées aux termites et lui apportent des sources d'azote et de carbone.

Des bactéries colonisant la panse des herbivores permettent la digestion de la cellulose par ces animaux. La présence de bactéries dans l'intestin de l'Homme contribue à la digestion des aliments mais les bactéries fabriquent également des vitamines comme l'acide folique, la vitamine K et la biotine^[49].

Des bactéries colonisent le jabot d'un oiseau folivore (consommateur de feuilles), le Hoazin (*Opisthocomus hoazin*). Ces bactéries permettent la digestion de la cellulose des feuilles, de la même manière que dans le rumen des ruminants.

Des bactéries bioluminescentes comme *Photobacterium* sont souvent associées à des poissons ou des invertébrés marins. Ces bactéries sont hébergées dans des organes spécifiques chez leurs hôtes et émettent une luminescence grâce à une protéine particulière : la luciférase. Cette luminescence est utilisée par l'animal lors de divers comportements comme la reproduction, l'attraction de proies ou la dissuasion de prédateurs.

Pathogènes □



☞ Culture de *Mycobacterium tuberculosis*.

pour l'Homme □

Les bactéries pathogènes sont responsables de maladies humaines et causent des infections. Les organismes infectieux peuvent être distingués en trois types : les pathogènes obligatoires, accidentels ou opportunistes.

Un pathogène obligatoire ne peut survivre en dehors de son hôte. Parmi les bactéries pathogènes obligatoires, *Corynebacterium diphtheriae* entraîne la diphtérie, *Treponema pallidum* est l'agent de la syphilis, *Mycobacterium tuberculosis* provoque la tuberculose, *Mycobacterium leprae* la lèpre, *Neisseria gonorrhoeae* la gonorrhée. Les *Rickettsia* à l'origine du typhus sont des bactéries parasites intracellulaires.

Un pathogène accidentel présent dans la nature peut infecter l'Homme dans certaines conditions. Par exemple, *Clostridium tetani* provoque le tétanos en pénétrant dans une plaie. *Vibrio cholerae* entraîne le choléra suite à la consommation d'une eau contaminée.

Un pathogène opportuniste infecte des individus affaiblis ou atteints par une autre maladie. Des bactéries comme *Pseudomonas aeruginosa*, des espèces de la flore normale, comme des

Staphylococcus de la flore cutanée, peuvent devenir des pathogènes opportunistes dans certaines conditions. On rencontre ce type d'infection surtout en milieu hospitalier.

La capacité d'une bactérie à provoquer une maladie est son pouvoir pathogène. L'intensité du pouvoir pathogène est la virulence. L'aboutissement de la relation bactérie-hôte et l'évolution de la maladie dépendent du nombre de bactéries pathogènes présentes dans l'hôte, de la virulence de cette bactérie, des défenses de l'hôte et de son degré de résistance.

Pour déclencher une maladie, les bactéries infectieuses doivent d'abord pénétrer dans l'organisme et adhérer à un tissu. Des facteurs d'adhésion permettent la fixation des bactéries à une cellule. Le pouvoir invasif est la capacité de la bactérie à se répandre et à se multiplier dans les tissus de l'hôte. Les bactéries peuvent produire des substances lytiques lui permettant de se disséminer dans les tissus. Certaines bactéries présentent aussi un pouvoir toxigène qui est la capacité de produire des toxines, substances chimiques portant préjudice à l'hôte. On peut distinguer les exotoxines libérées lors de la multiplication des bactéries et les endotoxines fixées dans la membrane des bactéries.

Les bactéries pathogènes tentant d'envahir un hôte rencontrent toutefois de nombreux mécanismes de défense assurant à l'organisme une protection aux infections. Une bonne alimentation et une hygiène de vie correcte constituent une première protection. La peau, les muqueuses forment une première ligne de défense contre la pénétration d'organismes pathogènes. Les bactéries de la flore normale constituent aussi une barrière de protection. Lorsqu'un micro-organisme a pénétré ces premières lignes de défense, il rencontre des cellules spécialisées qui se mobilisent contre l'envahissement : ce sont les phagocytes. L'inflammation est une réaction défensive non spécifique. Un second système de défense très efficace est le système immunitaire spécifique, capable de reconnaître des antigènes portés ou sécrétés par les bactéries, et d'élaborer des anticorps et des cellules immunitaires spécifiques de ces antigènes.

pour les plantes □

Les bactéries pathogènes pour les plantes sont connues du grand public pour leur responsabilité dans la dévastation de cultures agricoles. En 2001 les vergers du midi de la France étaient victime d'une vague d'infection par une bactérie du genre *xanthomonas*^[50]

En biotechnologie végétale la bactérie du sol *Agrobacterium tumefaciens* est utilisée pour sa capacité à transmettre un fragment d'ADN à la plante cible lors de son cycle infectieux.

Importance des bactéries dans l'industrie et les technologies

□

L'origine de la microbiologie industrielle date de l'époque préhistorique. Les premières civilisations ont utilisé sans le savoir des micro-organismes pour produire des boissons alcoolisées, du pain et du fromage.

Les bactéries comme *Lactobacillus*, *Lactococcus* ou *Streptococcus*, combinées aux levures et moisissures interviennent dans l'élaboration d'aliments fermentés comme les fromages, les yaourts, la bière, le vin, la sauce de soja, le vinaigre, la choucroute.

Les bactéries acétiques (*Acetobacter*, *Gluconobacter*) peuvent produire de l'acide acétique à partir de l'éthanol. Elles sont rencontrées dans les jus alcoolisés et sont utilisées dans la production du vinaigre. Elles sont également exploitées pour la production d'acide ascorbique (vitamine C) à partir du sorbitol transformée en sorbose.

La capacité des bactéries hétérotrophes à dégrader une large variété de composés organiques est exploitée dans des processus de traitement des déchets comme la bioremédiation ou le traitement des eaux usées. Des bactéries sont également utilisées dans les fosses septiques pour en assurer l'épuration. Des bactéries, capables de dégrader des hydrocarbures du pétrole, peuvent être utilisées lors du nettoyage d'une marée noire. Le processus de nettoyage de milieux pollués par des micro-organismes est la bioremédiation.

Des bactéries peuvent être utilisées pour récupérer des métaux d'intérêts économiques à partir de minerais. C'est la biolixiviation. L'activité de bactéries est ainsi exploitée pour la récupération du cuivre.

Des bactéries peuvent être utilisées à la place de pesticides en lutte biologique pour combattre des parasites des plantes. Par exemple, *Bacillus thuringiensis* produit une protéine Bt qui est toxique pour certains insectes. Cette toxine est utilisée en agriculture pour combattre des insectes qui se nourrissent de plantes.

En raison de leur capacité à se multiplier rapidement et de leur relative facilité à être manipulées, certaines bactéries comme *Escherichia coli* sont des outils très utilisés en biologie moléculaire, génétique et biochimie. Les scientifiques peuvent déterminer la fonction de gènes, d'enzymes ou identifier des voies métaboliques nécessaires à la compréhension fondamentale du vivant et permettant également de mettre en œuvre de nouvelles applications en biotechnologie.

De nombreuses enzymes utilisées dans divers processus industriels ont été isolées de micro-organismes. Les enzymes des détergents sont des protéases de certaines souches de *Bacillus*. Des amylases capables d'hydrolyser l'amidon sont très utilisées dans l'industrie alimentaire. La Taq polymérase utilisée dans les réactions de polymérisation en chaîne (PCR) pour l'amplification de l'ADN provient d'une bactérie thermophile *Thermus aquaticus*.

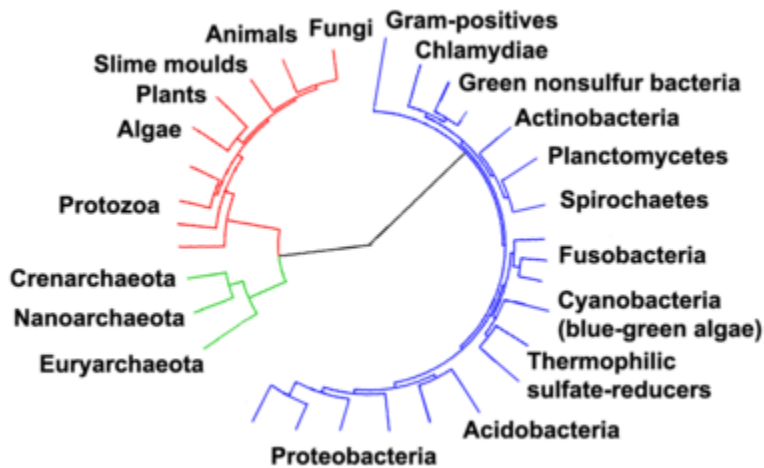
Les bactéries génétiquement modifiées sont très utilisées pour la production de produits pharmaceutiques. C'est le cas par exemple de l'insuline, l'hormone de croissance, certains vaccins, des interférons... Certaines bactéries comme *Streptomyces* sont très employées pour la production d'antibiotiques.

Certaines bactéries peuvent provoquer une dégradation d'installation (biocorrosion), en particulier les bactéries sulfato-réductrices

Classification et Identification □

La taxonomie permet de classer de façon rationnelle les organismes vivants. Chez les bactéries, les taxons dans l'ordre hiérarchique sont les suivant : phylums (ou divisions), classes, sous-

classes, ordres, sous-ordres, familles, sous-familles, tribus, sous-tribus, genres, sous-genres, espèces et sous-espèces. Différentes approches permettent la classification des bactéries.



Arbre phylogénétique montrant la diversité des bactéries, comparés aux autres organismes^[51]. Les eucaryotes sont colorés en rouges, les archaea en vert et les bactéries en bleu.

Classification phénotypique □

- Critères morphologiques (forme et groupement des bactéries, présence ou absence de flagelle, nature de la paroi, type de mobilité, présence d'endospore).
- Critères physiologiques (type métabolique, source d'énergie, de carbone, d'azote, type de substrat utilisé, capacité à produire certaines molécules, produits de fermentation, métabolites secondaires...).
- Critères de pathogénicité.
- Critères de sérogroupage.

Chimiotaxonomie □

Il s'agit de l'analyse chimique de constituants cellulaires (structure et composition de la paroi, des membranes plasmiques, du peptidoglycane).

Classification moléculaire □

- Composition en bases de l'ADN. Le pourcentage de guanine + cytosine varie d'un organisme à un autre, mais est relativement constant au sein d'une même espèce. Le pourcentage de G + C varie de 25 à 70 % chez les procaryotes.
- Hybridation ADN – ADN. Cette technique permet de comparer la totalité du génome bactérien et d'estimer le degré d'homologie entre deux bactéries. Cette caractéristique est importante dans la définition d'une espèce bactérienne.
- Séquençage des ARN ribosomiques ou séquençage des gènes codant les ARNr. Chez les procaryotes, la comparaison de la séquence en nucléotides de l'ARN 16S permet

d'évaluer le degré de parenté entre ces organismes. Ces gènes sont qualifiés d'horloge moléculaire et permettent la classification phylogénétique.

Identification des espèces bactériennes □

La détermination génétique des espèces se base sur l'étude des gènes des ARN ribosomiques. Le choix des gènes des ARNr 16S se justifie pour les raisons suivantes :

- les ARNr 16S sont des molécules ubiquistes ;
- leur structure est bien conservée car toute modification pourrait nuire à la synthèse protéique. Il en résulte une évolution très lente de ces gènes.

Le choix des gènes des ARNr plutôt que les ARNr eux-mêmes se base sur le choix de la technique de l'amplification par PCR. Cette technique permet, à partir d'une colonie de bactéries, d'obtenir des fragments d'ADN correspondants au gène ou à une partie du gène. Les analyses génétiques concernent également la région intergénique 16S-23S des opérons des ARN ribosomiques. Cette dernière est une région de longueur variable selon les organismes. Elle donne une indication immédiate sur le fait que deux souches données appartiennent ou non à la même espèce.

Tous les micro-organismes possèdent au moins une copie des gènes codant les ARN ribosomiques. Ces molécules sont indispensables à la synthèse des protéines, raison pour laquelle cette séquence d'ADN est très conservée au sein des espèces (plus de 99 %). Cette conservation de séquence permet d'utiliser cette région pour la détermination des espèces. En effet, Le degré de similarité des séquences d'ARNr entre deux organismes indique leur parenté relative. La procédure utilisant l'ARNr 16S comme facteur d'identification implique l'extraction de l'ADN des bactéries d'une colonie. Puis des amorces reconnaissant des zones très conservées du gène permettent d'amplifier par PCR une grande partie du gène ARNr 16S, qui par la suite est séquencé. Les données sur la séquence nucléotidique sont comparées avec des bases de données de séquences déjà connues. Les séquences du gène codant l'ARNr 16S sont connues pour plus de 4 000 souches bactériennes. Ces séquences peuvent être consultées par interrogation de banques de données telles qu'EMBL et GenBank par les logiciels Fasta et Blast. Le Ribosomal Data Project II (RDP) est également intéressant dans la mesure où sa base de données est spécifique de l'ARN 16S. Ces logiciels sont accessibles en ligne sur l'internet. Selon les différents auteurs, le degré d'homologie entre deux bactéries pour qu'elles appartiennent à la même espèce doit être supérieur à 97 %, voire 99 %.

Comme les gènes de la région intergénique 16S-23S sont moins conservés, ils diffèrent d'une souche à l'autre aussi bien au niveau de la séquence que de la longueur. Ceci résulte de ce que de nombreuses bactéries ont des copies multiples par génome de l'opéron de l'ARNr, il en résulte lors de l'amplification un motif caractéristique. Comme pour le gène de l'ARNr 16S, l'étude systématique de la région intergénique 16S-23S requiert l'amplification de cette région par PCR. L'utilité de la région intergénique 16S-23S est qu'elle permet de distinguer des espèces différentes et parfois différentes souches au sein de la même espèce. En effet la région intergénique étant moins conservée, des variabilités au niveau des séquences peuvent se présenter pour des souches de la même espèce mais appartenant à des biovars différents.

Les séquences de la région intergénique 16S-23S sont comparées par interrogation des bases de données IWoCS qui est spécifique de la région intergénique 16S-23S. La base de données GenBank est également très bien fournie. Le degré d'homologies devrait idéalement être proche de 100 % pour des souches identiques.

Anecdotes □

Les plus anciennes bactéries en vie □

Le 4 septembre 2007, un forage dans le pergélisol du nord-ouest Canadien a permis à des scientifiques de l'université de Californie dirigée par le professeur Eske Willerslev (Université de Copenhague) de mettre au jour une bactérie vieille d'environ 500 000 ans et toujours vivante.

On a retrouvé une bactérie endormie à l'intérieur d'une abeille qui était dans de l'ambre (résine fossile - provenant de conifères de l'époque oligocène, qui poussaient sur l'emplacement de l'actuelle mer Baltique - se présentant sous forme de morceaux durs et cassants, plus ou moins transparents, jaunes ou rougeâtres) depuis 25 à 40 millions d'années.

De même, une bactérie demeurée endormie depuis 250 millions d'années a été découverte dans un cristal de sel. Elle a été découverte par Russell Vreeland de l'université de West Chester en Pennsylvanie dans un lit de sel à environ 600 mètres sous terre, près de Carlsbad au Nouveau-Mexique.

Dans l'espace, les bactéries deviendraient presque trois fois plus virulentes. C'est du moins le cas de *Salmonella typhimurim*, une bactérie responsable d'intoxication alimentaire. Celles-ci ont fait un voyage à bord de la navette Atlantis en 2006. À leur retour, les bactéries qui avaient été conservées dans un récipient étanche, ont été transmises à des souris. Il n'a fallu que le tiers de la dose habituelle pour tuer la moitié du groupe de souris qui avait été infecté^{[52],[53]}.

Recherche de bactéries extraterrestres □

On cherche actuellement à savoir s'il a existé une vie bactérienne sur la planète Mars. Certains éléments d'analyse du sol martien semblent s'orienter en ce sens, et la présence abondante d'eau sur Mars jadis a peut-être pu constituer un terrain extrêmement favorable au développement de la vie bactérienne, si elle est apparue. Si la chose venait à être confirmée, ce serait un élément important en faveur de l'hypothèse de panspermie.

Une chose semble certaine aujourd'hui (2006) : les différents appareils américains et européens envoyés sur Mars dans un but d'exploration de la planète y ont laissé une grande quantité de bactéries extrémophiles d'origine terrestre.^[54] Si ces bactéries terrestres arrivent à survivre en trouvant l'eau martienne profonde (qui parfois rejaillit en surface ou s'accumule en glace autour des pôles) et à s'adapter au milieu physicochimique et climatique de cette planète (notamment des extrémophiles capables d'utiliser les oxydes de fer et de carbone), elles pourraient contaminer et coloniser rapidement des sols qu'on cherche à explorer aujourd'hui, et même produire assez vite de nouvelles espèces spécifiquement martiennes, produisant à terme de profonds changements dans la chimie des sols, voire sur l'atmosphère très ténue de Mars.^[réf. nécessaire]

D'autres recherches s'intéressent aussi aux glaces de la lune jovienne Europe qui abritent de l'eau liquide sous leur surface.