



Frédéric Elie on  
ResearchGate

# Archéobactéries ou Archées, et les trois grands domaines du vivant

Frédéric Elie

CopyrightFrance.com

**La reproduction des articles, images ou graphiques de ce site, pour usage collectif, y compris dans le cadre des études scolaires et supérieures, est INTERDITE. Seuls sont autorisés les extraits, pour exemple ou illustration, à la seule condition de mentionner clairement l'auteur et la référence de l'article.**

« Si vous ne dites rien à votre brouillon, votre brouillon ne vous dira rien ! »  
Jacques Breuneval, mathématicien, professeur à l'université Aix-Marseille I, 1980

**Abstract :** Selon la classification actuelle, notamment grâce aux apports de la Biologie moléculaire, les êtres vivants sont répartis en trois grands domaines qui sont au sommet du classement hiérarchique : les Bactéries, les Archéobactéries ou Archées (auparavant regroupés en un seul domaine Procaryotes) et les Eucaryotes. Des propriétés spécifiques aux Archées ont ensuite conduit à leur attribuer un domaine séparé (Carl Woese, 1977) : les Archées ont une morphologie proche de celle des Bactéries, mais elles sont constituées d'espèces anaérobies (i.e. leur métabolisme n'utilise pas l'oxygène) et capables de vivre dans des conditions extrêmes (microorganismes extrémophiles) notamment grâce au fait que leur paroi est constituée de pseudopeptidoglycane, ou pseudomuréine ; et surtout, sur un plan génétique, les Archées diffèrent des Bactéries par leur ARNr (ARN ribosomal). Leurs propriétés extrémophiles confèrent aux Archées un grand intérêt en Biotechnologie. Dans le présent article le classement du vivant en ces trois domaines est présenté, avec quelques généralités sur les Bactéries et les Eucaryotes et des données plus détaillées sur les Archées.

## SOMMAIRE

[1 - Définitions, généralités](#)

[2 - Place des Archées dans les domaines et les règnes des microorganismes et macroorganismes](#)

[3 - Domaine des Archées, et leur diversité](#)

[4 - Archées, santé humaine et biotechnologie](#)

[Références](#)

## 1 - Définitions, généralités

Les organismes vivants unicellulaires sont répartis, à ce jour, en trois grands domaines :

- Eucaryotes (*Eukarya*)
- Bactéries (ou Eubactéries, *Bacteriaea*)
- Archées (ou Archéobactéries, *Archaea*)

La cellule des Bactéries et des Archées ne possèdent pas de noyau : ces organismes sont alors des procaryotes (*Prokaryota* ou *Prokarya*). La cellule des Eucaryotes possède un noyau. Les Eucaryotes sont aussi pluricellulaires et entrent dans les structures des organismes plus complexes : protozoaires, végétaux, champignons, animaux. Avant la découverte des propriétés spécifiques aux Archées, celles-ci et les Bactéries étaient réunies, indistinctement, dans le même domaine des procaryotes.

Des propriétés spécifiques aux Archées ont ensuite conduit à leur attribuer un domaine séparé (Carl Woese, 1977) : les Archées ont une morphologie proche de celle des Bactéries, mais elles sont constituées d'espèces anaérobies (i.e. leur métabolisme n'utilise pas l'oxygène) et capables de vivre dans des conditions extrêmes (microorganismes extrémophiles), et surtout, sur un plan génétique, leur séquence nucléotidique de l'ARN ribosomique ARNr 16S est différente de celle des Bactéries, ces séquences étant par ailleurs différentes de celle des ARNr 18S des Eucaryotes :

► Il existe différentes **façons de déterminer l'appartenance à une même espèce** pour les microorganismes unicellulaires :

- Identification du coefficient de Chargaff, noté CG(%). Elle repose sur le fait que, quelle que soit l'espèce

d'origine, l'ADN de la cellule contient le même nombre de nucléotides de la famille des purines que les nucléotides de la famille des pyrimidines. Les nucléotides de la famille purine ont pour bases nucléiques l'adénine (A) et la guanine (G), ceux de la famille pyrimidine ont pour bases nucléiques la cytosine (C) et la thymine (T). On a donc  $(A+G)/(C+T) = 1$ , où les parenthèses (...) représentent « nombre de ». Mais le **coefficient de Chargaff**

$$CG(\%) = \frac{(A+T)}{(G+C)}$$

varie avec l'espèce : deux organismes unicellulaires de CG(%) différents appartiennent à des espèces ou à des genres différents. Il a été établi que si la variation de CG(%) entre deux cellules est inférieure à 3% alors elles sont de même espèce. La réciproque peut être fautive : deux espèces différentes peuvent avoir un même CG(%), tandis que l'ordre de leurs bases nucléiques dans l'ADN est différent. Le coefficient de Chargaff est généralement déterminé par la mesure de la température de fusion  $T_m$  de l'ADN qui est une propriété caractéristique, car il est montré que  $T_m$  augmente lorsque (G+C) augmente, et ce de manière biunivoque, lequel varie d'une espèce à l'autre.

- Hybridation ou dénaturation de l'ADN. Elle consiste à séparer les deux brins de la double hélice ADN (bicaténaire) par rupture des liaisons hydrogène, pour les obtenir sous forme monocaténaire, les diverses techniques employées (température élevée, acidité, basicité, salinité) risquant cependant de détruire les purines. Si les séquences monocaténaire de bases des ADN de deux cellules sont complémentaires, alors ces cellules sont homologues.

- Séquençage des ARN ribosomiques ARNr 16S. Il présente l'avantage d'être beaucoup moins destructif que les deux procédés précédents, et de mise en œuvre plus aisée. Les ARN ribosomiques (i.e. situés dans les ribosomes) des sous-unités 16S et 18S contribuent à la lecture et au décodage des ARN messagers (ARNm) : ils assurent alors la régularité du processus de formation des protéines à partir du message génétique véhiculé par les ARNm (traduction). Le séquençage comparatif entre deux organismes portent sur ARNr plutôt que sur les ARNm et ARN de transfert (ARNt) car ces derniers sont trop instables. De plus, les ARNr présentent une grande ubiquité, une bonne stabilité évolutive, une grande abondance dans les cellules, et peuvent être purifiés aisément. Il est établi que deux microorganismes unicellulaires appartiennent à des espèces différentes si leurs ARNr 16S présentent un écart de similitude supérieure à 3% (donc si l'homologie est inférieure à 97%), et compte tenu de l'hybridation ADN/ADN qui montre ou pas la correspondance des positions des bases nucléiques, laquelle doit être plus grande que 70%. De plus, les écarts entre les températures de fusion  $T_m$  des ADN ne doivent pas excéder  $\Delta T_m = 5^\circ\text{C}$ .

Par exemple, *Aeromonas trota* et *Aeromonas caviae* partagent 99,9% de similitude pour ARNr 16S mais seulement 30% pour l'hybridation ADN/ADN.

Le classement des microorganismes unicellulaires ne repose donc pas sur des critères uniquement liés au phénotype et au mode de nutrition. À ces niveaux d'observation, les structures de l'ADN doivent être prises en compte, critères phylogénétiques (réf. [3]).

Les Archées contiennent l'espèce souche dont elles descendent toutes : on dit qu'elles constituent un domaine monophylétique. Par ailleurs, le fait que les Archées ont certaines caractéristiques proches de celles des Eucaryotes implique qu'elles ne sont pas à l'origine des Bactéries.

Le tableau 1 présente une synthèse des principales caractéristiques des microorganismes unicellulaires.

caractéristiques	Bactéries	Archées	Eucaryotes
taille	1 à 5 $\mu\text{m}$	1 à 5 $\mu\text{m}$	> 5 $\mu\text{m}$ jusqu'à 500 $\mu\text{m}$
ADN	ADN nu dans un chromosome unique et circulaire		3 types de génomes : génome nucléaire (matériel génétique de l'individu codé dans son ADN), réparti sur plusieurs ADN linéaires organisés en chromosomes différenciés. L'ADN possède aussi des séquences non codantes (introns). Génomes non nucléaires : dans les mitochondries et chloroplastes, souvent circulaires, sans introns
	Gènes en continu  ADN circulaire  absence de noyau : réplication, transcription, traduction de l'ADN directement dans le cytoplasme	Gènes en mosaïque  ADN circulaire  absence de noyau : réplication, transcription, traduction de l'ADN directement dans le cytoplasme	
Gènes codant	Très différents de ceux des Archées et Eucaryotes		similaires
Gènes du métabolisme	Similaires		Très différents de ceux des procaryotes
Enveloppe du noyau	sans		Enveloppe nucléaire en double membrane

caractéristiques	Bactéries	Archées	Eucaryotes
organites	sans		Oui : réticulum endoplasmique, appareil de Golgi, plastes divers, mitochondries, lysosomes, etc.
reproduction	Division en deux		Mitose, méiose, fécondation
Ribosomes (système de synthèse des protéines)	Type 70S libres	Type 70S libres (certains similaires à ceux des Eucaryotes)	Dans le cytoplasme : type 80S, dans les mitochondries : type 70S
Paroi cellulaire	Complexe avec peptidoglycane	Complexe sans peptidoglycane	Simple sans peptidoglycane
différenciation	rudimentaire		Tissus et organes
Structure des lipides de membrane	Phospholipides avec liaisons type ester (linéaires), glycolipides chez les cyanobactéries	Phospholipides avec liaisons type éther (ramifiées)	Phospholipides avec liaisons type ester (linéaires), glycolipides
ARN polymérase	1 seul type	Plusieurs types	
lysosomes	sans		Oui (sauf érythrocytes)
Premier acide aminé dans la synthèse des protéines	formyl-méthionine	méthionine	
Histones associés à l'ADN	non	oui	
Moyens de déplacement	Flagelle simple, ou glissement	Flagelle simple	Flagelle complexe, cils ; pattes, ailes, nageoires (chez animaux, plantes)
Possibilité de croissance aux hautes températures (> 100°C)	non	Oui pour espèces hyperthermophiles	non
Réactions aux antibiotiques	Arrêt de la croissance	Pas d'action	

*Tableau 1 : comparaisons entre les trois domaines  
(voir aussi par ex. référence [8])*

**NB** : Quelques définitions employées dans le tableau 1 :

- Réticulum endoplasmique : organite lié à la paroi du noyau cellulaire, assurant la synthèse préliminaire des protéines avant leur finalisation dans l'appareil de Golgi.
- Appareil de Golgi : situé entre le réticulum endoplasmique et la paroi cellulaire, c'est un organite assurant la phase de maturation dans la production des protéines initiée dans le réticulum endoplasmique, ainsi que la synthèse des glycoprotéines (référence [19]) et des sphingolipides (référence [20]).
- Lysosomes : organites très petits (0,5 µm) situés dans le liquide plasmique (cytosol) assurant la digestion des substances nutritives au moyen d'une quarantaine d'enzymes.
- Peptidoglycane (PGN) ou muréine : composant essentiel de la paroi cellulaire des Bactéries, agencé sous formes de chaînes. Il est formé par l'association d'un polysaccharide et d'un peptide. C'est un élément caractérisant de la Bactérie tout comme l'est le génome. Il assure la protection de la cellule vis-à-vis des pressions osmotiques résultant des gradients de concentration entre les milieux extra et intracellulaires, qui peuvent conduire à la destruction de la cellule (cytolysse). L'épaisseur du PGN est faible (monocouche) chez les Bactéries Gram négatif, et importante (multicouches) chez les Gram positif (fig. 1). Parmi les antibiotiques, certains ont pour effet de détruire la paroi PGN d'une Bactérie pathogène. Lorsqu'une bactérie est proche de cellules hôtes qu'elle va infecter, certaines d'entre elles parviennent à l'identifier à partir de son PGN.

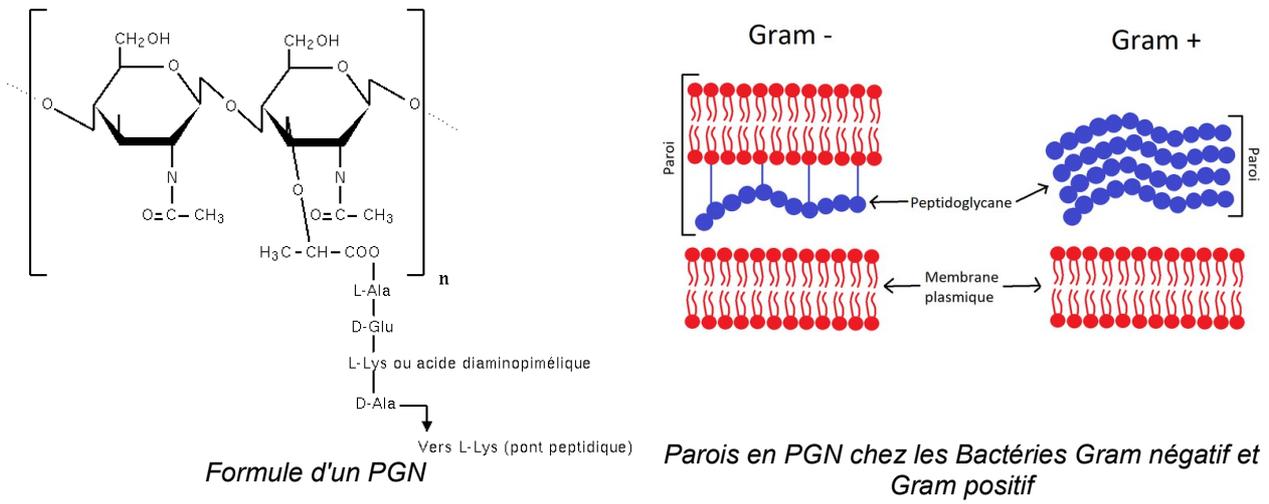


fig. 1 (source : Wikipedia)

- Formyl-méthionine : dérivé de la méthionine, acide aminé protéinogène (v. tableau 1) complété d'un groupe aldéhyde (v. référence [18]). Il initialise la biosynthèse des protéines dans les ribosomes, mitochondries, chloroplastes.

## 2 - Place des Archées dans les domaines et les règnes des microorganismes et macroorganismes

### ► Arbre phylogénétique universel du vivant :

Dans le classement phylogénétique des organismes cellulaires, les Archées sont l'un des trois grands domaines du vivant.

Ces domaines forment l'arbre phylogénétique universel établi sur les critères de comparaison des séquences du gène des ARNr (figure 2). La racine de cet arbre serait située au niveau de la souche des Bactéries, et la souche des Archées serait située sur la même branche que celle qui porte les Eucaryotes.

Des questionnements sur la ou les origines communes à ces trois grands domaines, ou bien certains d'entre eux, font encore l'objet de recherches.

Selon certaines, les Archées et les Eucaryotes se seraient différenciés à partir d'organismes primitifs. Selon d'autres, cette origine commune ferait partie du domaine des Bactéries (la « racine de l'arbre » figure 2). Selon d'autres encore, l'ancêtre commun des Archées et des bactéries serait un organisme thermophile (pouvant exister et se développer aux températures élevées), suggérant alors des conditions très chaudes sur la Terre il y a 2 à 3 milliards d'années.

Les Archées possèdent un seul chromosome, qui est circulaire. Il en est de même pour les Bactéries. Les Eucaryotes ont plusieurs chromosomes, ils ne sont pas circulaires.

Chez les Archées les chromosomes contiennent un nombre de paires de bases d'ADN allant de quelques centaines de milliers à plusieurs millions. À titre de comparaison, la bactérie *Escherichia coli* possède un chromosome circulaire avec 4,68 millions de paires de bases d'ADN et 4300 gènes environ ; une cellule humaine (eucaryote) possède plus de 1000 fois d'ADN et 7 fois plus de gènes que *Escherichia coli*.

La paroi cellulaire des Archées n'est pas composée de peptidoglycane (v. figure 1), contrairement aux Bactéries, mais de pseudopeptidoglycane (ou pseudomuréine)<sup>(1)</sup>.

1 Les pseudopeptidoglycans, ou pseudomuréines, ont une structure physique proche de celle des muréines PGN, mais de composition chimique différente (fig. 1) : le peptide est remplacé par un oligopeptide (peptide à faible nombre d'acides aminés). Cette structure rend les antibiotiques sans effets sur l'inhibition de la synthèse des parois des Archées.

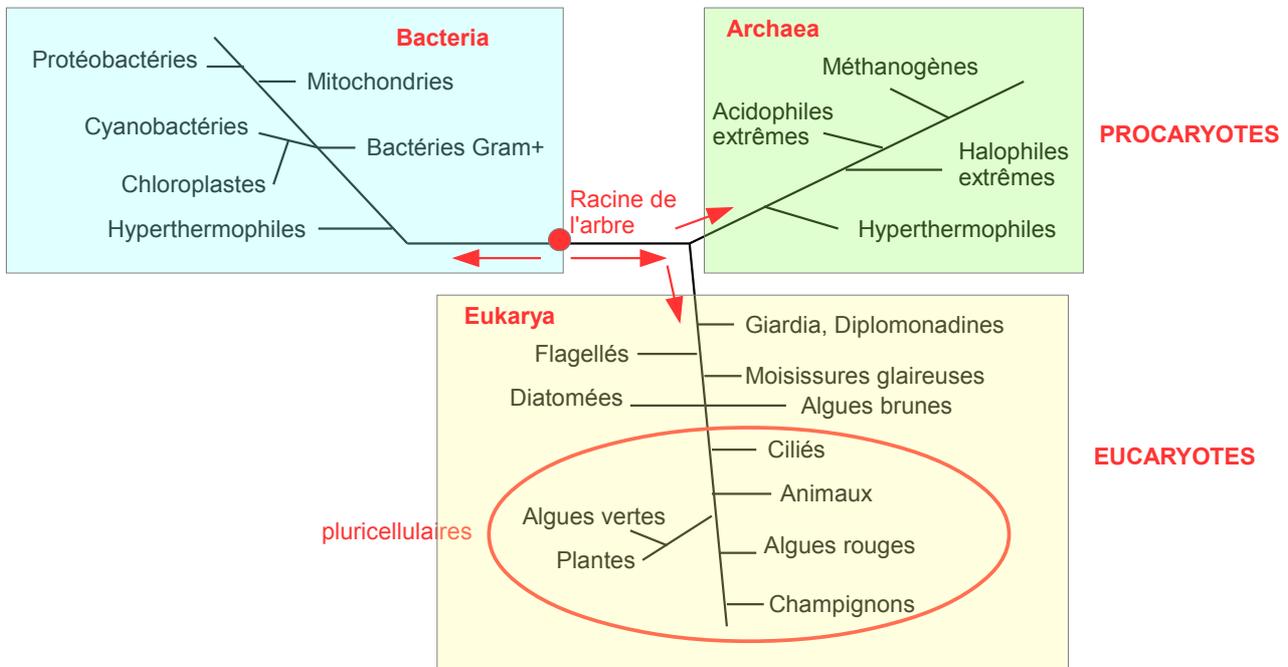


figure 2 : arbre phylogénétique universel des organismes unicellulaires et pluricellulaires. Représentation simplifiée, les phyllums à l'intérieur d'un domaine ne sont pas exhaustifs (voir aussi référence [4])

Les Bactéries et les Archées possèdent des plasmides (molécules d'ADN non chromosomiques) capables de réplication autonome, et pouvant être transmis à d'autres cellules.

En ce qui concerne les Eucaryotes, les cellules animales et végétales sont de ce domaine, mais il y a beaucoup d'autres organismes unicellulaires eucaryotes. On peut en déduire que les microorganismes unicellulaires eucaryotes sont à l'origine des macro-organismes pluricellulaires. En effet, les microorganismes unicellulaires eucaryotes divergent en plusieurs espèces d'organismes unicellulaires eucaryotes avant les règnes des plantes et animaux (fig. 2). Toutefois, il a été aussi établi que les cellules eucaryotes possèdent des gènes issus de ceux des Archées et des Bactéries.

Par exemple, les mitochondries et les chloroplastes, qui sont des organelles propres aux Eucaryotes, et qui ont un rôle particulier dans le métabolisme énergétique (respiration pour les mitochondries, photosynthèse pour les chloroplastes) possèdent leurs propres génomes (sous forme d'ADN circulaire comme chez les procaryotes) et leurs propres ribosomes. Il a été montré qu'ils divergent à partir d'origines appartenant au domaine des Bactéries (Bacteriae). Ils devaient alors, aux époques initiales de la vie, être des cellules indépendantes qui, pour des raisons non encore complètement élucidées (protection, nutrition...) se sont établies et intégrées dans les cellules eucaryotes, processus appelé endosymbiose.

Les figures 3 et 4 représentent respectivement les structures internes des cellules de microorganismes, de manière simplifiée, et des observations au microscope électronique des cellules pour les 3 domaines du vivant.

### ► Les règnes du vivant :

Les Eucaryotes sont divisés en plusieurs règnes (voir plus loin « Domaine des Eucaryotes ») :

- Protozoaires
- Algues
- Champignons
- à ces règnes s'ajoutent ceux des organismes pluricellulaires complexes : végétaux, animaux, dont les cellules sont eucaryotes.

On obtient alors 7 règnes du vivant en les complétant des Bactéries et des Archées, ces domaines ne se subdivisant pas en règnes spécifiques.

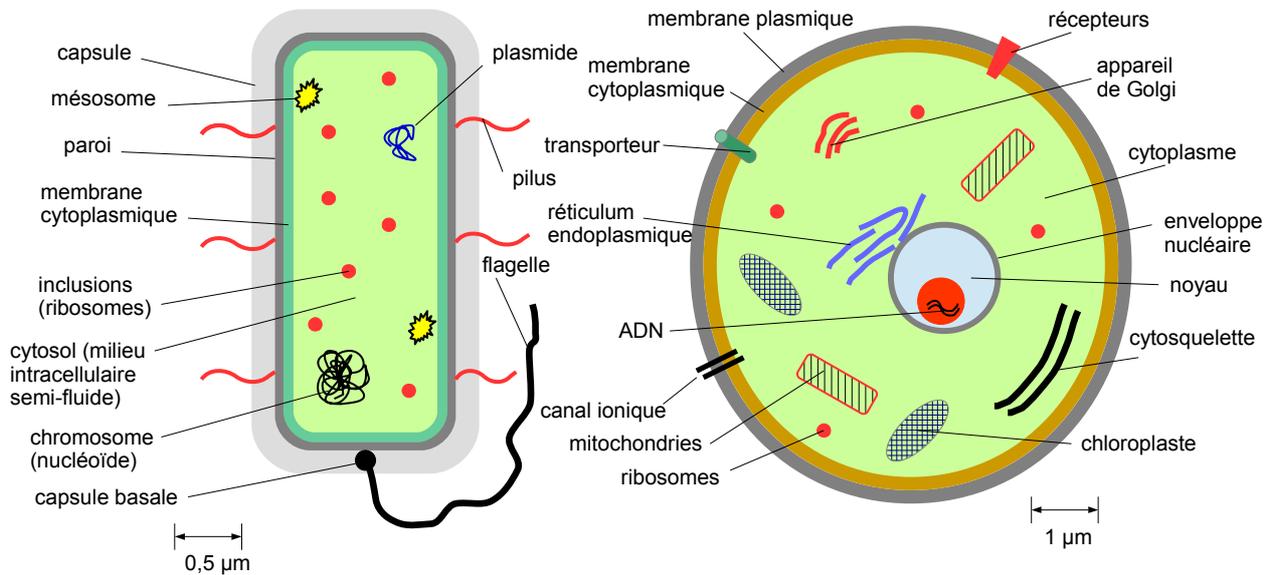


figure 3 : Représentations très simplifiées des cellules procaryotes (Bactéries et Archées), à gauche, et Eucaryotes, à droite. Les échelles ne sont pas les mêmes, la taille des Eucaryotes pouvant être d'un facteur 20 fois plus grande

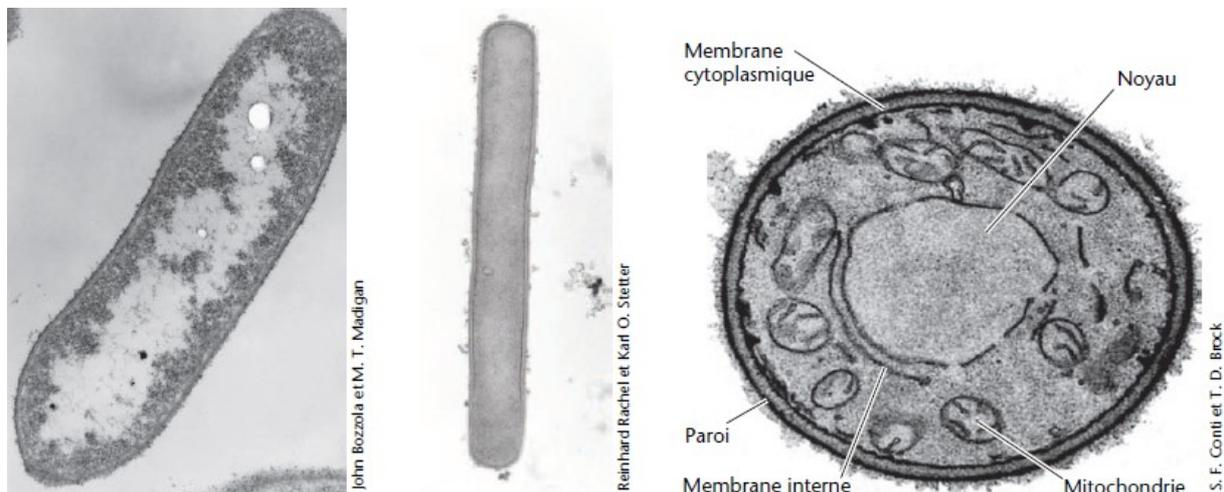


figure 4 : à gauche, bactérie *Heliobacterium modesticaldum* (longueur 3 µm) ; au milieu, archée *Methanopyrus kandleri* (longueur 4 µm) ; à droite, eucaryote *Saccharomyces cerevisiae* (diamètre 8 µm).  
Source : référence [9] chap.2

► **Hiéarchie taxonomique, du domaine à l'espèce** : Les microorganismes sont classés selon une hiérarchie arborescente où, à chaque niveau, ils partagent des propriétés spécifiques, soit de nature phénétique (c'est-à-dire liées à la physiologie et au métabolisme), soit de nature phénotypique (traits observables d'un organisme), soit de nature phylogénétique. Le rang le plus élevé est le domaine. Les différents niveaux hiérarchiques sont ensuite : phylum, classe, ordre, famille, genre, espèce, et même sous-espèce.

Exemple figure 5 :

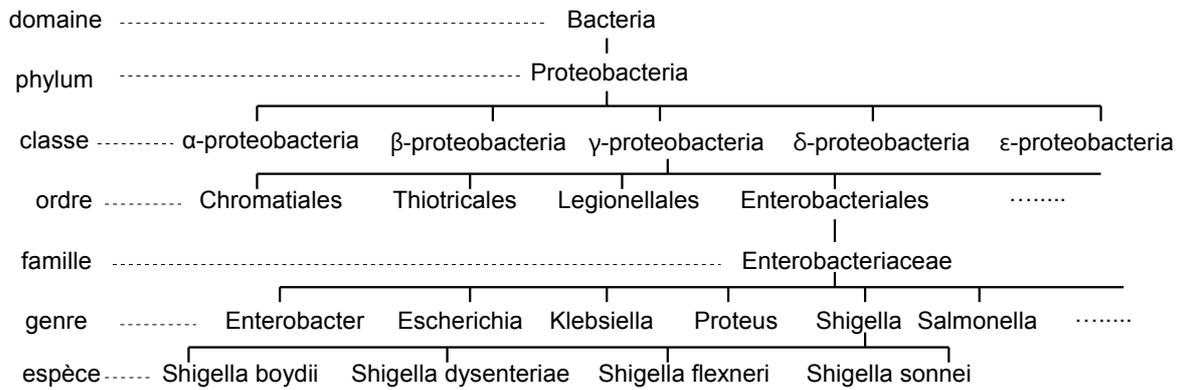


figure 5 : hiérarchie taxonomique dans le domaine Bacteria

► **Dimensions et diversité physiologique des microorganismes** : L'ordre de grandeur des tailles des différents microorganismes, ainsi que les modes d'observation, sont représentés à la figure 6 :

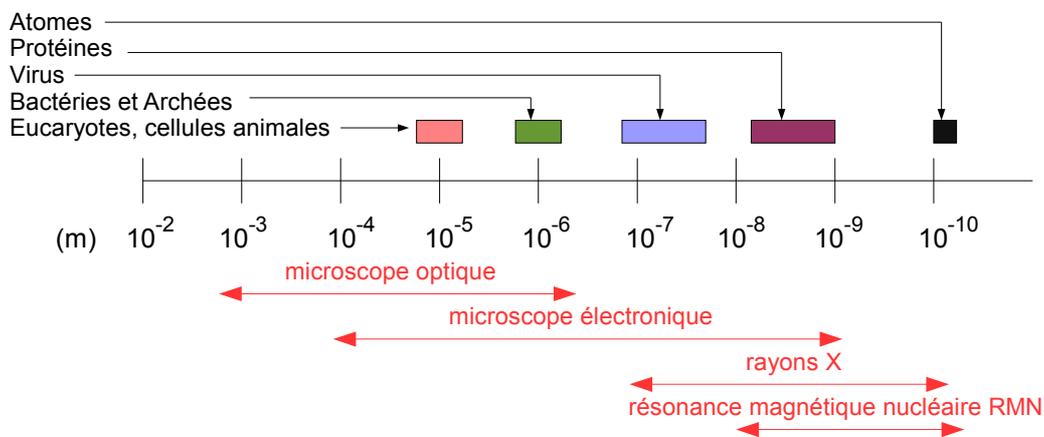
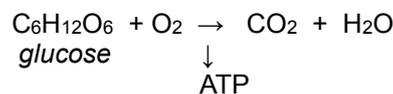


figure 6 : tailles relatives des microorganismes et virus

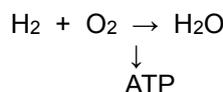
Sur un plan biologique, quels que soient leurs domaines, les microorganismes, pour exister et conserver leurs génomes, doivent remplir trois besoins fondamentaux : produire leur énergie, conserver cette énergie, réaliser la réplication génétique ; ces besoins nécessitent d'être assurés en cohérence avec l'environnement où ces microorganismes se trouvent, et donc requièrent un quatrième besoin, celui de l'adaptation à l'environnement (ou aussi de l'adaptation de l'environnement à eux).

Pour les microorganismes il existe **trois processus métaboliques pour obtenir l'énergie** :

- à partir des composés organiques ; dans ce cas les microorganismes sont dits **chimio-organotrophes**. L'énergie est produite par l'oxydation de ces composés (glucoses, acétates...) et conservée dans la cellule par l'adénosine triphosphate (ATP). Si le microorganisme a besoin de l'oxygène pour produire l'énergie, il est dit **aérobie**. Si, à l'inverse, pour produire l'énergie il ne lui faut pas avoir d'oxygène, il est dit **anaérobie**. Exemple :



- à partir des composés inorganiques ; dans ce cas les microorganismes sont dits **chimio-lithotrophes**. Sont concernées les Bactéries et les Archées. L'avantage est double : elles n'entrent pas en compétition avec les chimio-organotrophes, et elles exploitent les composés inorganiques oxydés tels que H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S produits par leurs déchets, ainsi que Fe<sup>2+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ... Exemple :



- à partir de la lumière ; dans ce cas les microorganismes sont dits **phototrophes**. Grâce à leurs pigments, ils produisent l'ATP directement à partir de la lumière solaire. Sont concernées certains Eucaryotes (végétaux, certaines algues) et certains procaryotes. Avantage : ne nécessite pas de substance chimique

supplémentaire pour produire l'énergie ; absence de compétition avec les autres microorganismes car la lumière solaire est disponible dans de nombreux environnements.

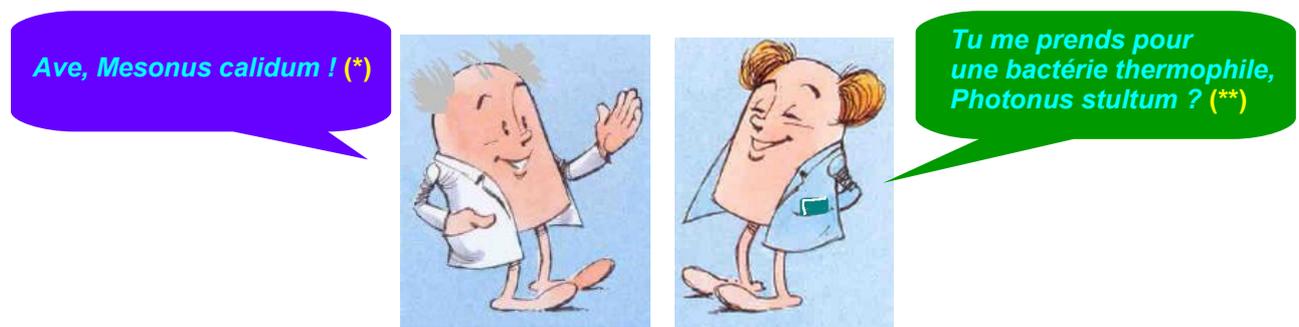
Quels que soient leurs modes de production d'énergie, les microorganismes ont besoin du carbone pour leur métabolisme. Si le carbone doit être obtenu à partir de plusieurs sources organiques, le microorganisme est dit **hétérotrophe**. Si le carbone n'est obtenu que par du CO<sub>2</sub>, le microorganisme est dit **autotrophe**.

Tous les chimio-organotrophes sont hétérotrophes, et la grande majorité des phototrophes sont autotrophes (par exemple les plantes).

► **Habitats, environnements des microorganismes, et extrémophiles** : Les microorganismes peuvent vivre dans un grand nombre d'environnements : eau, sol, plantes, animaux, matériaux... Ceux qui peuvent vivre dans des environnements extrêmes (pression, température, acidité, basicité, etc.) sont dits extrémophiles (tableau 2). Les Archées étant surtout anaérobies, elles sont **extrémophiles**. Parmi elles figurent les halophiles, telles que *Halobacterium halobium*, les thermophiles (que l'on trouve par exemple dans les geysers), et les méthanogènes (CH<sub>4</sub>) qui vivent par exemple dans les intestins des bovidés. Il n'y a pas d'extrémophiles chez les Eucaryotes.

conditions	qualité d'extrémophile	gamme de valeurs	domaine	genres, espèces	habitats
Température élevée	hyperthermophile	90 - 113°C	Archées	<i>Pyrolobus fumarii</i>	Sources chaudes hydrothermales marines des dorsales océaniques
Acidité forte	acidophile	0,06 ≤ pH ≤ 4	Archées	<i>Picrophilus oshimae</i>	Sources chaudes acides
Basicité forte	alcalophile	8,5 ≤ pH ≤ 12	Archées	<i>Natronobacterium gregoryi</i>	Lacs salés
Salinité forte (NaCl)	halophile	15 ≤ c ≤ 32% (32% : saturation)	Archées	<i>Halobacterium salinarum</i>	Milieux salés
Température basse	psychrophile	0 ≤ T ≤ 12°C	Bactéries	<i>Polaromonas vacuolata</i>	Mer glacée
Pression élevée	barophile	500 < P ≤ 1000 atm	Bactéries	<i>Moritella yayanosii</i>	Sédiments marins profonds

tableau 2 : qualités d'extrémophiles, exemples



(\*) en latin, « calidum » : chaud (\*\*) « stultum » : idiot

### ► **Domaine des Eucaryotes**

Les Eucaryotes (Eukarya) ont une taille généralement plus grande que 5 µm. Ce sont des organismes unicellulaires (microorganismes) ou pluricellulaires lorsqu'ils sont composés de cellules eucaryotes selon divers niveaux de complexité. Leurs cellules possèdent un noyau. Leurs principales caractéristiques sont (figure 3) :

- présence d'organites, telles que mitochondries, réticulum endoplasmique, appareil de Golgi, lysosomes, peroxyosomes, endosomes ;
- ADN contenu dans le noyau, sous forme de chromosome non circulaire ;
- cytosquelette très élaboré, il intervient dans le transport des organites et la mobilité des cellules ;
- existence d'une paroi sous forme de membrane plasmique (bicouche lipidique) contenant des protéines réceptrices, des canaux ioniques, des transporteurs...
- présence de structures macromoléculaires sans membrane (ribosomes, protéasomes,

centrioles...) qui interviennent sur les protéines et les microtubules.

Les récepteurs transmettent les informations qui proviennent de l'environnement, ou des microorganismes voisins, et l'eucaryote y répond de diverses manières : modification des fonctions cellulaires, de la réplication, par la différenciation, et même mort par apoptose.

L'origine des Eucaryotes n'est pas unitaire : bien qu'il soit généralement admis qu'elle soit issue des procaryotes, le passage de ceux-ci aux Eucaryotes fait intervenir des cheminements et des processus différents. L'un d'eux fait intervenir l'endosymbiose (Lynn Margulis, années 1970). Elle procède de plusieurs étapes :

- Pour diverses raisons, les procaryotes ancestraux, anaérobies, existant depuis plus de 3 milliards d'années, auraient eu leurs membranes plasmiques repliées vers le milieu intracellulaire, ce qui aurait créé des zones fermées (vésicules) permettant la formation du réticulum endoplasmique et du noyau muni d'une enveloppe.

- Les Eucaryotes primitifs ainsi formés (depuis 1,5 à 2 milliards d'années) auraient capturé un procaryote aérobic hétérotrophe, formant ainsi les mitochondries des cellules eucaryotes.

- Certains Eucaryotes auraient ensuite ingéré (ou plus techniquement, phagocyté) un procaryote capable de photosynthèse, formant ainsi les chloroplastes des cellules végétales.

Les premiers Eucaryotes issus de la première étape, sans mitochondries ni organelles, figurent à la base de la branche des Eukarya de l'arbre phylogénétique (figure 2) : il s'agit notamment des *Giardia* (Diplomonadines). En général, puisque ces organismes de structure simple ne peuvent subvenir à leurs besoins avec une relative autonomie, ils sont des parasites de l'homme, des animaux et parfois des plantes. Comme dit plus haut, les Eucaryotes sont soit unicellulaires, soit pluricellulaires et de structures fortement complexes ou pas. Les unicellulaires, issus et évolués à partir des procaryotes (voir explication précédente), sont appelés Protistes (règne *Protista*) ou désignés comme Protozoaires lorsqu'il s'agit de protistes hétérotrophes mobiles dont la nutrition est par phagocytose. Exemple : *Entamoeba histolyca*, amibe pathogène pour l'humain.

Les pluricellulaires, on l'a vu, constituent les règnes des Algues, Champignons, Végétaux, Animaux.

Le règne des **champignons** (ou *Fungi*) comprend les Mousses, les champignons proprement dits (Mycètes), les Levures, les Moisissures. Principales caractéristiques :

- Ils sont tous hétérotrophes, et en particulier sans pigment de photosynthèse : leur énergie provient d'autres molécules synthétisées par d'autres organismes.

- Ils sont soit unicellulaires (levures), soit assemblés en filaments de cellules (moisissures) (exemple : *Aspergillus*) : figure 7.

- Ils sont des agents de biodégradation du milieu naturel et de recyclage de la matière organique provenant de la décomposition des organismes morts situés dans le sol, le compost, les aliments, les céréales.

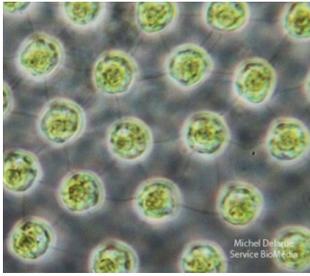
- Les moisissures sont présentes dans l'air, les poussières, les plantes, les fruits... Leur concentration dans l'air peut aller jusqu'à 20 spores /m<sup>3</sup>.

- Les champignons, unicellulaires, peuvent se constituer en colonies : assemblage de cellules effectuant des échanges mutuels, en particulier conduisant à la fructification, ou production de spores qui donneront naissance à de nouvelles cellules.

Les **algues** sont phototrophes, car elles possèdent des chloroplastes. Vivant dans des milieux pauvres, composés de quelques minéraux, d'eau, de CO<sub>2</sub> et recevant de la lumière, elles sont présentes dans des environnements terrestres et aquatiques. Leur phototrophie fait des algues des sources primaires pour les autres organismes.

Les algues se répartissent en algues vertes (dont certaines, les *Streptophyta*, sont à l'origine des plantes terrestres), algues rouges (*Rhodophyta*), algues brunes (*Phéophycées*), diatomées (ou *Bacillariophyta*). Les algues, unicellulaires, peuvent se regrouper en structure coloniale (figure 7).

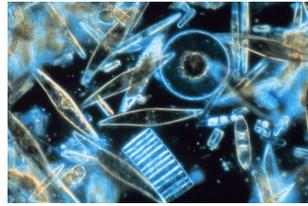
Lorsque les champignons s'associent à un organisme source primaire, phototrophe, tel une algue ou une cyanobactérie, cela produit des **lichens**. Par cette mutualisation le champignon apporte un support à un phototrophe qui, à son tour, lui fournit l'énergie, coopération entre les domaines Eucaryotes et Bactéries (figure 7).



Algue verte *Volvox*, les cellules sont reliées par des ponts cytoplasmiques (source : Michel Delarue, réf. [5])



Phéophycées (algues vertes) : cellules de l'*Ectocarpus* rassemblées en filament (largeur environ 20 µm). Source : Wikipedia



Diatomées marines vues au microscope (source : Wikipedia)



Protozoaires : amibe *Arcella* (source : Wikipedia)



Champignons (Fungi), type moisissures : *Aspergillus fumigatus* (source : Wikipedia)



Champignons : structure sporulante (réf. [194])



Lichens : colonie sur du bois mort (source : Wikipedia)

figure 7  
illustrations de quelques Eukarya : algue verte, diatomée, protozoaire, champignon

## ► **Domaine des Bactéries**

Description (figure 2) :

- absence de noyau (procaryotes) ;
- absence de membranes internes et d'organites ;
- la cellule est séparée du milieu externe par la membrane plasmique, elle-même entourée par la paroi bactérienne riche en peptidoglycanes, qui confère à la Bactérie une résistance aux effets de pression et d'osmose de la part du milieu extérieur ;
- le milieu intérieur, ou milieu intracellulaire (ou cytosol), est de nature semi-fluide ;
- ce milieu contient le chromosome, qui est constitué d'un ADN circulaire et bicaténaire (c'est-à-dire double brin ou double hélice) ;
- le milieu intracellulaire contient aussi des plasmides, éléments d'ADN de petite taille, bicaténaire et circulaire, capables de réplication ; les plasmides assurent la transmission horizontale des gènes entre les populations et les espèces bactériennes, permettant ainsi une certaine adaptation et résistance collective (par exemple, résistance aux antibiotiques), et donc une capacité de virulence (comme c'est le cas dans les pathologies causées par les Bactéries) ;
- présence de filaments, ou pilus, qui sont des appendices de protéines filamenteux rattachés à la paroi et sortant dans le milieu extracellulaire, assurant l'adhérence de la Bactérie ;
- existence d'un flagelle, très long appendice protéique filamenteux, animé de mouvements rotatifs causés par une variation de concentration de protons à travers la membrane plasmique.

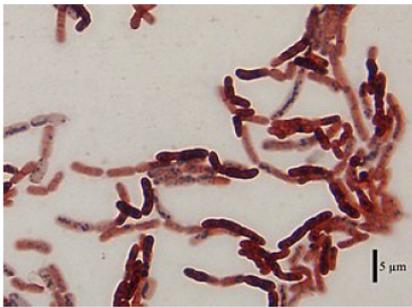
Les bactéries sont les principaux constituants de la flore commensale (i.e. vivant en association ou coopération) chez les humains. Parmi elle le microbiote cutané humain : la peau humaine adulte abrite plus de 500 espèces différentes, avec une densité de 500000 bactéries/cm<sup>2</sup>. Quant au microbiote intestinal, il représente, pour un adulte, entre 1 et 2 kg de microorganismes, et une population d'environ 100000 milliards réparties en 93% Bactéries (160 espèces), 6% virus, 1% Archées, levures, champignons.

Les Bactéries se répartissent en de nombreux règnes et phylums (figure 2). On distingue, entre bien d'autres (figure 8) :

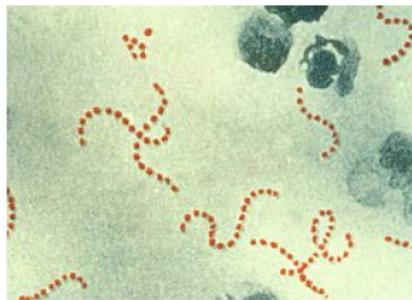
- Protéobactéries, qui regroupent la majorité des Bactéries. Certaines sont chimio-organotrophes (ex. *Escherichia coli*), d'autres chimolithotrophes (ex. *Thiobacillus denitrificans*). Exemples de Protéobactéries pathogènes : *Salmonella*, *Rickettsia*, *Pseudomonas*...
- Bactéries Gram positif, c'est-à-dire leur réponse au est Gram, effectué avec un colorant d'aniline (aminobenzène C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>-NH<sub>2</sub>), montre que la membrane bactérienne est simple (réf. [1]). Exemples : *Bacillus*, *Clostridium*, *Streptomyces* (à partir duquel on produit des antibiotiques tels que strptomycine), *Lactobacillus* (bactéries lactiques), *Streptococcus*, *Mycoplasma* (pathogènes)...
- Cyanobactéries, qui sont phototrophes oxygéniques et Gram+, probablement génératrices

d'oxygène au début de l'évolution du vivant sur Terre. Les Eucaryotes, qui utilisent l'oxygène, ont pu alors apparaître.

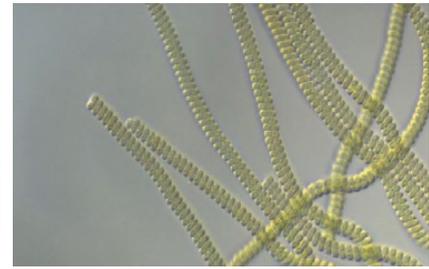
- Spirochètes, en forme d'hélice, pour la plupart pathogènes (ex. maladie de Lyme...).
- Bactéries vertes, autotrophes, certaines sulfureuses d'autres non, contenant des pigments photosynthétiques.
- Etc. liste évidemment très incomplète.



*Bacillus megaterium*, bactérie Gram+  
(source : Wikipedia)



*Streptococcus pyogenes*, bactéries Gram+ sphériques assemblées en chaînettes pathogènes, infections graves causant 500000 décès par an dans le monde (source : Wikipedia)



*Spirulina subsals*, cyanobactérie  
(source : réf. [6])

figure 8 : exemples de Bactéries

### 3 - Domaine des Archées, et leur diversité

De morphologie proche de celle des Bactéries, les Archées diffèrent cependant de celles-ci par leur ARNr (ARN ribosomal), comme on l'a vu, et par le fait que leur paroi est constituée de pseudopeptidoglycane, ou pseudomuréine, ce qui leur permet de résister et se développer dans des conditions extrêmes : les Archées sont pour la plupart extrémophiles (par exemple *Pyrolobus* est un thermophile, sa croissance s'effectuant au-delà de 100°C). Voir par exemple références [12], [15], [16], [17]. Certaines Archées ont des complexes protéiques de type histone interagissant avec l'ADN.

Les ARN polymérase<sup>(2)</sup> des Archées sont proches de ceux des Eucaryotes.

En plus des critères physicochimiques et morphologiques utilisés pour le classement (phénotypique) des Archées, il y a surtout le classement phylogénétique qui les répartit en plusieurs phylums :

Phylum **Euryarchaeota** :

- Classes :
- Archaeoglobi (thermophiles)
  - Halobacteria (halophiles extrêmes)
  - Methanobacteria (méthanogènes)
  - Methanococci (méthanogènes)
  - Methanomicrobia (méthanogènes)
  - Methanopyri (méthanogènes, hyperthermophiles)
  - Nanohaloarchaea (halophiles)
  - Thermoplasmata (acidophiles)
  - Thermococci (environnements marins, légèrement halophiles)

Phylum **Crenarchaeota** :

- Classe :
- Thermoprotei (hyperthermophiles)

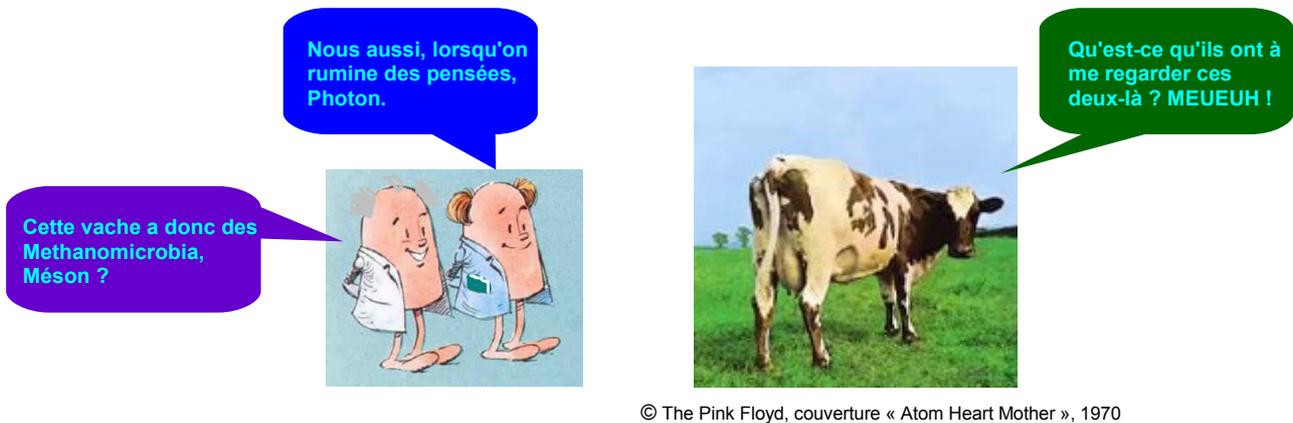
Phylum **Korarchaeota** (thermophiles)

Phylum **Nanoarchaeota**

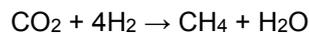
Phylum **Thaumarchaeota** (hyperthermophiles)

► **Archées méthanogènes** : ce sont des anaérobies stricts, vivant dans les milieux complètement dépourvus d'oxygène. Habitats : sols inondés (rizières, sédiments lacustres, marécages), sédiments marins, tubes digestifs des animaux (exemple : *Methanomicrobium* du tube digestif des ruminants).

2 L'ARN polymérase est une enzyme présente dans toutes les cellules vivantes qui permet la transcription d'un ADN et la production d'un ARN à partir de celle-ci. Les ARN obtenus sont : ARN messagers ARNm, ARN ribosomiques ARNr, ARN de transfert ARNt, ARN interférents (qui inhibent l'expression des ARNm), etc.



Certaines Archées méthanogènes sont également thermophiles et psychrophiles. Les Archées méthanogènes tirent leur énergie à partir de la biosynthèse du méthane CH<sub>4</sub>, et produisent donc ce gaz à effet de serre (réf. [10]). Cette production est effectuée par la réduction du dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> (autre gaz à effet de serre) selon :



(exemple : *Methanobacterium thermoautotrophicum*, réf. [7], et figure 9).

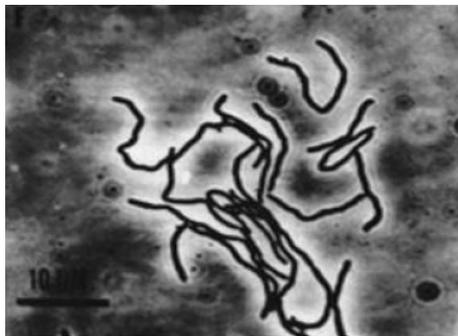


figure 9 : Archée méthanogène *Methanobacterium thermoautotrophicum*, source : [http://web.mst.edu/MoW/BIO221-2002/Methanobacterium\\_thermoautotrophicum.htm](http://web.mst.edu/MoW/BIO221-2002/Methanobacterium_thermoautotrophicum.htm)

Le gaz des marais, comme celui du Marais Poitevin, est créé par les Archées méthanogènes.

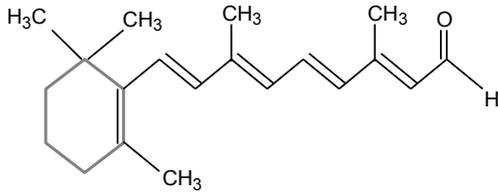
► **Archées halophiles** : Elles supportent, ou bien ont besoin pour leur croissance, les milieux salés ou très salés (exemple : *Halobacterium salinarum*).

La concentration en sel de l'eau de mer (salinité) est  $c_m = 34,7$  g/L (ou psu). Rappel : la concentration d'une substance (soluté) de masse  $m$  dans un liquide de volume total  $V$  est :  $c_m = m/V$  exprimée en g/L (ou psu). On exprime aussi la concentration par la molarité ou concentration molaire  $c = n/V$  où  $n$  est le nombre de moles du soluté,  $c$  est donnée en (mol/L ou M) ; si  $M$  est la masse molaire du soluté, on a  $n = m/M$  et donc la relation entre les deux concentrations :  $c = c_m/M$ .

La valeur  $c_m = 34,7$  psu indiquée ci-dessus est une valeur moyenne pour l'ensemble des océans et mers ; pour la mer Baltique  $c_m = 3$  à 8 psu, pour la mer Rouge  $c_m = 50,8$  à 58,5 psu, pour la mer Morte  $c_m = 192,2$  à 260 psu !

La majorité des halophiles nécessitent des salinités supérieures à 1,8 M pour leur développement, et même pour certaines d'entre elles des salinités supérieures à 4 M, ainsi que des milieux très basiques (pH élevé). Pour la grande majorité d'entre elles, une concentration inférieure à 1 M conduit à la rupture de la cellule.

Les Archées halophiles s'assemblent en formant des colonies sous forme de mousses de couleur rose caractéristique, due à un pigment photosynthétique, la **bactériorhodopsine** (figure 10). Celle-ci est une protéine à 248 acides aminés qui utilise la lumière pour créer un gradient de protons à travers la membrane cellulaire : une différence de pH apparaît entre le cytoplasme et le milieu extracellulaire, qui permet la production d'ATP. Ce pompage de protons est activé par les variations géométriques (isomérisation) de la molécule de **rétilnal** (C<sub>20</sub>H<sub>28</sub>O) liée à la protéine, et permet de convertir l'énergie lumineuse en énergie métabolique. Ce processus est voisin de celui existant dans le cycle de la vision, y compris chez l'humain, et s'appelle photoisomérisation :



Rétinal, représenté ici sous la forme tout-trans ;  
le rétinol se présente sous forme de cristaux oranges

Le processus est symbolisé ainsi en mentionnant les isomères :

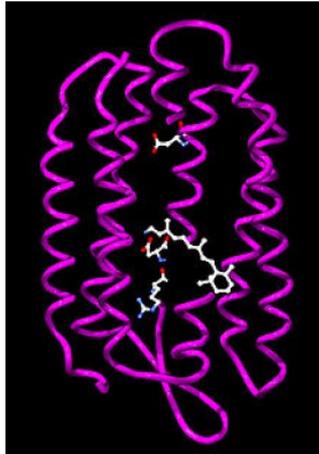
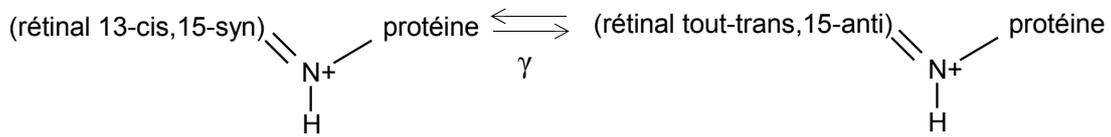


figure 10 : Bactériorhodopsine (source : Wikipedia)

#### ► Archées hyperthermophiles :

Les Archées hyperthermophiles, par définition, sont des Archées dont le développement nécessite des températures supérieures à 80°C (exemple : *Pyrococcus*, *Thermococcus*, *Pyrodictium*, *Pyrolobus fumarii*, *Sulfolobus* qui vit dans les sources chaudes et sulfureuses du Parc National de Yellowstone, fig. 11). Certaines vivent même dans un environnement à 122°C.

L'adaptation à la chaleur est rendue possible par les propriétés suivantes chez l'Archée : augmentation de la rigidité de la membrane, ce qui permet de supprimer la fuite des solutions aqueuses de la cellule (eau, composés ioniques...) que favorise une température élevée ; saturation des chaînes lipidiques (nombre très réduit des doubles liaisons), dans l'isomérisation favorise la position des doubles liaisons ; allongement des chaînes des composés organiques, celles-ci étant linéaires au lieu d'être ramifiées, ce qui augmente la stabilité thermique des protéines, y compris des enzymes, par compactification des repliements de la protéine, et permet donc de minimiser le nombre de cavités internes.

À noter que chez les Archées adaptées au froid (psychrophiles), les adaptations sont inverses de celles ci-dessus.



figure 11 : geyser en éruption dans le Parc National de Yellowstone.

Les Archées thermophiles ont été découvertes dans ce parc par Thomas Brock.

(source : ©Wikimedia, Arad Mojtahedi)

Les Archées hyperthermophiles se répartissent en aérobies (facultatifs ou obligatoires) et anaérobies obligatoires. Les hyperthermophiles aérobies sont pour la plupart aussi acidophiles ( $\text{pH} \leq 2$ ). Les hyperthermophiles anaérobies sont en général neutrophiles ( $\text{pH}$  aux alentours de 5).

#### 4 - Archées, santé humaine et biotechnologie

L'existence d'Archées pathogènes n'a pas encore été mise en évidence. Cependant leurs rôles dans certains processus inflammatoires et l'importance de précautions sanitaires ont été identifiés (voir par exemple références [11], [14]). Les Archées ont plutôt un rôle favorable dans les cycles du carbone et de l'azote, et, par leur faculté de mutualisation, dans les métabolismes digestifs.

Les Archées s'avèrent d'un grand intérêt en biotechnologie, notamment par leurs facultés à vivre et se développer dans des milieux défavorables aux Bactéries et Eucaryotes.

Exemples (réf. [2], [13]) :

- Biolixiviation : augmentation de la concentration en métaux rares (cuivre, or, uranium) à partir de minerais de faible concentration, par culture des archées *Pyrobaculum*, *Pyrococcus*, *Sulfolobus*, etc. hyperthermophiles et acidophiles, qui peuvent donc tenir dans les réacteurs thermiques des traitements de certains minerais.
- Action contre la contamination par des produits chimiques, des métaux lourds, radionucléides, composés halogénés. Pour ce faire, les Archées fortement halophiles s'avèrent efficaces.
- Élaboration de films lipidiques pour des membranes artificielles intervenant dans les matériaux biomimétiques. Ces procédés utilisent les propriétés spécifiques des lipides membranaires des Archées.
- Utilisation des propriétés spécifiques de polymères d'archées pour l'élaboration de plastiques biodégradables, et aussi dans les produits de l'agroalimentaire, la cosmétique, la santé (encapsulation des médicaments...).
- Utilisation des Archées dans les procédés d'obtention des biocarburants grâce à leur faculté de biodégradation des polysaccharides.
- Utilisation des enzymes d'Archées pour l'intérêt qu'elles présentent dans leur faculté d'amplification des gènes.
- Etc...

#### Références

[1] Frédéric Élie : *La légionellose* - site <http://fred.elie.free.fr> , 26 février 2004

[2] Joël Querellou : *Biotechnologie des archées*. BIOFUTUR 310, mai 2010

[3] Céline Petitjean : *Phylogénie et évolution des Archaea, une approche phylogénomique*. Sciences agricoles. Université Paris-Sud – Paris XI, 2013. Français. NNT : 2013PA112159. Tel-01070633

[4] Jean-Claude Callen : *Biologie Cellulaire*. Dunod, 1999

[5] Michel Delarue : *Volvox, structure et cycle de vie d'une algue verte originale*. PLANET VIE, 18 mai 2011.

<http://planet-vie.ens.fr>

[6] Sébastien Sguéra : *Spirulina platensis et ses constituants : intérêts nutritionnels et activités thérapeutiques*. Sciences pharmaceutiques. 2008. hal-01732214

[7] J.G. Zeikus, R.S. Wolfe : *Fine structure of Methanobacterium thermoautotrophicum : Effect of growth temperature on morphology and ultrastructure*. J. of Bacteriology. Jan. 1973, p.461-467

[8] Selosse Marc-André, Joyard Jacques (2021) : *Symbiose et évolution : à l'origine de la cellule eucaryote*. Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950]

url : <http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=784>

[9] Michael Madigan, John Martinko : *Brock, Biologie des micro-organismes*. Pearson ed., 11e édition, 17 septembre 2007

[10] Frédéric Élie : *Réchauffement climatique : bases scientifiques pour comprendre le problème* - site <http://fred.elie.free.fr> , novembre 2007, modifié mars 2009

[11] Pascale Blais Lecours : *Le rôle des archées dans l'inflammation et leur impact sur la santé humaine*. Thèse de doctorat en microbiologie, Université Laval, Québec, Canada, 2014

[12] Michel Detay, Pierre Thomas : *Les extrémophiles dans leurs environnements géologiques. Un nouveau regard sur la biodiversité et sur la vie terrestre et extraterrestre*. Plant Terre, 7 avril 2022.

URL : <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/extremophiles.xml>

[13] Ariane Bize, Guennadi Sezonov : *Les virus d'archées : de la morphologie aux nanotechnologies*. BIOFUTUR 309, avril 2010. URL : <https://www.researchgate.net/publication/297429452>

[14] P. Blais Lecours, M. Veillette, D. Marsolais, Y. Cormier, S. Kirychuk, C. Duchaine : *Archaea des bioaérosols de fermes laitières, des poulaillers et des usines d'épuration des eaux usées. Leur rôle dans l'inflammation pulmonaire*. Institut de Recherche Robert-Sauvé en Santé et en Sécurité du Travail (IRSST), Québec, Canada, Rapport R-827, 2014

[15] Eva Rosenbaum : *Caractérisation structurale, enzymatique et biophysique d'un complexe peptidase piézo-thermophile issu de l'archaea marine abyssale Pyrococcus horikoshii*. Biophysique [physics.bioph]. Université Joseph-Fourier – Grenoble I, 2008. Français. Tel-00363757

[16] Floriane Delpech : *Dynamique cellulaire des protéines de la réplication chez l'archée halophile Haloferax volcanii*. Organisation et fonctions cellulaires [q-bio.SC]. Université Paris Saclay (ComUE), 2016. Français. NNT : 2016SACLX087. Tel-01495466

[17] Yoann Collien : *Dynamique de la réplication chez l'archée Haloferax volcanii*. Organisation et fonctions cellulaires [q-bio.SC]. Université Paris Saclay (ComUE), 2019. Français. NNT : 2019SACLX063. Tel-02439197

[18] Frédéric Élie : *Notions sur les aldéhydes* - site <http://fred.elie.free.fr> , décembre 2022

[19] Frédéric Élie : *Notions sur les glucides* - site <http://fred.elie.free.fr> , décembre 2022

[20] Frédéric Élie : *Notions sur les lipides et les acides gras* - site <http://fred.elie.free.fr> , décembre 2022