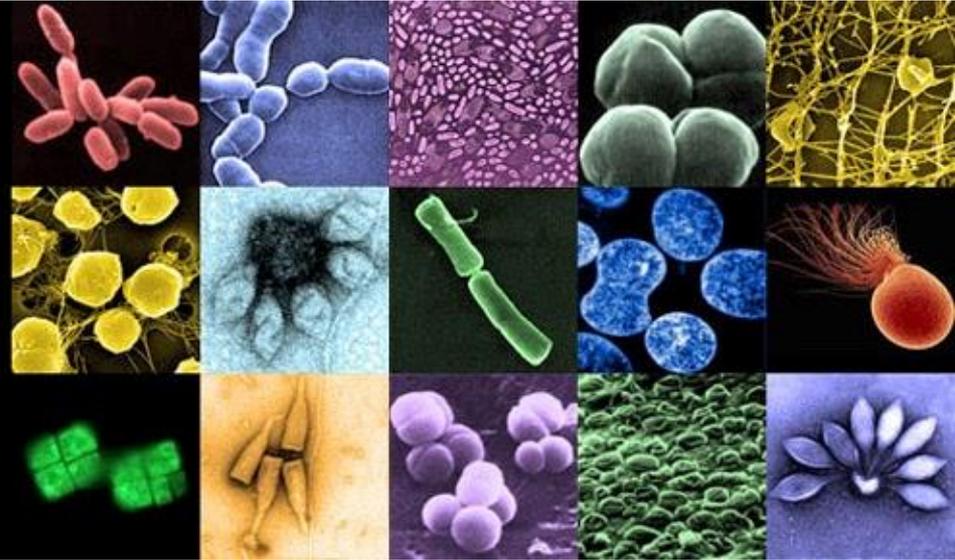


Archaea

ARCHAEA



à la découverte du troisième domaine du vivant

Classification actuelle des Archées

Caractéristiques particulières des Archées

Enveloppe cellulaire

Méthanogénèse

Adaptation aux conditions extrêmophiles (hyperthermophilie)

Absence d'Archées pathogènes (archaeome humain)

Importance écologique des Archées (cycle d'azote)

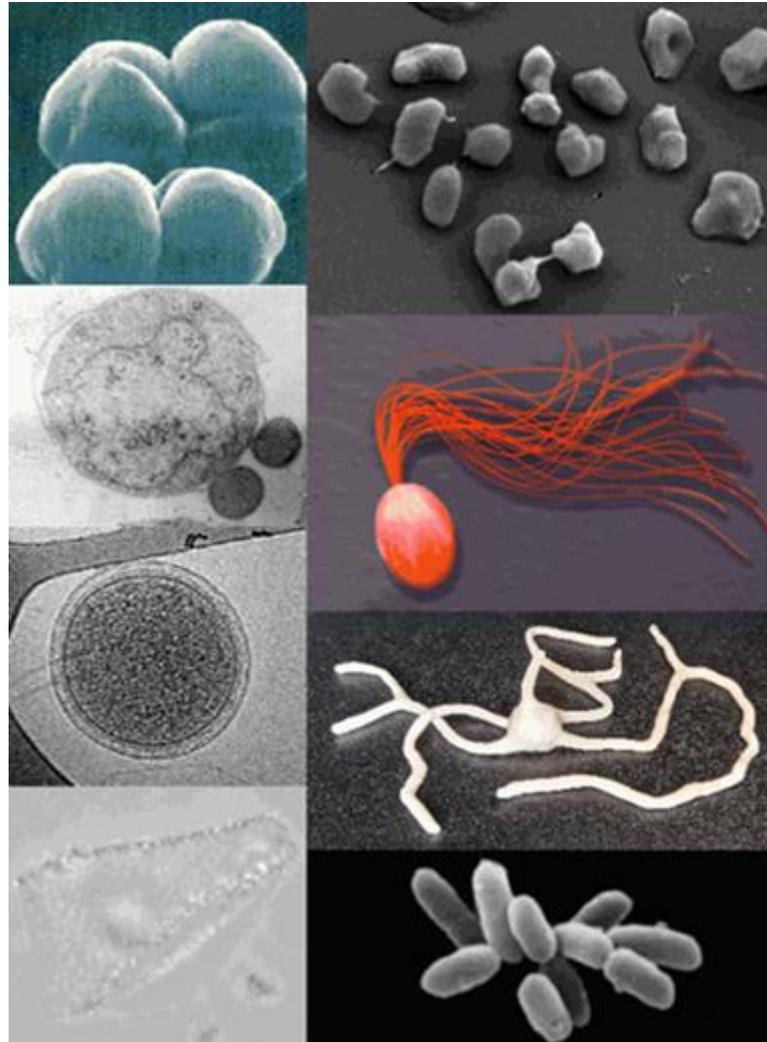
Evolution d'Archées

Où est la racine ?

DPANN

Classification actuelle des Archées

→ Les Archées sont des organismes unicellulaires du type procaryote (absence du noyau)



Découverte du 3-eme domaine du vivant - les Archées

Proc. Natl. Acad. Sci. USA
Vol. 87, pp. 4576-4579, June 1990
Evolution

Towards a natural system of organisms: Proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya

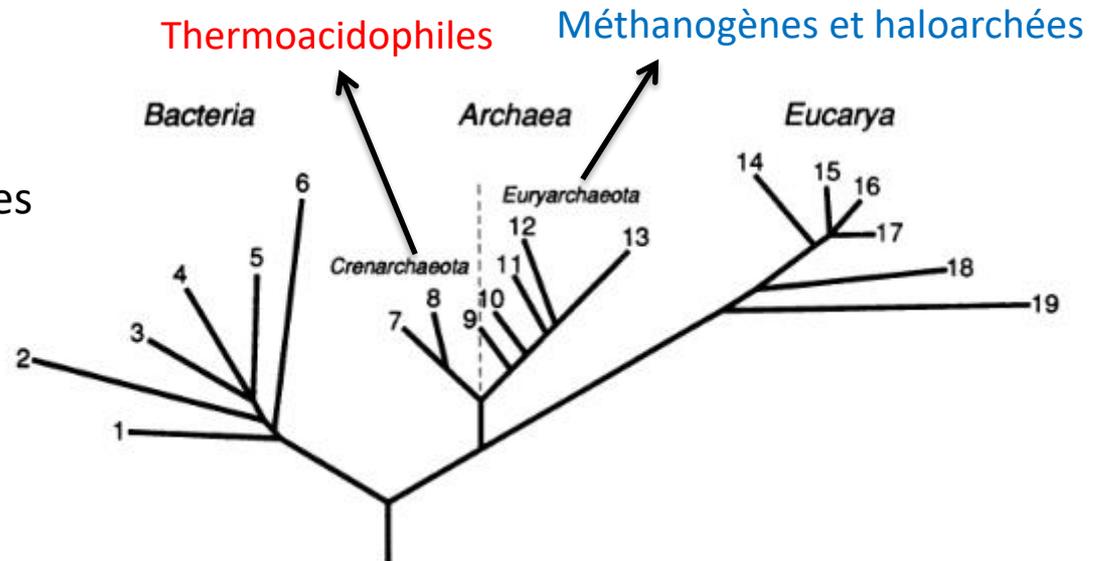
(Euryarchaeota/Crenarchaeota/kingdom/evolution)

CARL R. WOESE*[†], OTTO KANDLER[‡], AND MARK L. WHEELIS[§]

*Department of Microbiology, University of Illinois, 131 Burrill Hall, Urbana, IL 61801; [†]Botanisches Institut der Universität München, Menzinger Strasse 67, 8000 Munich 19, Federal Republic of Germany; and [§]Department of Microbiology, University of California, Davis, CA 95616

Contributed by Carl R. Woese, March 26, 1990

- introduction du domaine comme catégorie au dessus du règne
- les archées sont divisés en 2 règnes



Classification actuelle des Archées

→ Les Archées présentent des caractéristiques chimériques et quelques particularités

Table 1 | **Selected traits of the Bacteria, Archaea and Eukarya***

Trait	Bacteria	Archaea	Eukarya
Carbon linkage of lipids	Ester	Ether	Ester
Phosphate backbone of lipids	Glycerol-3-phosphate	Glycerol-1-phosphate	Glycerol-3-phosphate
Metabolism	Bacterial	Bacterial-like	Eukaryotic
Core transcription apparatus	Bacterial	Eukaryotic-like	Eukaryotic
Translation elongation factors	Bacterial	Eukaryotic-like	Eukaryotic
Nucleus	No	No	Yes
Organelles	No	No	Yes
Methanogenesis	No	Yes	No
Pathogens	Yes	No	Yes

*The occurrence of a trait is for the majority of cases (not necessarily absolute) — for example, haloarchaea often possess organelles in the form of gas vesicles, but most archaea possess no organelles.

Classification actuelle des Archées

→ Les Archées présentent des caractéristiques chimériques et quelques particularités

Table 1 | **Selected traits of the Bacteria, Archaea and Eukarya***

Trait	Bacteria	Archaea	Eukarya
Carbon linkage of lipids	Ester	Ether	Ester
Phosphate backbone of lipids	Glycerol-3-phosphate	Glycerol-1-phosphate	Glycerol-3-phosphate
Metabolism	Bacterial	Bacterial-like	Eukaryotic
Core transcription apparatus	Bacterial	Eukaryotic-like	Eukaryotic
Translation elongation factors	Bacterial	Eukaryotic-like	Eukaryotic
Nucleus	No	No	Yes
Organelles	No	No	Yes
Methanogenesis	No	Yes	No
Pathogens	Yes	No	Yes

*The occurrence of a trait is for the majority of cases (not necessarily absolute) — for example, haloarchaea often possess organelles in the form of gas vesicles, but most archaea possess no organelles.

Classification actuelle des Archées

→ Les Archées présentent des caractéristiques chimériques et quelques particularités

Table 1 | **Selected traits of the Bacteria, Archaea and Eukarya***

Trait	Bacteria	Archaea	Eukarya
Carbon linkage of lipids	Ester	Ether	Ester
Phosphate backbone of lipids	Glycerol-3-phosphate	Glycerol-1-phosphate	Glycerol-3-phosphate
Metabolism	Bacterial	Bacterial-like	Eukaryotic
Core transcription apparatus	Bacterial	Eukaryotic-like	Eukaryotic
Translation elongation factors	Bacterial	Eukaryotic-like	Eukaryotic
Nucleus	No	No	Yes
Organelles	No	No	Yes
Methanogenesis	No	Yes	No
Pathogens	Yes	No	Yes

*The occurrence of a trait is for the majority of cases (not necessarily absolute) — for example, haloarchaea often possess organelles in the form of gas vesicles, but most archaea possess no organelles.

Classification actuelle des Archées

→ Les Archées présentent des caractéristiques chimériques et quelques particularités

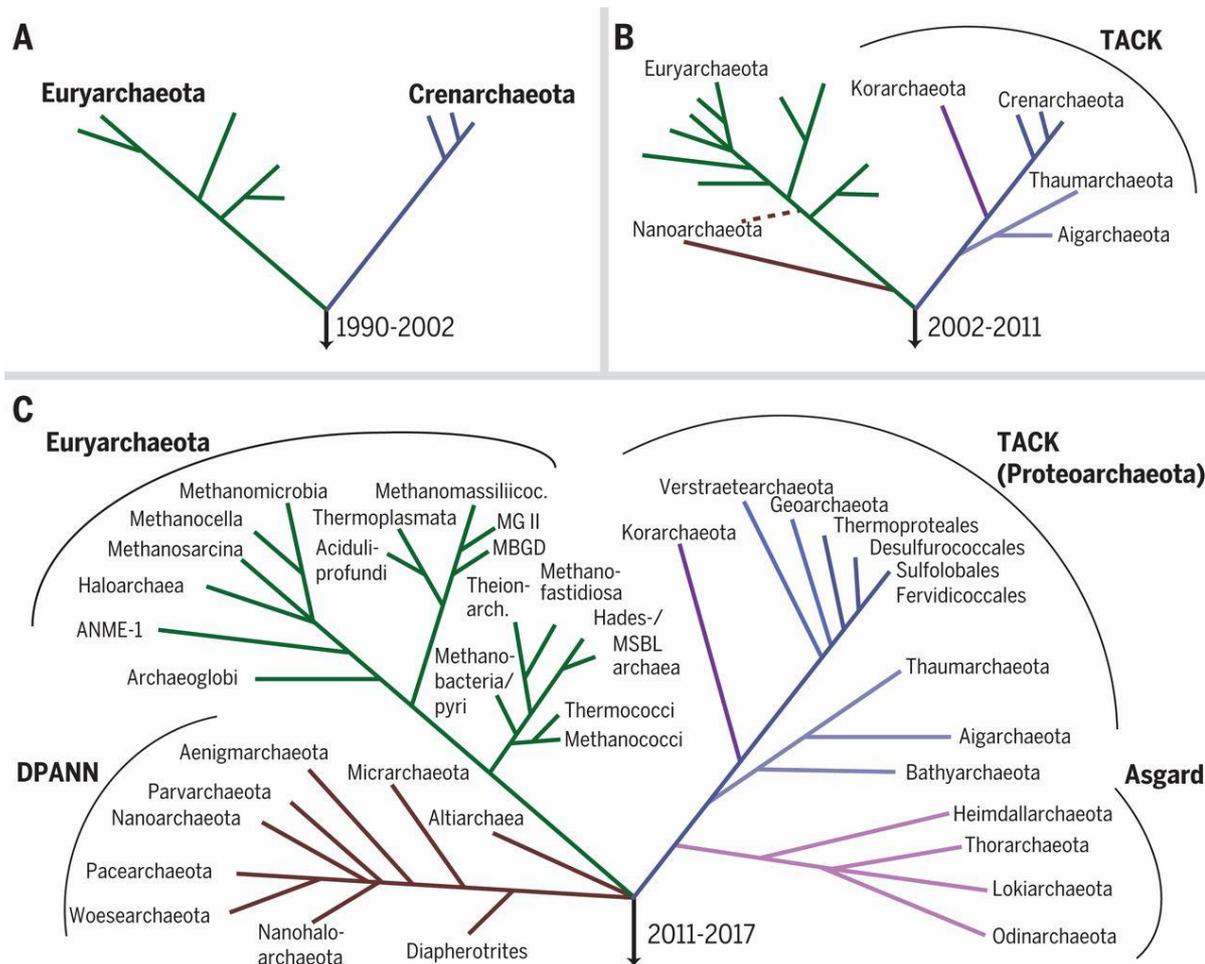
Table 1 | **Selected traits of the Bacteria, Archaea and Eukarya***

Trait	Bacteria	Archaea	Eukarya
Carbon linkage of lipids	Ester	Ether	Ester
Phosphate backbone of lipids	Glycerol-3-phosphate	Glycerol-1-phosphate	Glycerol-3-phosphate
Metabolism	Bacterial	Bacterial-like	Eukaryotic
Core transcription apparatus	Bacterial	Eukaryotic-like	Eukaryotic
Translation elongation factors	Bacterial	Eukaryotic-like	Eukaryotic
Nucleus	No	No	Yes
Organelles	No	No	Yes
Methanogenesis	No	Yes	No
Pathogens	Yes	No	Yes

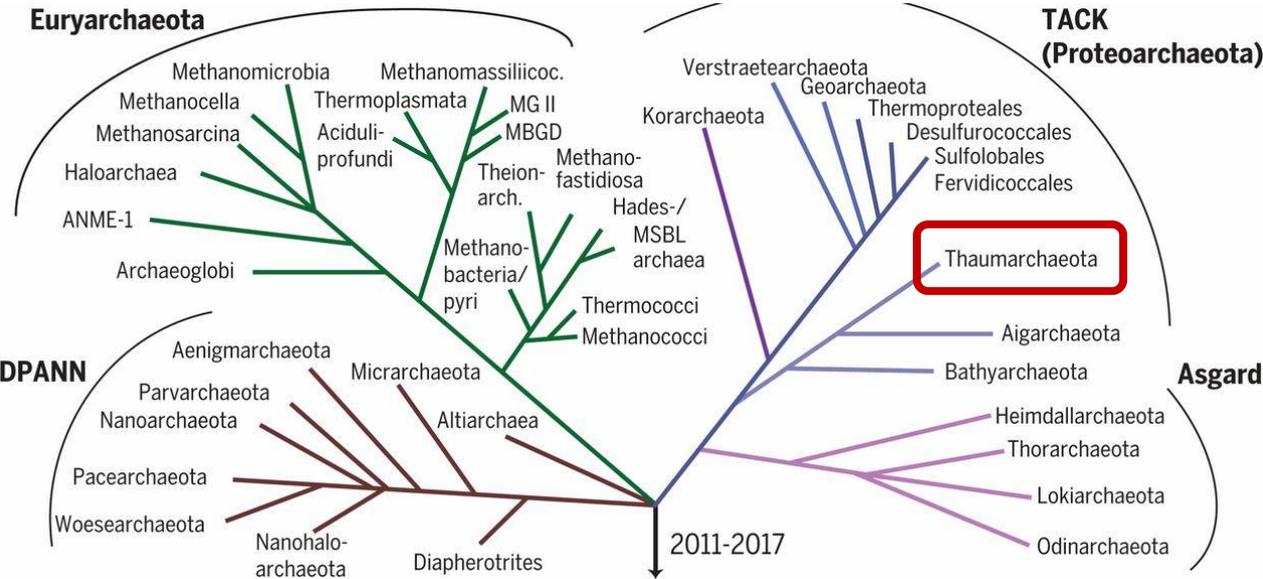
*The occurrence of a trait is for the majority of cases (not necessarily absolute) — for example, haloarchaea often possess organelles in the form of gas vesicles, but most archaea possess no organelles.

Classification actuelle des Archées

→ L'impact de la métagénomique sur l'arbre des Archées



Classification actuelle des Archées



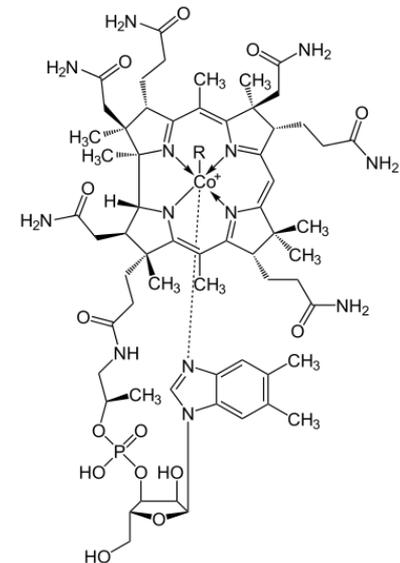
→ Parmi les organismes les plus abondants sur la planète

→ Importants pour le cycle de l'azote

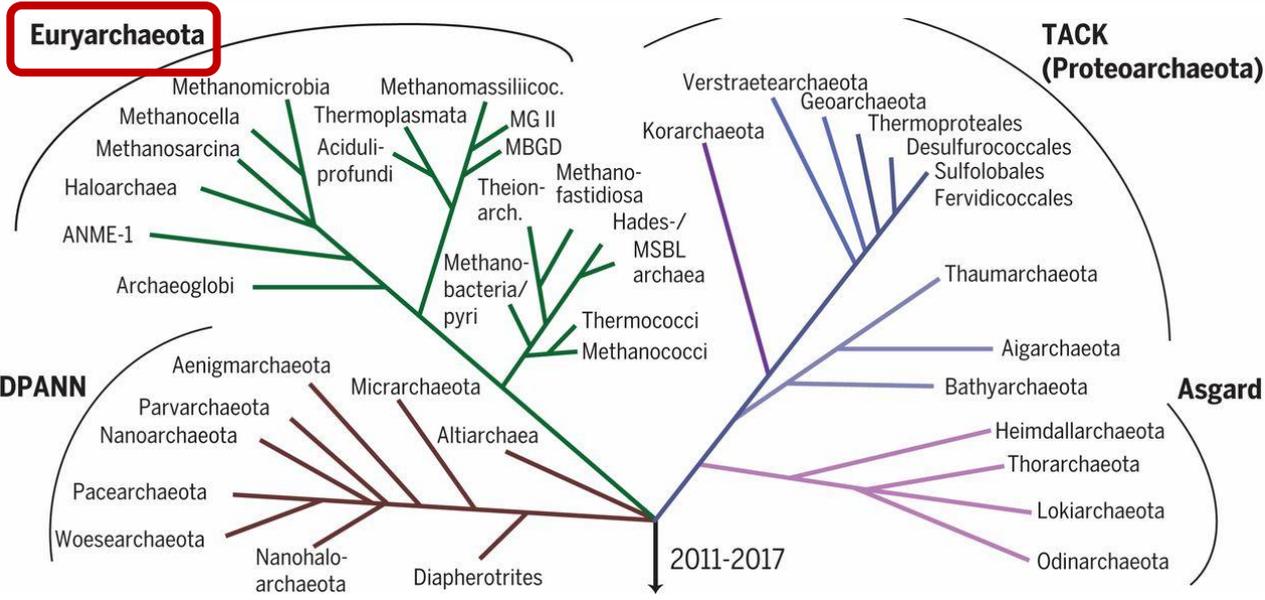
→ Les producteurs primaires dans l'océan profond

→ Important constituant de la flore microbienne humaine

→ Producteurs majeurs de la vitamine B12

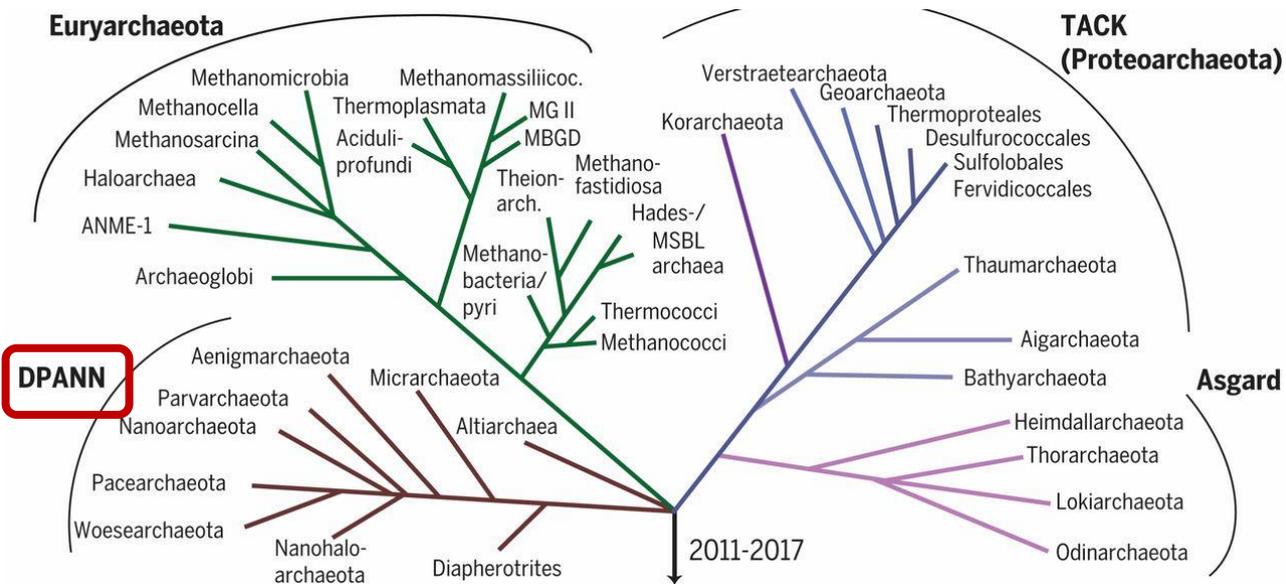


Classification actuelle des Archées



- Présents dans une grande diversité d'environnements
- Producteurs de méthane (origine de la méthanogène ?)
- Font partie de la flore intestinale humaine (lien avec obésité/parkinson?)

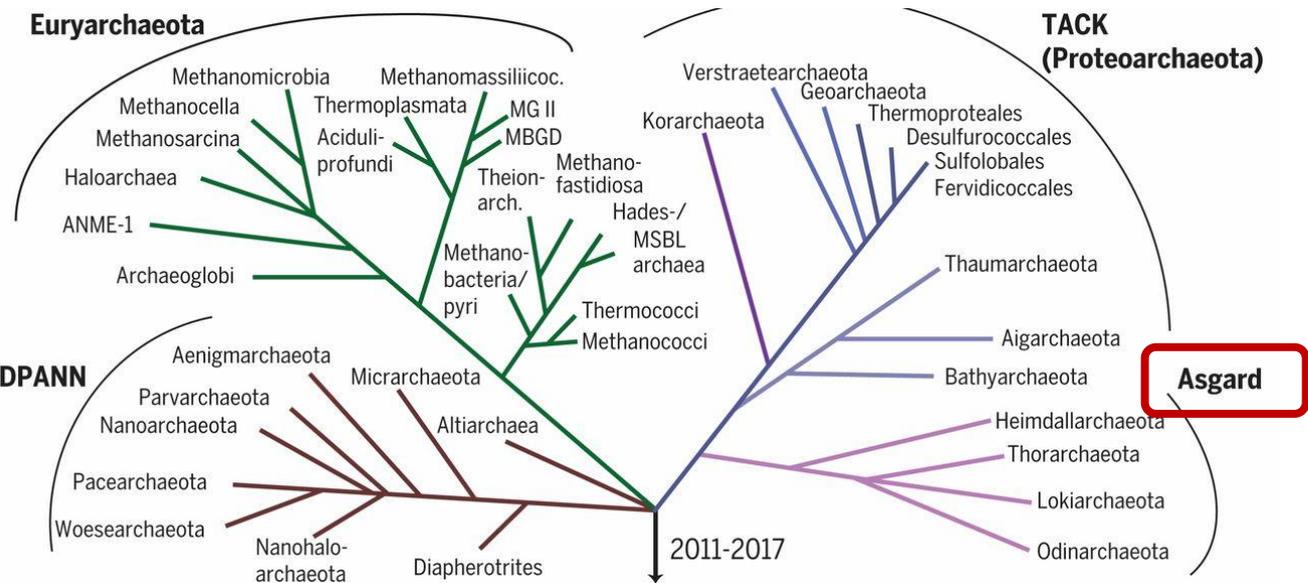
Classification actuelle des Archées



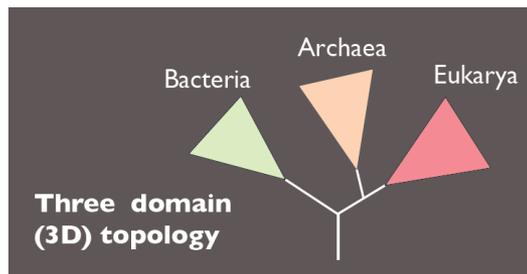
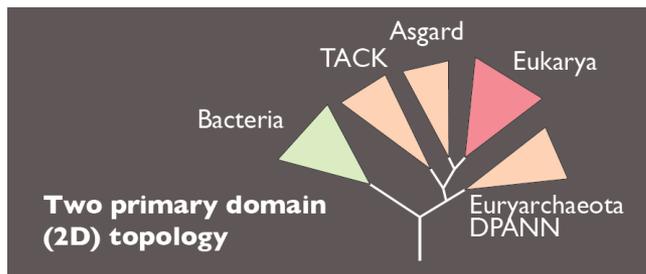
→ Nanoarchées représentant une grande partie de biodiversité jusqu'au 50% !

→ Rôle écologique et le positionnement dans l'arbre reste à déterminer

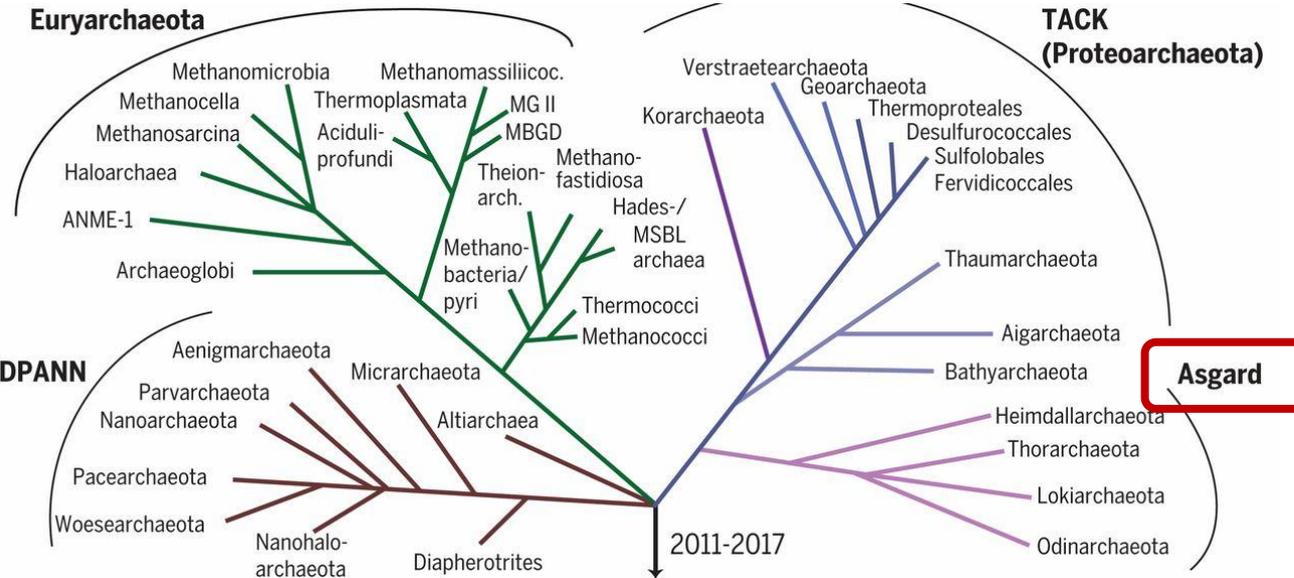
Classification actuelle des Archées



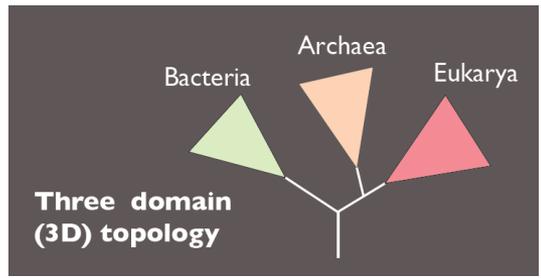
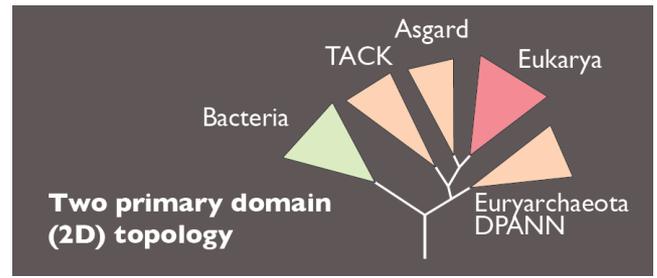
→ Importants pour comprendre nos propres origines !



Classification actuelle des Archées



→ Importants pour comprendre nos propres origines !



Caractéristiques particulières des Archées - enveloppe cellulaire

Otto Kandler étudie la composition de l'enveloppe cellulaire chez les méthanogènes...

Arch. Microbiol. 113, 57–60 (1977)

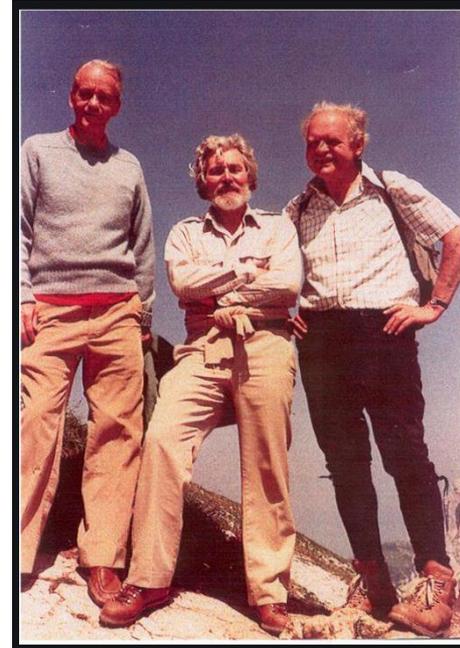
Ralph Wolfe Carl Woese Otto Kandler

Lack of Peptidoglycan in the Cell Walls of *Methanosarcina barkeri*

OTTO KANDLER^{1*} and HANS HIPPE²

¹ Botanisches Institut der Universität München,
Menzinger Str. 67, D-8000 München 19, Federal Republic of Germany

² Deutsche Sammlung von Mikroorganismen, Teilsammlungen München und Göttingen,
Grisebachstr. 8, D-3400 Göttingen, Federal Republic of Germany



→ la composition de l'enveloppe cellulaire d'archée est fondamentalement différente de celle des bactéries

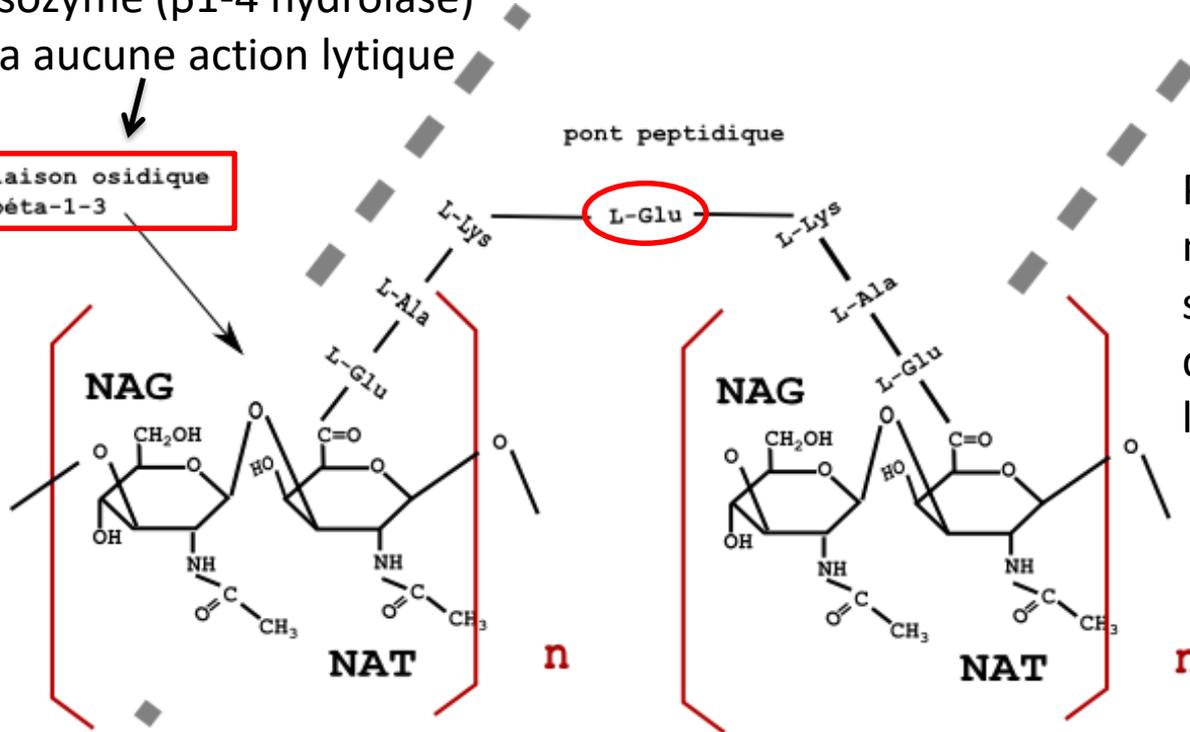
Caractéristiques particulières des Archées - enveloppe cellulaire

lysozyme (β 1-4 hydrolase)
n'a aucune action lytique

liaison osidique
béta-1-3

pont peptidique

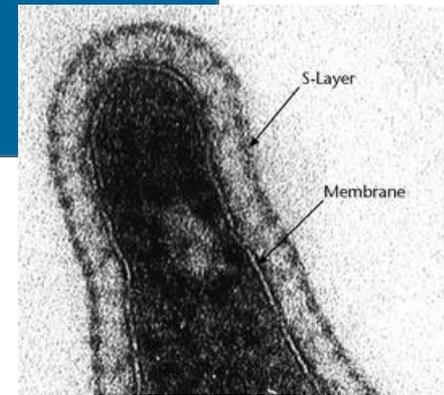
Pas de transpeptidation sur un
motif D-ala-D-ala pour la
synthèse des ponts, donc pas
d'effet des antibiotiques β -
lactames (ex. pénicilline)



Chez les Archées on trouve la
pseudomuréine

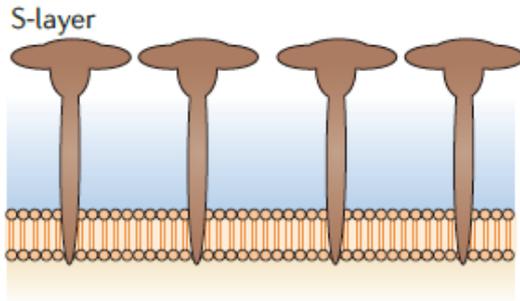
NAG = N-acétylglucosamine;
NAT = acide N-acétyltalosaminuronique

Caractéristiques particulières des Archées - enveloppe cellulaire

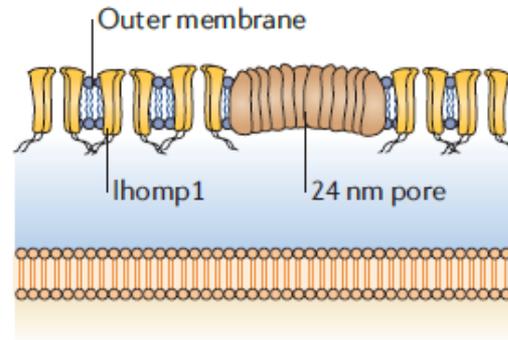


Les archées ont une membrane plasmique couverte chez la majorité des espèces par un S-layer (une couche protéique paracristalline)

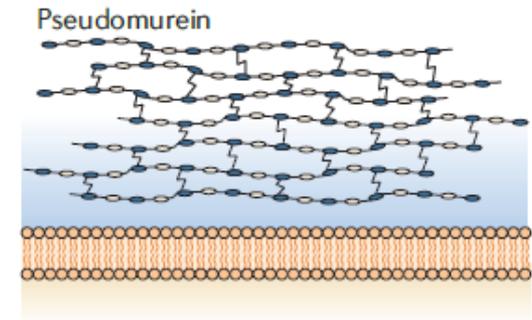
Sulfolobales



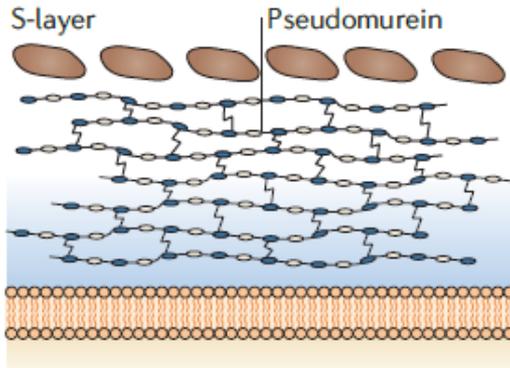
Ignicoccus hospitalis



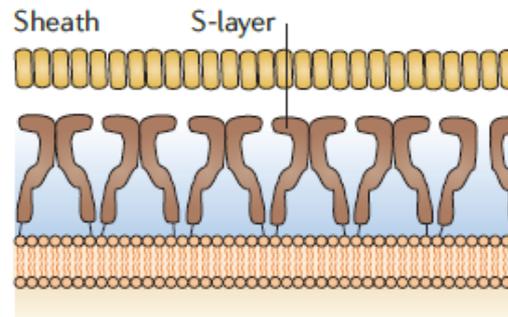
Methanosphaera



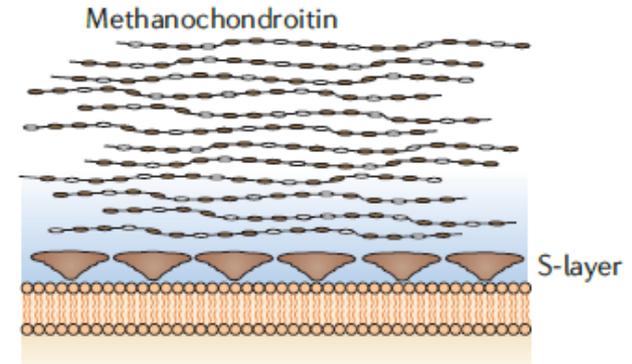
Methanothermus



Methanospirillum

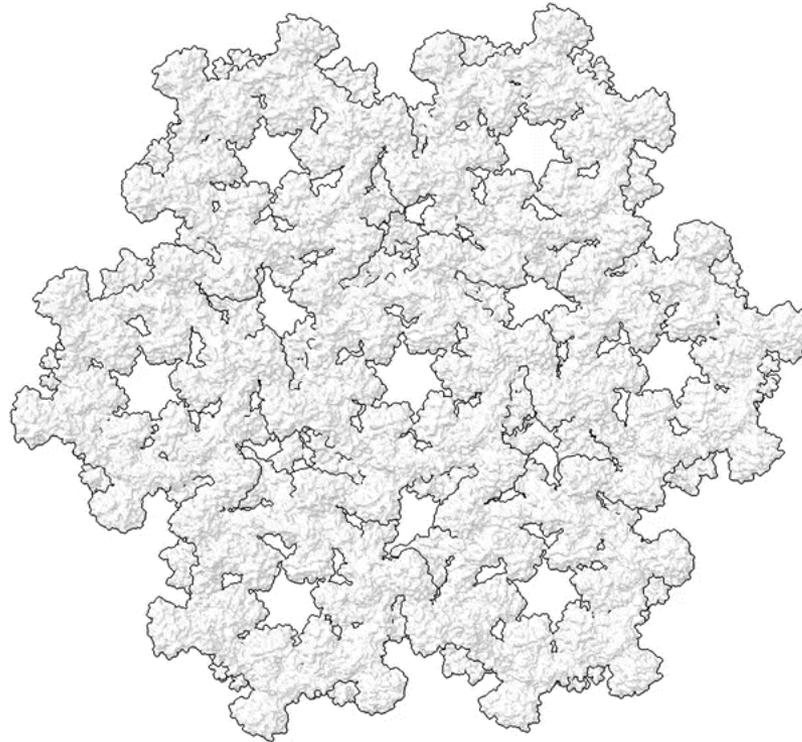


Methanosarcina



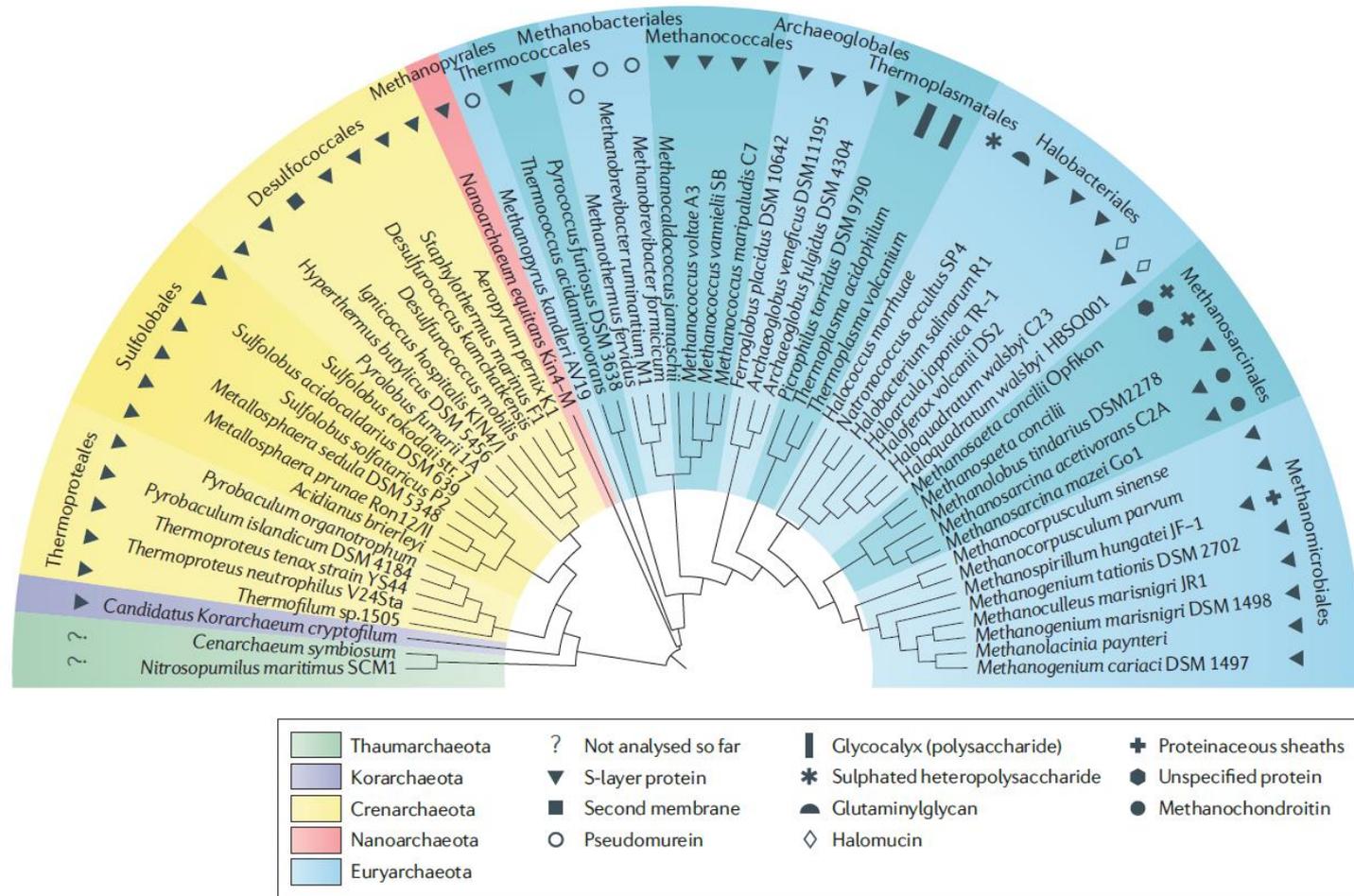
Caractéristiques particulières des Archées - enveloppe cellulaire

S. acidocaldarius SlaA/SlaB assembly

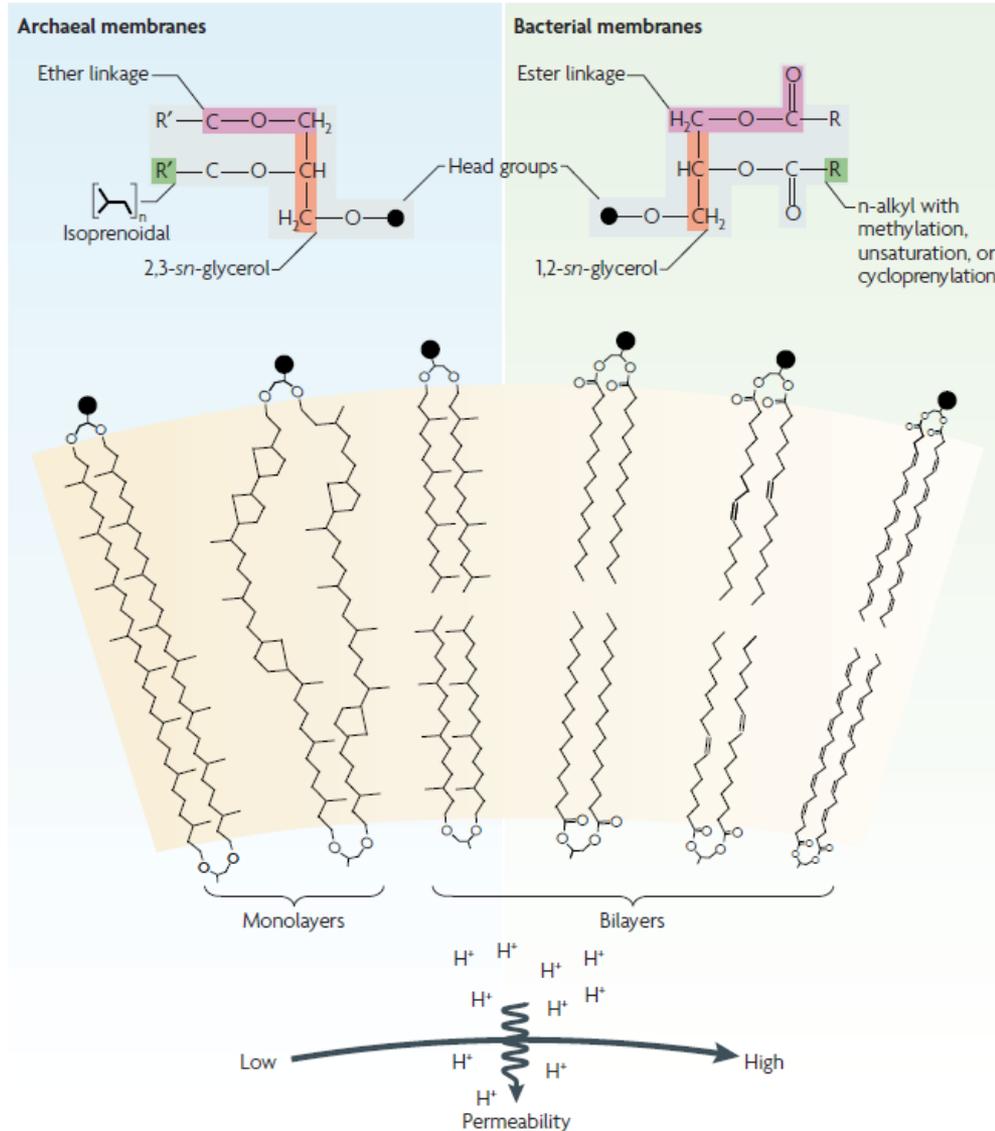


Caractéristiques particulières des Archées - enveloppe cellulaire

→ La diversité des enveloppes chez les Archées



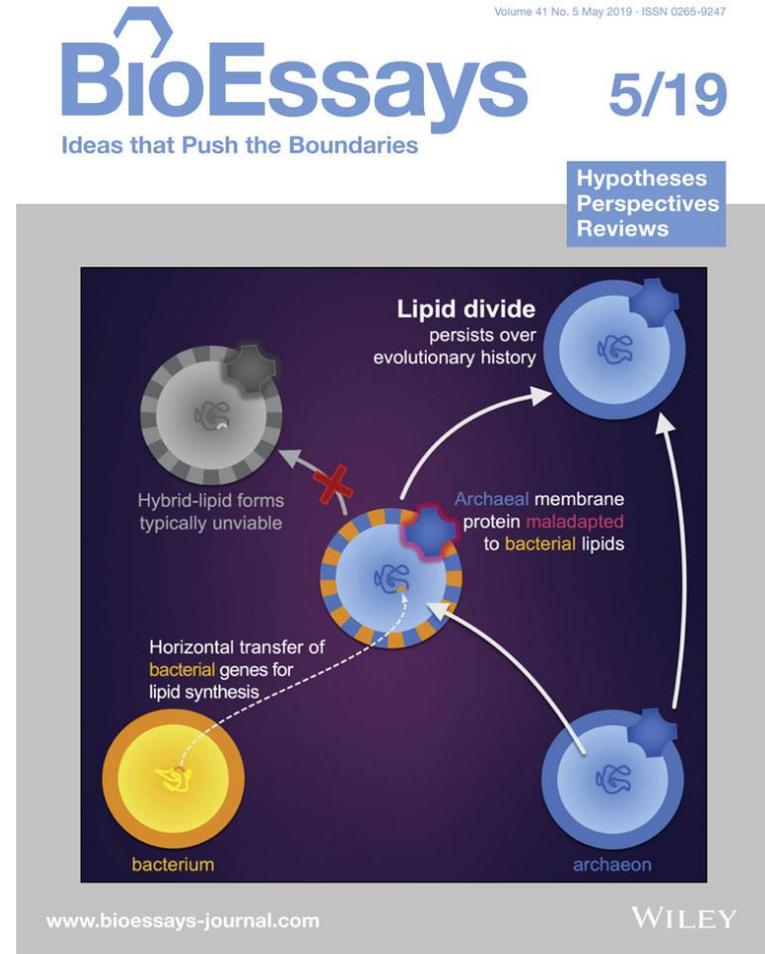
Caractéristiques particulières des Archées - enveloppe cellulaire



Caractéristiques particulières des Archées - enveloppe cellulaire

Cette dichotomie est
probablement apparue après le
dernier ancêtre commun (LUCA)

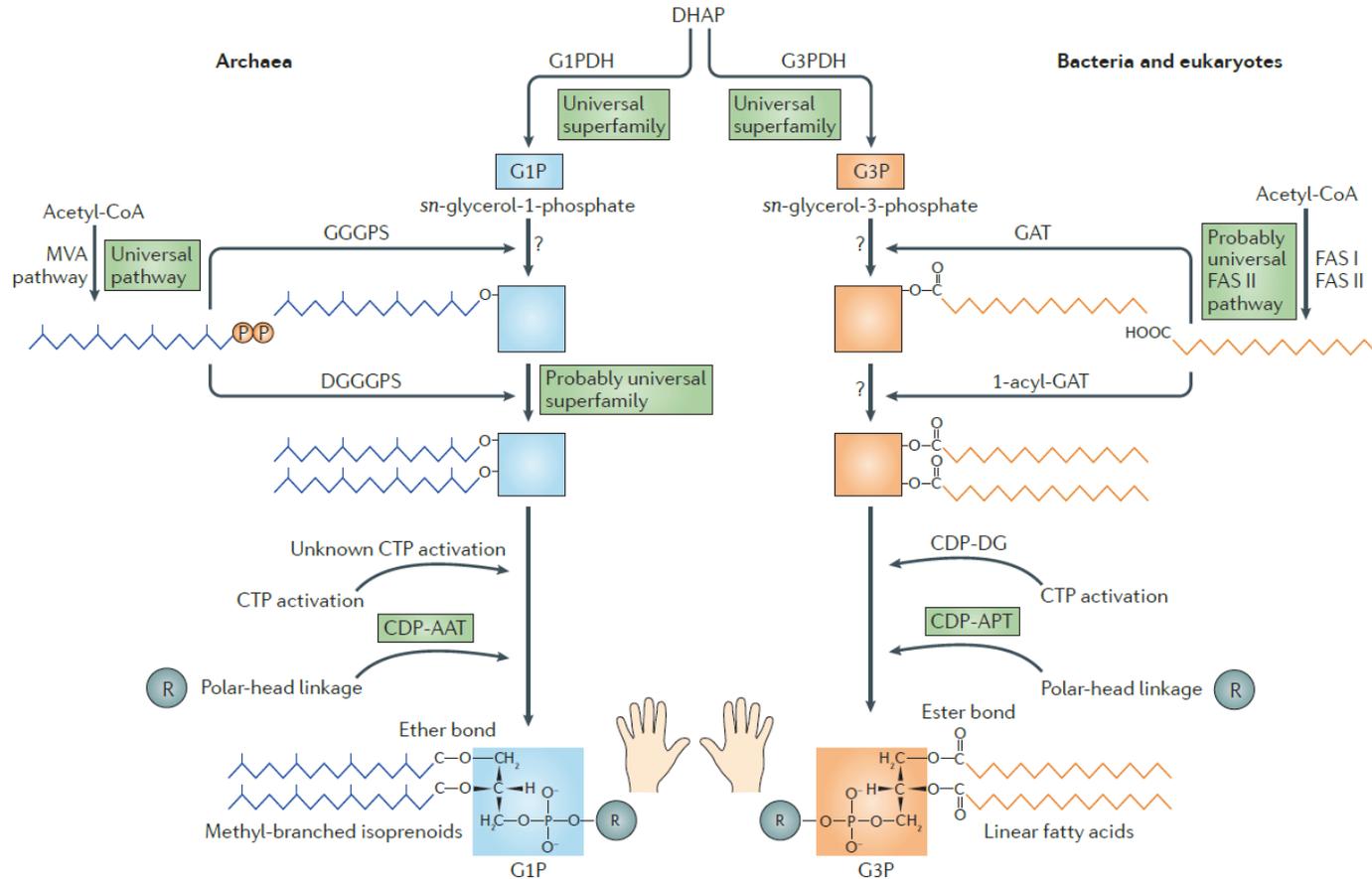
« Lipid divide » l'une des questions
évolutives majeures



Quelle est la nature de la membrane ancestrale ?

Caractéristiques particulières des Archées - enveloppe cellulaire

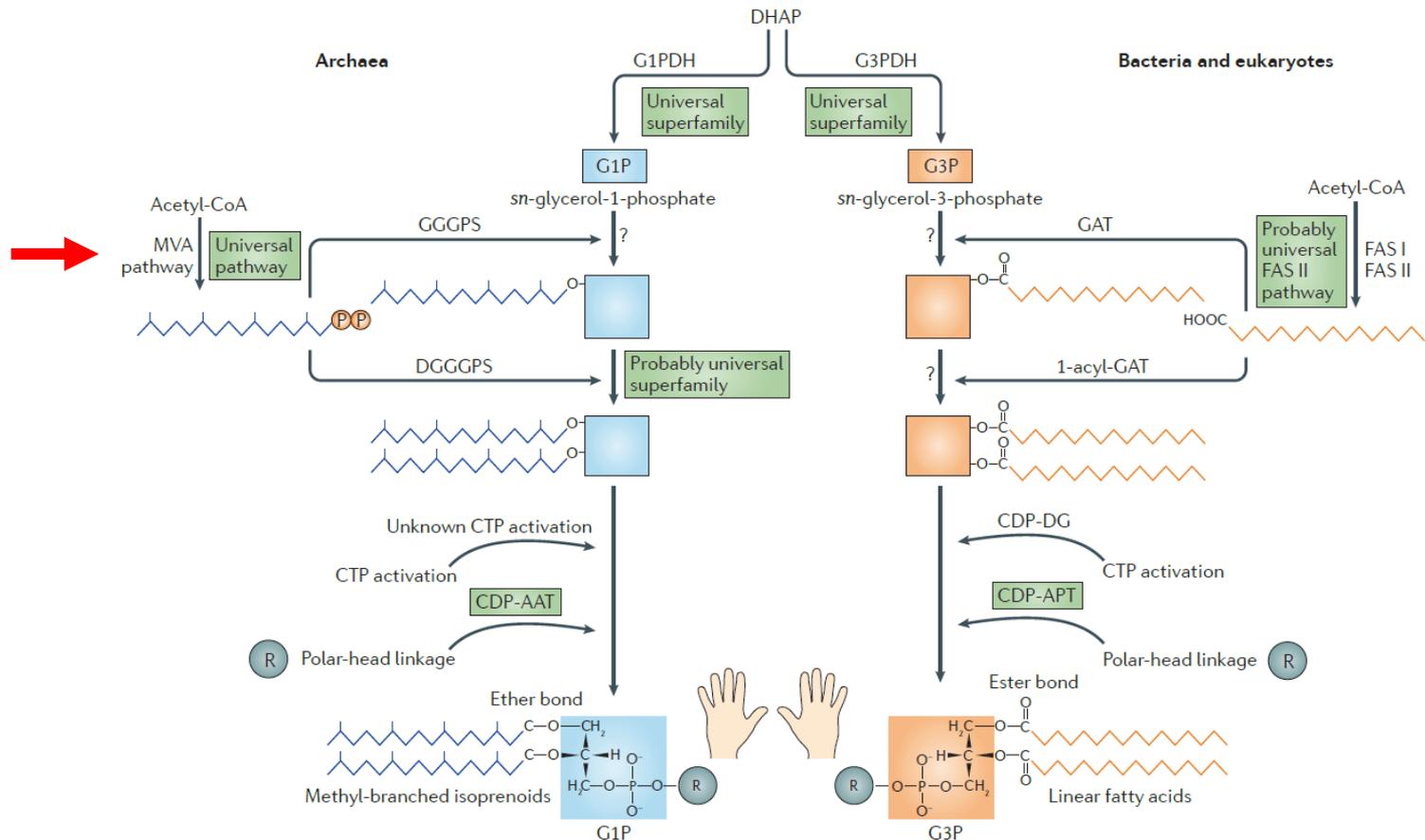
- Les voies de synthèse de phospholipides dans les 3 domaines du vivant
- Arbres phylogénétiques des protéines impliquées (et spécifiques de cette voie)



Caractéristiques particulières des Archées - enveloppe cellulaire

→ Origine et l'évolution de la synthèse des isoprénoides ?

Composés ubiquitaires mais deux voies (non-homologues) de synthèse : MVA (Archées et Eucaryotes) et MEP (Bactéries)



Caractéristiques particulières des Archées - enveloppe cellulaire

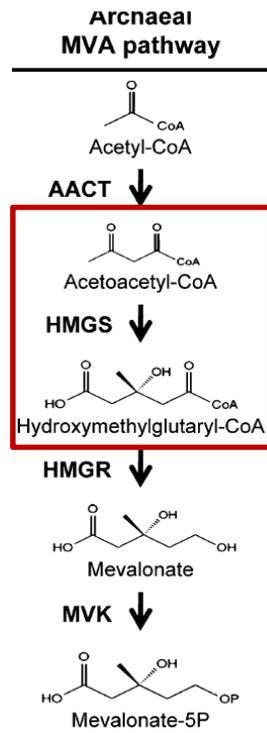
Origins and Early Evolution of the Mevalonate Pathway of Isoprenoid Biosynthesis in the Three Domains of Life

Jonathan Lombard and David Moreira*

Unité d'Ecologie, Systématique et Evolution, Centre National de la Recherche Scientifique, Université Paris-Sud, Orsay, France

*Corresponding author: E-mail: david.moreira@u-psud.fr.

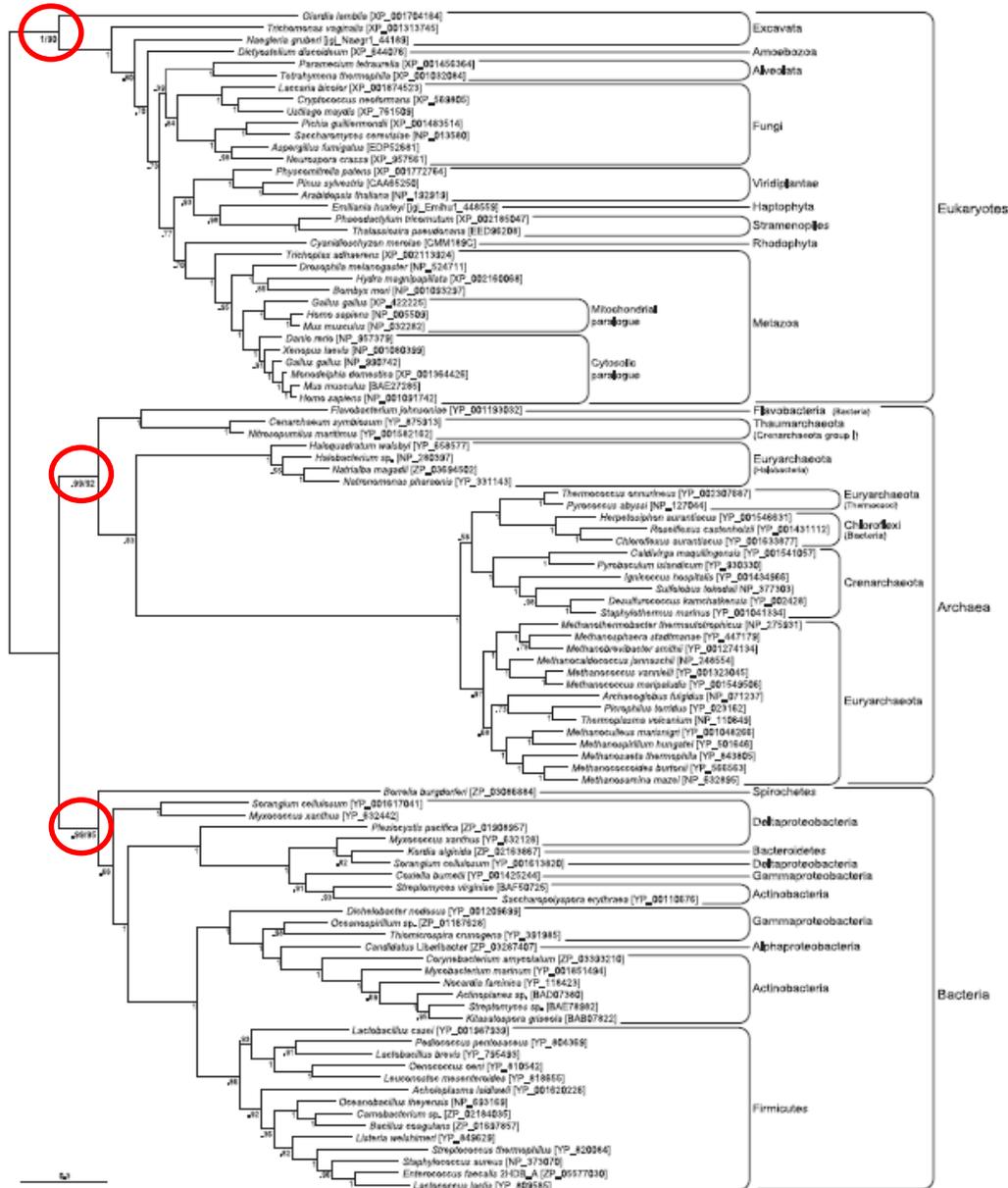
Associate editor: Andrew Roger



Mais la voie MVA existe aussi chez les Bactéries (6 phyla différents)! → apport de l'étude de la diversité pour la compréhension de l'évolution

S'agit il d'une acquisition par HGT ou alors cette voie est apparue avant la diversification en trois domaines du vivant ?

Caractéristiques particulières des Archées - enveloppe cellulaire



L'arbre Bayésien (99 séquences, 311 positions) – sans racine

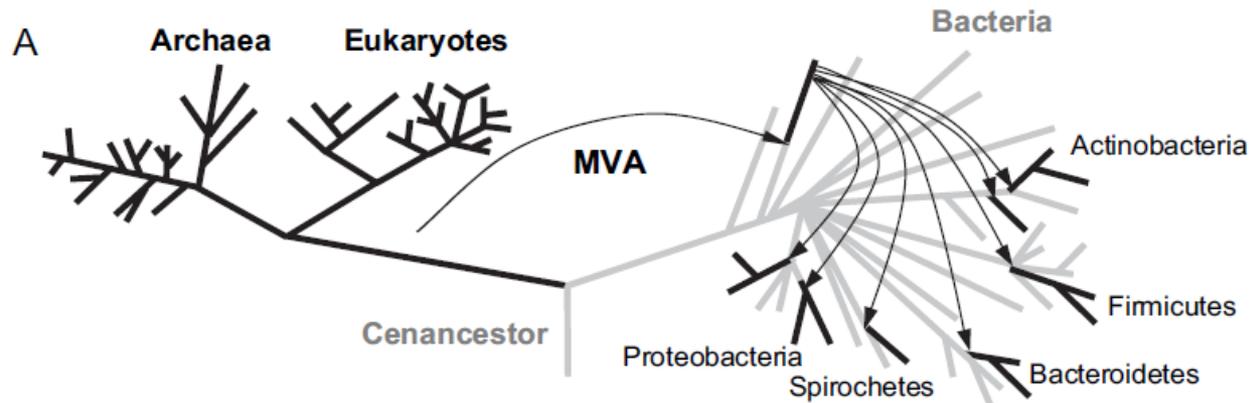
Les trois domaines du vivant sont monophylétiques, les nœuds ancestraux de ces trois clades sont très bien soutenus :

PP \geq 0.99, BS \geq 90 %

Au sein de chaque domaine on retrouve les phyla reconnus par la classification actuelle des organismes → transmission verticale de ces gènes

Caractéristiques particulières des Archées - enveloppe cellulaire

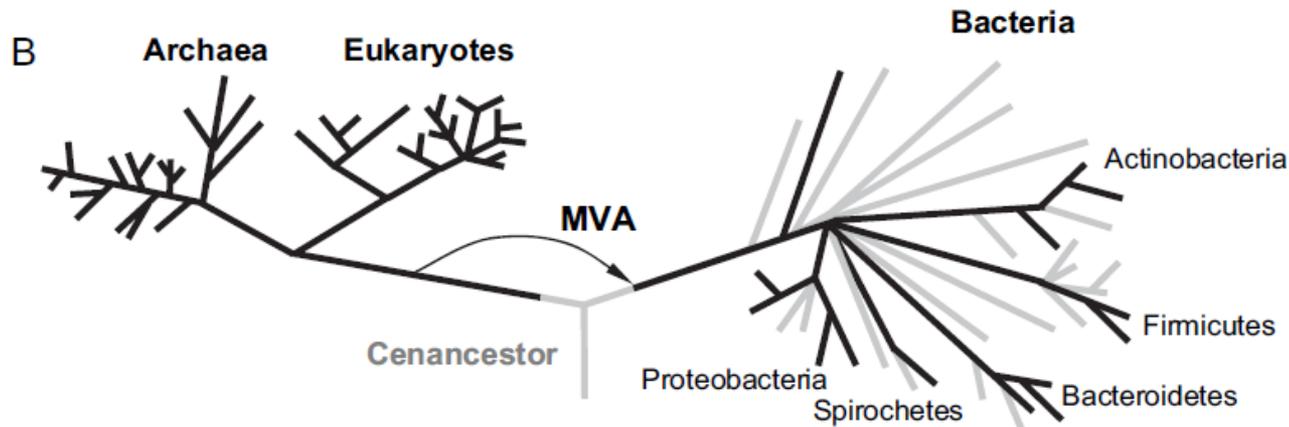
→ Ces données sont compatibles avec trois scénarii évolutifs :



Un transfert horizontal des gènes depuis l'ancêtre commun des Archées et des Eucaryotes vers une lignée bactérienne, une évolution rapide (séquences deviennent divergentes) et ensuite HGT secondaires multiples vers les différentes lignées des bactéries.

Caractéristiques particulières des Archées - enveloppe cellulaire

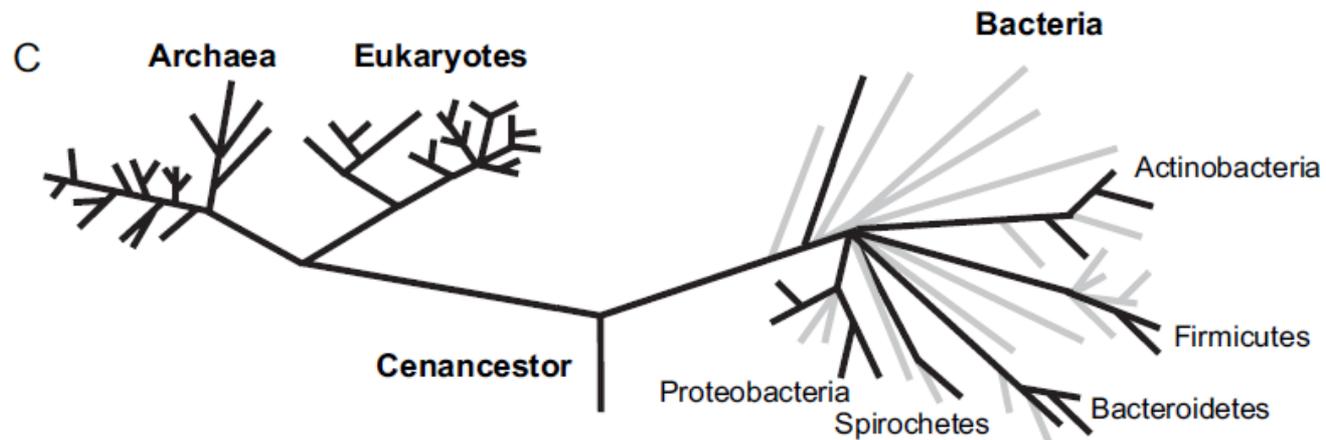
→ Ces données sont compatibles avec trois scénarii évolutifs :



La voie est ancestrale aux bactéries, a été acquises par HGT avant la diversification des bactéries et ensuite perdue dans les nombreuses lignées bactériennes.

Caractéristiques particulières des Archées - enveloppe cellulaire

→ Ces données sont compatibles avec trois scénarii évolutifs :



La voie est ancestrale à tous, a été transmise verticalement depuis LUCA et ensuite perdue dans les nombreuses lignées bactériennes.

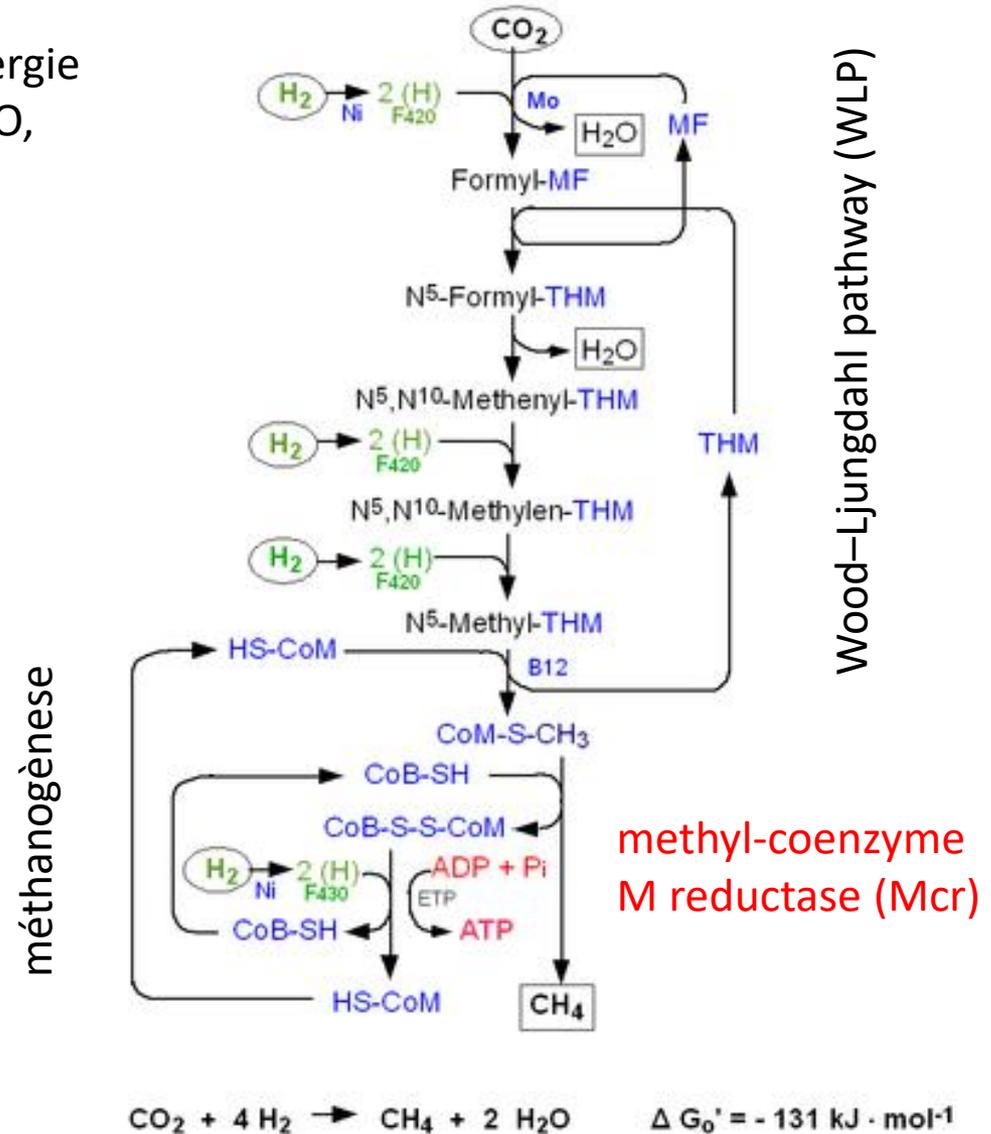


Implications pour comprendre la nature des membranes ancestrales cf. CM 6

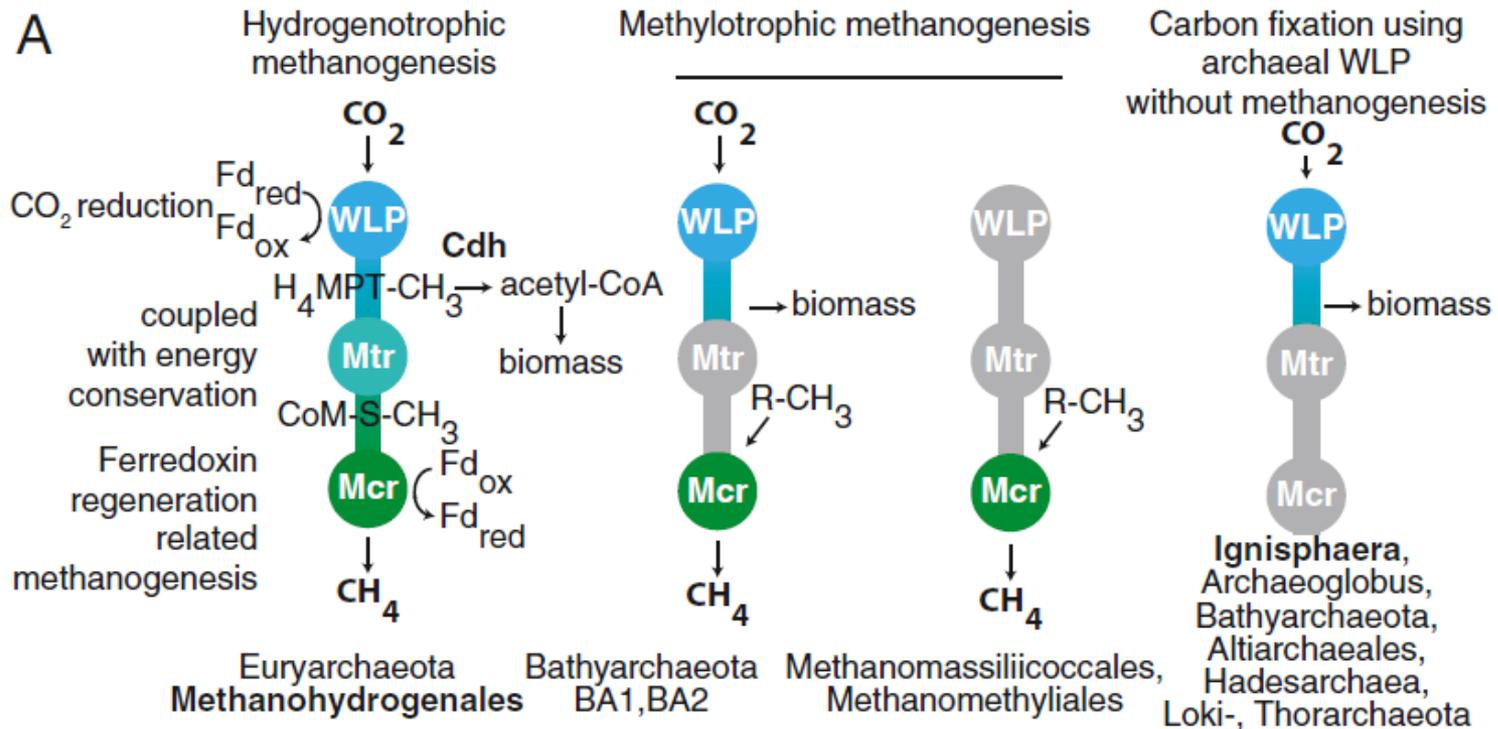
Caractéristiques particulières des Archées - méthanogénèse

→ chimiolithotrophie, génération d'énergie par réduction des composés C₁ (CO₂, CO, formate) ou C₂ (acétate, méthanol, méthylamine) en méthane

→ La méthanogénèse hydrogenotrophique (couplage avec WLP) est la plus répandue – considéré comme la voie ancestrale

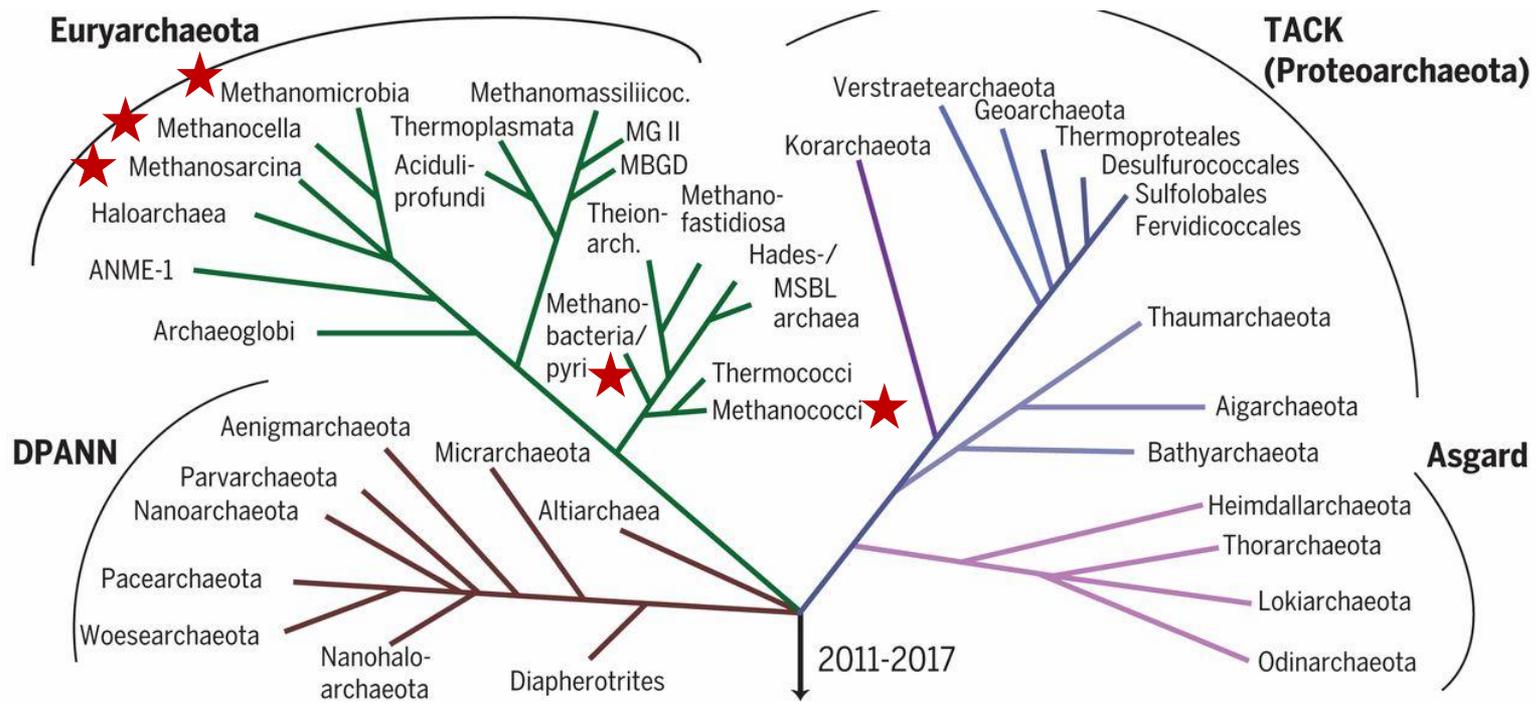


Caractéristiques particulières des Archées - méthanogénèse



Caractéristiques particulières des Archées - méthanogénèse

→ uniquement au sein d'archées mais (!) toutes les archées ne sont pas des méthanogènes

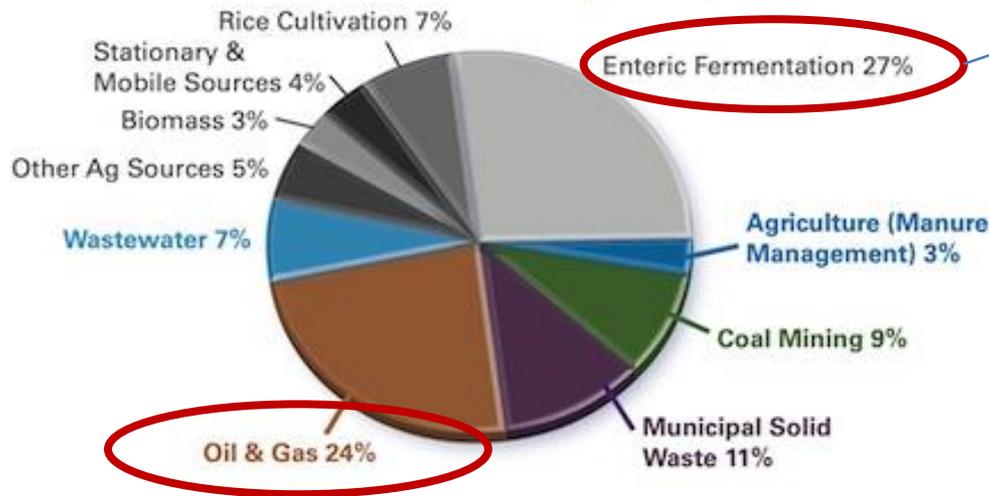


Caractéristiques particulières des Archées - méthanogènèse

→ Production annuelle estimée 100 teragrams (Tg) de CH₄ par les archées méthanogènes – rôle important pour le changement climatique

Intergovernmental Panel of Climate Change (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report, eds Core Writing Team; Pachauri RK, Meyer LA (IPCC, Geneva).

Figure 1: Estimated Global Anthropogenic Methane Emissions by Source, 2020



4 % de la biomasse

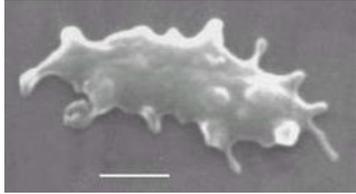
MACRO LUTTE CONTRE LES EMISSIONS DE METHANE DES BOVINS



U.S. EPA/globalmethane.org

Caractéristiques particulières des Archées - méthanogénèse

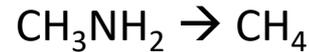
→ Découverte des archées méthylophiles dans le rumen des vaches



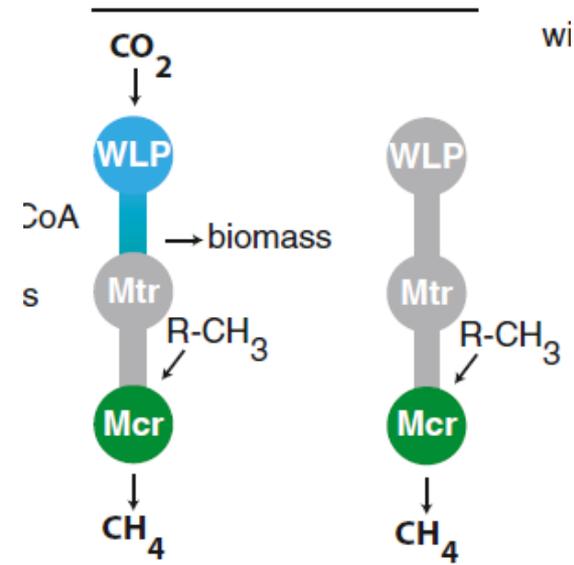
Thermoplasma acidophilum



betterave
fourragère



Methylotrophic methanogenesis

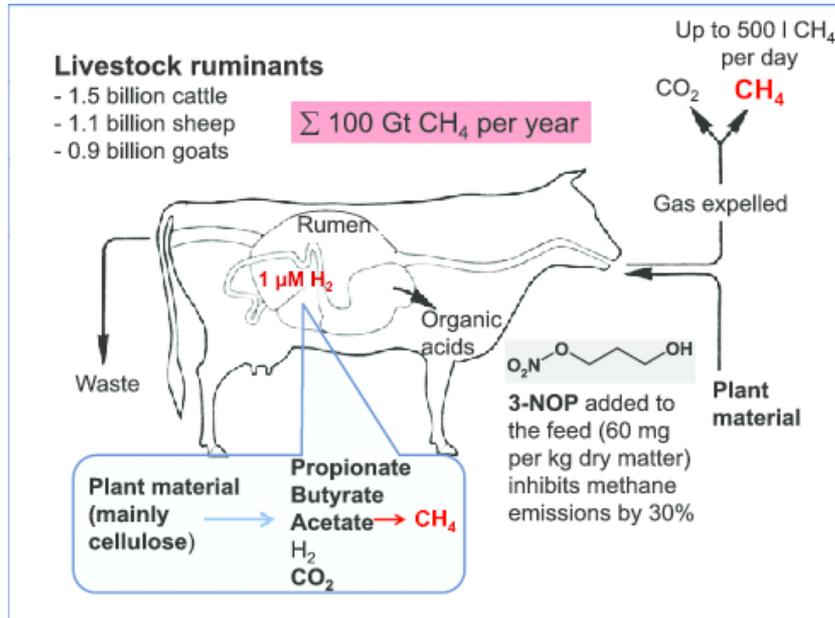


→ L'utilisation de la betterave fourragère pour l'alimentation des vaches augmente la production du méthane

Poulsen et al. 2013 Nat. Comm.

Caractéristiques particulières des Archées - méthanogénèse

→ 3-nitrooxypropanol, complément alimentaire permettant de réduire la production du méthane



Methylotrophic methanogenesis

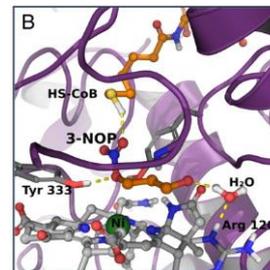
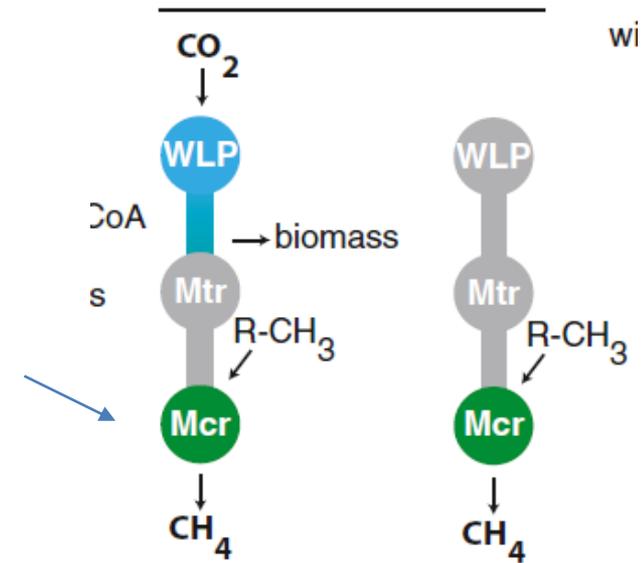


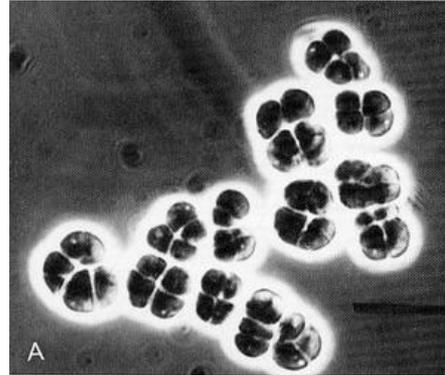
Figure 1. Feed additive (3-NOP; DSM) marketed as Boveri. Adapted from Mulholland (2020)

Duin et al. 2016 PNAS

Caractéristiques particulières des Archées - méthanogénèse



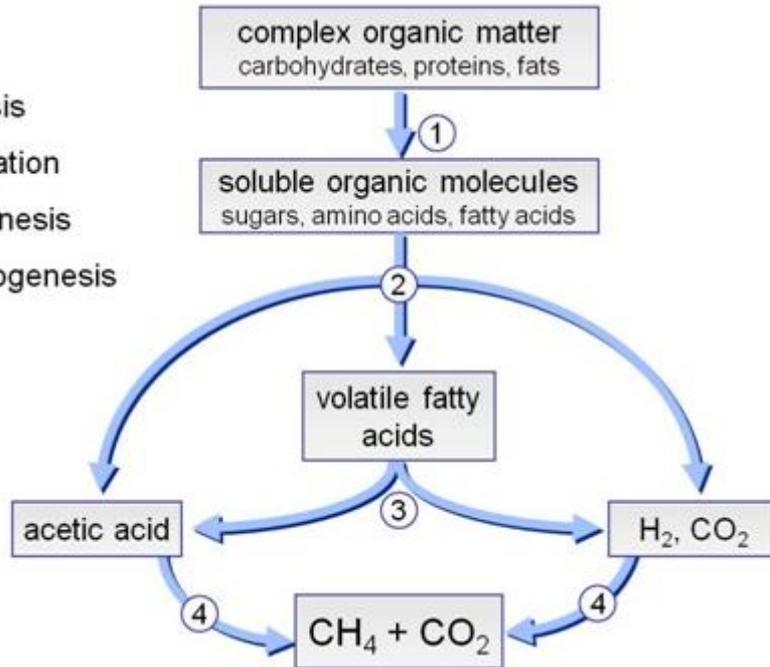
traitement des eaux usés



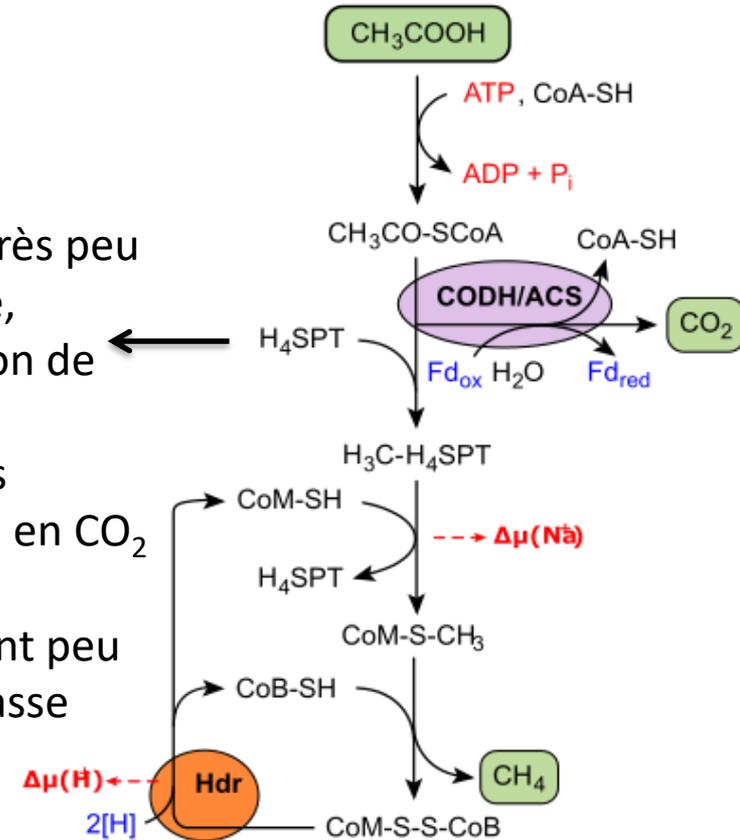
Methanosarcina barkeri

-l'organisme responsable du succès du traitement des eaux usés: but convertir la matière organique en gaz

- ① hydrolysis
- ② fermentation
- ③ acetogenesis
- ④ methanogenesis



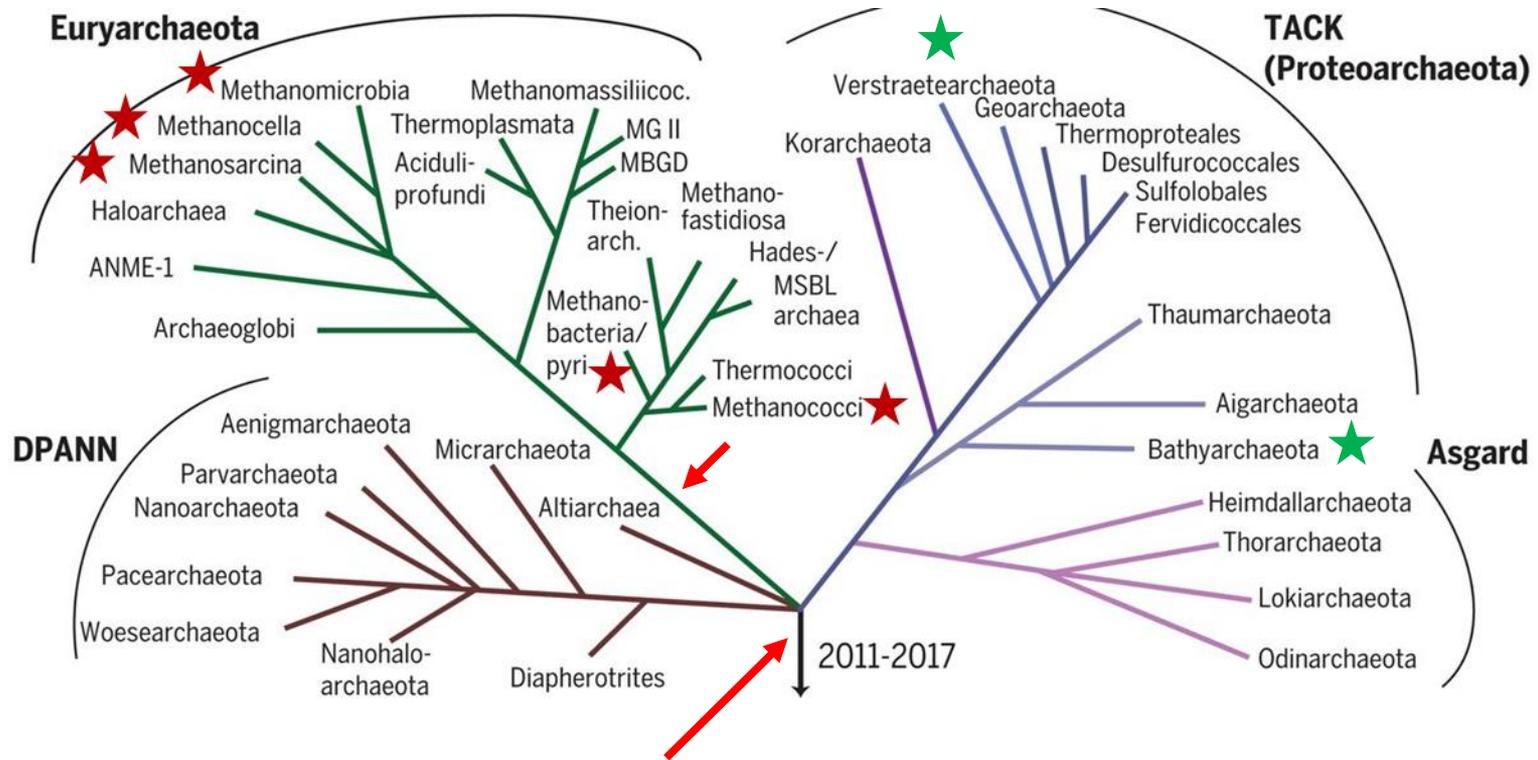
produit très peu d'énergie, conversion de grandes quantités d'acétate en CO_2 + CH_4 en produisant peu de biomasse



Caractéristiques particulières des Archées - méthanogènèse

→ Les Euryarchées ne sont pas les seuls méthanogènes...

→ Le métabolisme putatif de méthane a été identifié chez deux phylum au sein des TACK



Origine de la
méthanogènèse ?

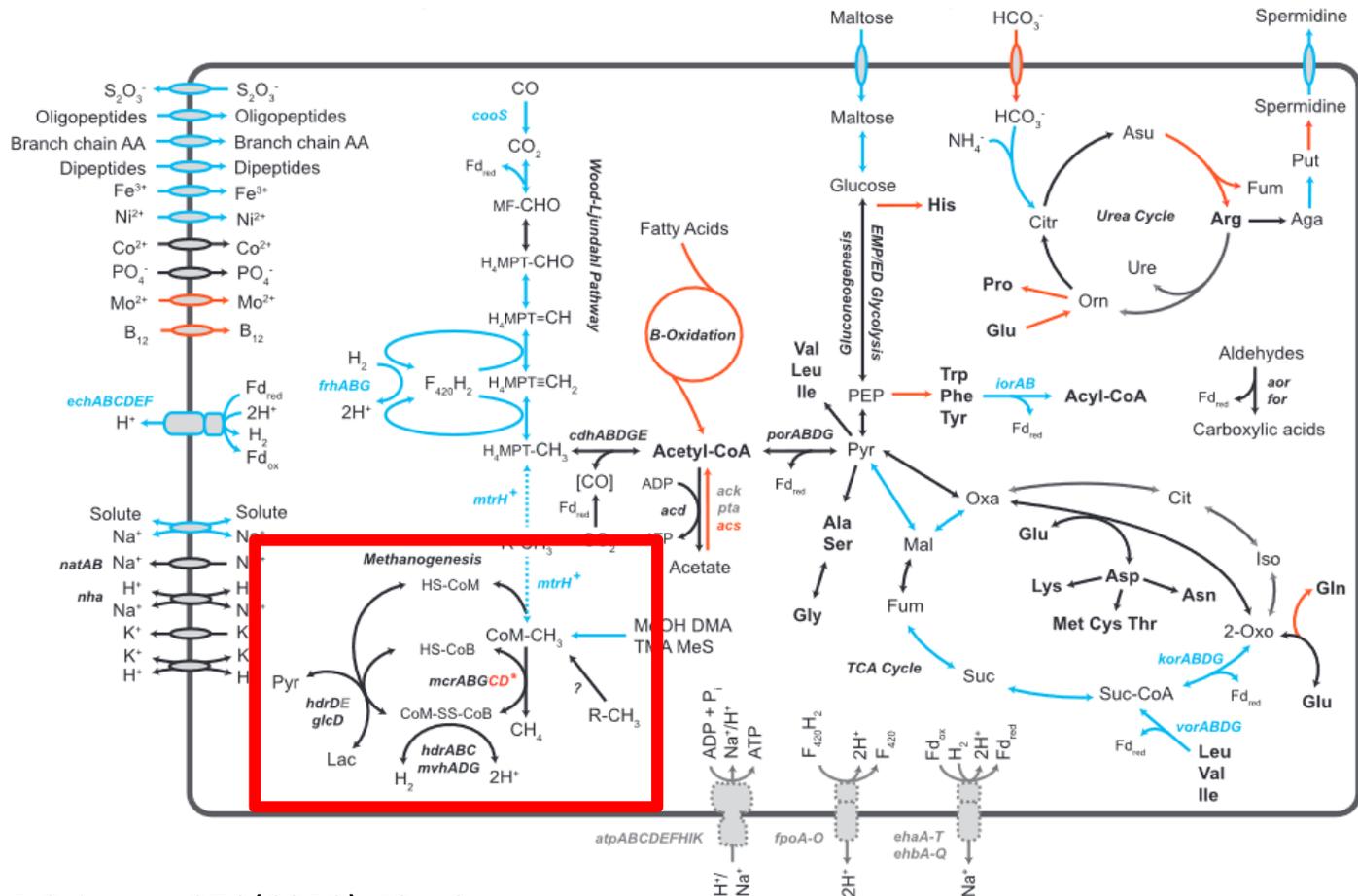
Caractéristiques particulières des Archées - méthanogénèse

MICROBIAL METABOLISM

Methane metabolism in the archaeal phylum Bathyarchaeota revealed by genome-centric metagenomics

Paul N. Evans,^{1*} Donovan H. Parks,^{1*} Grayson L. Chadwick,² Steven J. Robbins,¹ Victoria J. Orphan,² Suzanne D. Golding,² Gene W. Tyson^{1,4,†}

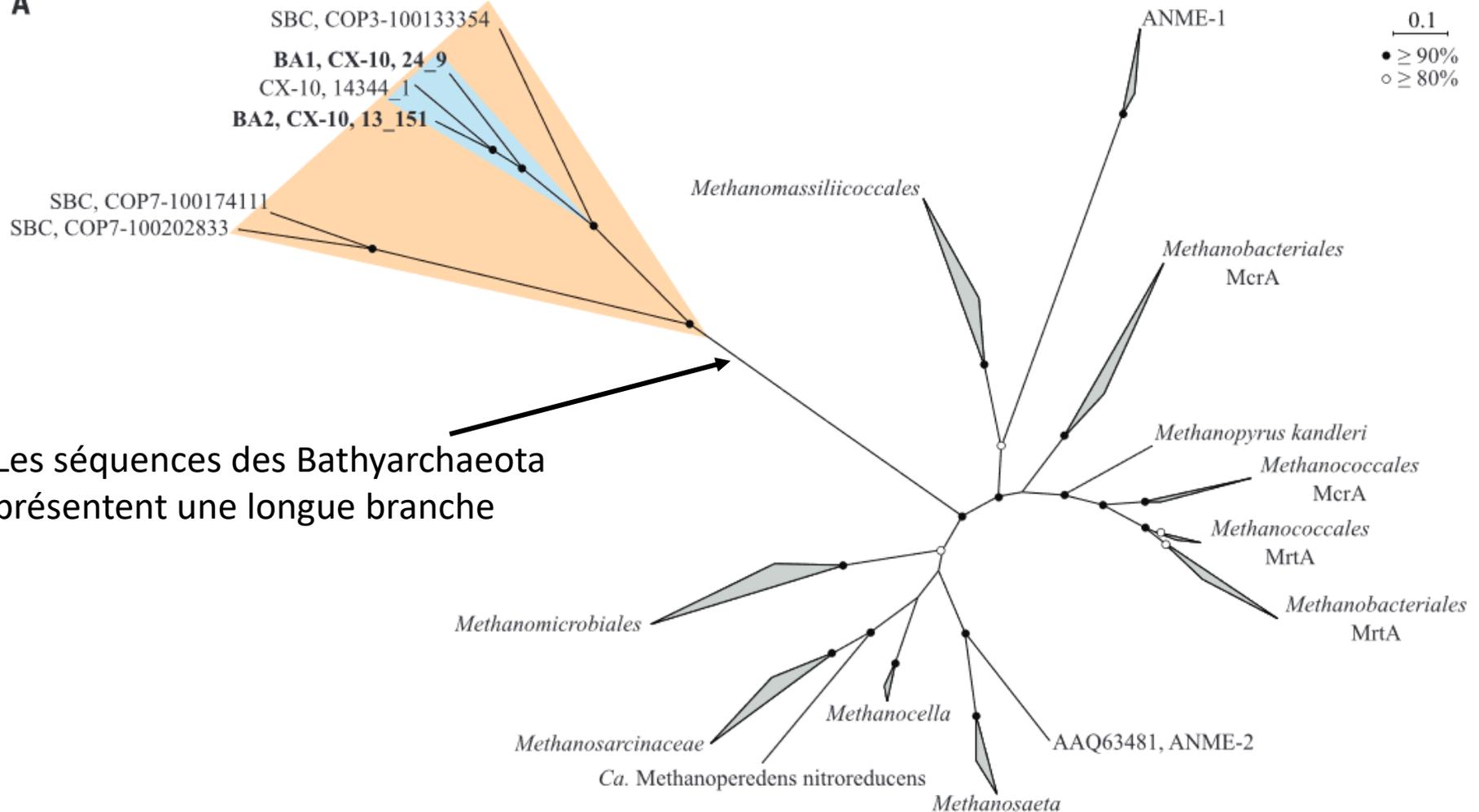
→ Une voie *méthylotrophe* a été reconstitué à partir des données métagénomiques



Caractéristiques particulières des Archées - méthanogénèse

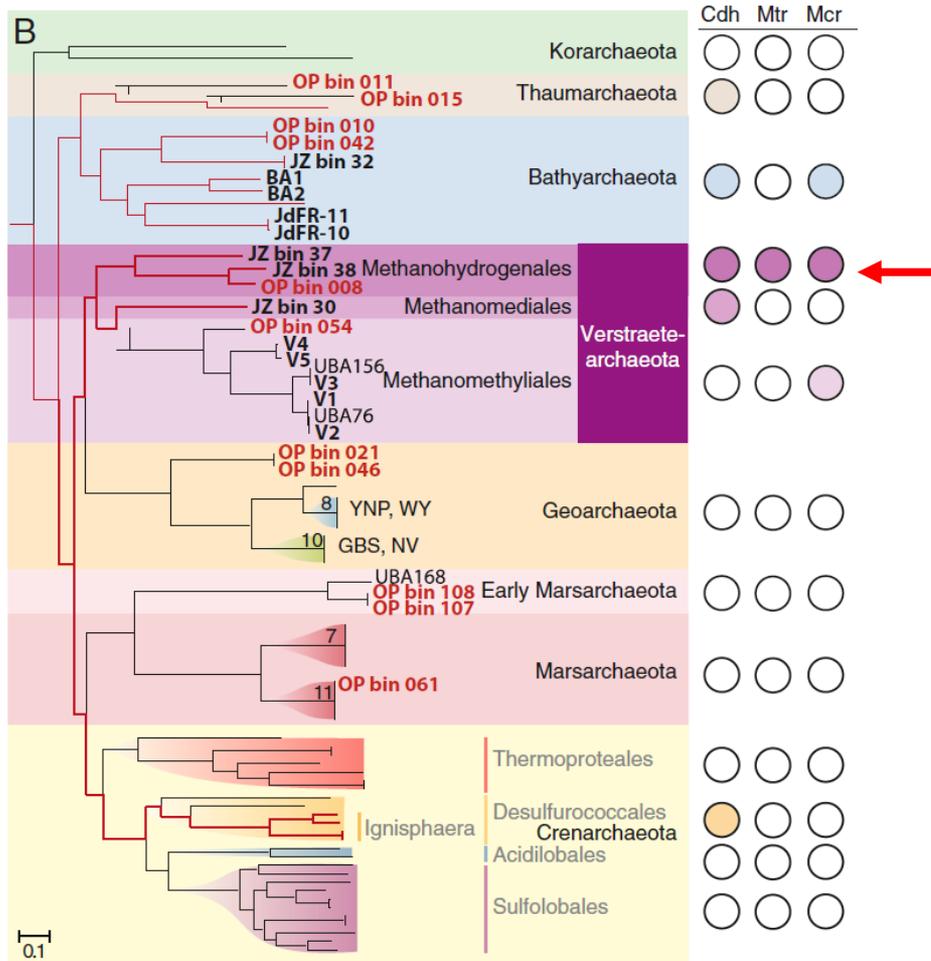
→ Arbre phylogénétique methyl-coenzyme M reductase (MCR) complex

A

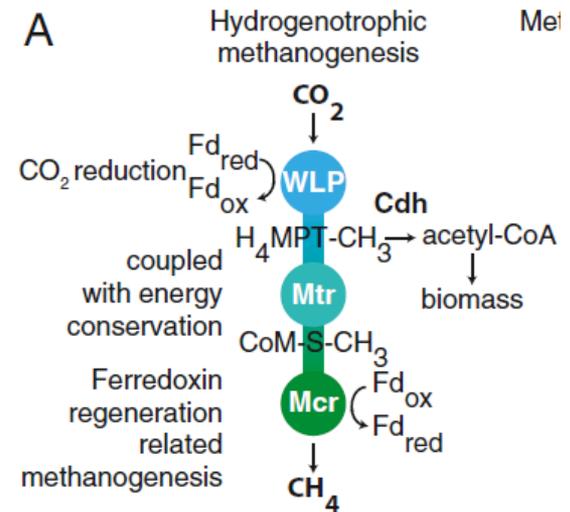


Les séquences des Bathyarchaeota présentent une longue branche

Caractéristiques particulières des Archées - méthanogénèse

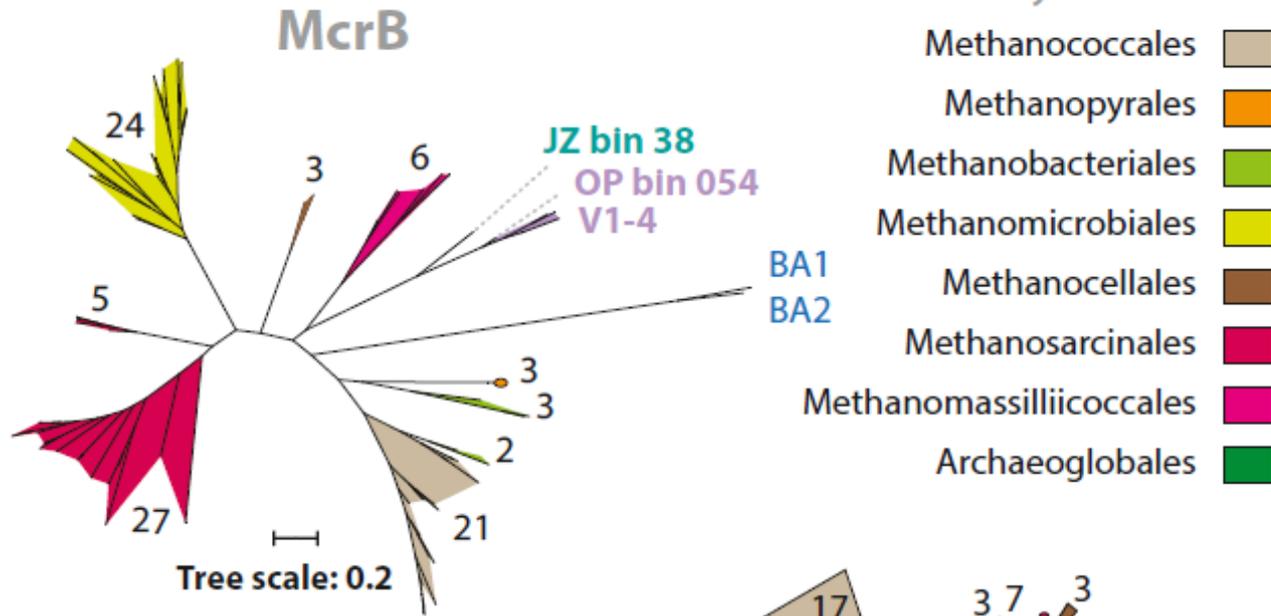


→ Identification de la voie complète au sein de trois MAGs affiliés aux Verstraetearchaeota



Caractéristiques particulières des Archées - méthanogénèse

B

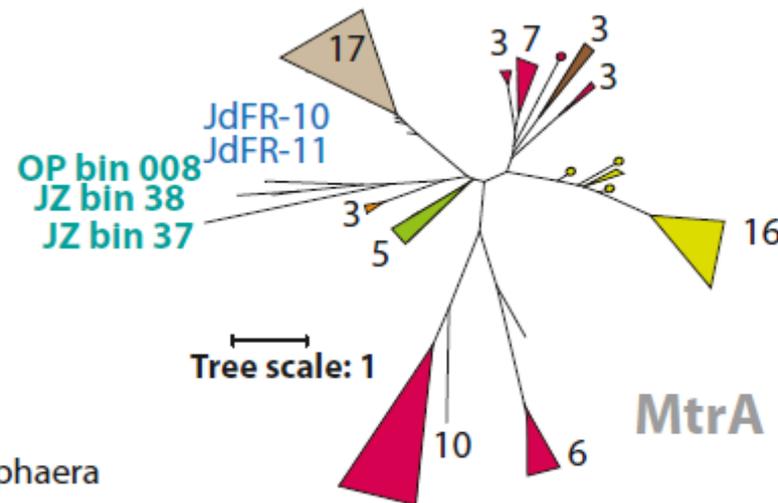


Euryarchaeota

- Methanococcales
- Methanopyrales
- Methanobacteriales
- Methanomicrobiales
- Methanocellales
- Methanosarcinales
- Methanomassilliicoccales
- Archaeoglobales

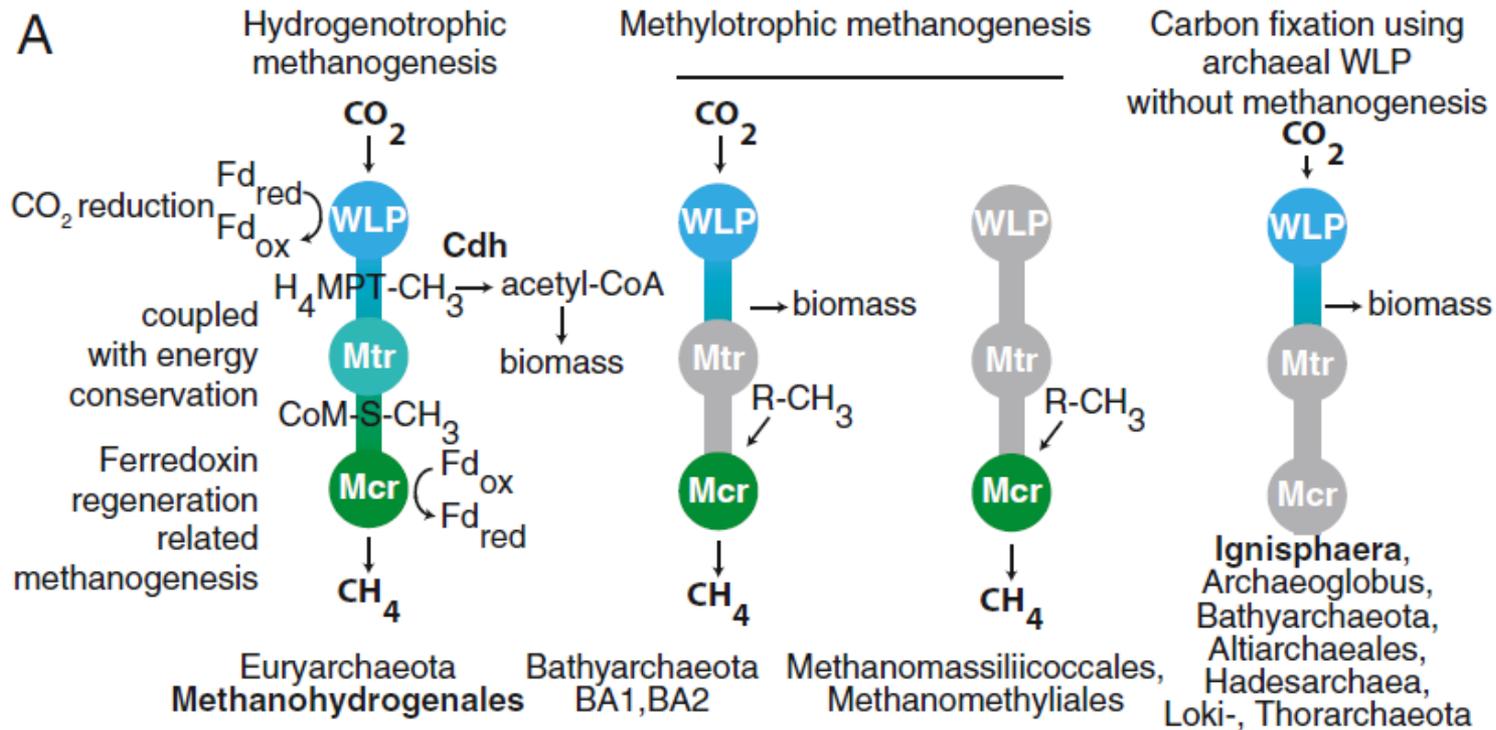
TACK

- Methanohydrogenales
- Methanomediales
- Methanomethyliales
- Bathyarchaeota
- Desulfurococcales - Ignisphaera



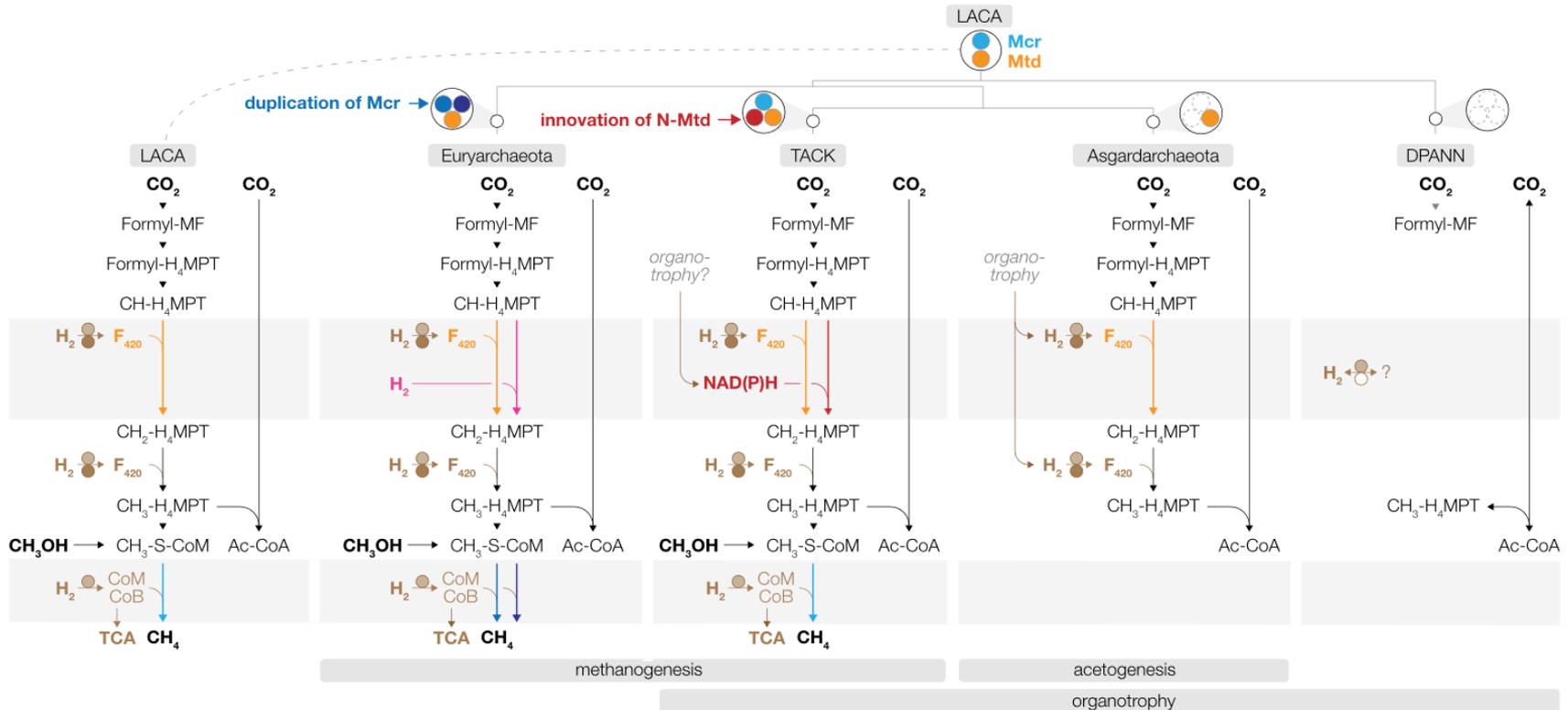
→ MtrA de TACK forment un clade monophylétique – l'ancêtre des TACK codait pour MtrA

Caractéristiques particulières des Archées - méthanogénèse



Caractéristiques particulières des Archées - méthanogénèse

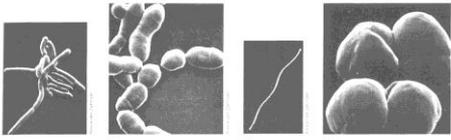
→ Role clé de la méthanogénèse dans l'origine et l'évolution des Archées?



Caractéristiques particulières des Archées - extrêmophiles

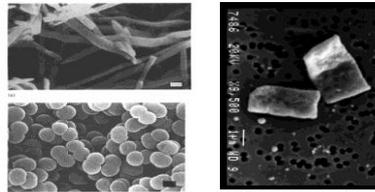
→ Les premières Archées isolés sont des extrêmophiles

Méthanogènes (0 - 110°C)



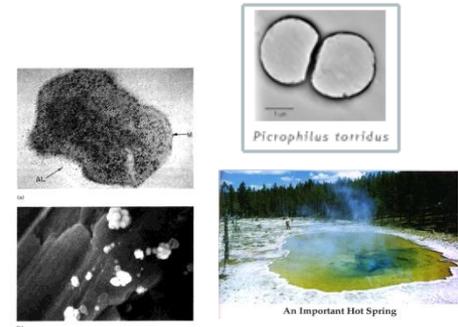
anaérobies

Halophiles (30-50°C)



aérobies
photosynthétiques

Thermoacidophiles (50-90°C, pH 0-3)



aérobies/anaérobies

Caractéristiques particulières des Archées - extrêmophiles

→ Les extrêmophiles sont majoritairement des microbes

Psychrophiles | *Temperature <15°C*

Thermophiles | *Temperature >60°C (>80°C for hyperthermophiles)*

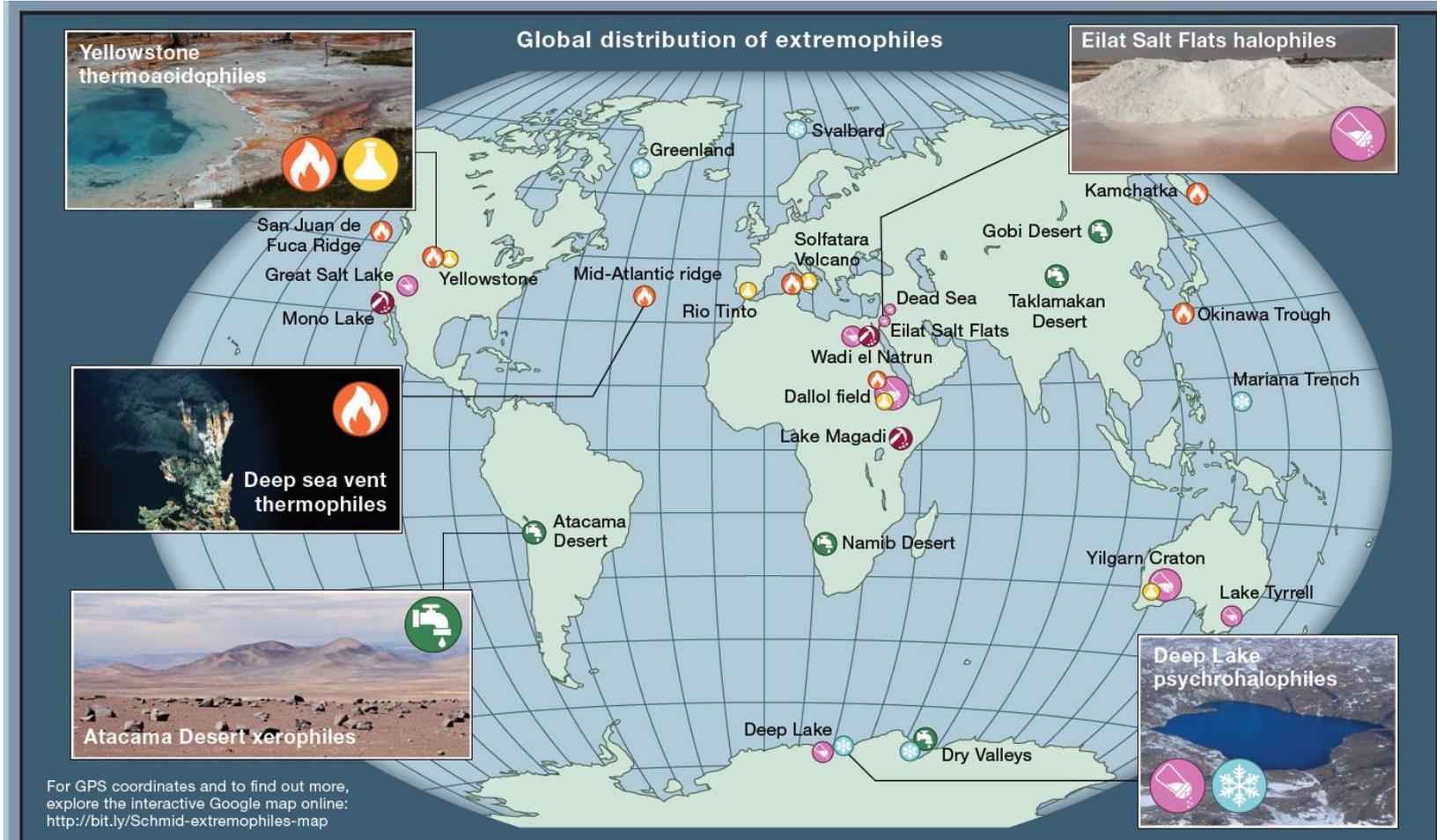
Acidophiles | *Acidic pH <3*

Alkaliphiles | *Alkaline pH >9*

Halophiles | *NaCl >0.5 M (or very high sugar for osmophiles)*

Xerophiles | *Desiccation, water activity (a_w) <0.8*

Caractéristiques particulières des Archées - extrêmophiles



DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2020.01.018>

Caractéristiques particulières des Archées - extrêmophiles

→ **Comment la vie est apparue sur la Terre ?**

→ Astrobiologie : recherches de la vie Extraterrestre (les paramètres physico-chimiques limitants pour le maintien de la vie)

→ Applications biotechnologiques

Cheminées hydrothermales :

- Environnement fortement réducteur
- Synthèse abiotique des composés carbonés
- Catalyse des réactions de polymérisation
- Environnement protégé d'impact de météorites



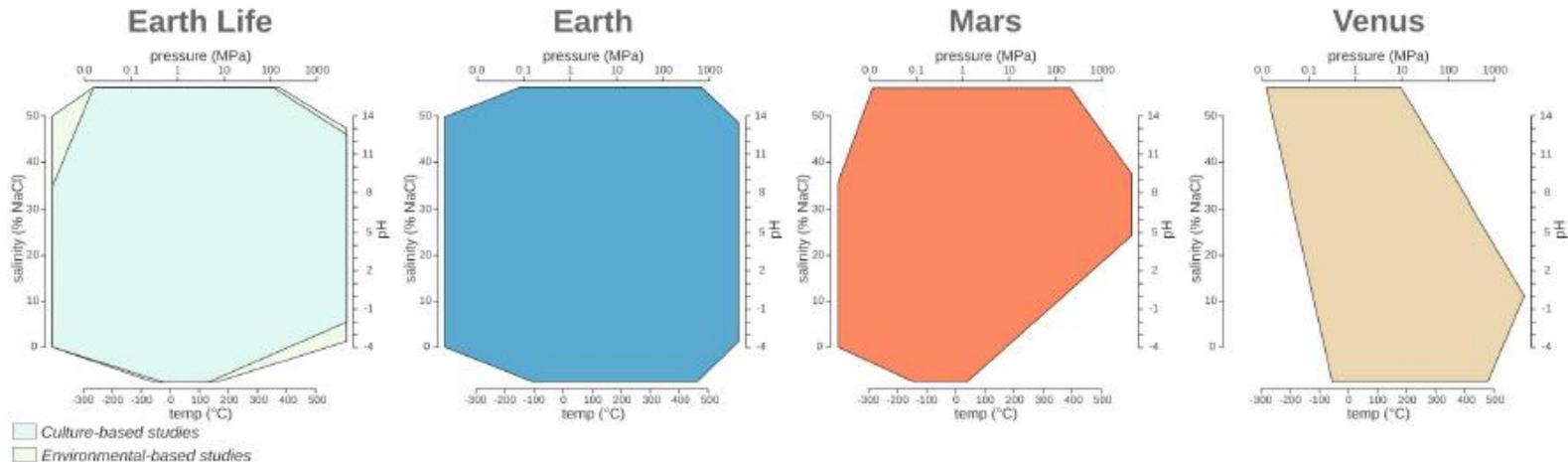
Dick GJ, 2019, Nat Rev Microbiol. 17:271-283.

Caractéristiques particulières des Archées - extrêmophiles

→ Comment la vie est apparue sur la Terre ?

→ **Astrobiologie : recherches de la vie Extraterrestre (les paramètres physico-chimiques limitants pour le maintien de la vie)**

→ Applications biotechnologiques



Les limites de température, pression, salinité et pH

Merino et al., 2019, Front Microbiol. 15;10:780.

Caractéristiques particulières des Archées - extrêmophiles

→ Comment la vie est apparue sur la Terre ?

→ Astrobiologie : recherches de la vie Extraterrestre (les paramètres physico-chimiques limitants pour le maintien de la vie)

→ Applications biotechnologiques

The Polymerase Chain Reaction (PCR)

- First described in 1985, Nobel Prize for Kary Mullis in 1993
- The technique was made possible by the discovery of *Taq* polymerase, the DNA polymerase that is used by the bacterium *Thermus aquaticus* that was discovered in hot springs



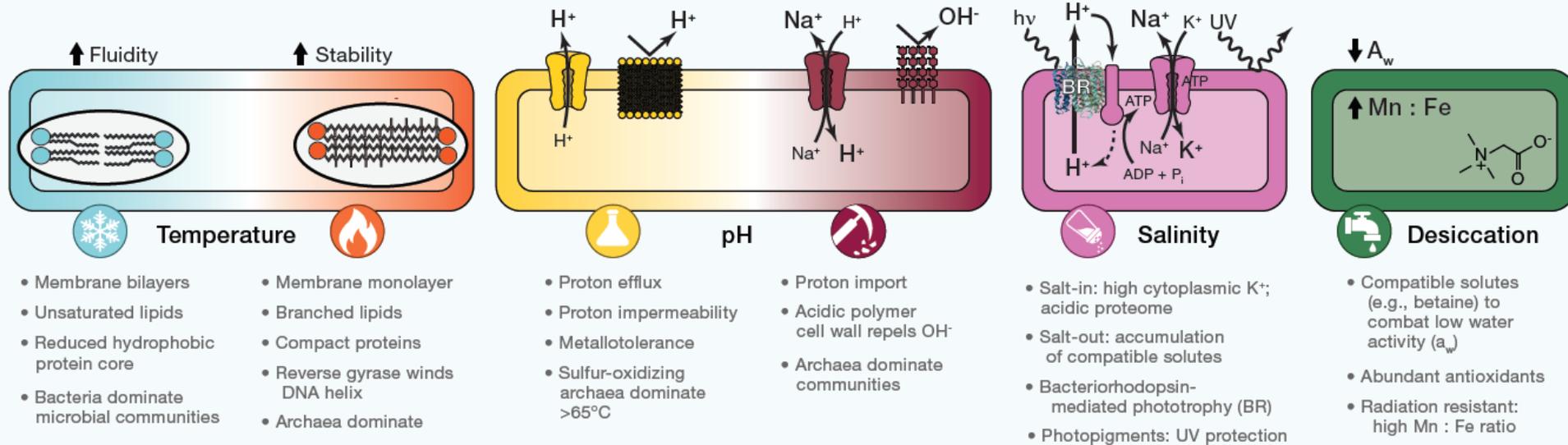
Table 1 Biotechnological applications of major groups of extremophiles

Extremophilic organisms	Enzymes and organic compounds	Applications and products
Thermophiles and hyperthermophiles (T_{opt} 55–105 °C)	Amylases	Glucose, fructose for sweeteners
	Xylanases	Paper bleaching
	Proteases	Amino acid production from keratins, food processing, baking, brewing, detergents
Psychrophiles and psychrotolerants (T_{opt} < 20 °C)	DNA polymerases	Genetic engineering
	Neutral proteases	Cheese maturation, dairy production
	Proteases	Polymer-degrading additives in detergents
	Amylases	
	Lipases	
Acidophiles (pH_{opt} < 3)	Polyunsaturated fatty acids	Pharmaceuticals
	Dehydrogenases	Biosensors
Alkaliphiles (pH_{opt} > 8.5)	Sulfur oxidation	Desulfurization of coal, biomining of ores
	Cellulases	Polymer-degrading additives in detergents
Halophiles (growing with 3–20% salt)	Proteases	
	Amylases	
	Lipases	
	Cyclodextrines	Stabilization of volatile substances
	Antibiotics	Pharmaceuticals
	Carotene	Food coloring
	Glycerol	Pharmaceuticals
	Compatible solutes	Pharmaceuticals
	Membranes	Surfactants for pharmaceuticals

Canganella & Wiegell, 2011 98(4):253-79.

Caractéristiques particulières des Archées - extrêmophiles

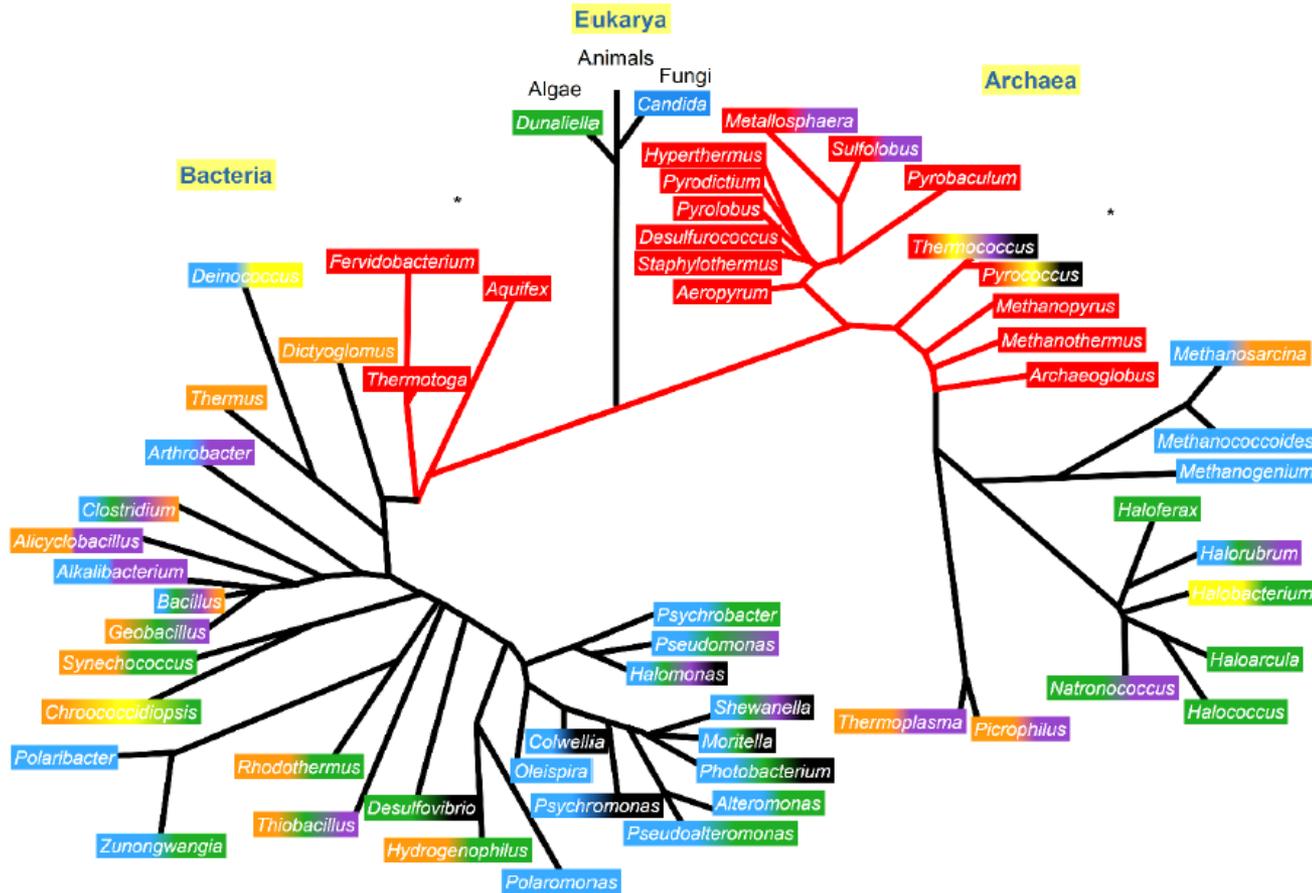
Molecular and cellular adaptations



Les archées dominent

Caractéristiques particulières des Archées - extrêmophiles

→ La majorité des hyperthermophiles sont des Archées

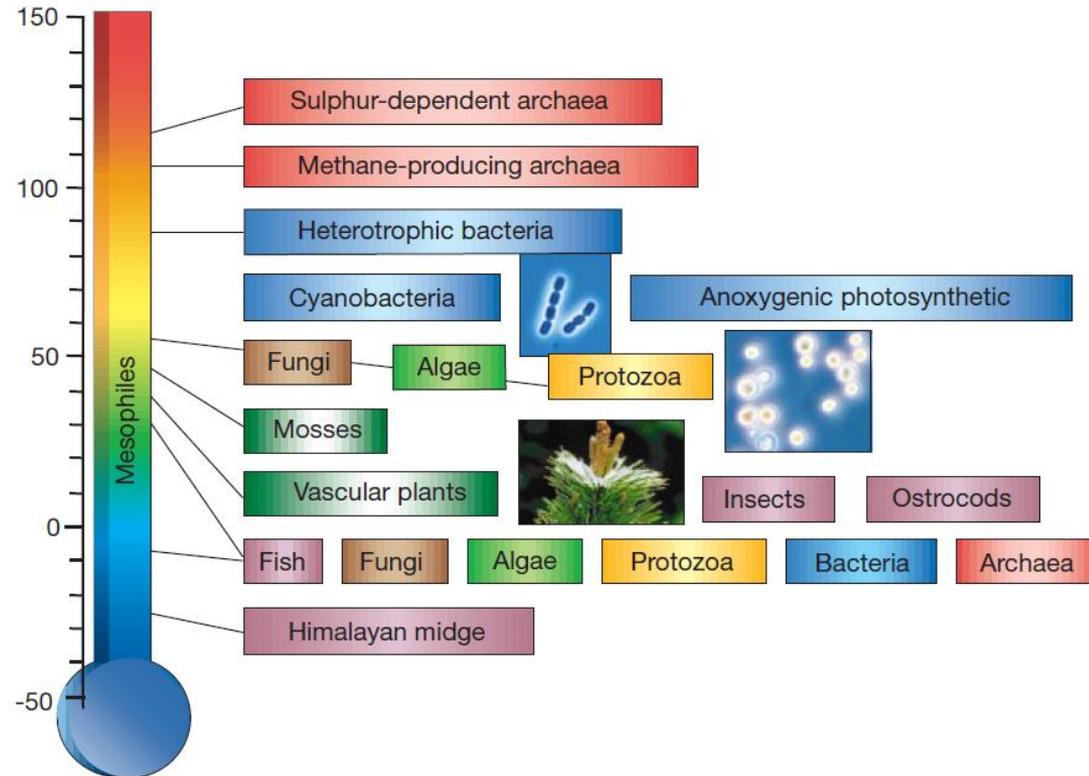


- Hyperthermophiles
- Psychrophiles
- Halophiles
- Radiation resistant
- Thermophiles
- Piezophiles
- pH extremes

Dalmaso et al., 2015, Mar. Drugs, 13, 1925-1965

Caractéristiques particulières des Archées - extrêmophiles

→ Température optimale de croissance > 80°C



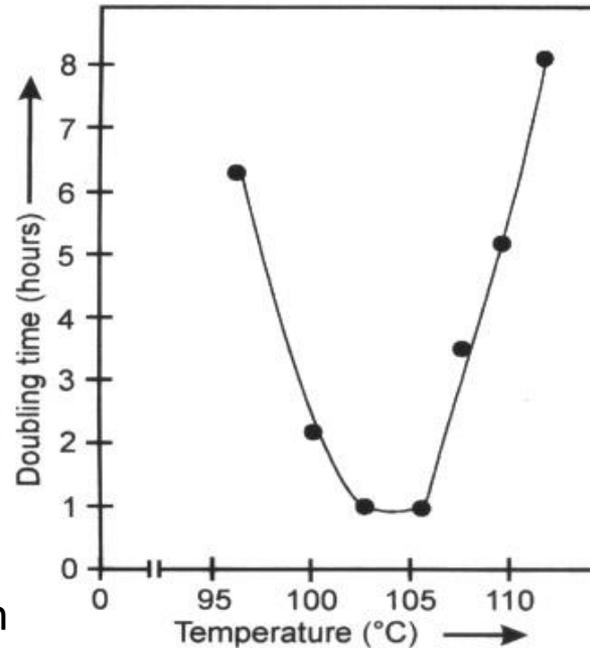
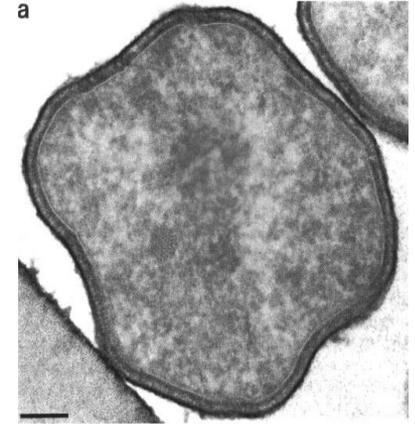
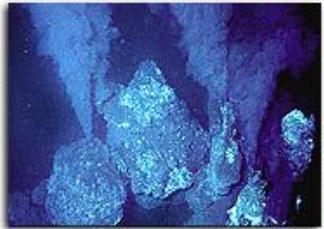
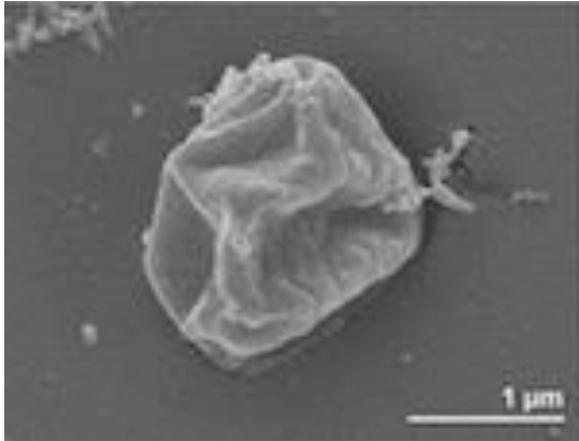
Rothschild & Mancinelli, 2001, Nature

Caractéristiques particulières des Archées - extrêmophiles

Elisabeth Blöchl · Reinhard Rachel · Siegfried Burggraf
Doris Hafenbradl · Holger W. Jannasch · Karl O. Stetter

1997 *Pyrolobus* (the "fire lobe")

***Pyrolobus fumarii*, gen. and sp. nov., represents a novel group of archaea, extending the upper temperature limit for life to 113°C**



-survit 1h
d'autoclavage
(120°C)!

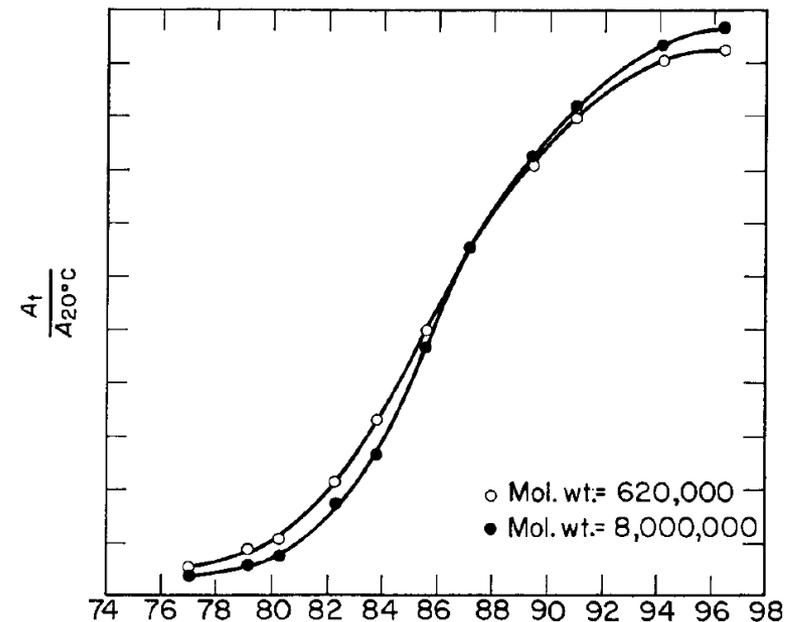
- isolé à partir d'un fumeur noir à 3650 m
de profondeur!

Caractéristiques particulières des Archées - extrêmophiles

Table 1. Metabolite and coenzyme stabilities.

Metabolite/coenzyme	% remaining after	
	1 h/95 °C	3 h/105 °C
NAD	<5	n.d.
FAD	100	85
FMN	75	65
Pyridoxal phosphate	40	0
Glucose	100	100
Glucose-6-phosphate	100	70
Glucose-1,6-diphosphate	90	50
Gluconate	100	100
6-Phosphogluconate	100	90
Glycerate	100	100
3-Phosphoglycerate	100	100
Acetate	100	100
Acetyl phosphate	<10	n.d.
CoASH	100	45
Acetyl CoA	100	75
ATP	40	0
ADP	50	0
AMP	95	60

Solutions (10 mM) in distilled water containing 1 mM KI were heated in sealed glass tubes, and degradation assessed by changes to the electrospray mass spectrum [5].



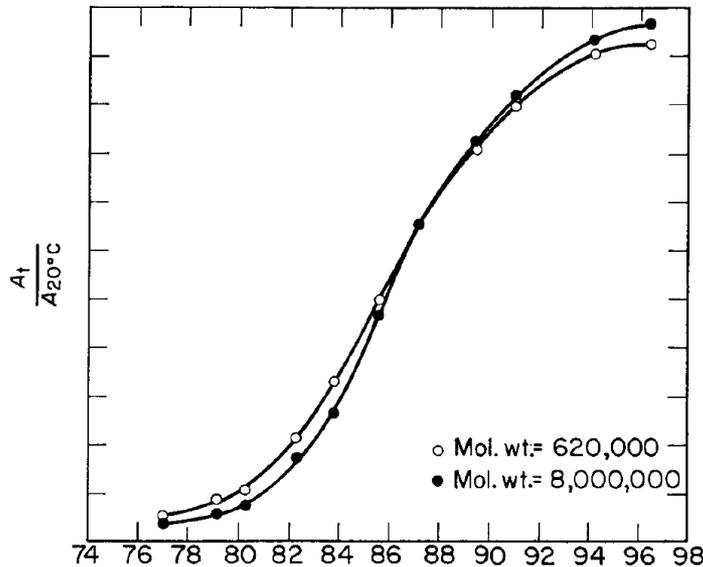
→ *In vitro* l'ADN est totalement dénaturé à 95°C

Daniel & Cowan, 2000, Cell. Mol. Life Sci. 57:250–264

Marmur and Doty, 1962, J.Mol.Biol

Caractéristiques particulières des Archées - extrêmophiles

→ Les hyperthermophiles ont acquis au cours de l'évolution des mécanismes adaptatifs permettant de protéger le contenu cellulaire de la thermo -
dénaturation/dégradation



→ High intracellular salt concentration
(molar!)

→ Polycationic polyamines

→ High G-C % (ARNr)

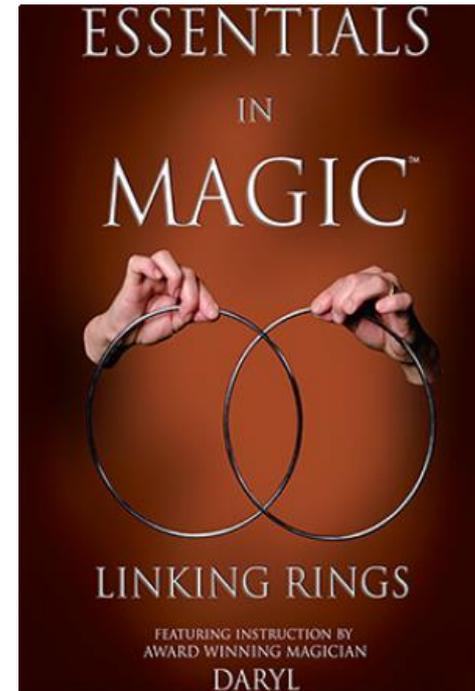
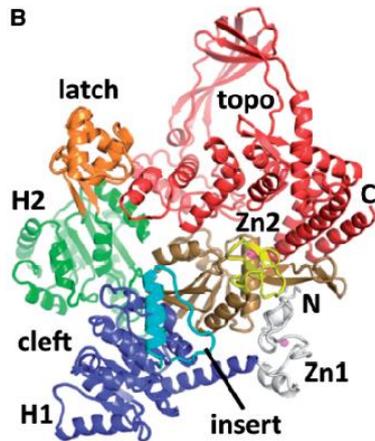
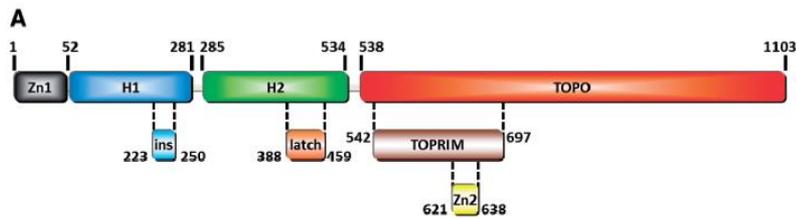
→ **DNA supercoiling** and association with
cationic proteins (ex. histones)

Marmur and Doty, 1962, J.Mol.Biol

Daniel and Cowan, 2000, Cell. Mol. Life Sci

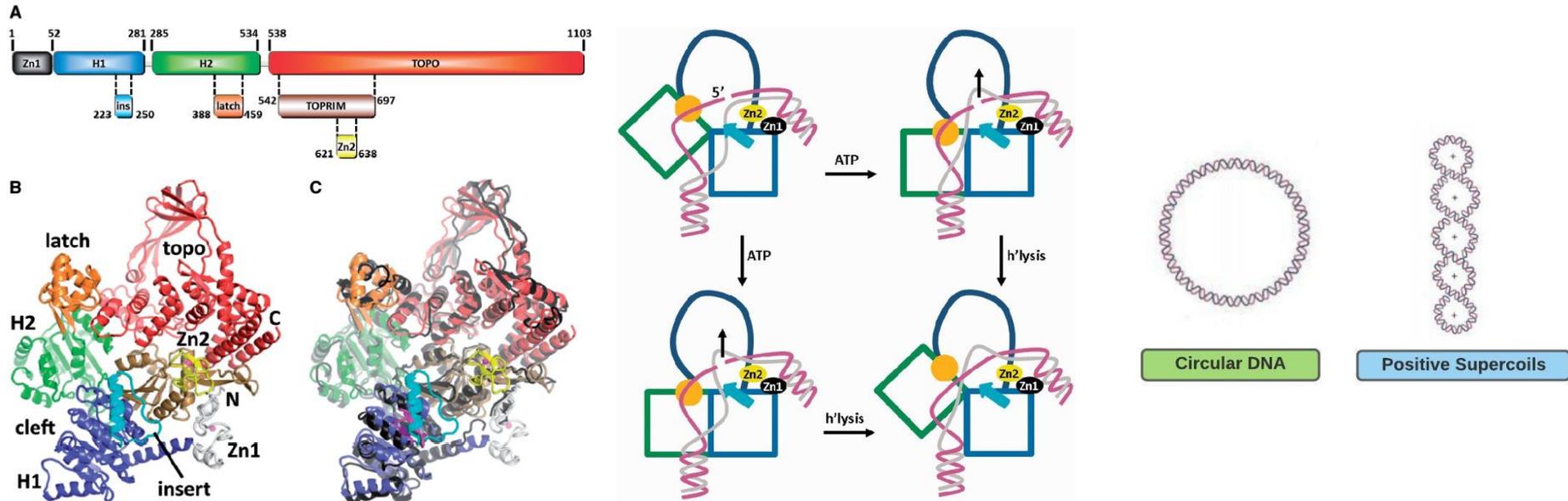
Caractéristiques particulières des Archées - extrêmophiles

→ La reverse gyrase est la seule protéine trouvée de manière ubiquitaire chez les thermophiles mais absente chez les mésophiles



Caractéristiques particulières des Archées - extrêmophiles

→ La reverse gyrase est la seule protéine trouvée de manière ubiquitaire chez les thermophiles mais absente chez les mésophiles



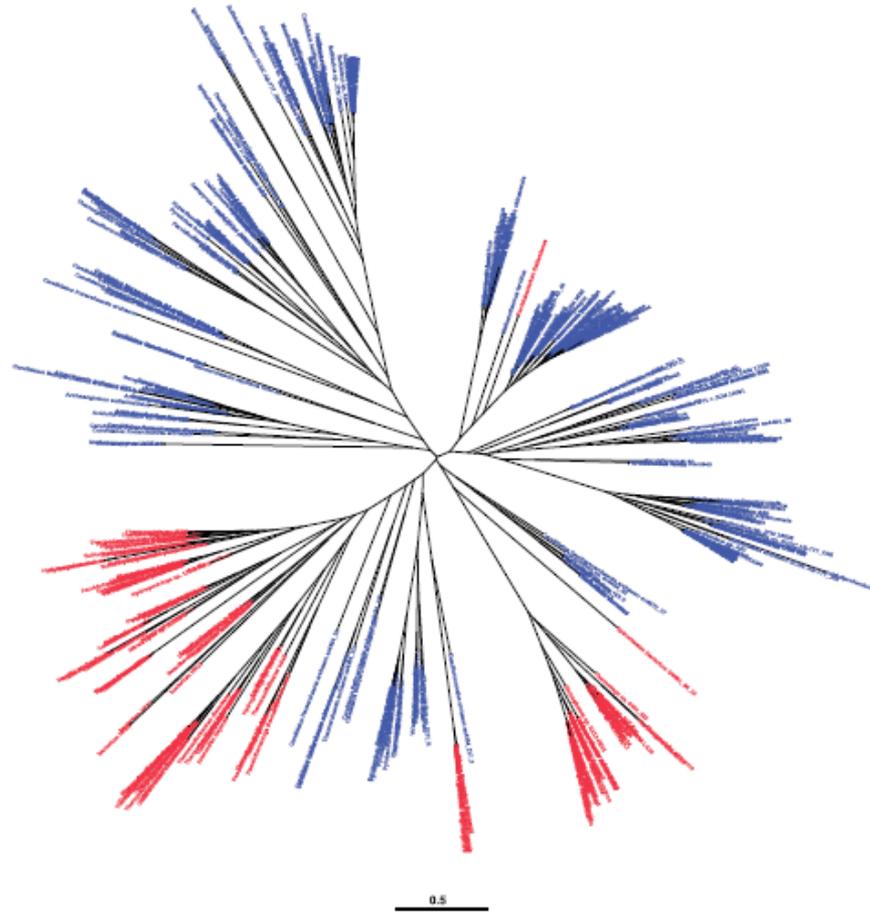
→ L'ADN surenroulé positivement est plus résistant à la dénaturation thermique

Rudolph et al., 2013, Nucleic Acids Res. 41(2):1058-70.

Caractéristiques particulières des Archées - extrêmophiles

→ La présence de la reverse gyrase permet de déduire la nature thermophile d'un organisme – y compris des organismes ancestraux (via la phylogénie moléculaire)

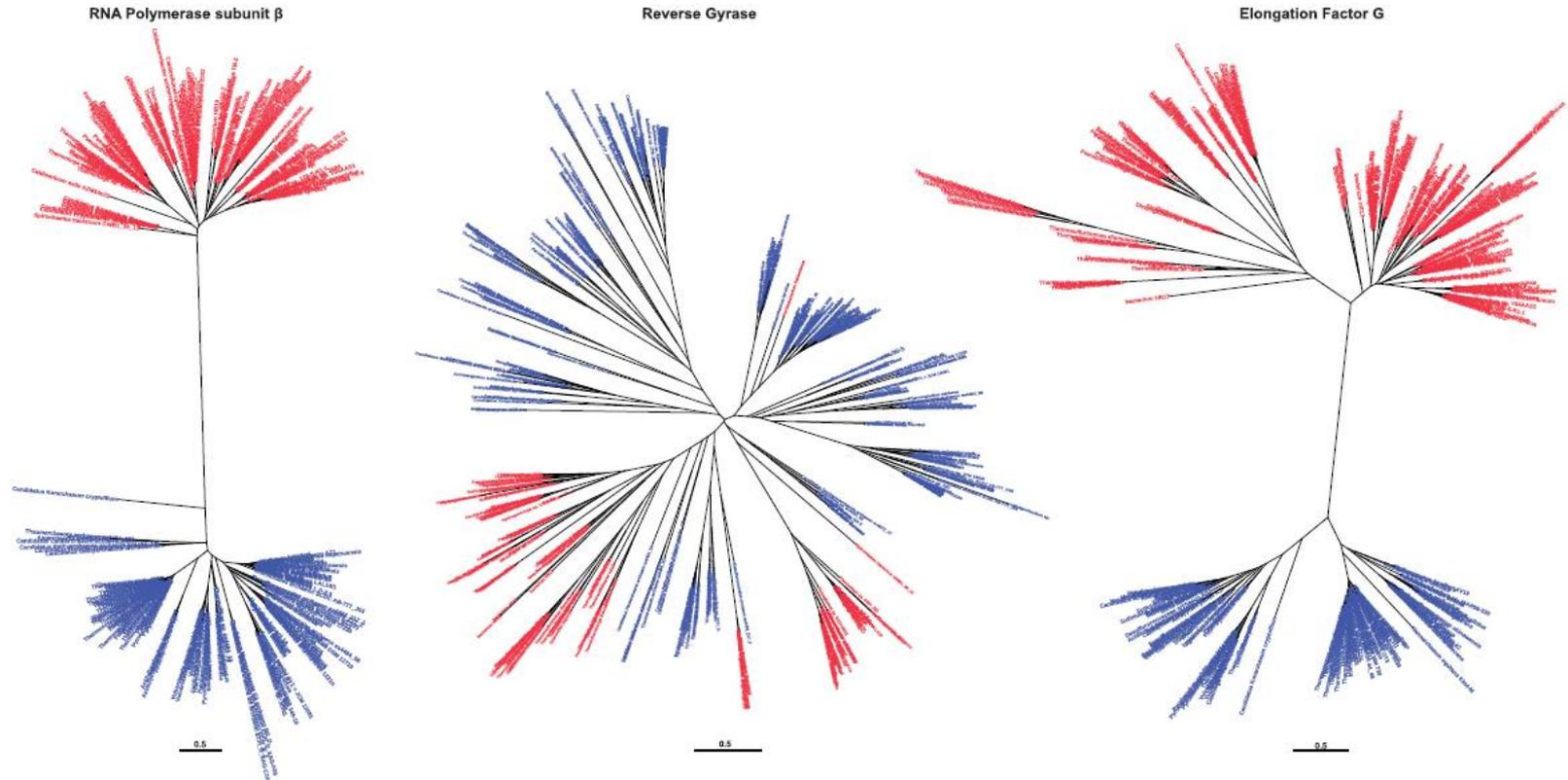
Bactéries
Archées



Catchpole & Forterre, 2019, Mol Biol Evol. 2019 36(12):2737-2747.

Caractéristiques particulières des Archées - extrêmophiles

Bactéries
Archées



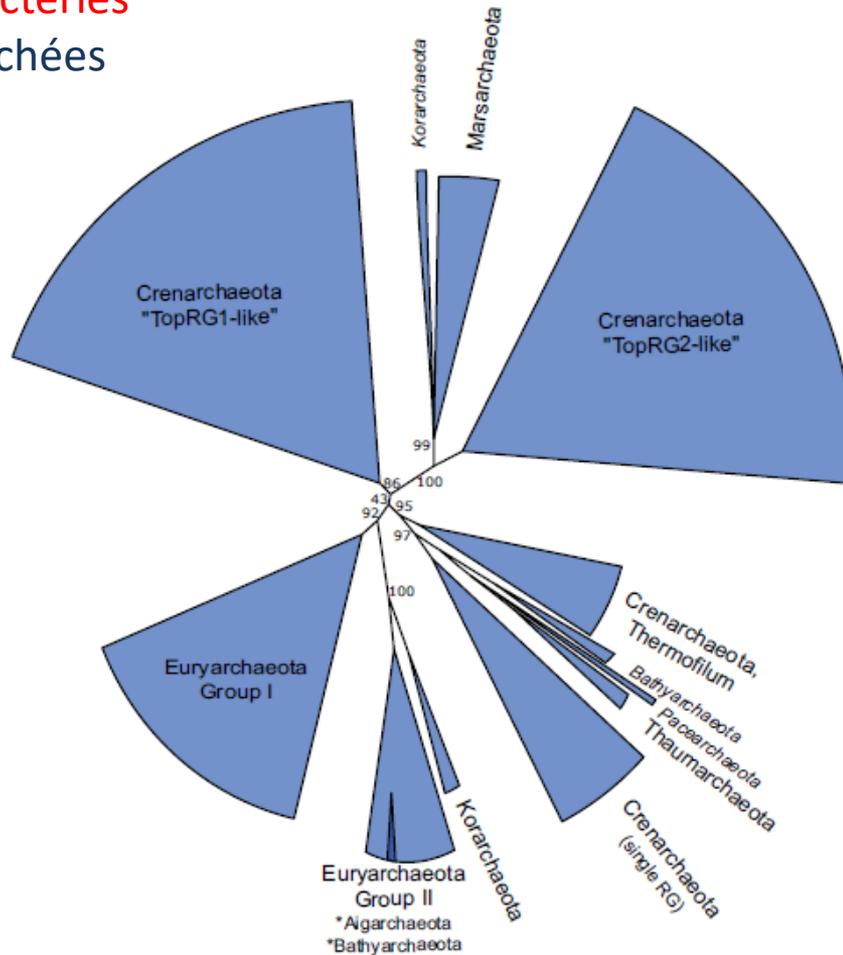
→ La phylogénie de la RG ne montre pas des longues branches typiques des protéines universelles (présentes chez LUCA)

Catchpole & Forterre, 2019, Mol Biol Evol. 2019 36(12):2737-2747.

Caractéristiques particulières des Archées - extrêmophiles

Bactéries

Archées



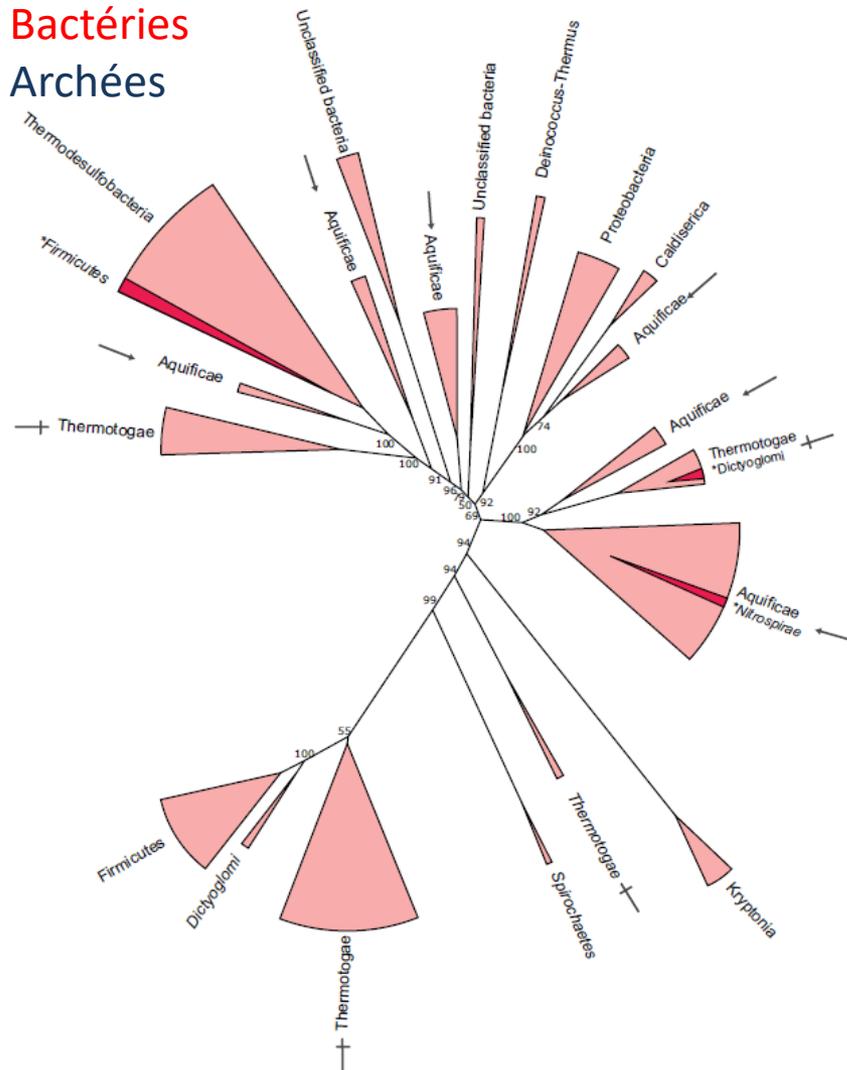
→ L'arbre obtenu uniquement avec les séquences d'Archées est congruent avec la phylogénie établie des Archées

→ La RG est apparue avant la diversification des Archées et a été transmise verticalement dans les différentes lignées

Caractéristiques particulières des Archées - extrêmophiles

Bactéries

Archées



→ L'arbre construit à partir des séquences bactériennes montre que Aquificae et Thermotogales sont paraphylétiques

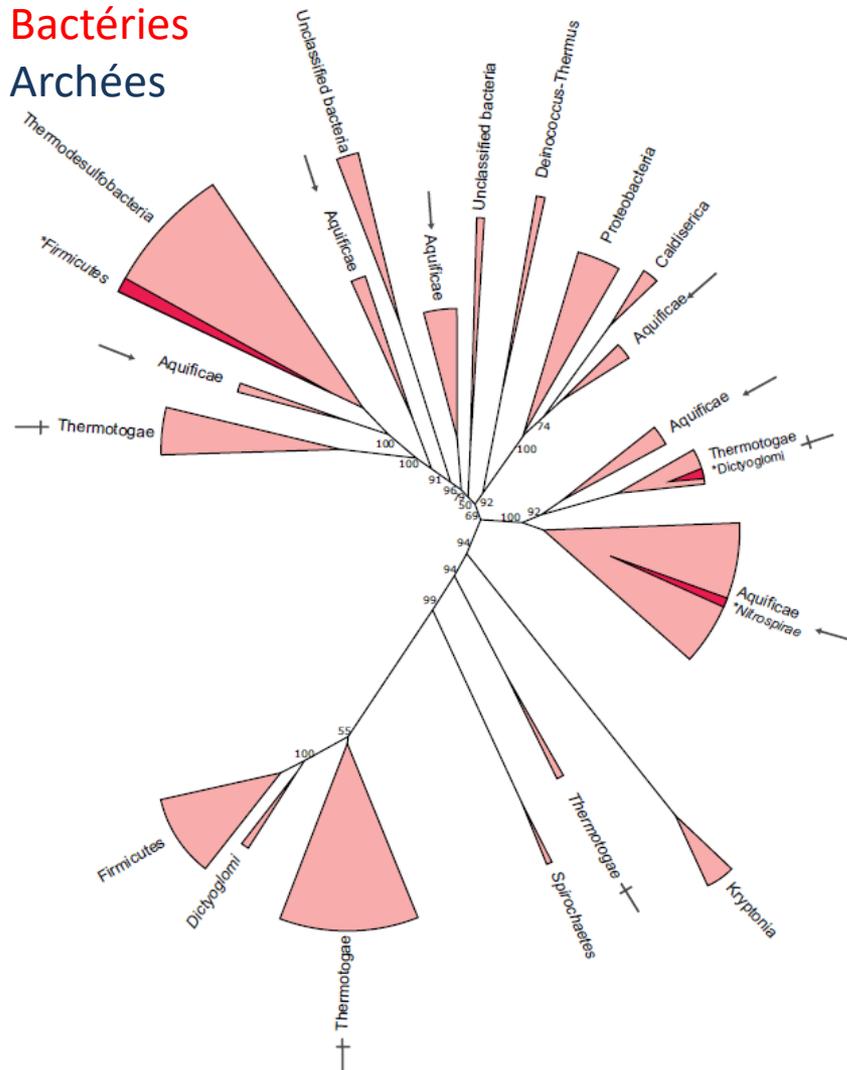
Que cela signifie ?

Catchpole & Forterre, 2019, Mol Biol Evol. 2019 36(12):2737-2747.

Caractéristiques particulières des Archées - extrêmophiles

Bactéries

Archées

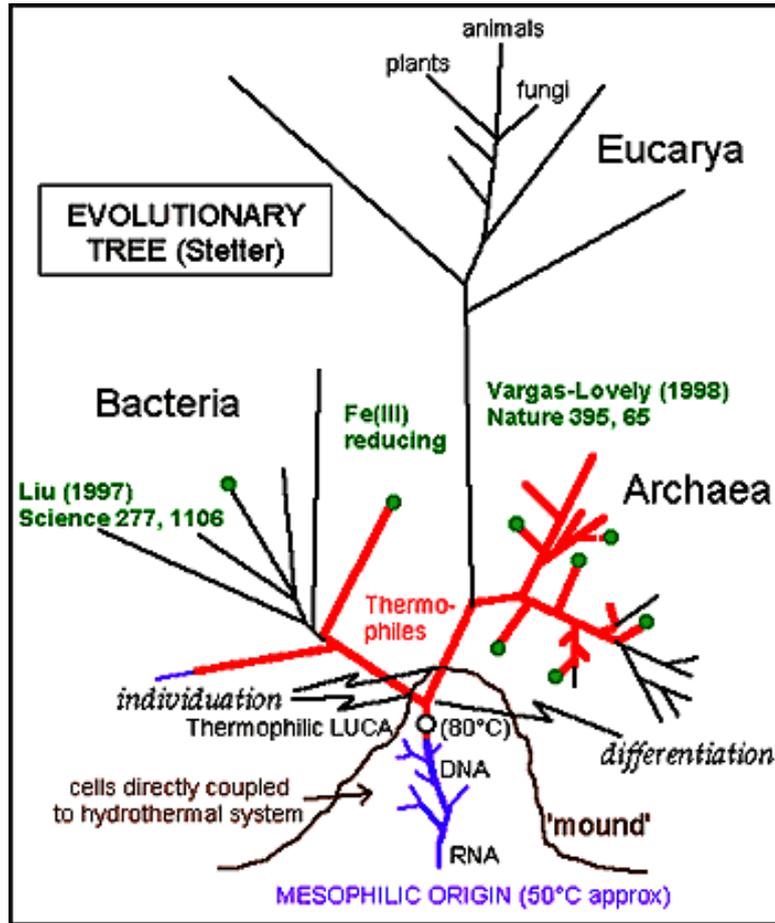


→ Acquisition de la RG après la divergence des Bactéries accompagné par les HGT

Catchpole & Forterre, 2019, Mol Biol Evol. 2019 36(12):2737-2747.

Caractéristiques particulières des Archées - extrêmophiles

→ Incidence sur la compréhension de la nature du LUCA :



→ LUCA et le dernier ancêtre commun des Bactéries n'était pas des thermophiles

→ Le dernier ancêtre commun des Archées était thermophile

→ Acquisition de la RG par les Bactéries via HGT à partir des Archées

Catchpole & Forterre, 2019, Mol Biol Evol. 2019 36(12):2737-2747.

Caractéristiques particulières des Archées - absence des pathogènes

Pathogenic archaea: do they exist?

Ricardo Cavicchioli,^{1*} Paul M.G. Curmi,^{2,3} Neil Saunders,¹
and Torsten Thomas^{1,4}

“It would be a brave person to stake their career on the existence of an archaeal pathogen, however, there is good reason to expect that such pathogens will be found.”

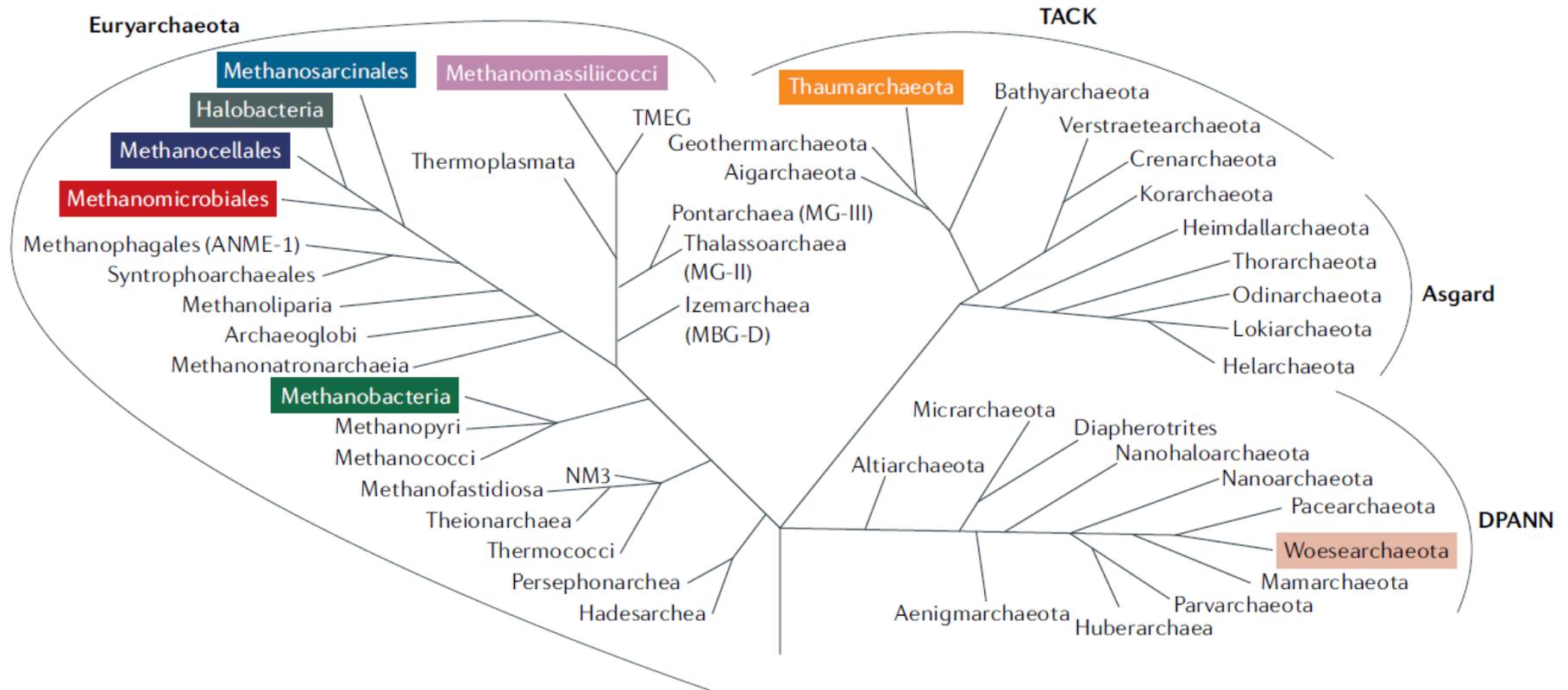
Les Archées font partie du microbiote naturel des animaux – rôle pour la santé et fitness des organismes hôtes ?

Le archaeome humain commence seulement à être étudié.

Cavicchioli R et al., 2003 Bioessays, 25(11):1119-28.

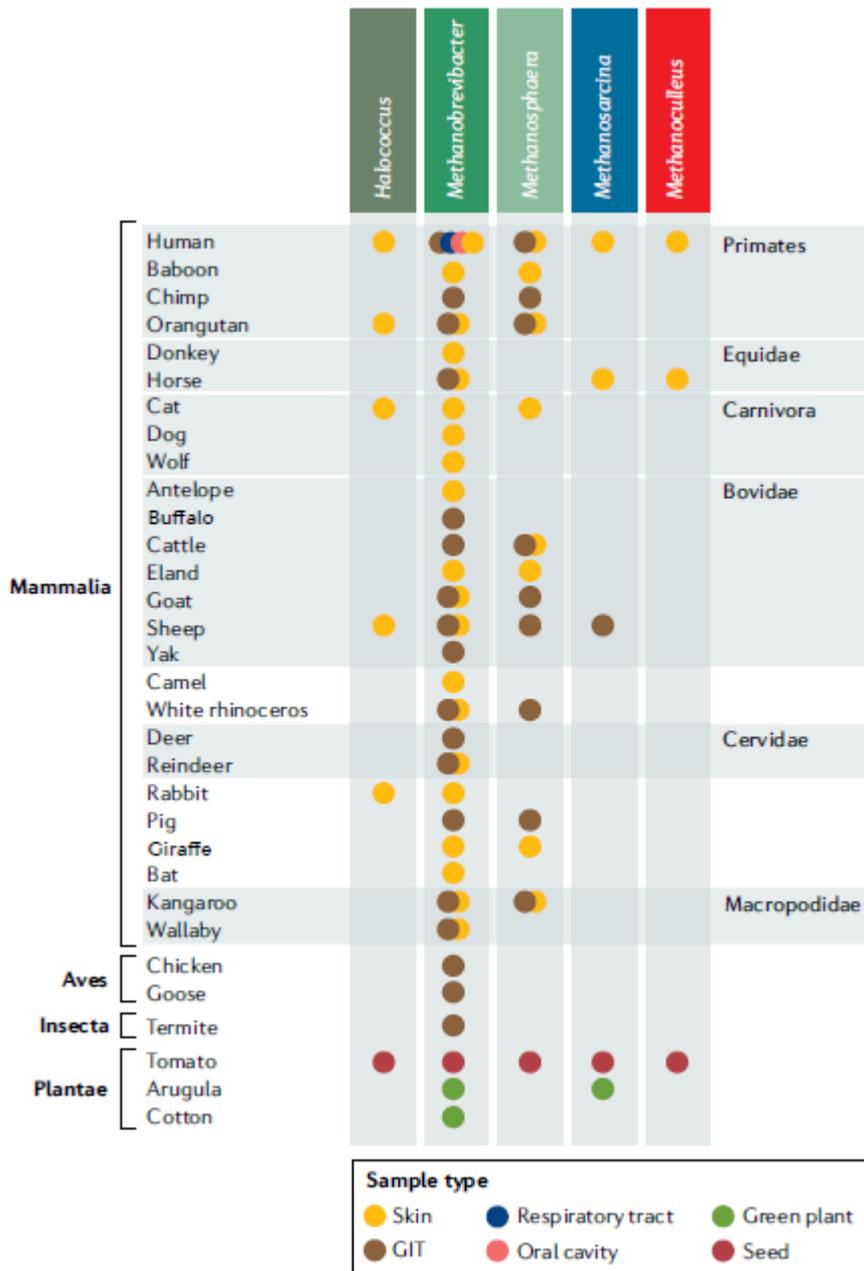
Caractéristiques particulières des Archées - absence des pathogènes

→ Les archées associées avec les animaux et plantes



Borrel et al., 2020, Nat Rev Microbiol. 18(11):622-636.

Caractéristiques particulières des Archées - absence



“In conclusion, it is striking that nearly 40 years after the first description of human-associated archaea, we still have no evidence for one of their members being the primary cause of a disease.”

→ Surprenant, car conceptuellement il n’y a pas de raison évidente pour l’absence de pathogénicité chez les Archées

Borrel et al., 2020, Nat Rev Microbiol. 18(11):622-636.

Caractéristiques particulières des Archées - absence des pathogènes

→ Les hypothèses avancés :

Utilisation des co-facteurs différents

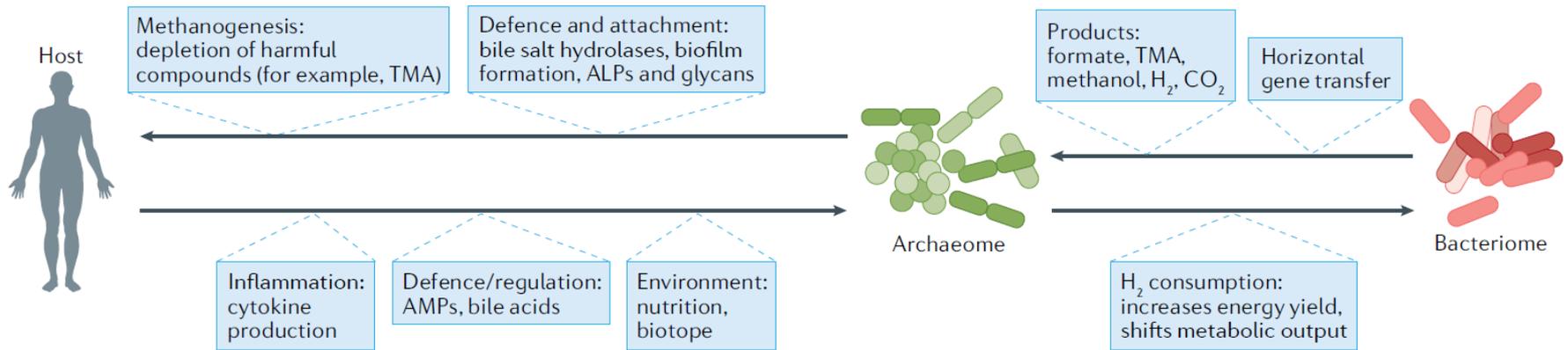
Virus particuliers qui ne peuvent pas acquérir des facteurs de virulence

L'émergence de pathogénicité est rare – seulement 1% des bactéries sont des pathogènes

Absence des systèmes de sécrétion de type III

Peu de phyla d'Archées se sont adaptés à une relation avec un hôte – moins de chances de développer la virulence (42 (!) événements indépendants nécessaires chez les Bactéries)

Caractéristiques particulières des Archées - absence des pathogènes

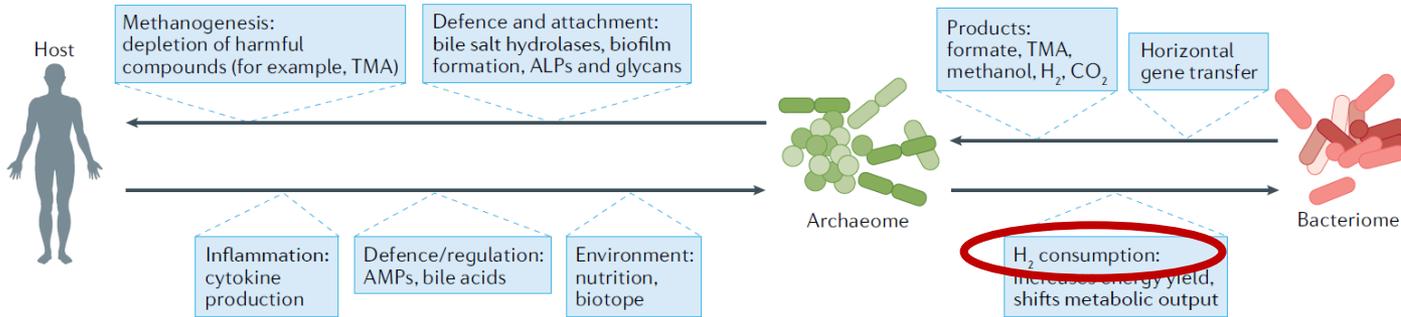


→ Interaction de l'archaeome gastro-intestinal (1.2% du microbiome, Chibani et al., 2021, Nat. Microbiol.) avec le hôte et la flore bactérienne

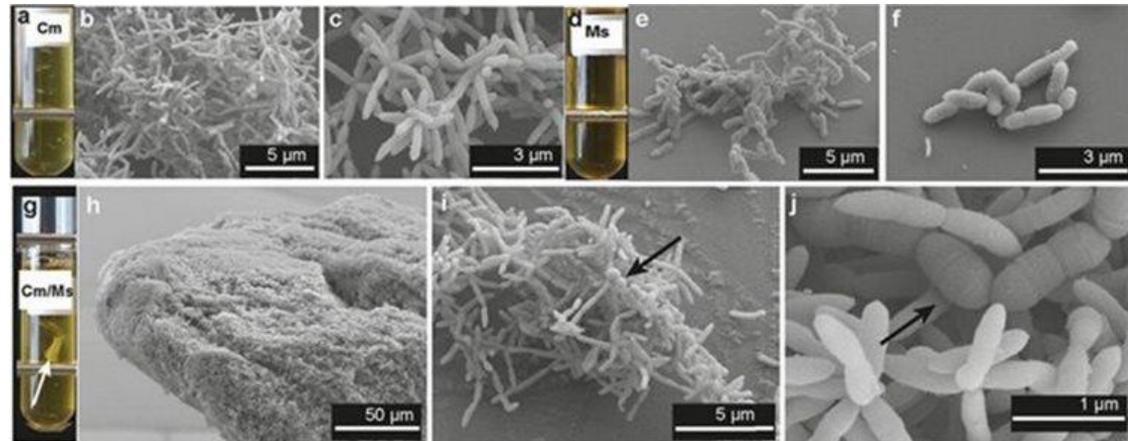
→ Maladies humaines ont été associés avec un dérèglement du archaeome intestinal (cancer du colon, diabète, obésité, anorexie, maladies inflammatoires de l'intestin)

Borrel et al., 2020, Nat Rev Microbiol. 18(11):622-636.

Caractéristiques particulières des Archées - absence des pathogènes



Coculture
Methanobrevibacter smithii
 - Bactéries intestinales



Ruaud A, et al./mBio, 2020

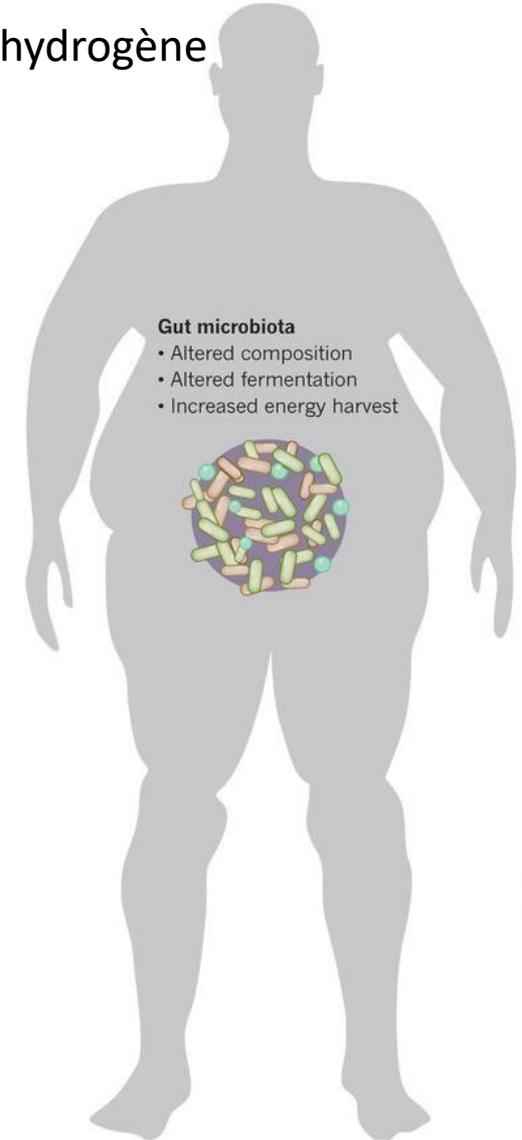
Caractéristiques particulières des Archées - absence des pathogènes

→ les personnes possédant des haleines riches en méthane et hydrogène possèdent des IMC et taux de graisse élevés

Methanobrevibacter smithii 1/10 de tous les prokaryotes dans l'intestin humain



Surabondance de *M. smithii*: la dégradation d'aliments par les bactéries est plus efficace → le surplus d'énergie stockée sous forme de graisse



Caractéristiques particulières des Archées - absence des pathogènes

ARTICLES

<https://doi.org/10.1038/s41564-021-01020-9>

nature
microbiology



OPEN

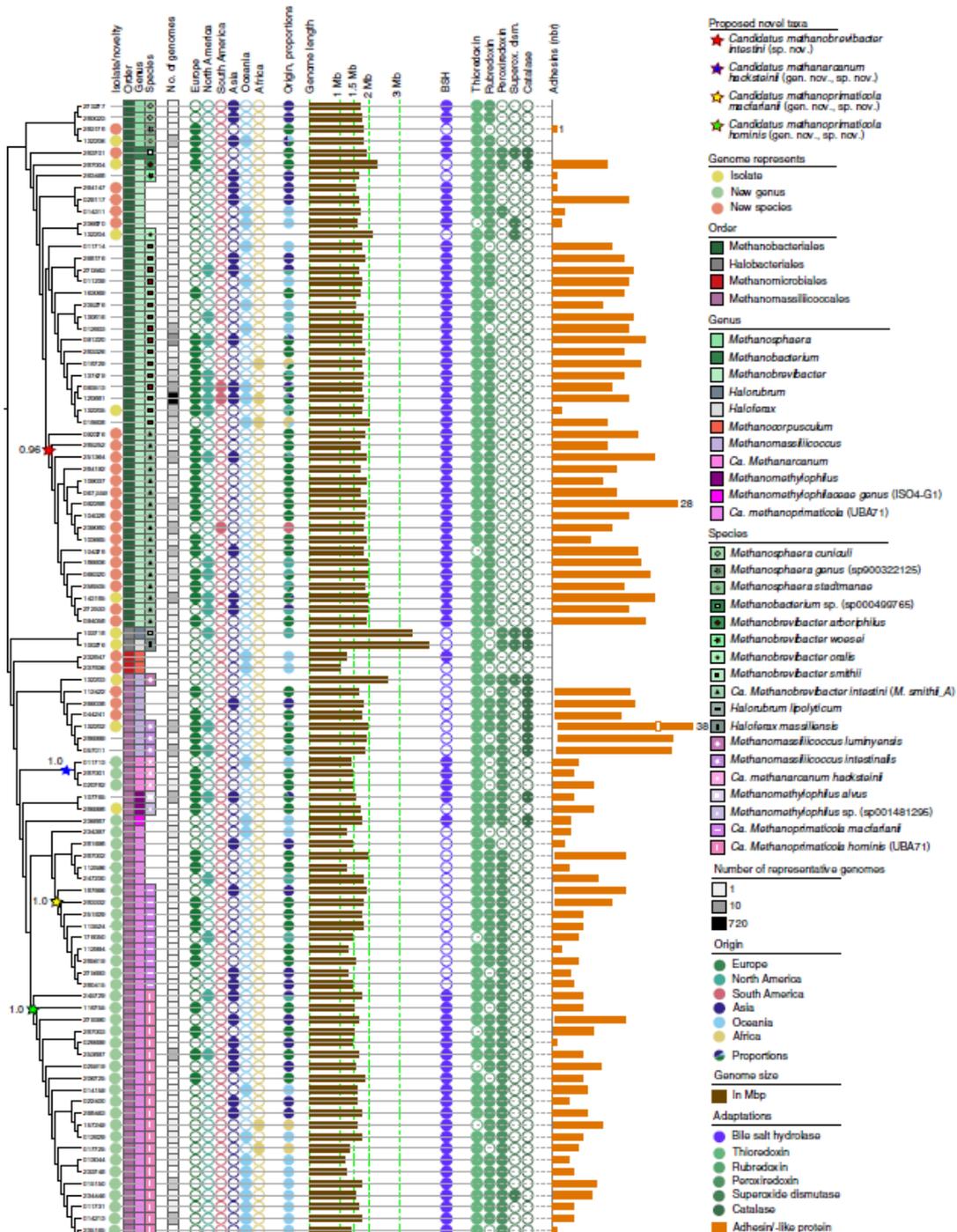
A catalogue of 1,167 genomes from the human gut archaeome

Cynthia Maria Chibani^{1,8}, Alexander Mahnert ^{2,8}, Guillaume Borrel ³, Alexandre Almeida ^{4,5},
Almut Werner¹, Jean-François Brugère ⁶, Simonetta Gribaldo ³, Robert D. Finn ⁴,
Ruth A. Schmitz ¹✉ and Christine Moissl-Eichinger ^{2,7}✉

The human gut microbiome plays an important role in health, but its archaeal diversity remains largely unexplored. In the present study, we report the analysis of 1,167 nonredundant archaeal genomes (608 high-quality genomes) recovered from human gastrointestinal tract, sampled across 24 countries and rural and urban populations. We identified previously undescribed taxa including 3 genera, 15 species and 52 strains. Based on distinct genomic features, we justify the split of the *Methanobrevibacter smithii* clade into two separate species, with one represented by the previously undescribed '*Candidatus Methanobrevibacter intestini*'. Patterns derived from 28,581 protein clusters showed significant associations with sociodemographic characteristics such as age groups and lifestyle. We additionally show that archaea are characterized by specific genomic and functional adaptations to the host and carry a complex virome. Our work expands our current understanding of the human archaeome and provides a large genome catalogue for future analyses to decipher its impact on human physiology.

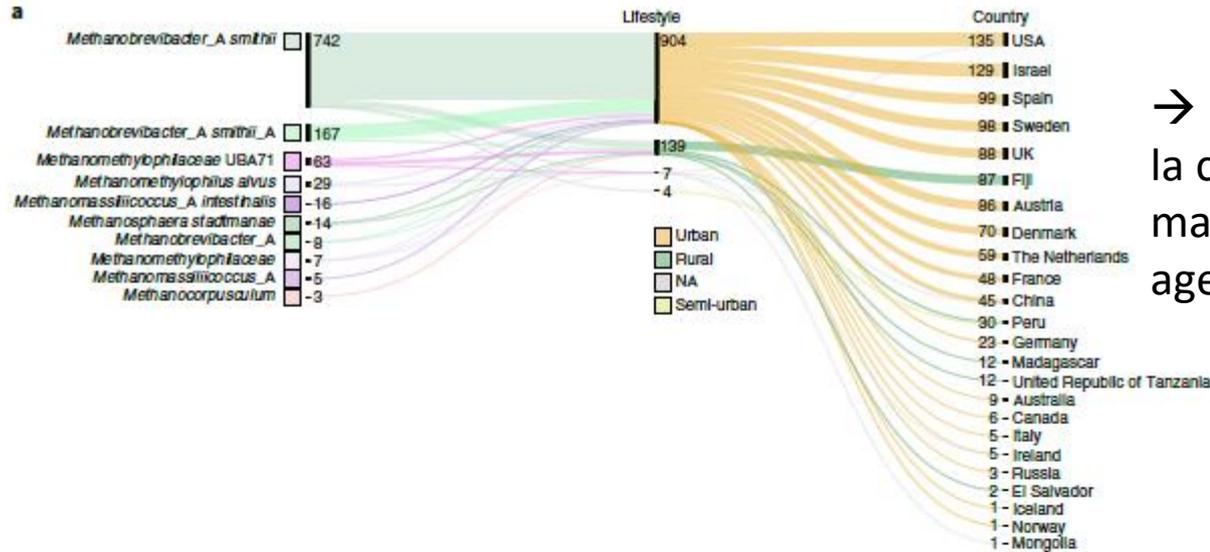
Archées - absence

→ Permet d'identifier des nouvelles espèces de Methanogènes d'intestin

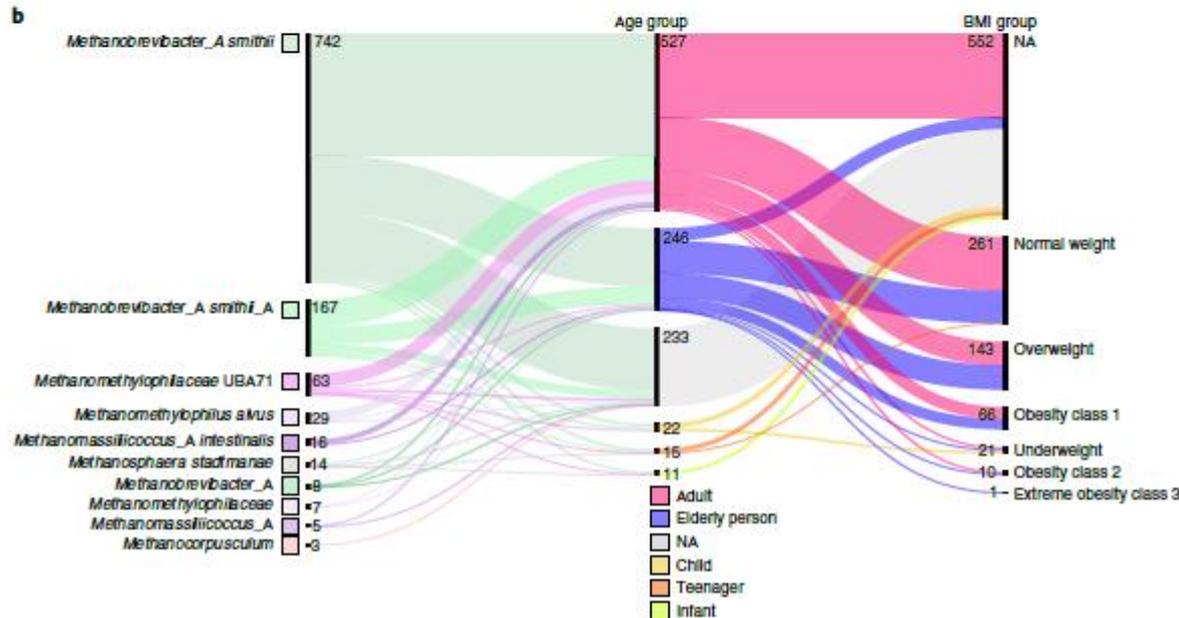


Chibani et al., 2021, Nat. Microbio.

Caractéristiques particulières des Archées - absence des pathogènes



→ Recherche des corrélations entre la composition des espèces et une maladie particulière, style de vie, age etc.



Chibani et al., 2021, Nat. Microbio.

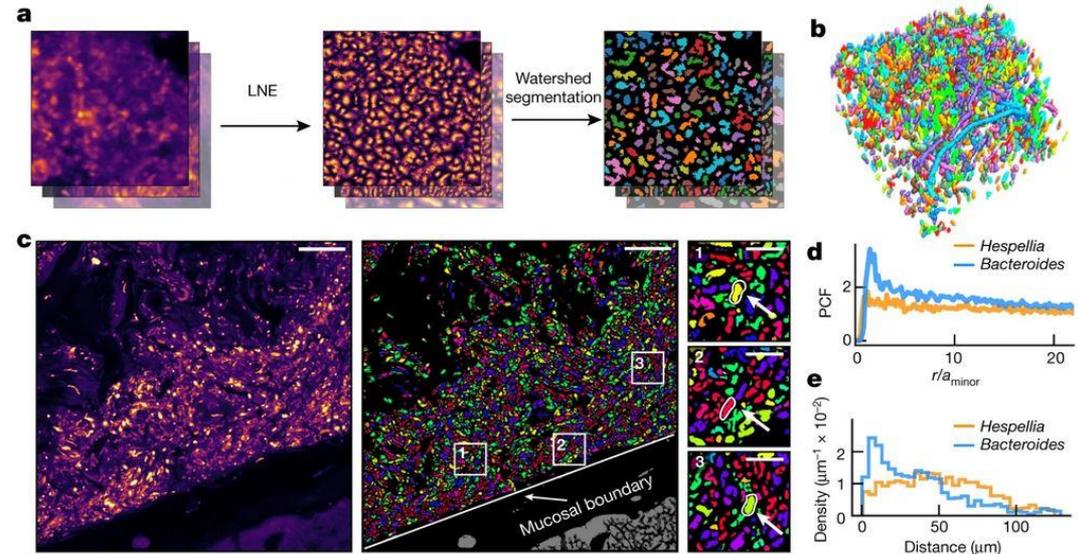
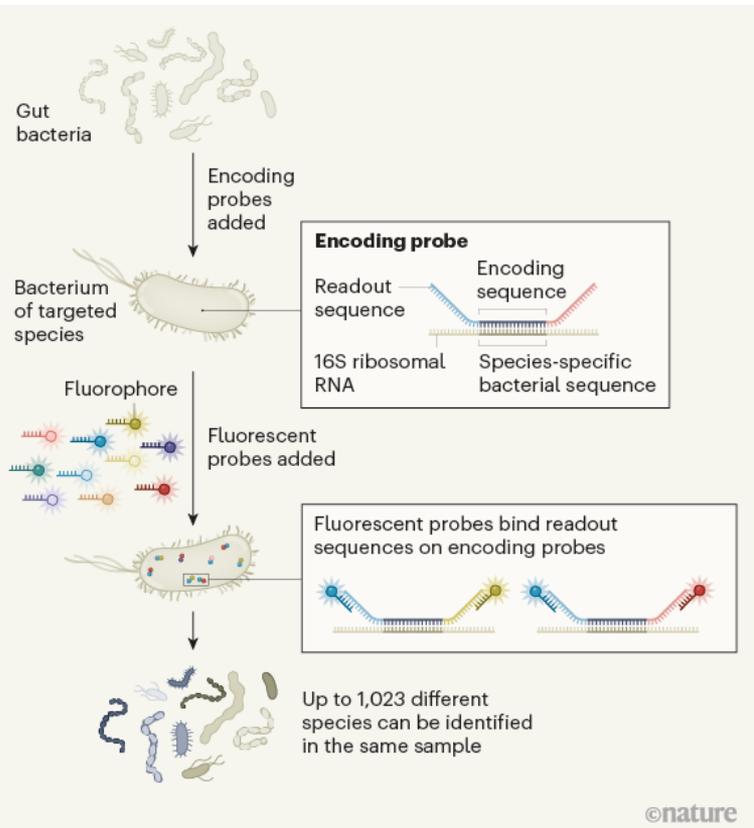
Caractéristiques particulières des Archées - absence des pathogènes

> Nature. 2020 Dec 2. doi: 10.1038/s41586-020-2983-4. Online ahead of print.

Highly multiplexed spatial mapping of microbial communities

Hao Shi ¹, Qiaojuan Shi ², Benjamin Grodner ², Joan Sasing Lenz ², Warren R Zipfel ², Ilana Lauren Brito ², Iwijn De Vlamincx ³

MicroBioGeography !



Importance écologique des Archées

Woese, Wheelis and Kandler, 1990

4578 Evolution: Woese *et al.*

Proc. Natl. Acad. Sci. USA 87 (1990)

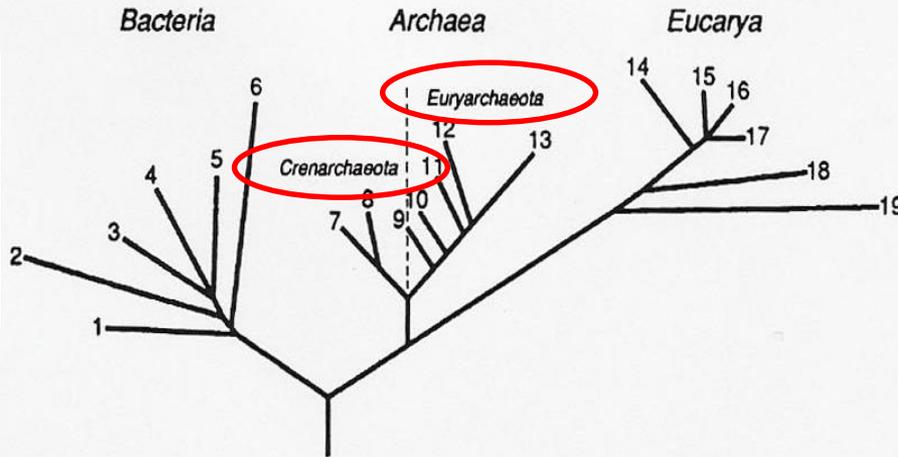
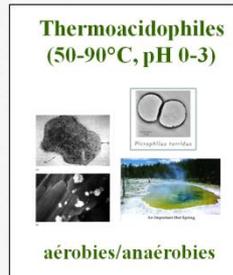
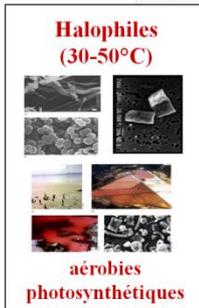
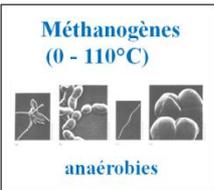


FIG. 1. Universal phylogenetic tree in rooted form, showing the three domains. Branching order and branch lengths are based upon rRNA sequence comparisons (and have been taken from figure 4 of ref. 2). The position of the root was determined by comparing (the few known) sequences of pairs of paralogous genes that diverged from each other before the three primary lineages emerged from their common ancestral condition (27). [This rooting strategy (28) in effect uses the one set of (aboriginally duplicated) genes as an outgroup for the other.] The numbers on the branch tips correspond to the following groups of organisms (2). Bacteria: 1, the Thermotogales; 2, the flavobacteria and relatives; 3, the cyanobacteria; 4, the purple bacteria; 5, the Gram-positive bacteria; and 6, the green nonsulfur bacteria. Archae: the kingdom Crenarchaeota: 7, the genus *Pyrodictium*; and 8, the genus *Thermoproteus*; and the kingdom Euryarchaeota: 9, the Thermococcales; 10, the Methanococcales; 11, the Methanobacteriales; 12, the Methanomicrobiales; and 13, the extreme halophiles. Eucarya: 14, the animals; 15, the ciliates; 16, the green plants; 17, the fungi; 18, the flagellates; and 19, the microsporidia.

Toutes les Archées ne sont pas des extrêmophiles !

Importance écologique des Archées



Edward DeLong



-les eaux oxygénés de surface
(environnement mésophile)



Filtre, 10 µm

ADN total $\xrightarrow{\text{PCR}}$ ADN 16S \longrightarrow séquençage

Proc. Natl. Acad. Sci. USA
Vol. 89, pp. 5685–5689, June 1992
Ecology

Archaea in coastal marine environments

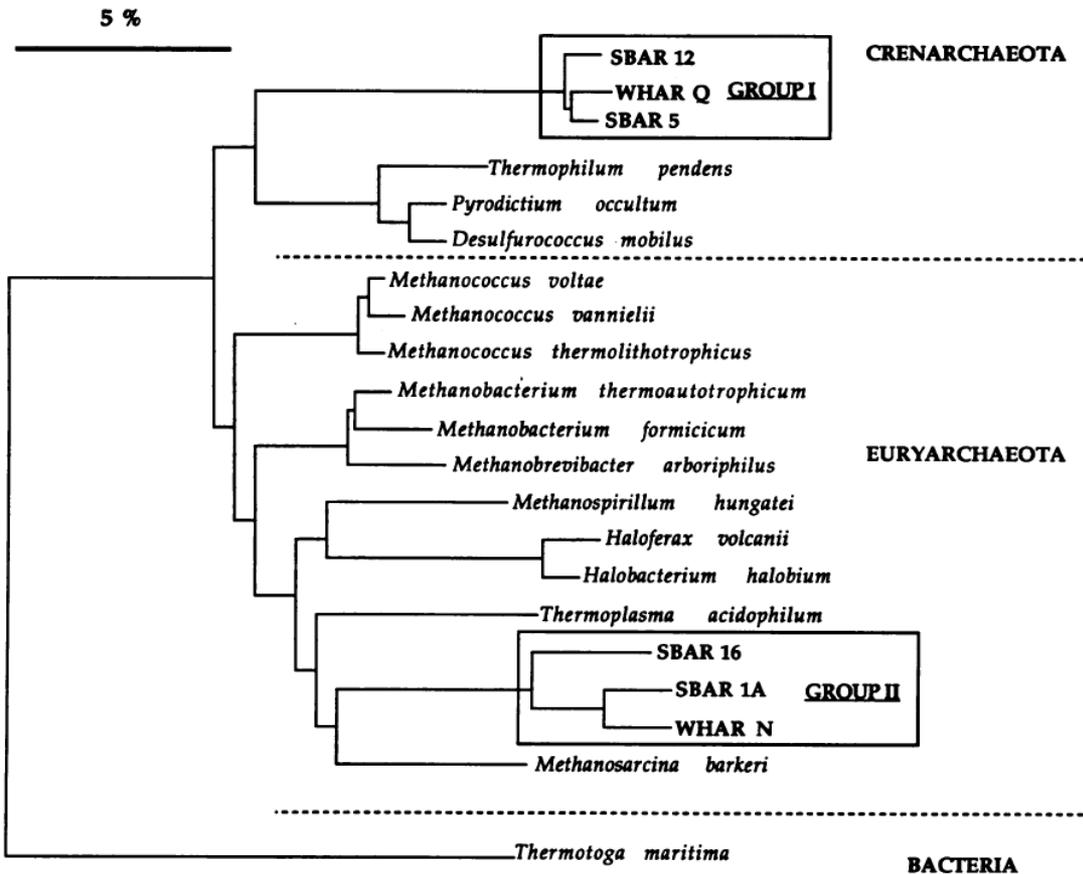
(archaeobacteria/phylogeny/bacterioplankton/molecular ecology)

EDWARD F. DELONG*

Biology Department, Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA 02543

Communicated by George N. Somero, March 17, 1992 (received for review February 4, 1992)

Importance écologique des Archées



→ deux lignées phylogénétiquement distinctes des archées connues à l'époque

→ découverte des (nouvelles?) archées mésophiles et planctoniques *non-cultivées*

→ quelle est leur *abondance*?

« A more provocative explanation is that group I and group II represent undescribed mesophilic, aerobic members of the archaea, which reside and compete with eubacterial picoplankton in oxic, marine coastal waters. »

Importance écologique des Archées

→ quelle est leur *abondance*?



2001

Ed DeLong

letters to nature

.....

Archaeal dominance in the mesopelagic zone of the Pacific Ocean

Markus B. Karner^{*}, Edward F. DeLong[†] & David M. Karl^{*}

^{*} University of Hawai'i, Department of Oceanography, 1000 Pope Road, Honolulu, Hawai'i 96822, USA

[†] Monterey Bay Aquarium Research Institute, 7700 Sandholdt Road, Moss Landing, California 95039, USA

station⁷. Below the euphotic zone (> 150 m), pelagic crenarchaeota comprised a large fraction of total marine picoplankton, equivalent in cell numbers to bacteria at depths greater than 1,000 m. The fraction of crenarchaeota increased with depth, reaching 39% of total DNA-containing picoplankton detected. The average sum of archaea plus bacteria detected by rRNA-targeted fluorescent probes ranged from 63 to 90% of total cell numbers at all depths throughout our survey. The high proportion of cells containing significant amounts of rRNA suggests that most pelagic deep-sea microorganisms are metabolically active. Furthermore, our results suggest that the global oceans harbour approximately 1.2×10^{28} archaeal cells and 2.1×10^{28} bacterial

→ Prélèvement d'échantillons dans la colonne d'eau 0.15 m – 4700 m → FISH (Fluorescence In Situ Hybridisation)

Importance écologique des Archées

2001



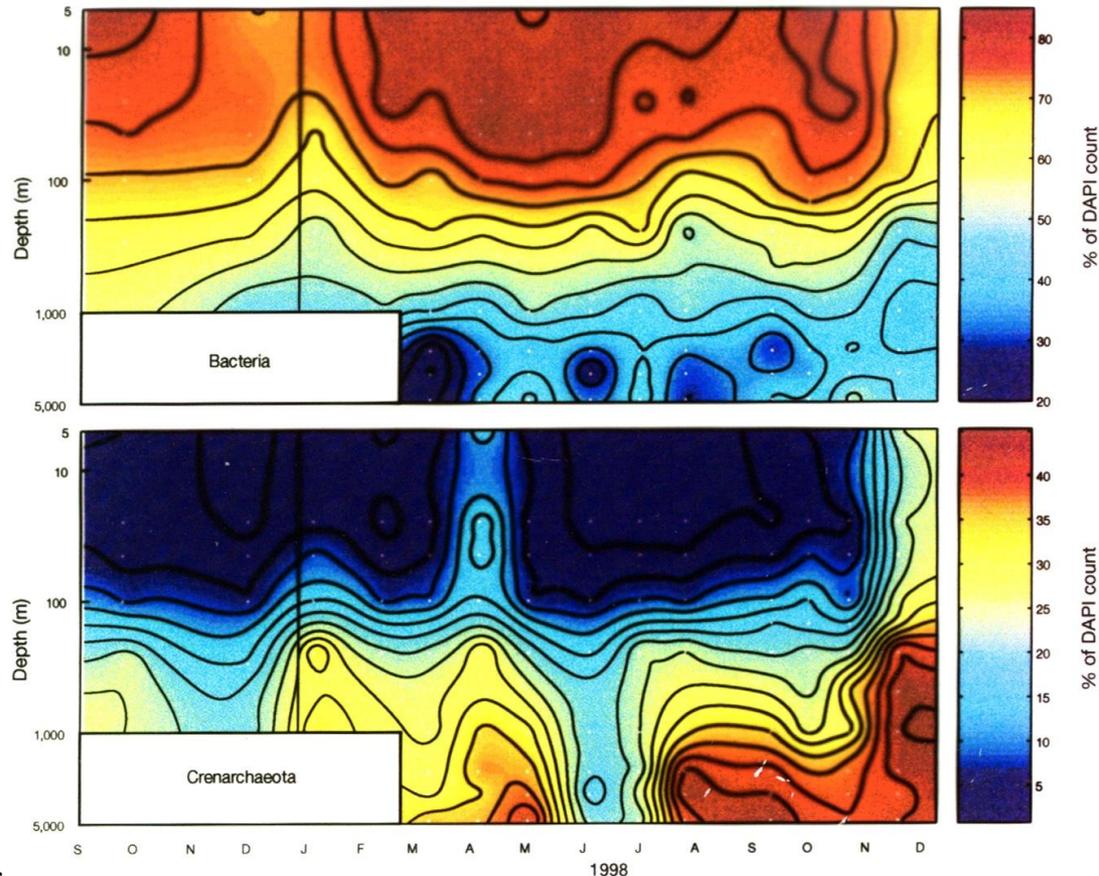
Ed DeLong

-les bactéries dominent dans la partie haute de la colonne d'eau (<150 m)

-les crenarchées deviennent abondantes > 250 m de profondeur et prédominent au delà de 1000 m

-l'océan contient $\sim 3.1 \times 10^{28}$ de bactéries et $\sim 1 \times 10^{28}$ de *crenarchées* pélagiques!!!

-les archées ne sont pas confinés uniquement à des habitats « extrêmes »

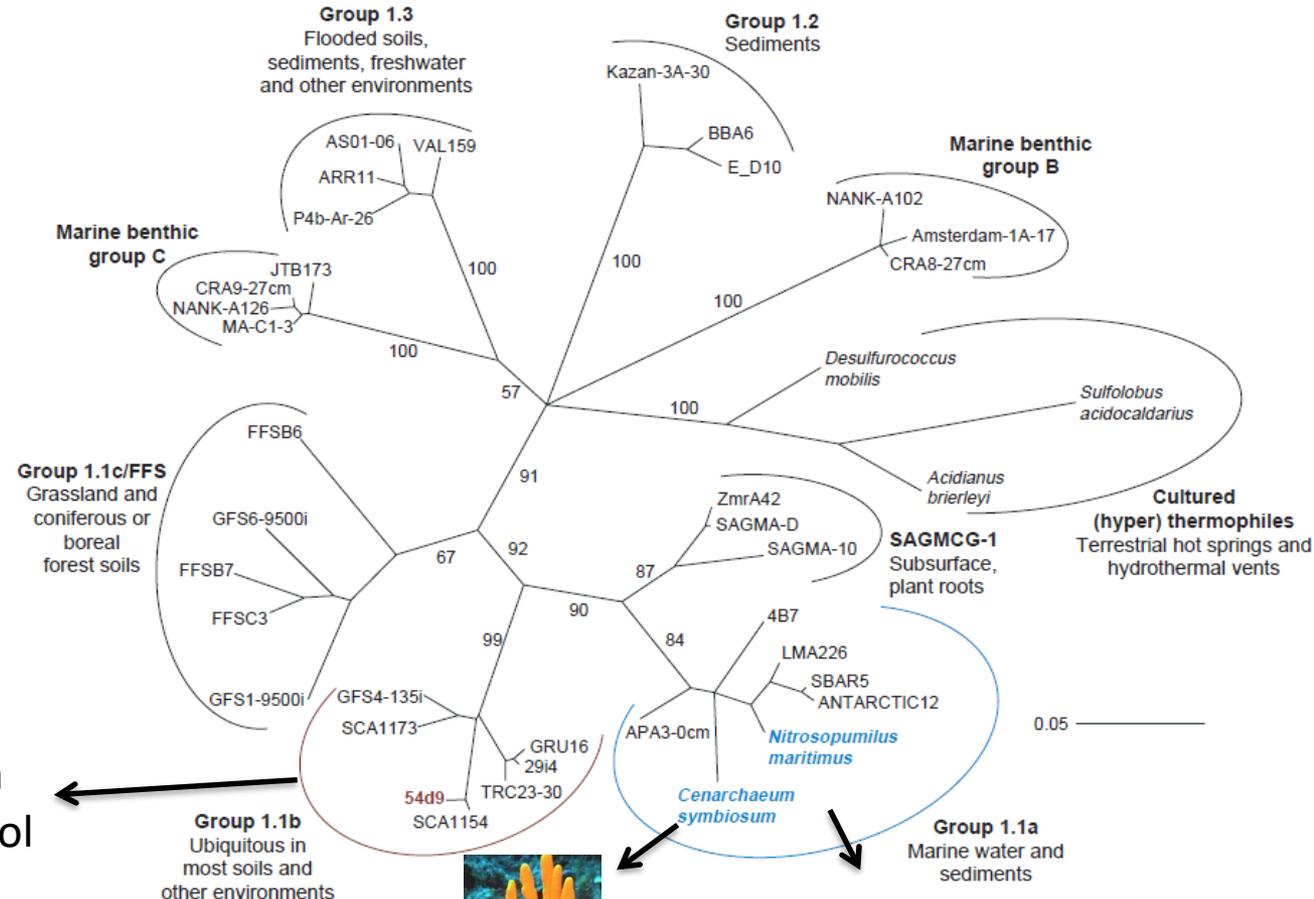


Importance écologique des Archées



Christa Schleper

les crenarchaea mésophiles occupent une large variété des habitats:



organismes dominants dans la majorité des échantillons du sol
1-5% de 16S rDNA

~20% de prokaryotes planctoniques dans les océans

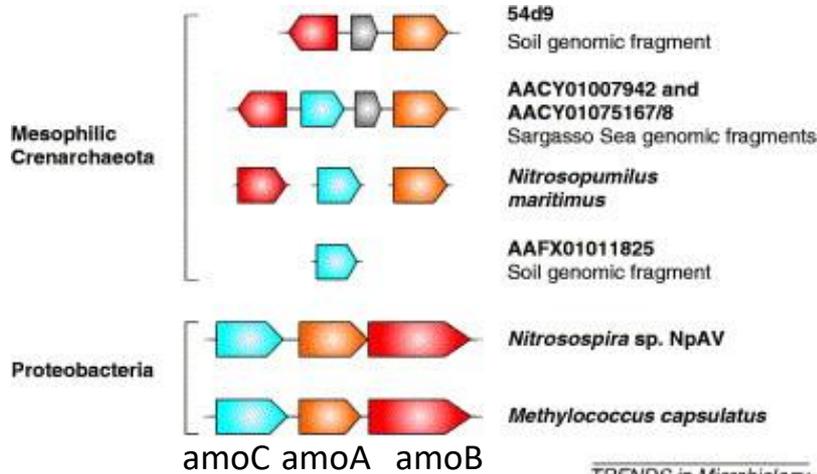
Nicol and Schleper, TRENDS in Microbiology Vol.14 No.5 May 2006

TRENDS in Microbiology

Importance écologique des Archées

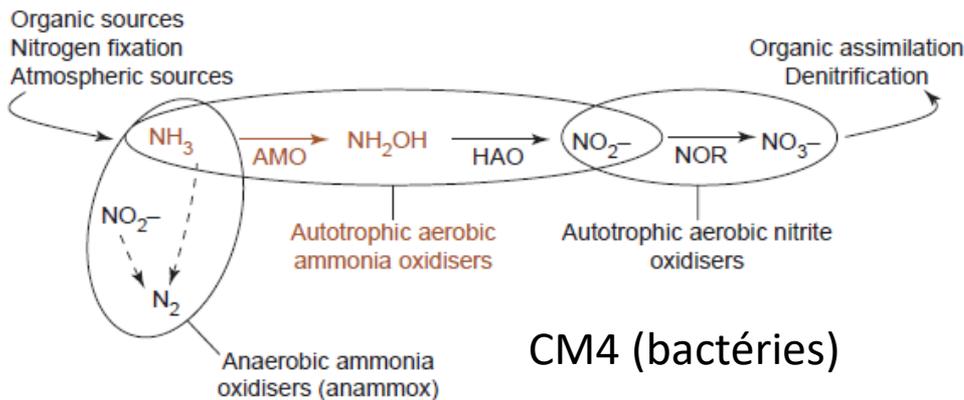


Christa Schleper



TRENDS in Microbiology

→ les crenarchées codent pour une enzyme (mono-oxydase) qui oxyde l'ammoniaque → l'enzyme clé dans le processus de nitrification

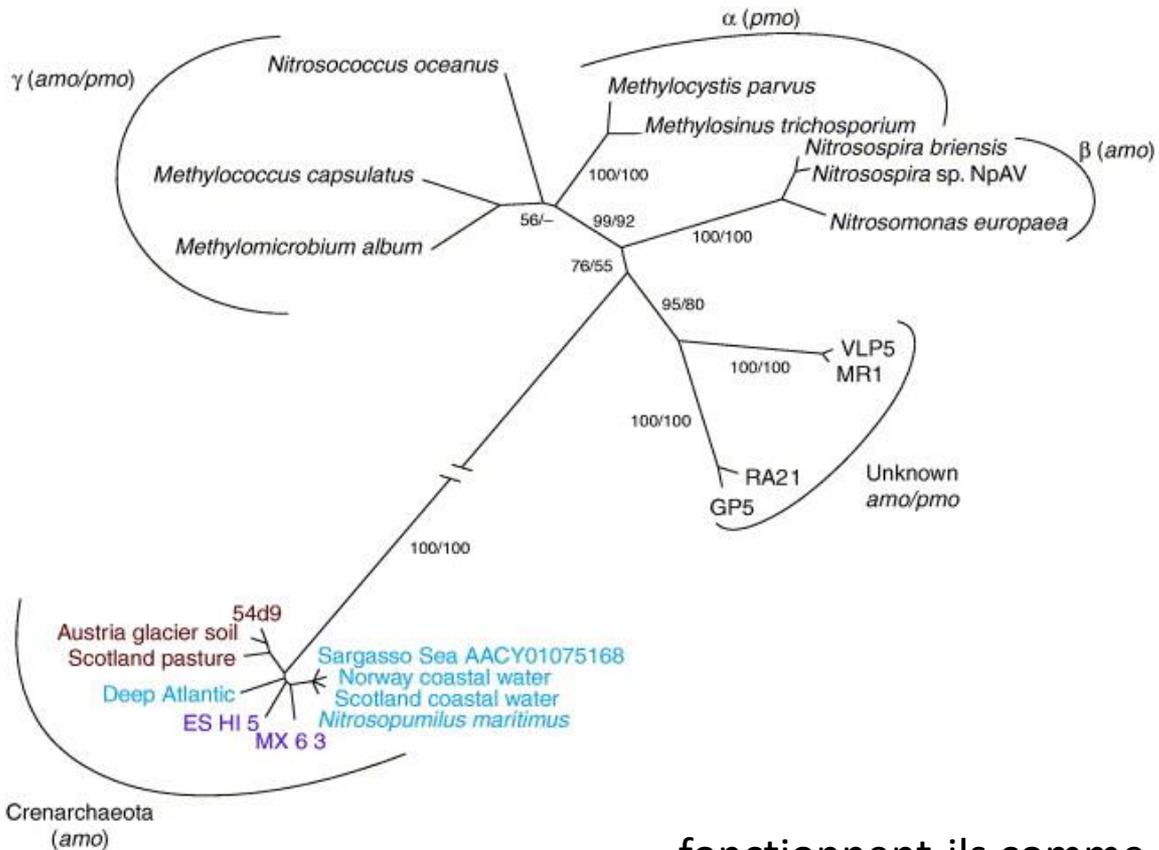


CM4 (bactéries)

TRENDS in Microbiology

-la nitrification est au centre du cycle global d'azote
-l'oxydation de l'ammoniaque est considéré comme l'étape limitante

Importance écologique des Archées



-les gènes *amo* d'archées sont phylogénétiquement éloignés de ceux des bactéries

-en moyenne 25% d'identité de séquence

-fonctionnent-ils comme oxydases d'ammoniaque???

Importance écologique des Archées

Vol 437|22 September 2005|doi:10.1038/nature03911

nature

LETTERS

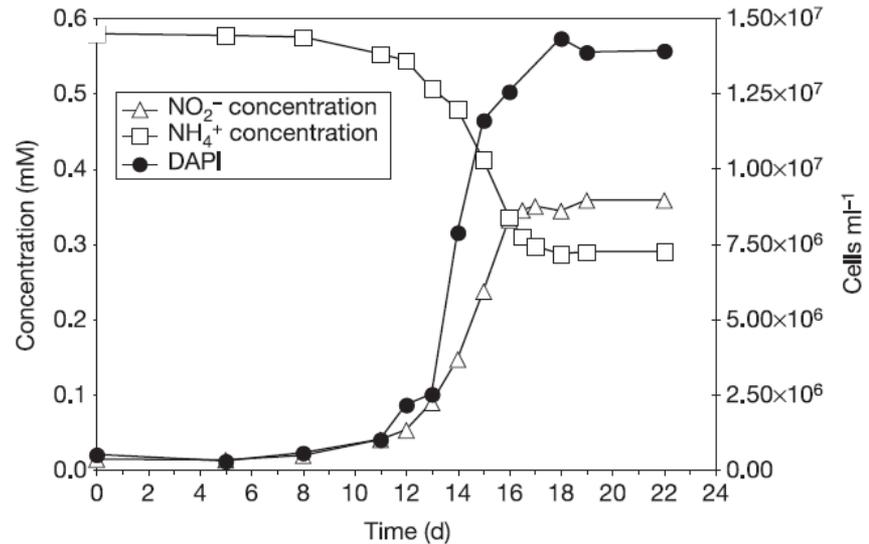
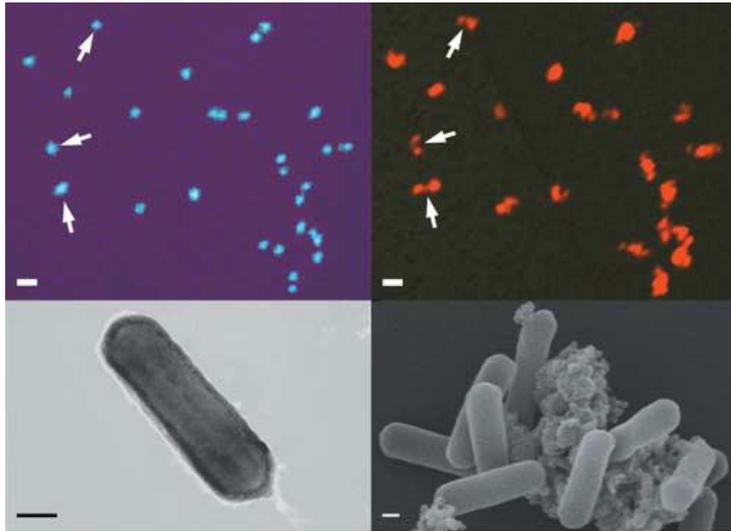
Isolation of an autotrophic ammonia-oxidizing marine archaeon

Martin Könneke^{1*†}, Anne E. Bernhard^{1*†}, José R. de la Torre^{1*}, Christopher B. Walker¹, John B. Waterbury² & David A. Stahl¹

-temps de génération = 21h!



→ isolation en culture pure, bicarbonate et ammoniacale les seules sources d'énergie et de carbone = chimolithotrophie



→ conversion quasi stœchiométrique de l'ammonium en nitrite

Importance écologique des Archées

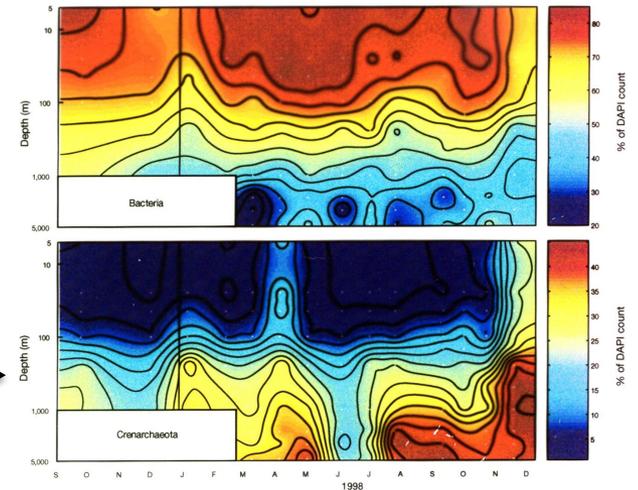
'Nitrosopumilus maritimus'

nitrosus: nitrous;

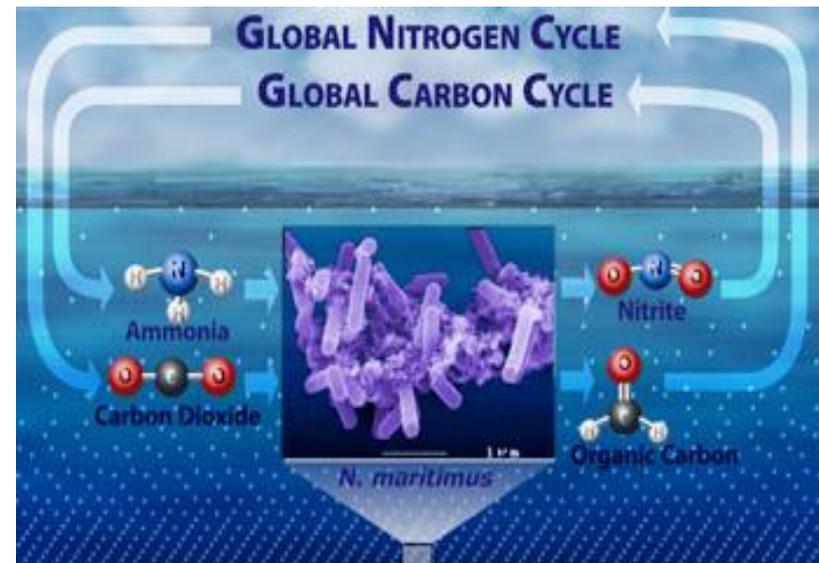
pumilus: dwarf;

maritimus: belonging to the sea

-La chimiolithotrophie leur permet d'habiter les eaux océaniques profonds (oligotrophe et sans lumière)



-sont des producteurs *primaires* dans ces environnements



Importance écologique des Archées

ARTICLE

Received 28 May 2015 | Accepted 14 Oct 2015 | Published 17 Nov 2015

DOI: 10.1038/ncomms9933

OPEN

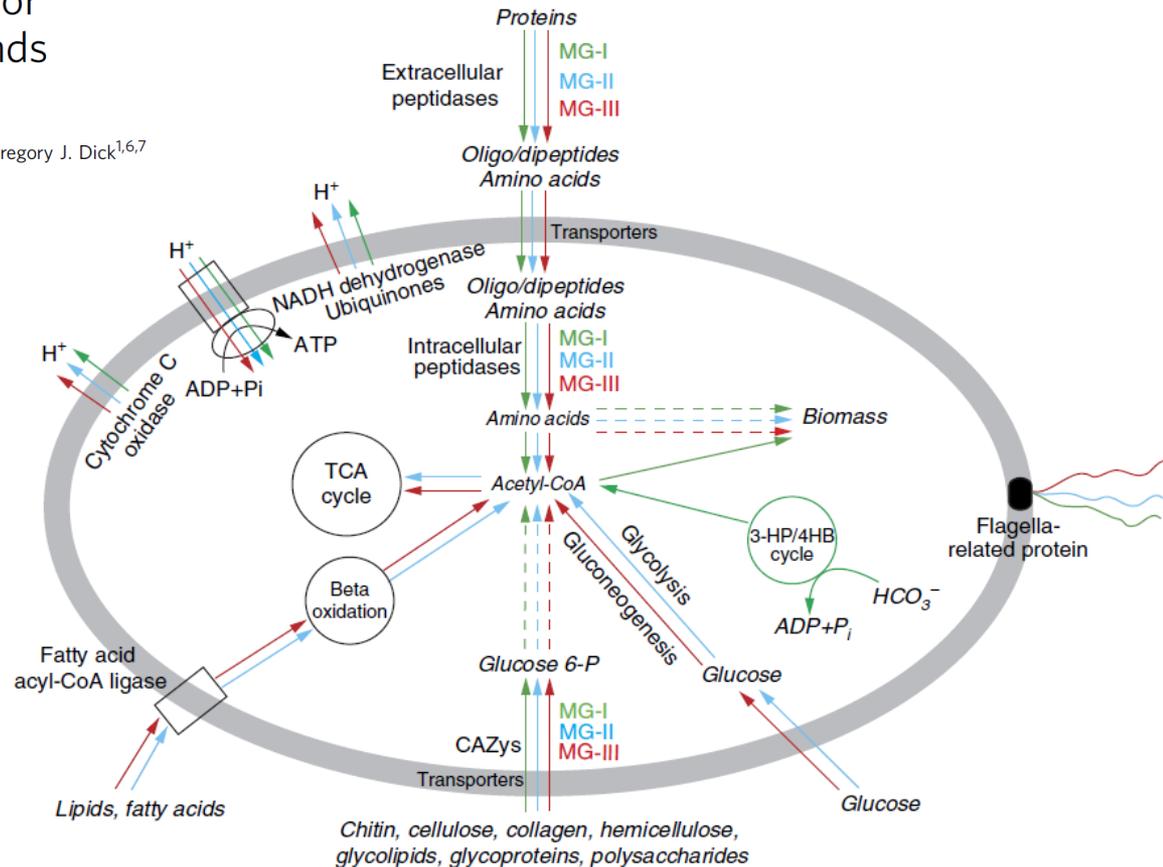
Genomic and transcriptomic evidence for scavenging of diverse organic compounds by widespread deep-sea archaea

Meng Li^{1,2}, Brett J. Baker^{1,3}, Karthik Anantharaman¹, Sunit Jain¹, John A. Breier^{4,5} & Gregory J. Dick^{1,6,7}

→ motile, hétérotrophes avec la capacité de capter et métaboliser une grande variété des composés organiques

→ Abondants à des profondeurs de 800 à 4950 m

→ Rôle important pour le flux de carbone dans les océans



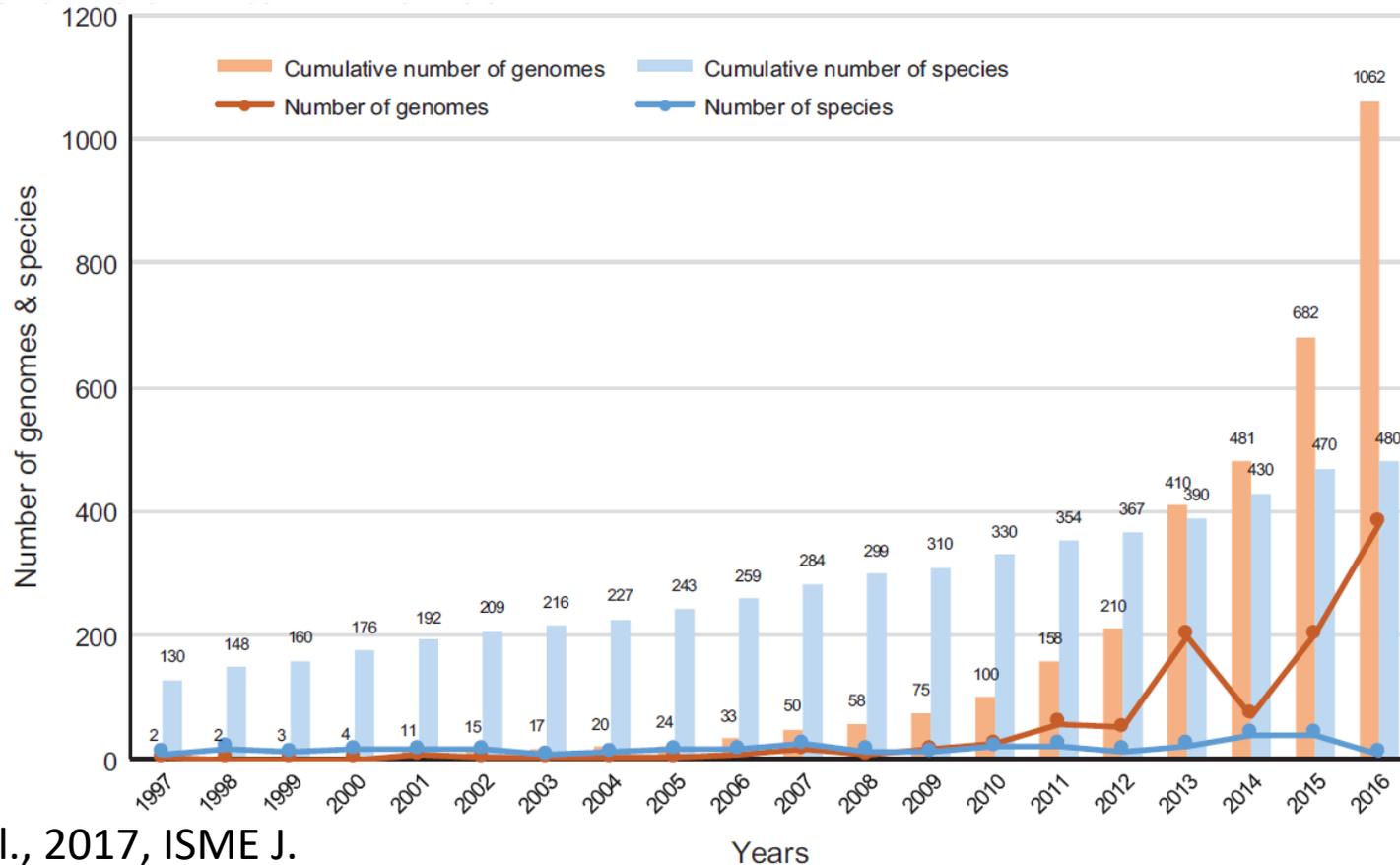
Evolution d'Archées

The ISME Journal (2017), 1–19
© 2017 International Society for Microbial Ecology All rights reserved 1751-7362/17
www.nature.com/ismej

MINI REVIEW

The growing tree of Archaea: new perspectives on their diversity, evolution and ecology

Panagiotis S Adam^{1,2}, Guillaume Borrel¹, Céline Brochier-Armanet³
and Simonetta Gribaldo¹



Adam et al., 2017, ISME J.

Evolution d'Archées

The ISME Journal (2017), 1–19
© 2017 International Society for Microbial Ecology All rights reserved 1751-7362/17
www.nature.com/ismej

MINI REVIEW

The growing tree of Archaea: new perspectives on their diversity, evolution and ecology

Panagiotis S Adam^{1,2}, Guillaume Borrel¹, Céline Brochier-Armanet³
and Simonetta Gribaldo¹

→ Placement de nouvelles lignées non-cultivés dans l'arbre?

→ Importance:

- nature du dernier ancêtre commun d'Archées
- relation de parenté entre les phylum majeurs
- établissement d'une classification robuste
- compréhension des processus évolutifs conduisant à la diversité actuelle: émergence des capacités métaboliques spécifiques, adaptation aux différents environnements, etc.

Adam et al., 2017, ISME J.

Evolution d'Archées

The ISME Journal (2017), 1–19
© 2017 International Society for Microbial Ecology All rights reserved 1751-7362/17
www.nature.com/ismej

MINI REVIEW

The growing tree of Archaea: new perspectives on their diversity, evolution and ecology

Panagiotis S Adam^{1,2}, Guillaume Borrel¹, Céline Brochier-Armanet³
and Simonetta Gribaldo¹

→ Placement de nouvelles lignées non-cultivés dans l'arbre?

→ Importance:

- nature du dernier ancêtre commun d'Archées
- relation de parenté entre les phylum majeurs
- établissement d'une classification robuste
- compréhension des processus évolutifs conduisant à la diversité actuelle: émergence des capacités métaboliques spécifiques, adaptation aux différents environnements, etc.

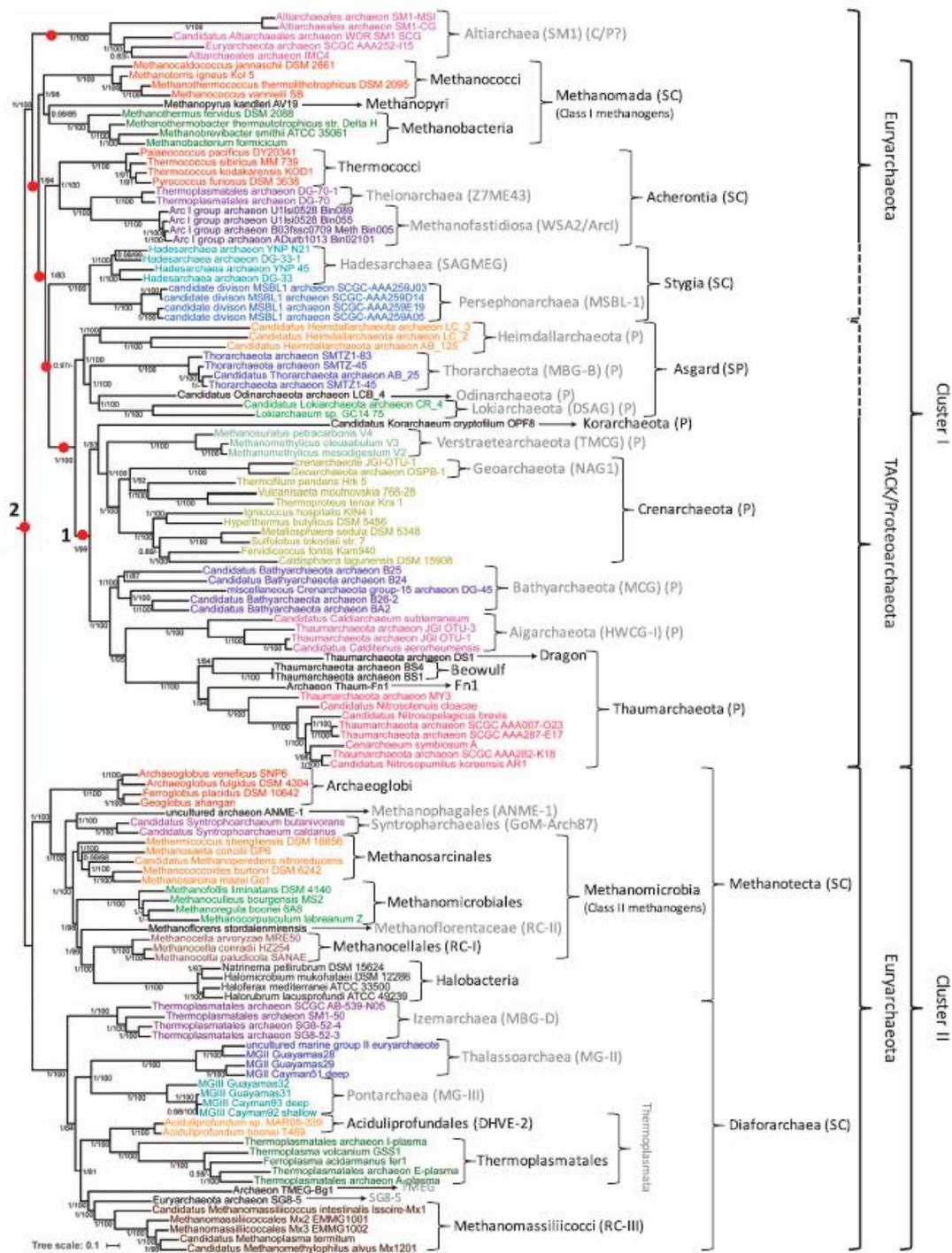
**A condition
de polariser
(orienter
l'arbre dans
le temps)
donc
l'enraciner**

Adam et al., 2017, ISME J.

Evolution d'Arché

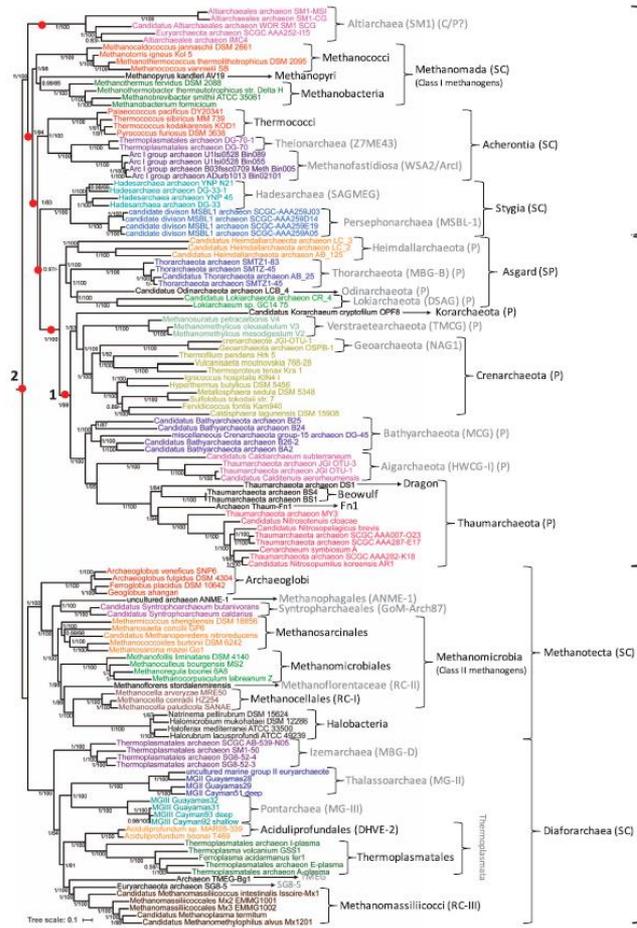
Phylogénie Bayésienne,
(PhyloBayes, CAT+GTR+ Γ 4)
41 gènes marqueurs et 8710
positions

En gris les clades pour
lesquels il n'y a pas
d'isolats!



Adam et al., 2017, ISME J.

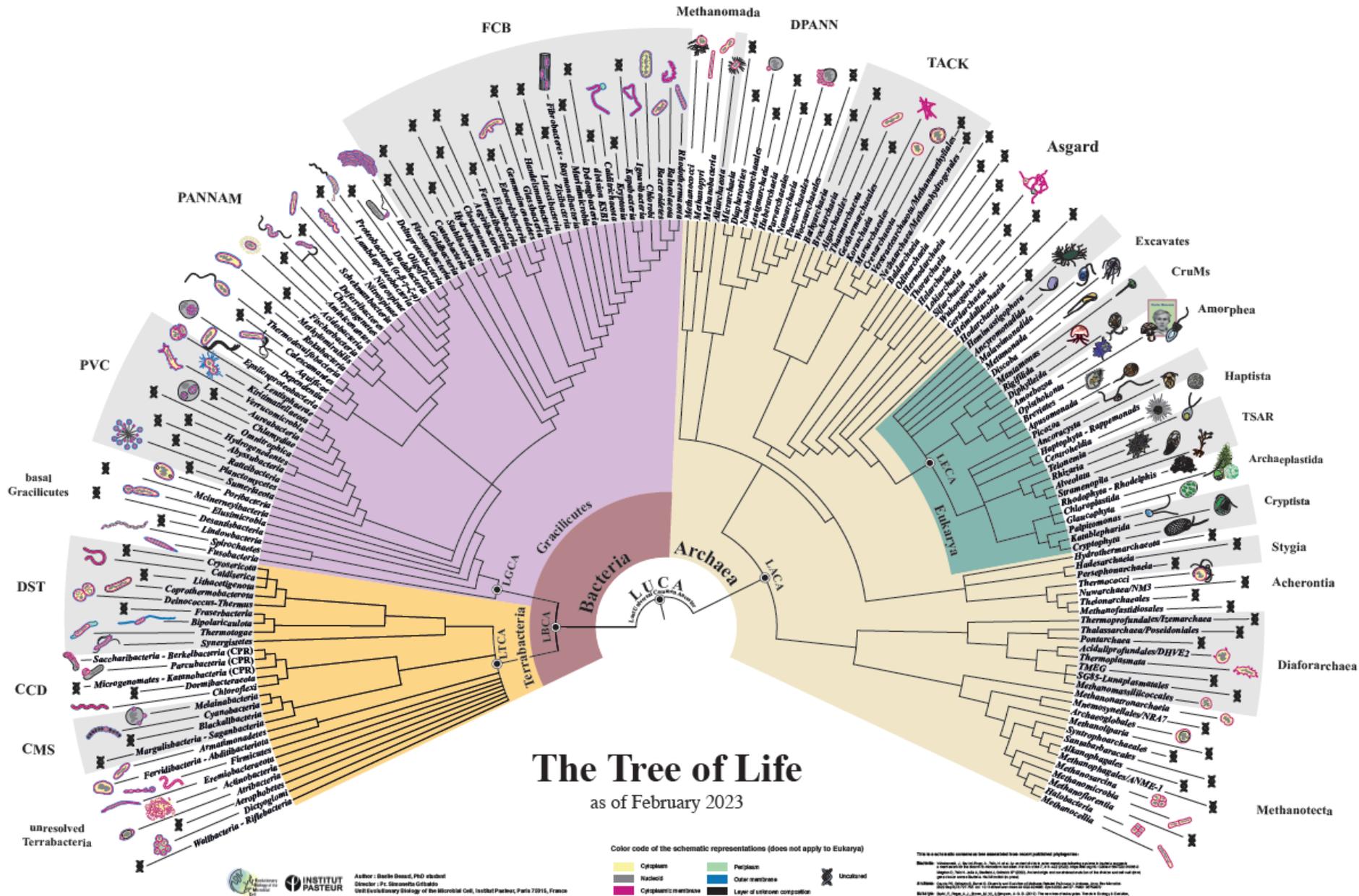
Evolution d'Archées



→ La racine alternative (2) implique :

- Les Euryarchées sont paraphylétiques
- Les caractères Euryarchées sont ancestraux (ex. méthanogénèse) et ceux de TACK sont dérivés
- La distribution des différents caractères (PoID, histones, gyrase etc.) révèle des pertes spécifiques dans les différentes lignées
- Lien entre la distribution des caractères et l'adaptation à des environnements ou mode de vie

Adam et al., 2017, ISME J.



Evolution d'Archées

- La découverte des Nanoarchées (et nanobactéries) est l'un des résultats majeurs de l'exploration de la diversité microbienne
- Ont pendant long temps échappé à la détection (les gènes 16S RNA très divergents)
- Evoluent très vite et ne codent pas pour la plupart des voies de biosynthèse d'AA (symbiontes ou parasites ?)

Table 3 Characteristics of nanosized archaeal lineages

Name	Genome sequences obtained from	Genome size (completeness)	Cell size	Reference
Nanoarchaeota	Submarine hydrothermal vent (anoxic)	0.5–0.6 Mb	0.1–0.4 μm	Huber <i>et al.</i> , 2002
Nanohaloarchaea	Surface waters of hypersaline lake (oxic)	1.2 Mb	0.6 μm	Narasingarao <i>et al.</i> , 2012
Diapherotrites (pMC2A384, DUSEL-3)	Deep sea hydrothermal vent, groundwater (anoxic)	1.24 Mb	ND	Rinke <i>et al.</i> , 2013, Castelle <i>et al.</i> , 2015
Parvarchaeota (ARMAN-4 and -5)	Acidic, metal-rich mine biofilm (oxic)	0.8–0.92 Mb (80 & 90% complete)	0.009 μm^3 to 0.04 μm^3	Baker <i>et al.</i> , 2010
Aenigmarchaeota (DSEG, DHVE3, DUSEL-2)	Subsurface sediment and water (anoxic)	0.86 Mb (93% complete)	< 1.2 μm	Rinke <i>et al.</i> , 2013, Castelle <i>et al.</i> , 2015
Woesearchaeota (DUSEL-2, DUSEL-4)	Subsurface sediment and water (anoxic)	0.8–1.16 Mb	< 1.2 μm	Castelle <i>et al.</i> , 2015
Pacearchaeota (DUSEL-1)	Subsurface sediment and water (anoxic)	0.56–0.68 Mb (90% complete)	< 1.2 μm	Castelle <i>et al.</i> , 2015
Micrarchaeota (ARMAN 2)	Acidic, metal-rich mine biofilm (oxic)	1 Mb (99% complete)	Length mean = 0.24 μm	Baker <i>et al.</i> , 2010
DHVEG-6	Deep sea hydrothermal vent plume	0.8 Mb (56% complete)	ND	Li <i>et al.</i> , 2015

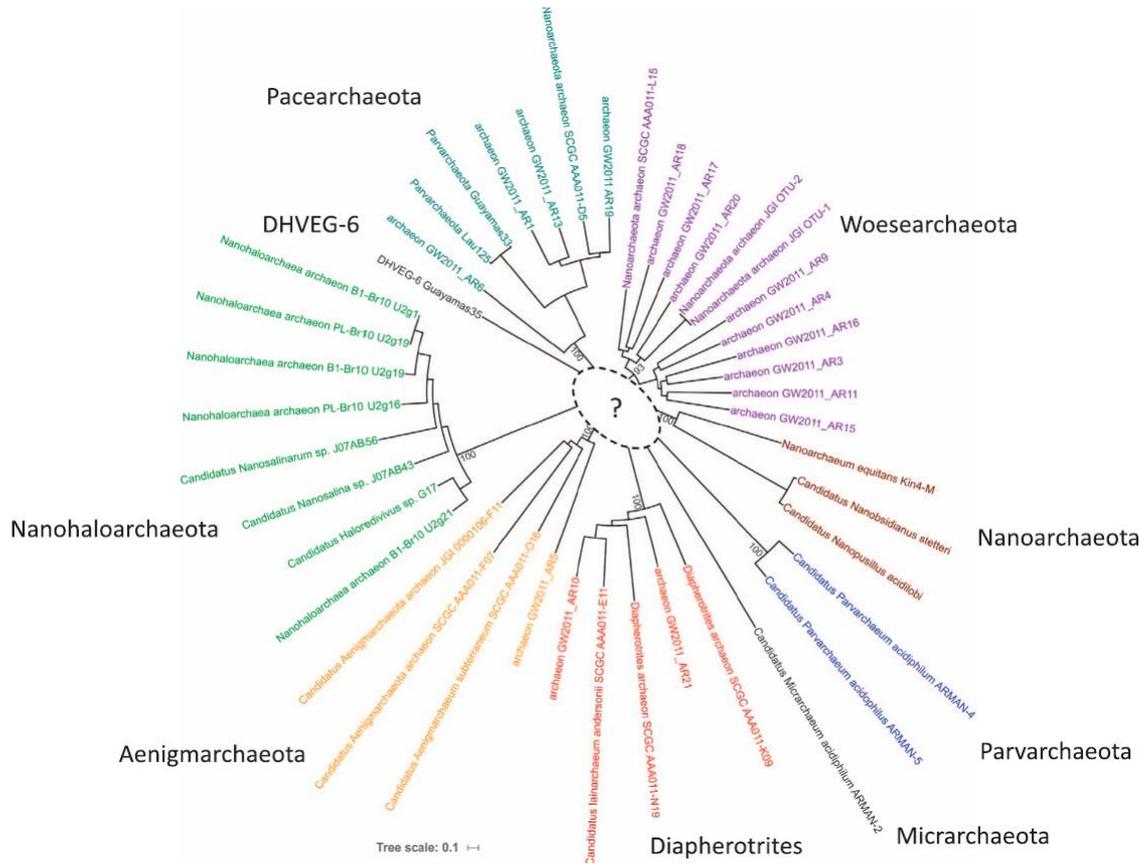
Abbreviation: ND, not determined. Estimates of genome and cell size were taken from the literature when available.

Adam *et al.*, 2017, ISME J.

Evolution d'Archées

DPANN superphylum : une réalité ou un artéfact?

→ Très grande diversité avec au moins sept clades



→ Question clé: constituent ils un clade monophylétique et où sont ils branchés dans la phylogénie d'Archées?

→ La monophylie n'a pas toujours été retrouvée :

- Nanoarchées (groupe sœur de Thermococcales)
- Nanohaloarchaeota (groupent avec les Haloarchées)

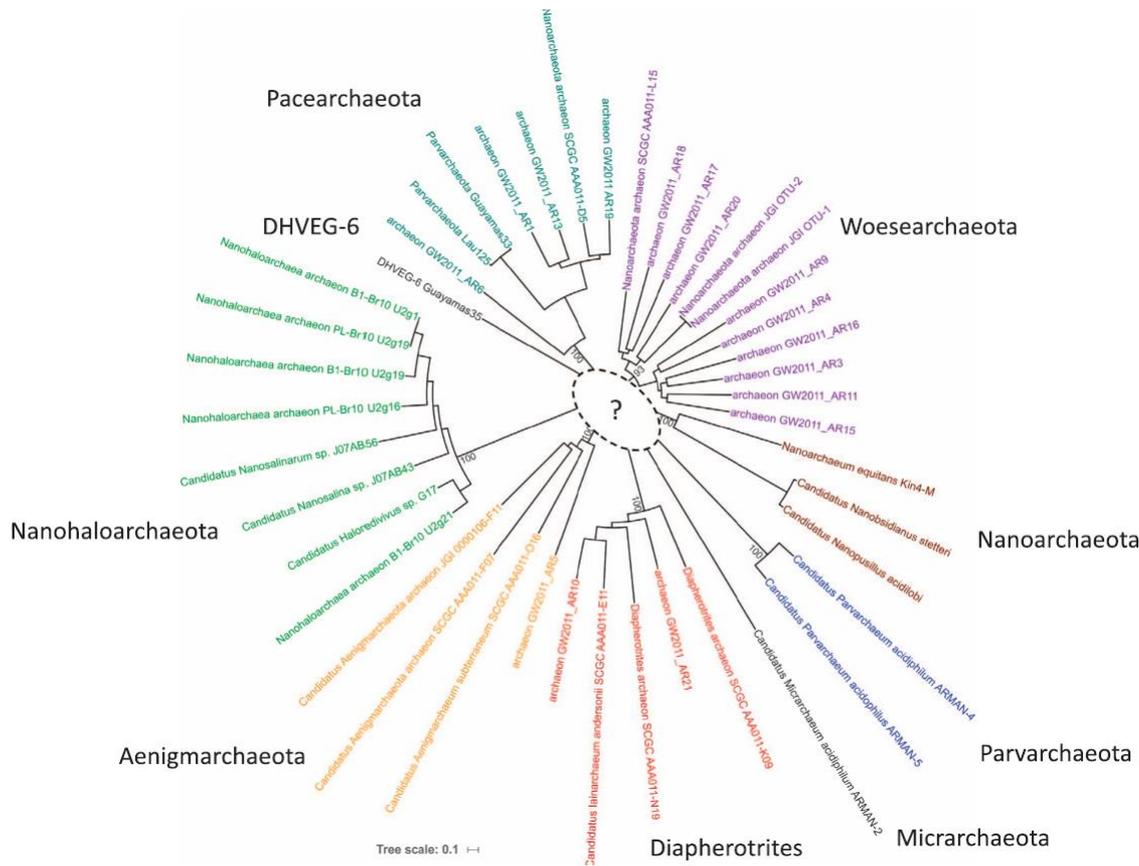
→ Mais biais dans la composition en AA des protéines?

Adam et al., 2017, ISME J.

Evolution d'Archées

DPANN superphylum : une réalité ou un artéfact?

→ Très grande diversité avec au moins sept clades



→ Comment les Nanoarchées ont évolué pour s'adapter à l'interaction directe avec les cellules hôtes ?

→ Comment cette interaction a modifié la physiologie et le génome de l'hôte ?

Isolation des couples Nanoarchée-Hôte nécessaire

Adam et al., 2017, ISME J.

Evolution d'Archées

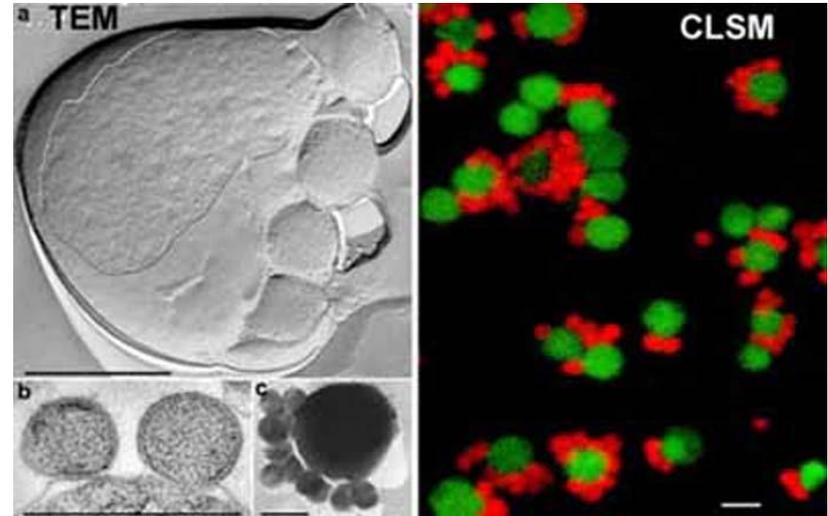
2002: isolation d'une nanoarchée: *Nanoarchaeum equitans* (« riding the fire sphere »)

A new phylum of Archaea represented by a nanosized hyperthermophilic symbiont

Harald Huber*, Michael J. Hohn*, Reinhard Rachel*, Tanja Fuchs*†, Verena C. Wimmer‡ & Karl O. Stetter*

* Lehrstuhl für Mikrobiologie und Archaeenzentrum, Universität Regensburg, Universitätsstrasse 31, D-93053 Regensburg, Germany

† Max Planck Institute for Medical Research, Department of Cell Physiology, Jahnstrasse 29, 69120 Heidelberg, Germany



N. equitans:

-0,35-0,5 μM

-le plus petit génome d'archées connues, 500 kpb

-gènes fragmentés (tRNA, protéines), perte massive des capacités métaboliques

-peut être cultivé uniquement en co-culture avec le hôte *Ignicoccus hospitalis* (parasitisme)

-les séquences 16 rRNA sont uniques (pas d'amplification avec les amorces universelles!)

-un organisme primitif (« living fossil ») ou soumis à un taux d'évolution plus rapide?

Evolution d'Archées

Ignicoccus hospitalis, une archée à part:

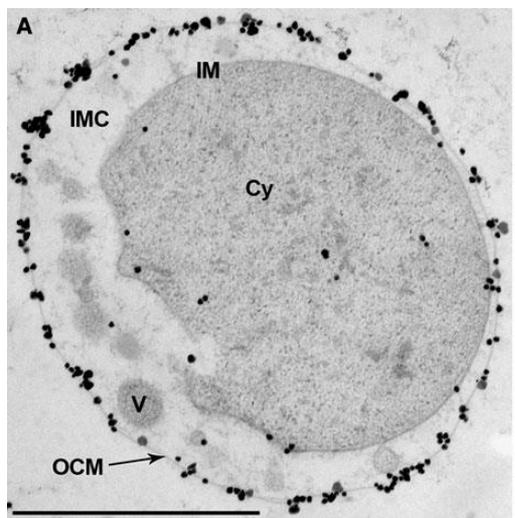
→ absence de S-layer ou pseudomuréine, la cellule est entouré par *deux* membranes

→ large espace entre les deux membranes (compartiment intermembranaire) contient des vésicules, métaboliquement actif (absence de périplasme)

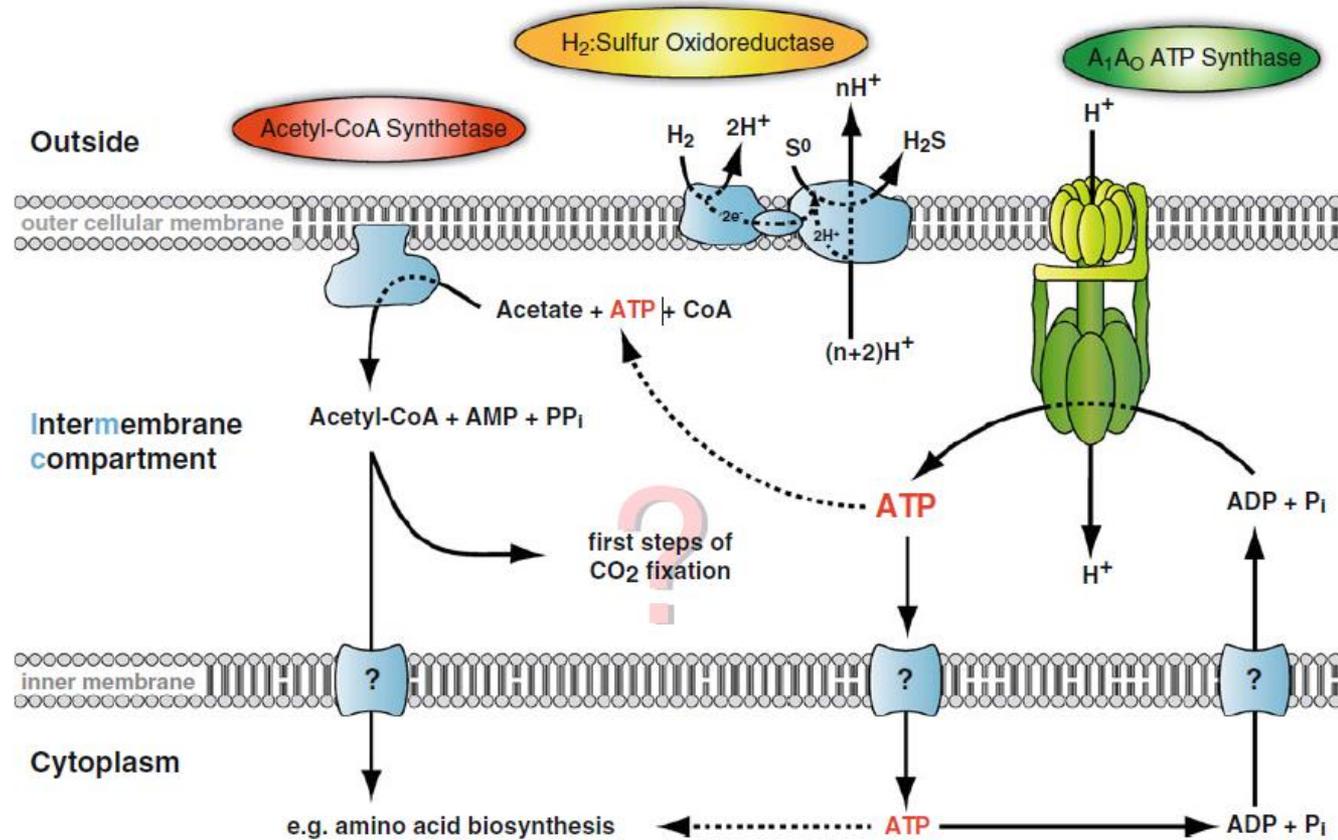


Huber et al., *Antonie van Leeuwenhoek* (2012) 102:203–219

Evolution d'Archées

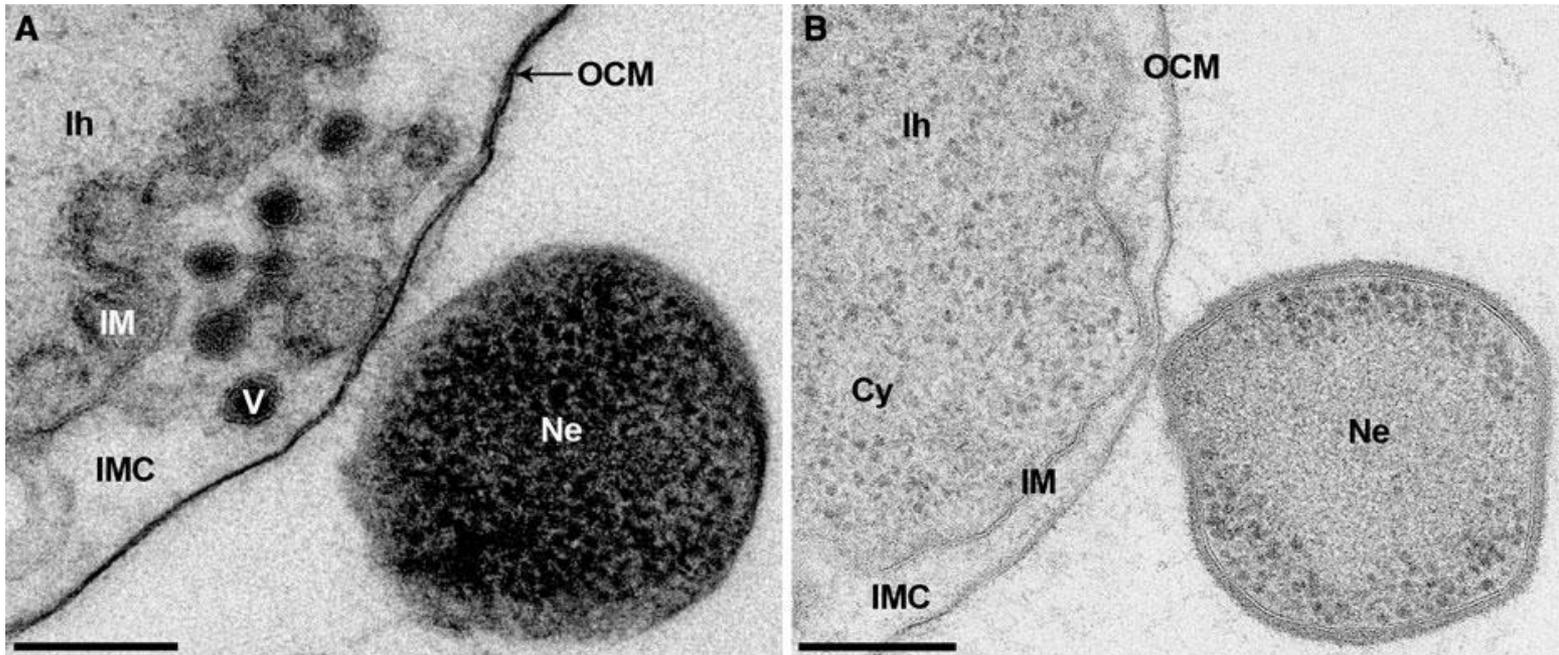


→ immuno électromicroscopie montre la localisation d'ATP synthase quasi exclusivement dans la membrane externe!



-c'est le premier organisme qui produit son ATP sur la membrane externe et dans le « periplasme »

Evolution d'Archées

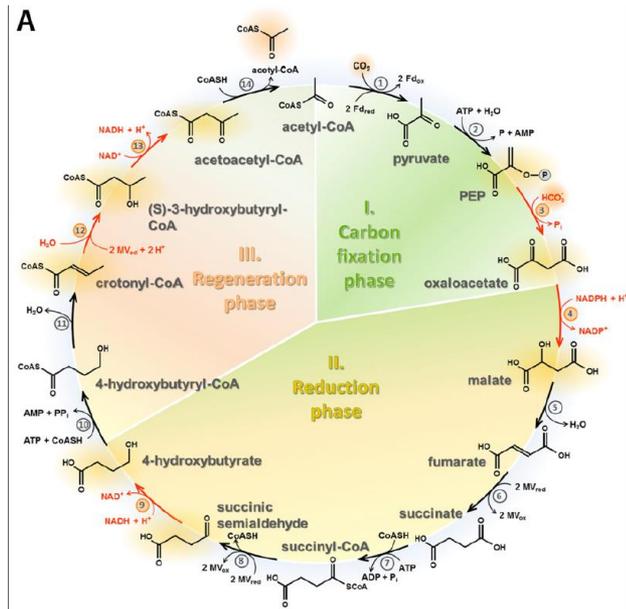


→ la production d'ATP sur la membrane externe permet à *N. equitans* de l'utiliser? (pas de transporteurs spécifiques détectés)

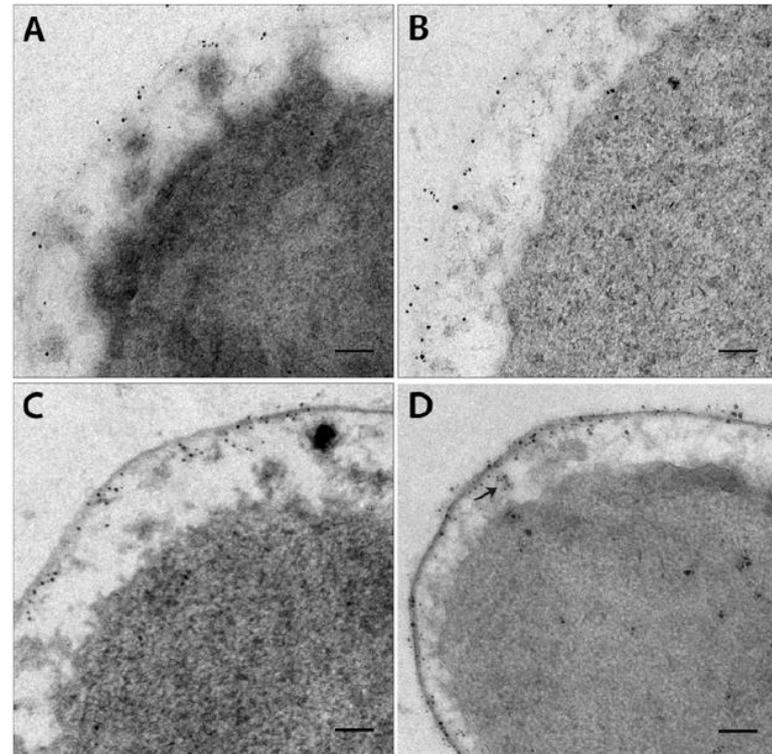
→ la surface du contact est petite, transport par les vésicules?

Evolution d'Archées

→ L'espace périplasmique est un compartiment métaboliquement actif ! = compartiment cytoplasmique périphérique



Assimilation du carbone

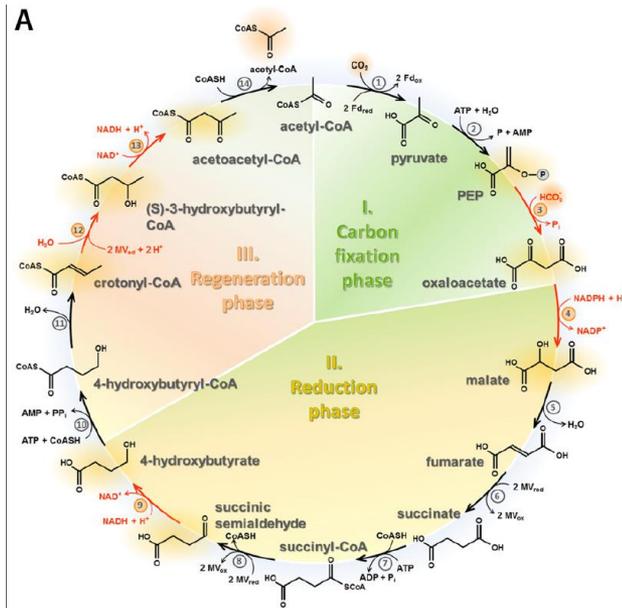


Marquage Immunogold (particules d'or)

Flechsler et al. 2021, PNAS

Evolution d'Archées

→ Pourquoi cette compartimentation spatio-fonctionnelle ?



Production des aldéhydes pouvant endommager ADN ou ARN

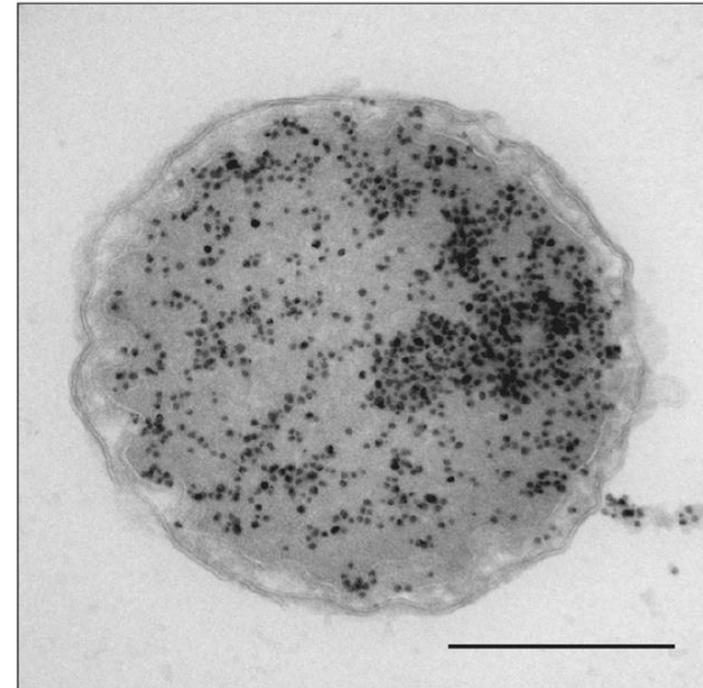
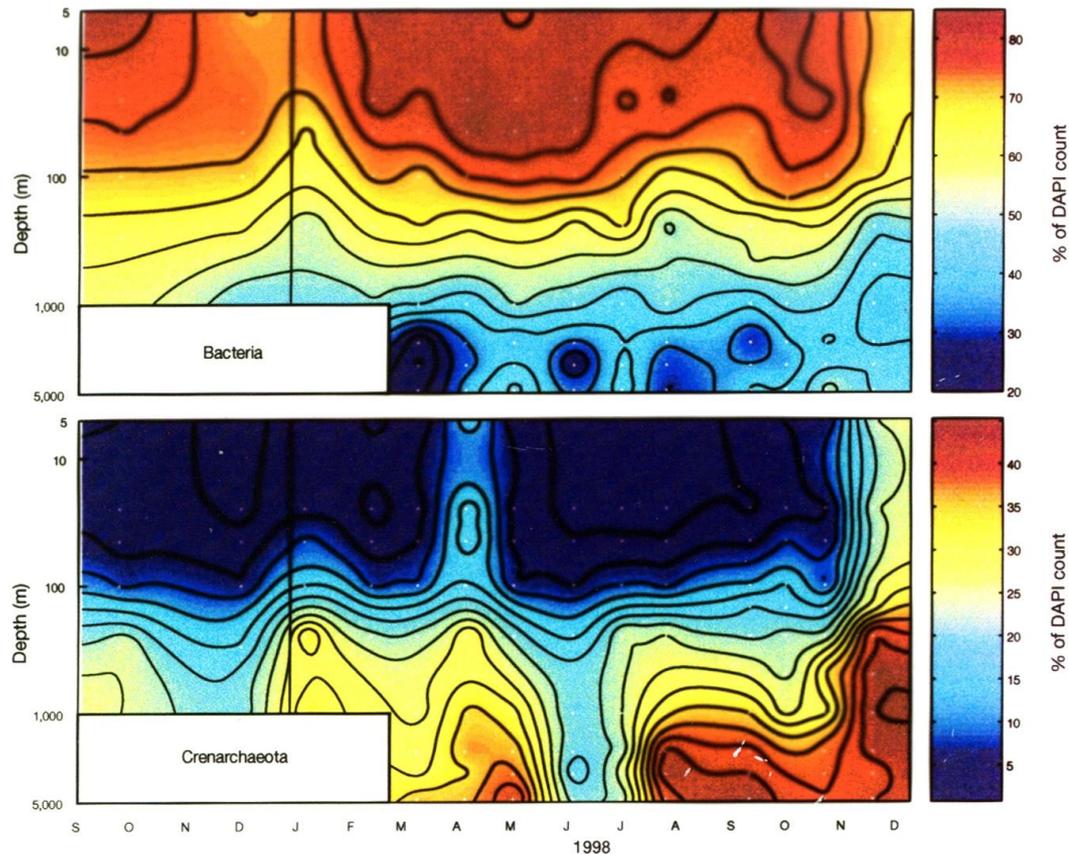


Fig. 3. Localization of DNA (cryosection). *I. hospitalis* cell is labeled with an anti-DNA antibody according to Tokuyasu (16). (Scale bar, 500 nm.)

Flechsler et al. 2021, PNAS

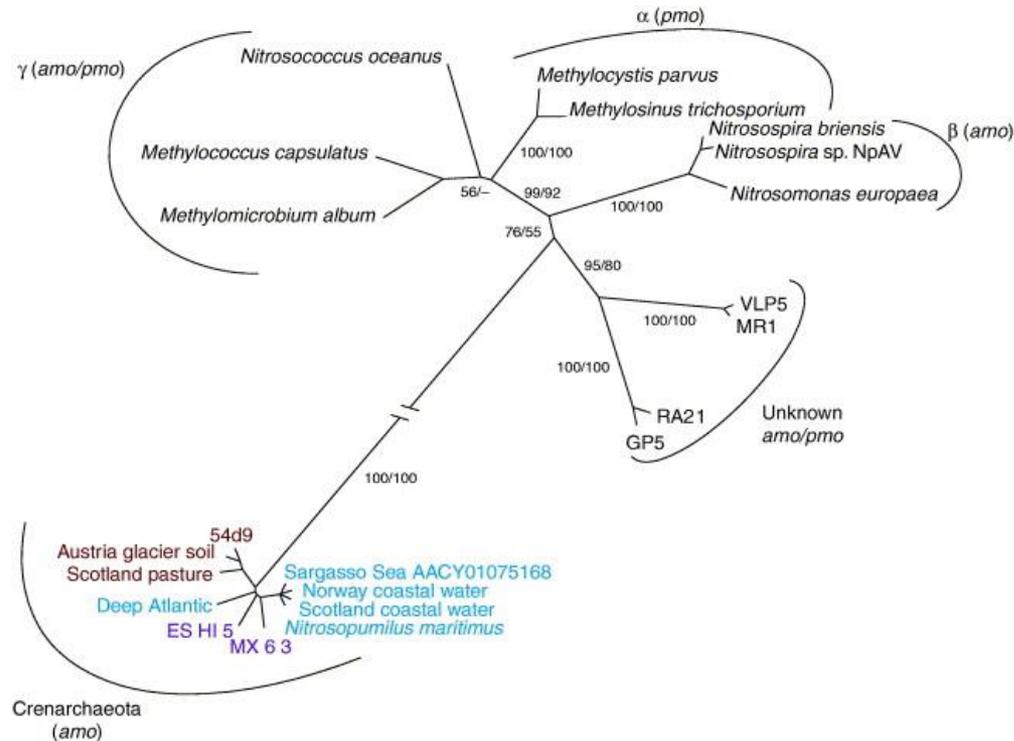
Questions de révision

3. Les archées ont longtemps été considérés comme des organismes extremophiles. Les études de biodiversité dans l'océan montrent que ces organismes constituent une grande partie de la biomasse dans cet environnement mésophile. Interprétez la figure ci-dessous tiré des travaux de Ed deLong. Où est ce que l'on trouve les Archées selon la figure ?



4. Les Archées du phylum Thaumarchaea sont des chimiolithotrophes. Qu'est ce que cela signifie?

5. Il y a quelques années, le laboratoire de C. Schleper a découvert les archées Thaumarchaeota qui oxydent l'ammonium en nitrate et a publié cette découverte dans Nature. L'arbre phylogénétique des gènes codant pour l'ammonium oxydase chez les Thaumarchées et ceux de bactéries est montré ci-dessous. Commentez cet arbre.



6. Au regard de la topologie de ces arbres phylogénétiques pouvez vous identifier le ou les arbres qui ont été générés grâce à un alignement des protéines universelles ? Justifiez.

Bactéries
Archées

