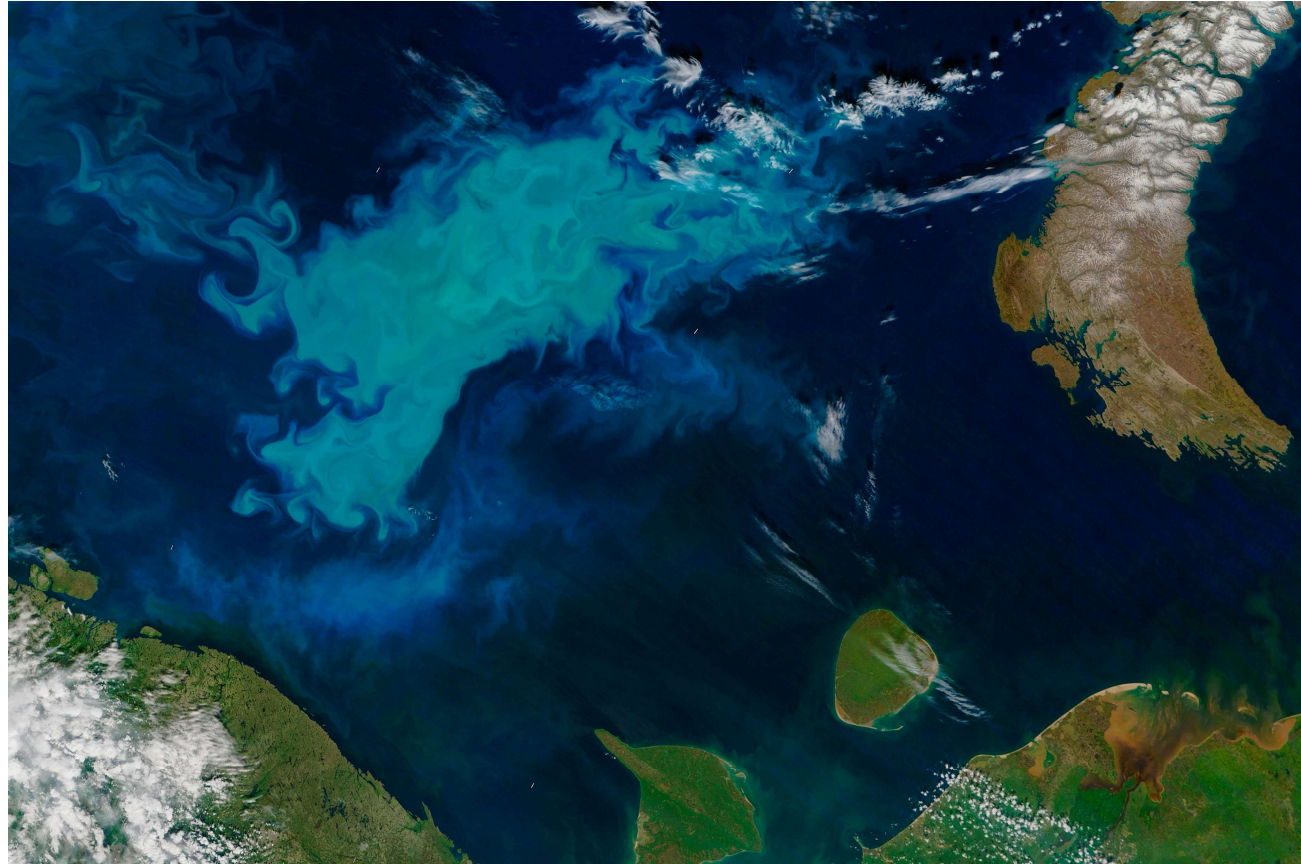


Le Minéral et le Vivant



©NASA Apollo 17 crew ; Harrison Schmitt ou Ron Evans



Mer de Barents, Juillet 2016 ©NASA image by Jeff Schmaltz and Joshua Stevens, [LANCE/EOSDIS Rapid Response](#).

Karim Benzerara

Institut de Minéralogie, Physique des Matériaux et Cosmochimie — CNRS, Sorbonne Université, MNHN

Jean-Paul Poirier

Le Minéral et le Vivant



Fayard

les chemins de la science



CAROLI LINNÆI

EQUITIS DE STELLA POLARI,

ARCHIATRI REGII, MED. & BOTAN. PROFESS. UPSAL.;

ACAD. UPSAL. HOLMENS. PETROPOL. BEROL. IMPER.

LOND. MONSPEL. TOLOS. FLORENT. SOC.

SYSTEMA NATURÆ

PER

REGNA TRIA NATURÆ,

SECUNDUM

CLASSES, ORDINES,
GENERA, SPECIES,

CUM

CHARACTERIBUS, DIFFERENTIIS.
SYNONYMIS, LOCIS.

TOMUS I.

EDITIO DECIMA, REFORMATA.

~~~~~  
*Cum Privilegio S:æ R:æ M:tis Sveciæ.*

~~~~~  
HOLMIÆ,

IMPENSIS DIRECT. LAURENTII SALVII,

1758.

« Naturalia sunt corpora cuncta Creatoris manu composita, corticem Telluris constituentia, in Regna Naturae tria divisa, quorum limites concurrunt in Lithophytis Lapides (...), nec viua, nec sentientia ».

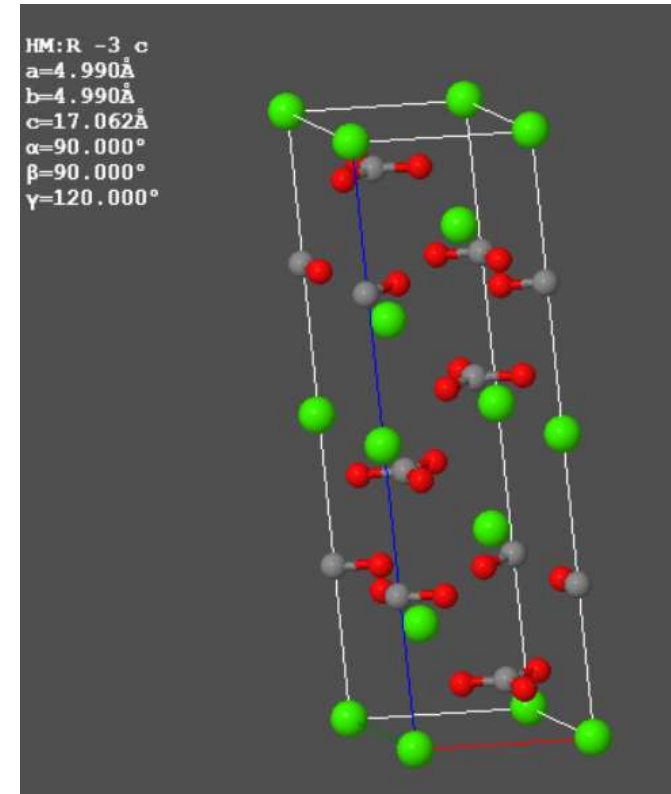
Un exercice développé dans le cadre du cycle 2: CP-CE1-CE2

Qu'est ce qui est un animal, un végétal, un minéral ?

				
un homme	de l'eau	un chien	un arbre	du sable
				
une tomate	des fleurs	une abeille	une poule	des cailloux
		https://edu1d.ac-toulouse.fr/blogs31/cm1-cm2-upe2a-benezet/2023/09/28/questionner-le-monde-animal-vegetal-mineral/		
un poisson	de l'herbe			

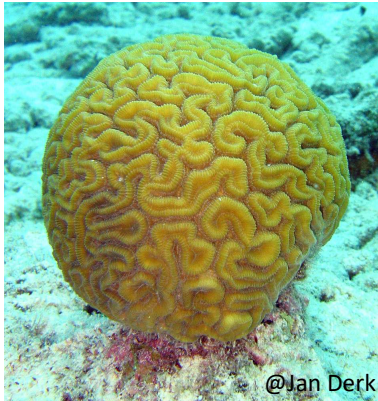
Qu'est ce qu'un minéral?

→ Espèce minérale



Calcite, CaCO_3

Tout cela est aussi du minéral...



@Jan Derk



@ Gary Lee Todd



@W. Röntgen



@APHOTOFAUNA



@APHOTOFAUNA



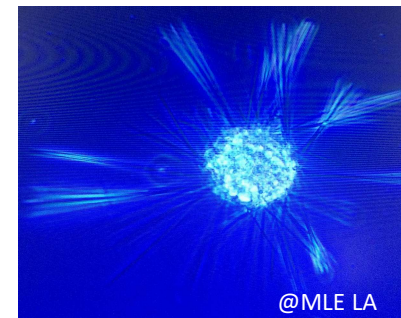
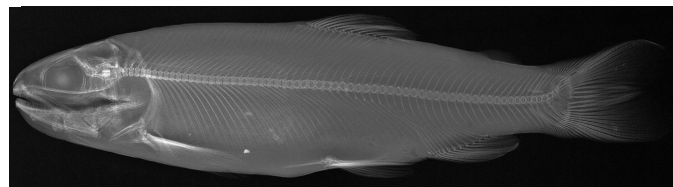
@Eugene Zelenko



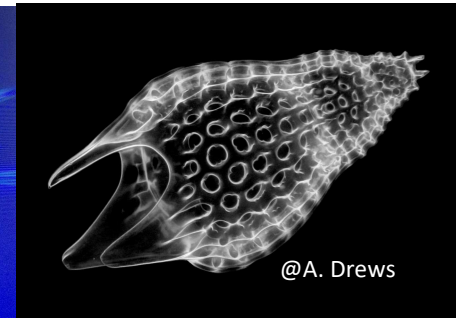
@herboristerie du Valmon



Sandra Raredon/Smithsonian Institution



@MLE LA



@A. Drews

Et pourtant, on ne sait pas bien...

Quand le vivant a commencé à contrôler la formation de minéraux ?

Comment s'effectue ce contrôle ?

Comment il s'est répandu au sein du vivant ?

Les stromatolites, des roches formées par le vivant



@P. Lopez-Garcia

Stromatolites fossiles (2.7 Ga)

Etude d'analogues actuels

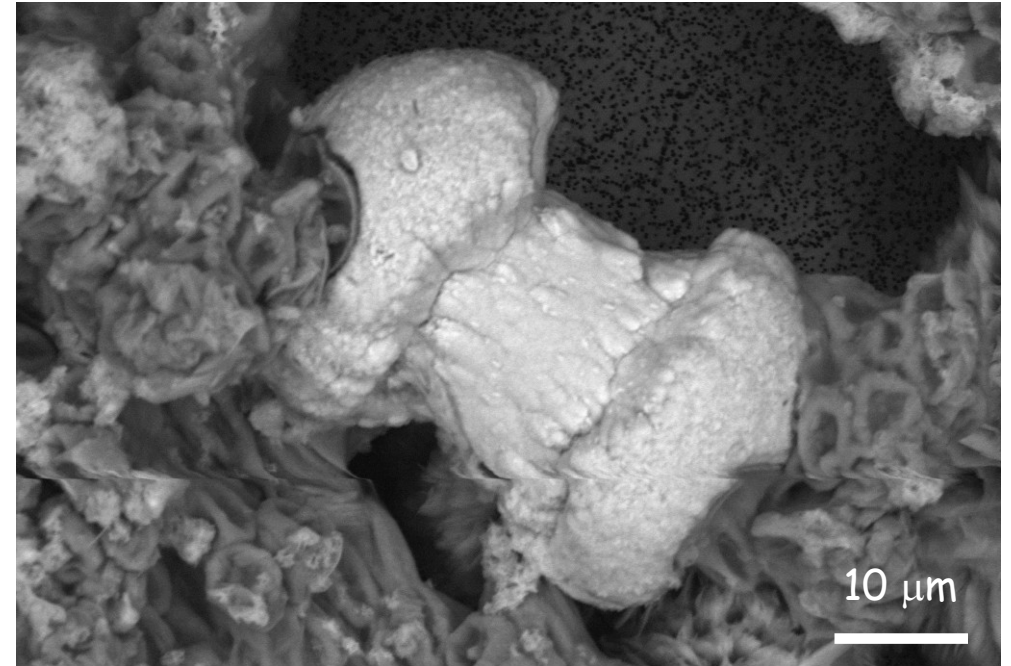


La Terre il y a 3,5 milliards d'années, vue d'artiste (Peter Sawyer)



Lac de cratère d'Alchichica (Mexico)

A la recherche des bactéries formant les stromatolites (Mexique)



Photosynthèse oxygénique : $6 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O} \xrightleftharpoons{\text{lux}} \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2$

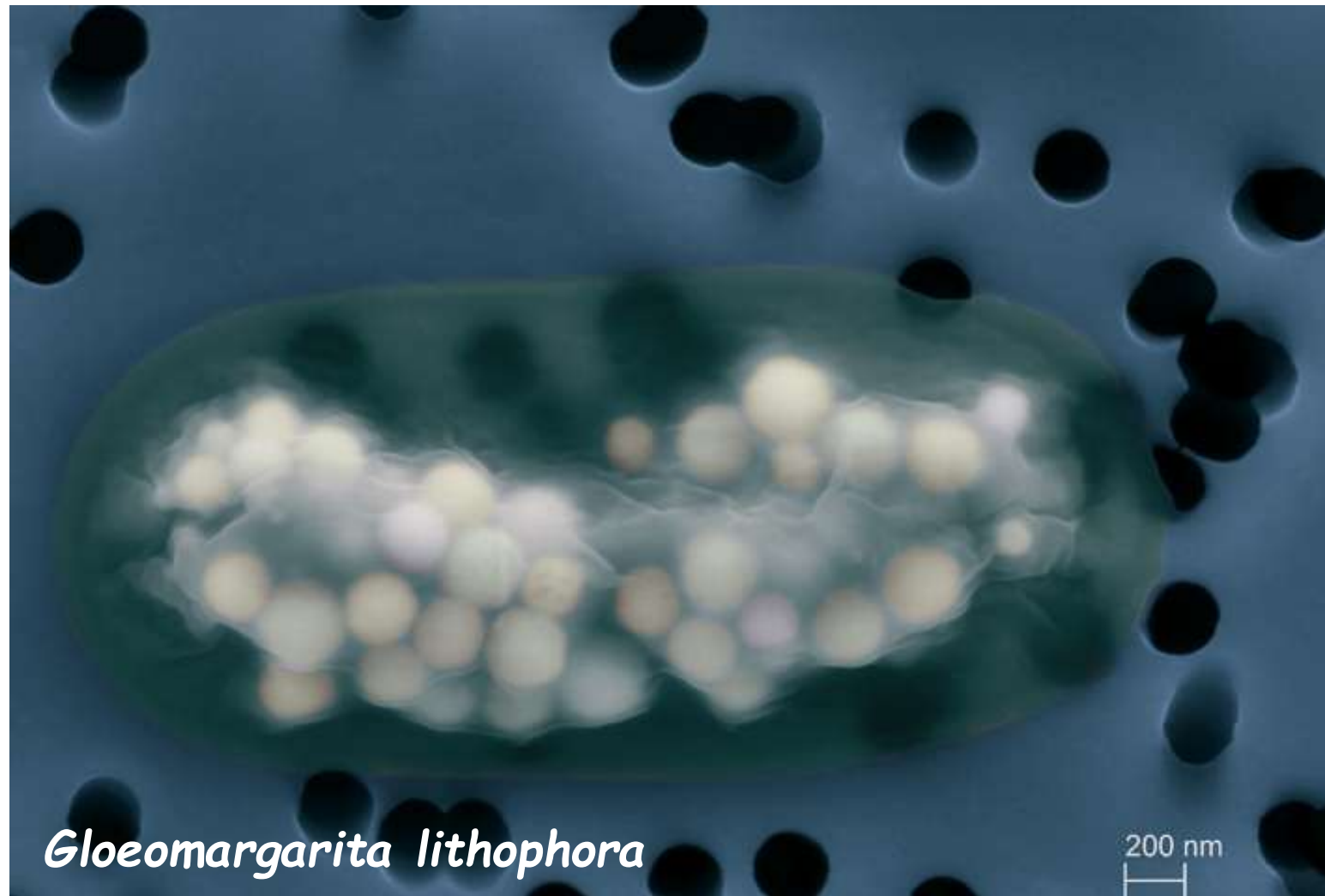
Des cyanobactéries forment des minéraux de carbonate de calcium extracellulairement



Culture au laboratoire des microorganismes formant les stromatolites du Mexique



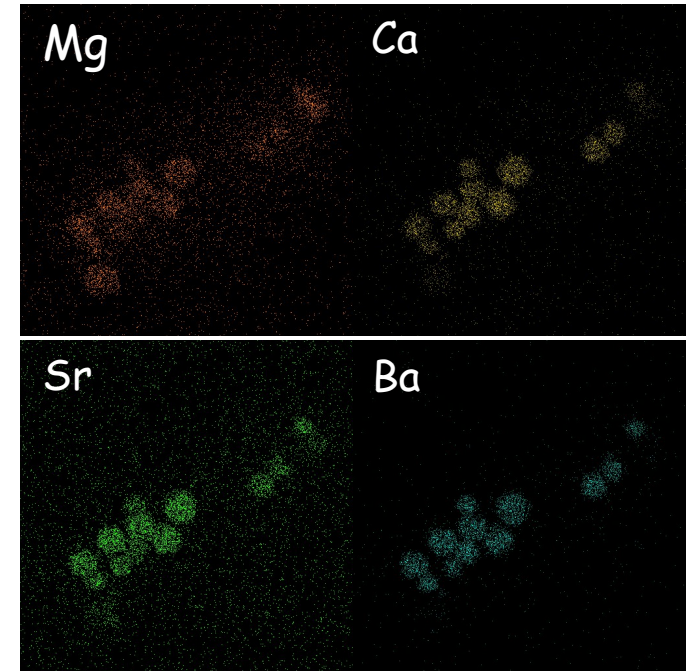
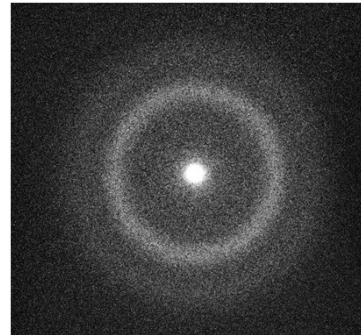
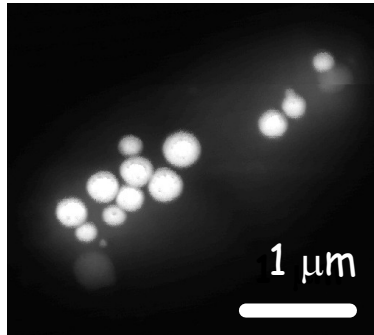
Découverte de cyanobactéries formant des phases minérales intracellulaires



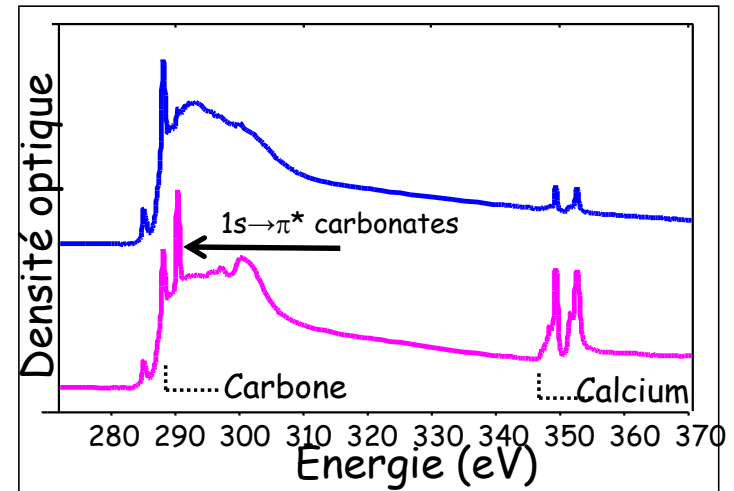
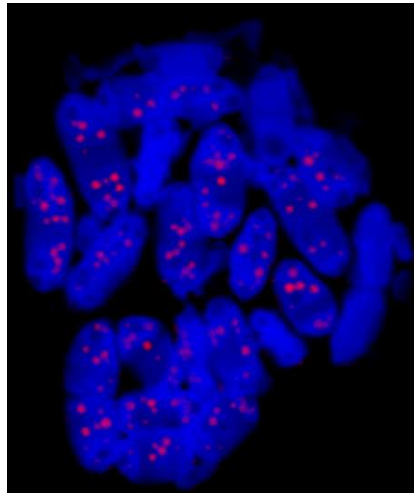
Couradeau et al (2012) Science

Caractérisation des minéraux intracellulaires

→ Phase amorphe contenant Mg, Ca, Sr and Ba



→ Ces minéraux sont des carbonates



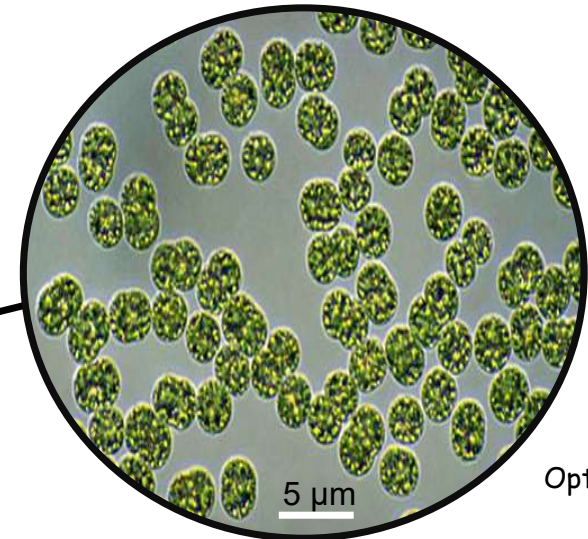
Pourquoi est-ce intéressant/surprenant ?

- ★ Différent du paradigme extracellulaire existant jusque là
- ★ Carbonate de calcium amorphe: phase très instable
→ Comment le vivant la stabilise?
- ★ Très peu de Ca dans une cellule normalement
→ Homéostasie du Ca particulière

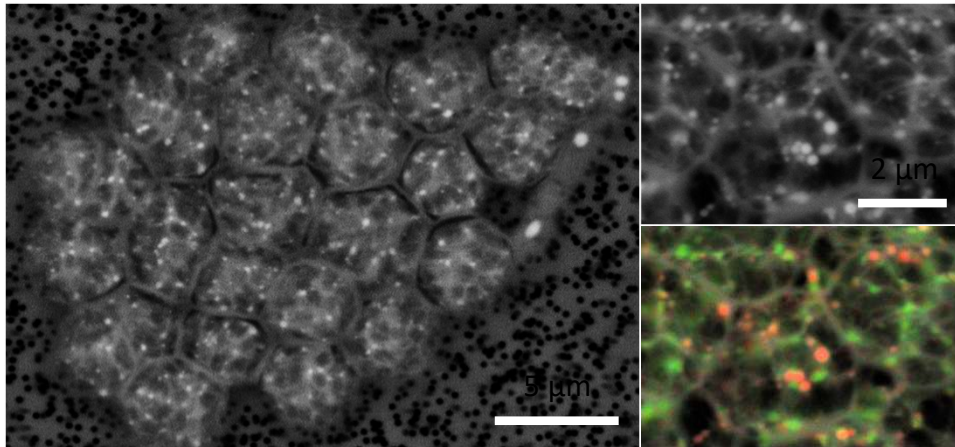
De plus, certaines de ces cyanobactéries forment des efflorescences toxiques



Maimee River, Ohio (USA) @David J.Ruck



Optical microscopy
@EPIDOR



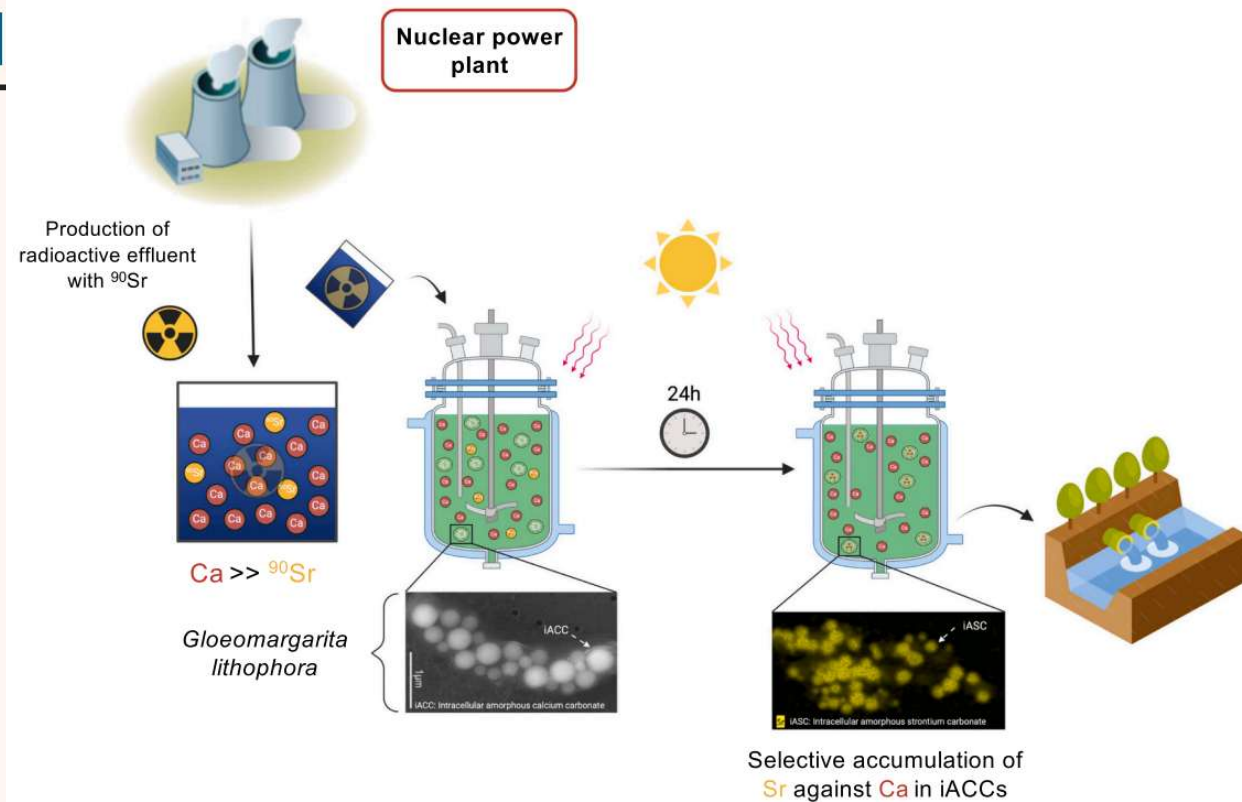
→ Quantité importante de calcium ?
→ Quel est le rôle biologique des carbonates ?

Gaetan et al. (2023) Env. Microbiol

Certaines de ces cyanobactéries pourraient aider à dépolluer le ^{90}Sr et les isotopes du radium



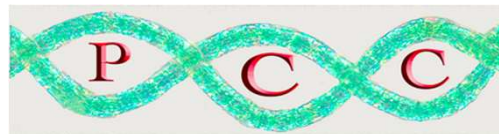
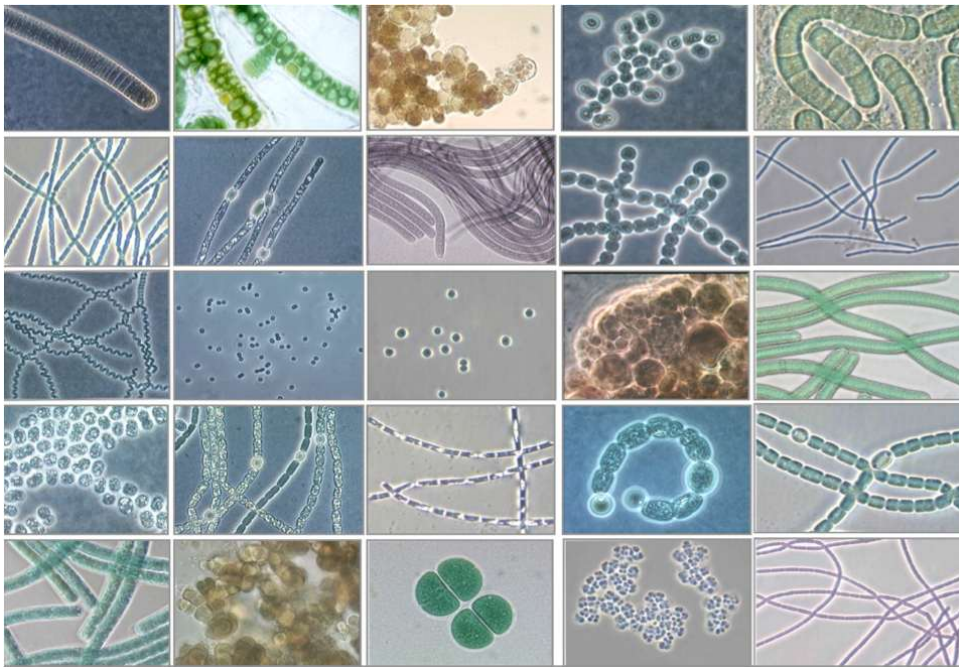
Mehta et al. (2019)



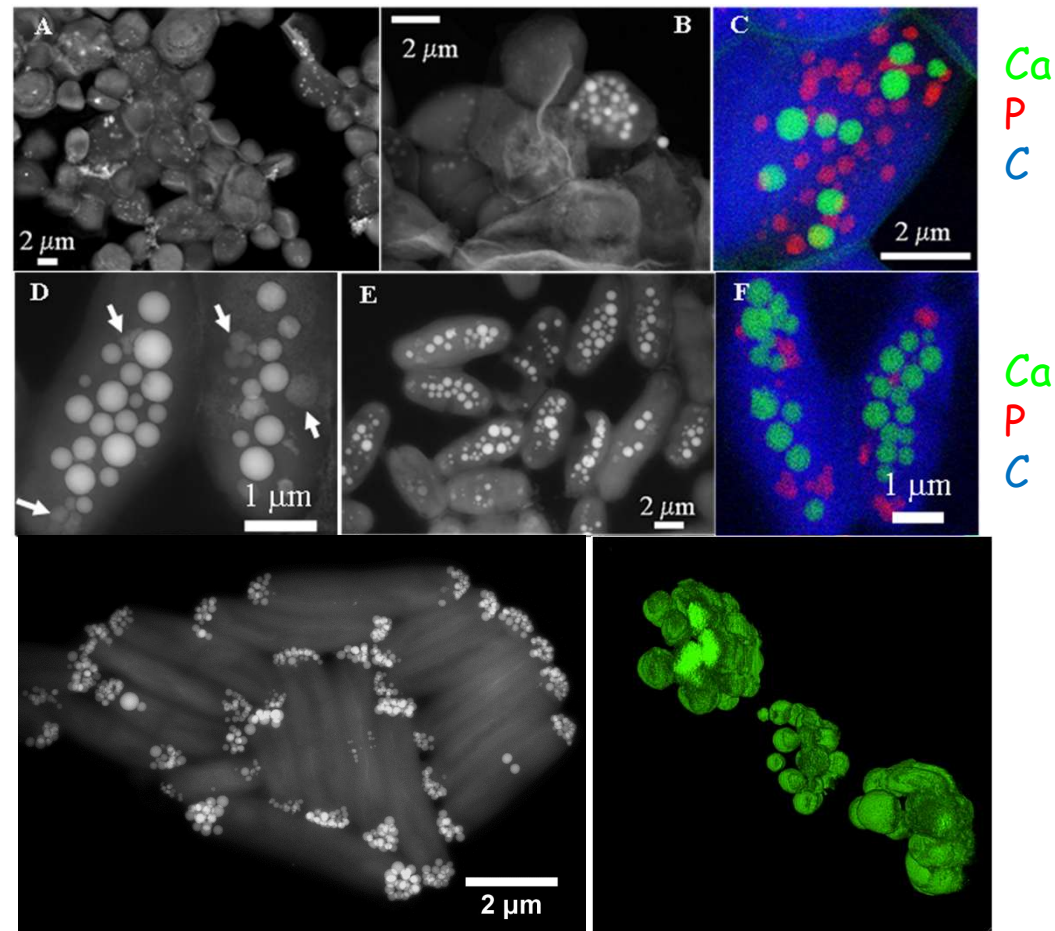
Pamart et al. (2025)

Combien de cyanobactéries forment des carbonates intracellulaires ?

→ Utilisation de la collection de cyanobactéries de l'Institut Pasteur (~750 souches)

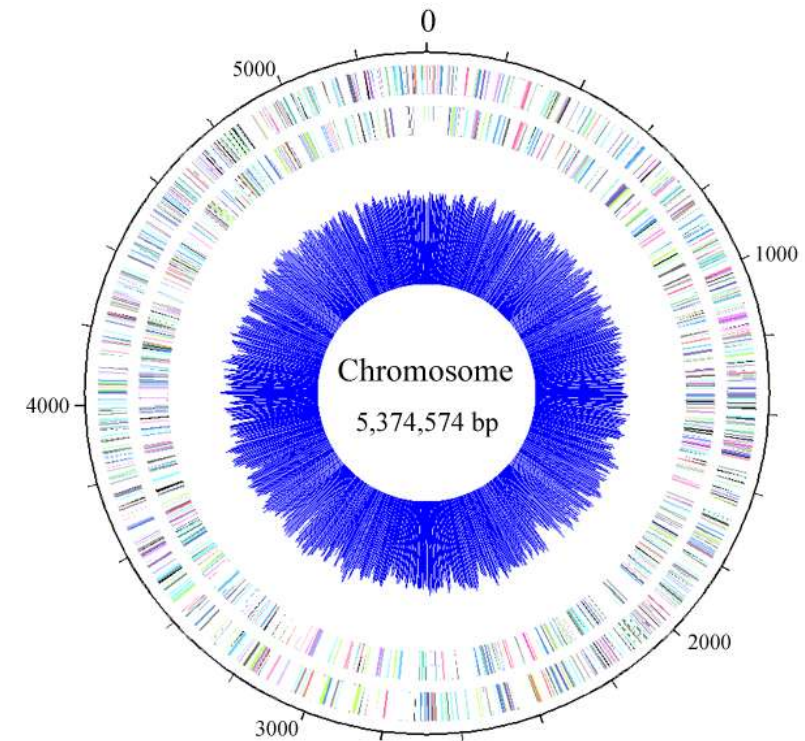
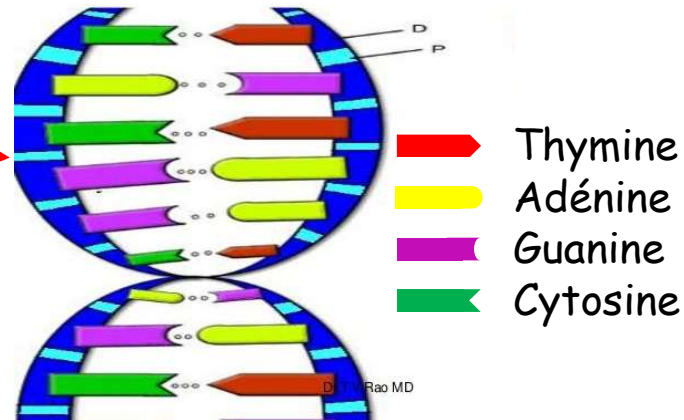
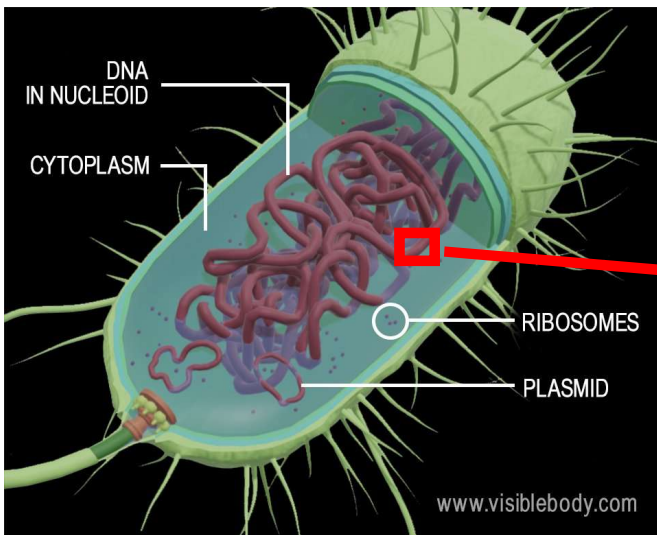


Sur 58 souches analysées, 8 formaient des carbonates intracellulaires (*iACC+*)



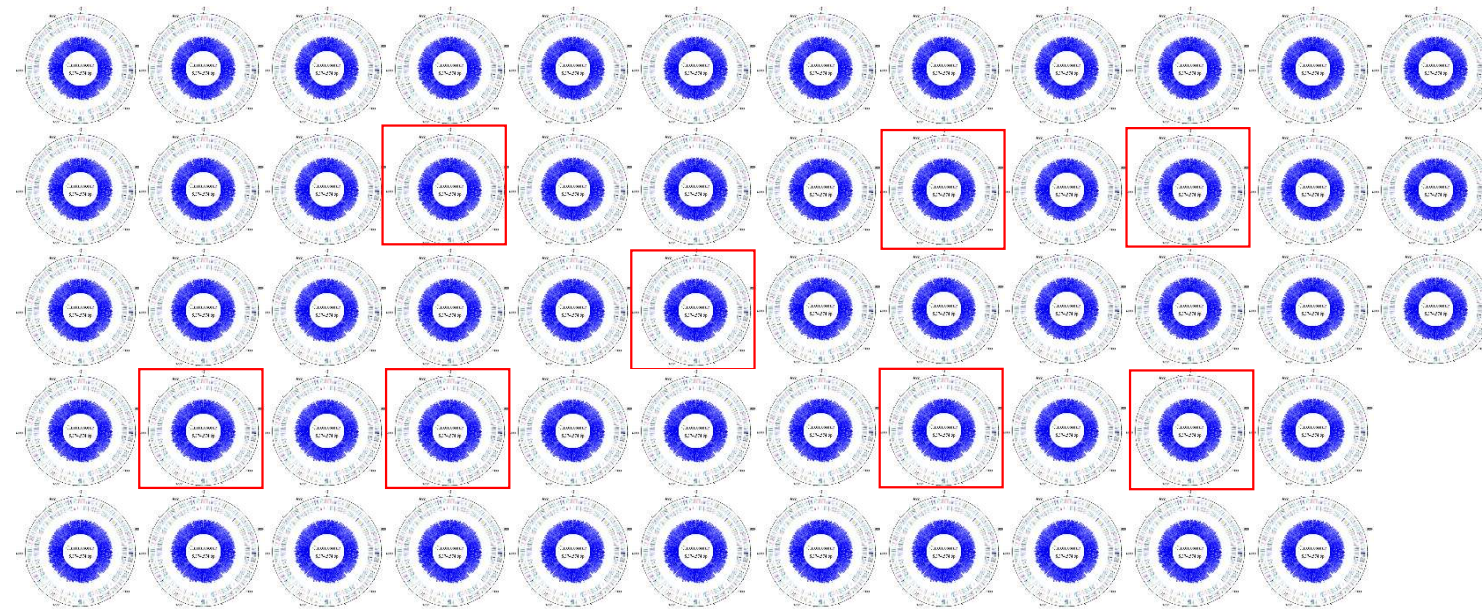
Benzerara et al. (2014) PNAS

Les séquences ADN des génomes des 58 souches sont connus



1 genome = quelques millions de paires de bases = quelques milliers de genes

Génomique comparative des 58 cyanobactéries analysées



 Cyanobactéries formant des carbonates intracellulaires (iACC+)

⇒ Un "gène" partagé par les 8 iACC⁺ et absent des 50 iACC⁻

= Nouveau gène / nouvelle protéine

Par la suite, nous avons trouvé ce gène dans 200 autres génomes répertoriés

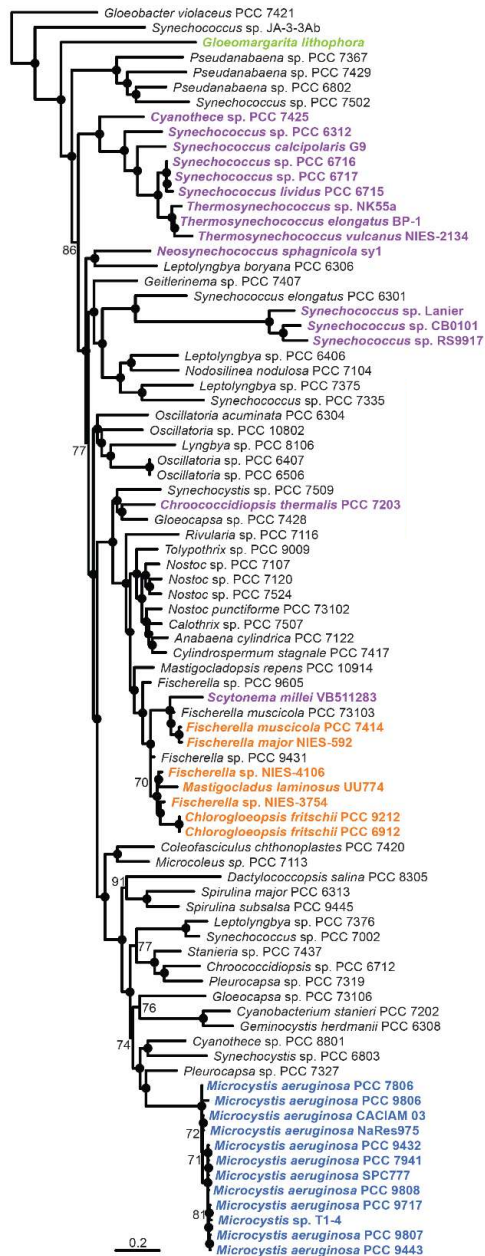


→ Grande diversité taxonomique et environnementale des cyanobactéries formant des carbonates intracellulaires

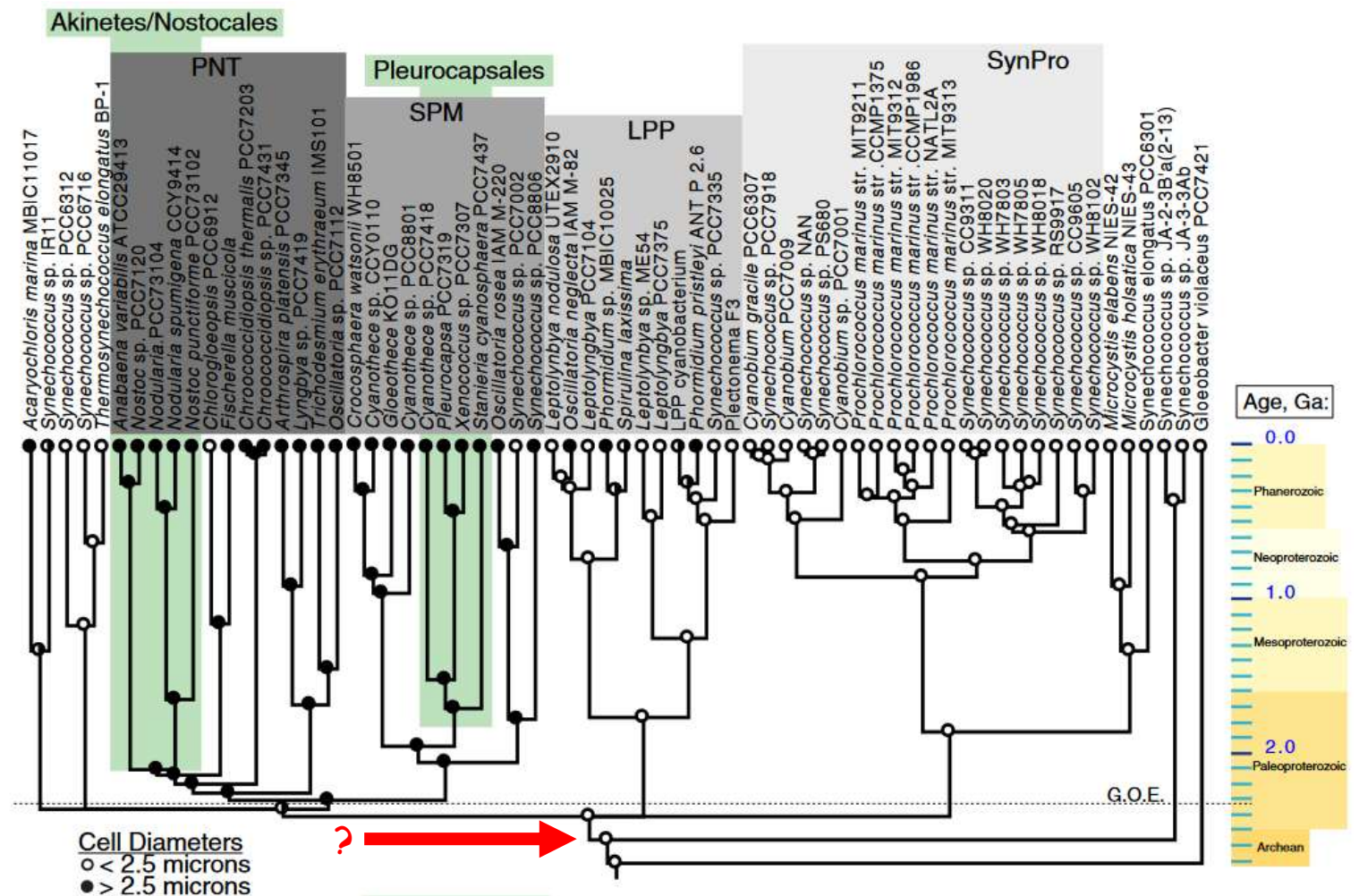
Benzerara et al. (2022) GBE

Ces cyanobactéries sont très répandues dans l'arbre phylogénétique des cyanobactéries

→ origine ancestrale de la formation intracellulaire des carbonates



Quand la biominéralisation intracellulaire de carbonate est-elle apparue?



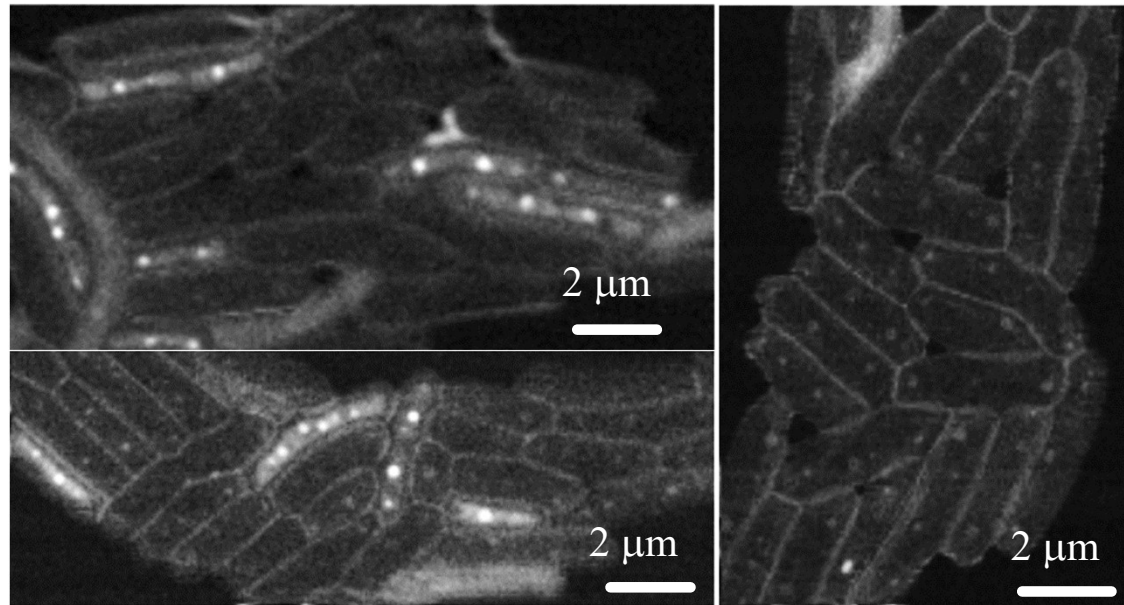
Vraisemblablement, plus de 2 milliards d'années ...

Quelle est la fonction du gène marqueur?

→ On peut créer des mutants par des approches de génétique

*e.g., insertion du gène dans *Synechococcus elongatus* PCC 7942, une cyanobactérie iACC-*

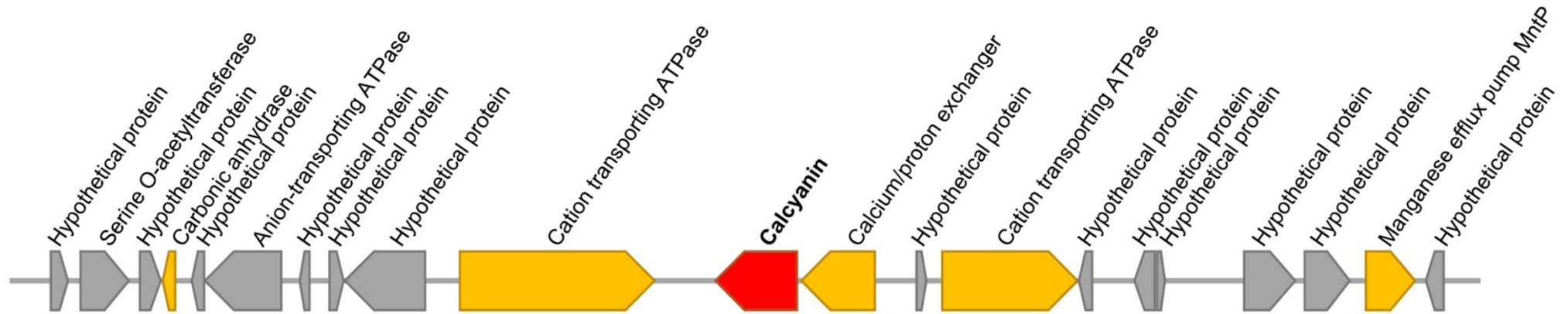
Cartographie du calcium par microscopie synchrotron



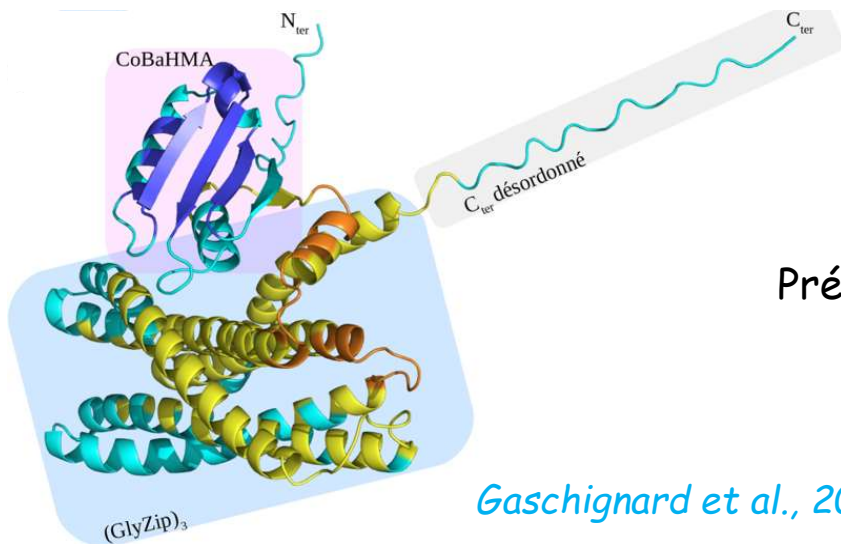
Benzerara et al. (2023) JESRP

Les mutants ont plus de calcium à l'intérieur des cellules, mais ils ne forment pas de carbonates intracellulaires

→ On analyse les gènes à côté de ce gène dans les génomes de cyanobactéries



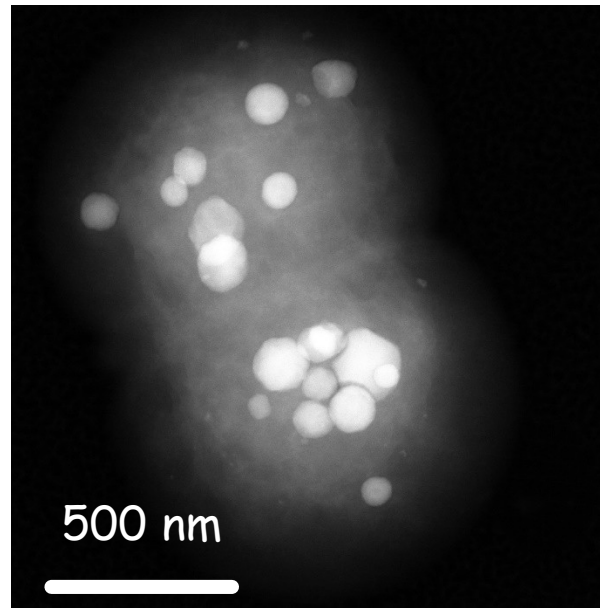
→ On analyse expérimentalement ou modélise théoriquement la structure de la protéine codée



Prédiction Alphafold2

Gaschignard et al., 2024

On a retrouvé le gène dans une bactérie qui n'est pas une cyanobactérie :
Methylococcus geothermalis



Benzerara et al., in prep

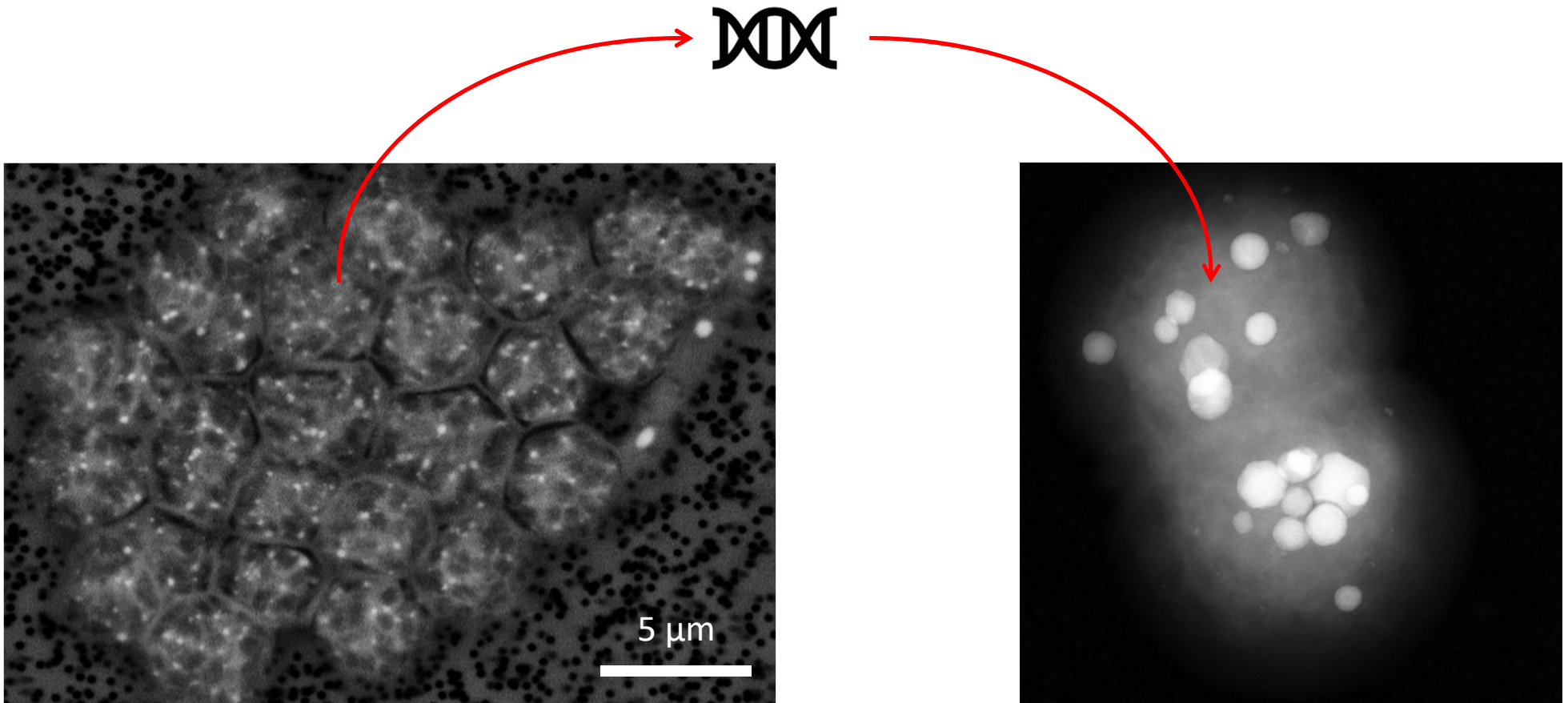
Alignement des séquences du gène marqueur pour plusieurs espèces de cyanobactéries et de *Methylococcus*

Autres cyanos
Microcystis

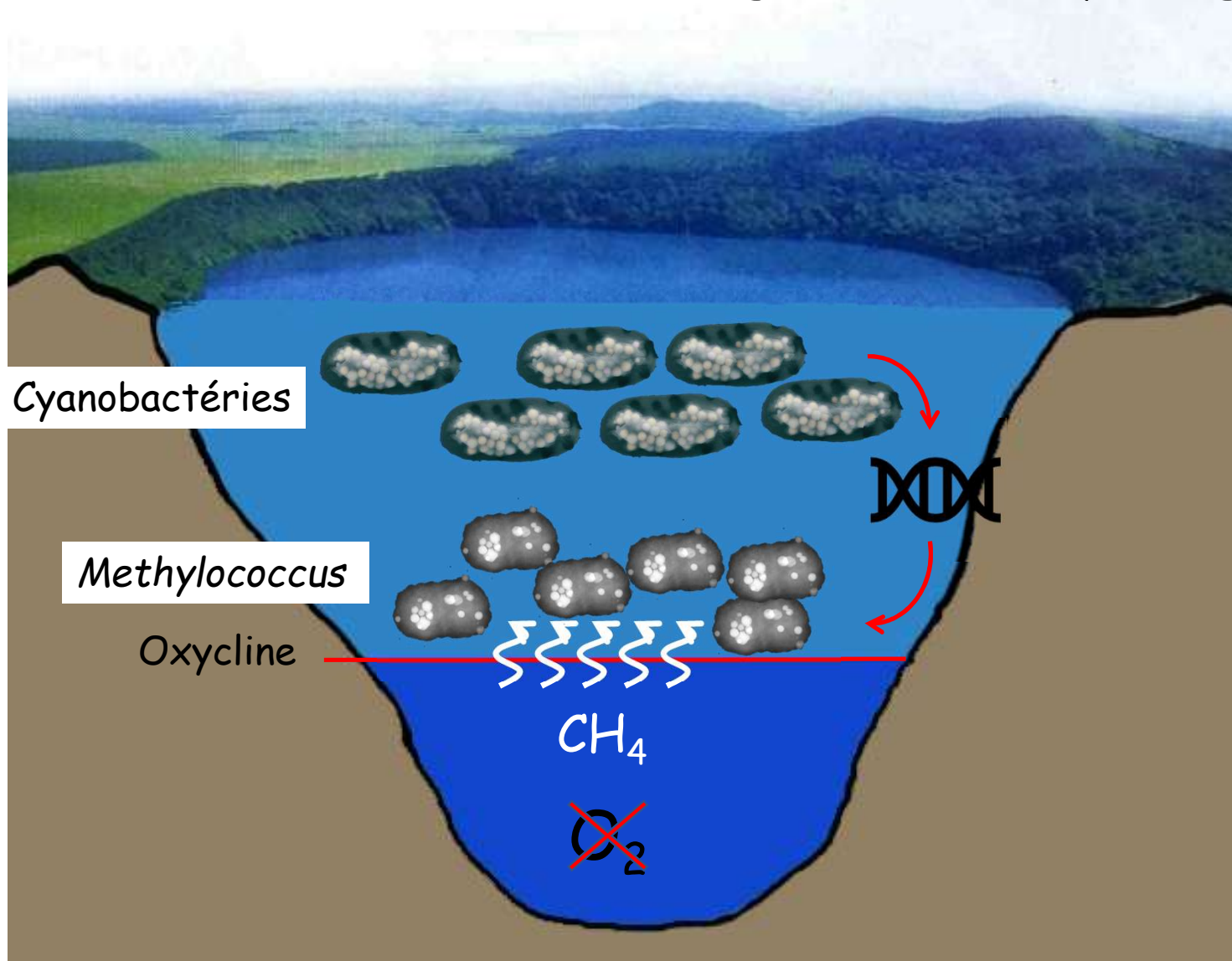
Methylococcaceae

	<i>Gloeomargarita lithophora</i> Alchichica-D10	QNLQTI GGGMVGLMGGHVVGSAI GGVAGAVT LGPVGAVIGA QVGGFTGRVMGAQLG-----[E]-----ETLAGGHPL
	<i>Synechococcus</i> sp. PCC_6312	DKAQDIGSFI VGGQVGDVVGGI AGAAVGGATIGPAGVVLGTQVGT FVGGVIGARVCVESMQTLKEHAFDLQTLCLDKTK
	<i>Fischerella</i> sp. NIES-4106	AKIQEFGGSLIGATVGETVGGTLGAVVAGIAMGPAGAI VGTQVGSVVGFTIGAQLGEDAMROVNQIT---QKNSETVSL
	<i>Microcystis aeruginosa</i> PCC_9443	VHPAAVGGAF LMSAGQVAGGMIGGAIGSAL-GPGGAVLGAQVGAFA GSTTGAKLGYDVTHEIFRPDP--DKAQAGANP
	<i>Candidatus Methylospira mobilis</i> WP_153247454.1	VDPAAGVGGAVAAMTAGEI IGGVIGGAIGAVA-GPGGVI LGAMGAFA GSTIGAKLGYDVTHEVVHPEADAPDASFNERV
	<i>Methylococcus capsulatus</i> WP_198322103.1	VDPAAGVGGAVAGLAAGEA IGGVIGGVVLGSVA-GPGGTVVGAQIGAFAGQTVGAKMGYDLTHEALHPEAADPQIDAGKHL
	<i>Methylococcus</i> sp. BF19-07_WP_198322103.1	VDPAAGVGGAVAGLAAGEA IGGVIGGVVLGSVA-GPGGTVVGAQIGAFAGQTVGAKMGYDLTHEALHPEAADPQIDAGKHL
	<i>Methylococcus</i> sp. 16-5_WP_266020907.1	VDPAAGVGGAVAGLAAGEA IGGVIGGVVLGSVA-GPGGTVVGAQIGAFAGQTVGAKMGYDLTHEAMHPEAAQPQAGSGKHL
	<i>Methylococcus geothermalis</i> WP_169602046.1	VDPAAGVGGAVAGSAAGEALGGVIGGVVLGSVA-GPGGTVVGAQIGAFAGQTVGAKMGYDLTHEAMHPEAADPQAGAGKRW
	<i>Methylococcus</i> sp. MDD2767319.1	VDPTAVGGAVAGLAAGEA IGGVIGGVVLGSVA-GPGGTLVGAQIGAFAGQTVGAKMGYDLTHVALHPQADAPKASPAKHL
	<i>Candidatus Methyllumidiphilus alinenensis</i> PZN76373.1	VDPAAGVGGAVAGMSAGEVVGAAIGGVVLGSLA-GPAGALIGAEAGGFAGLSIGAKLGYDVTHEAFHPEADADLSPKGRM

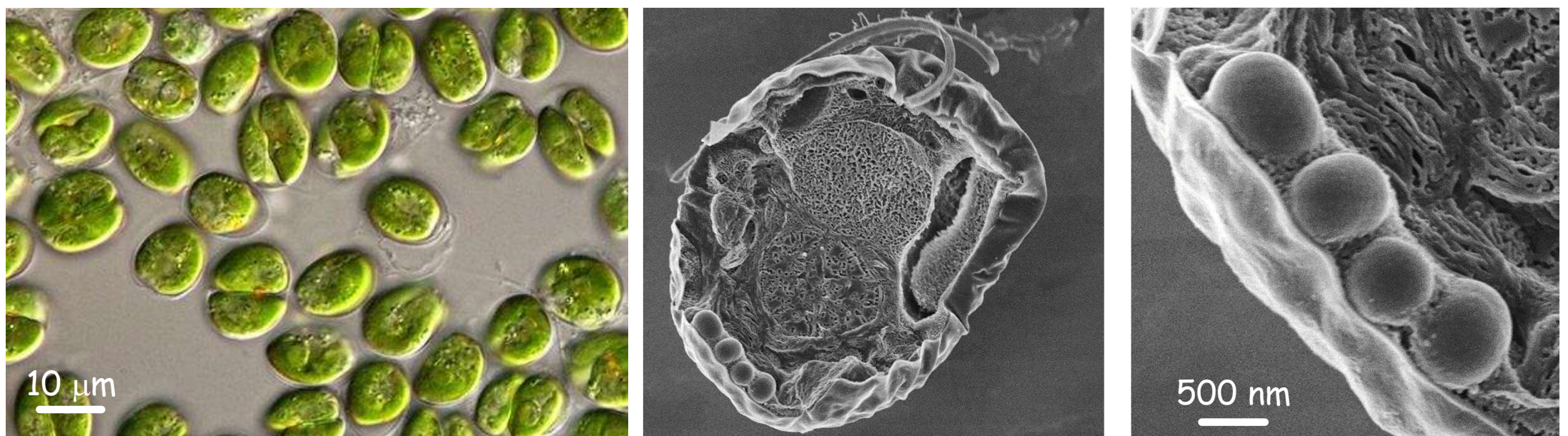
→ Le gène a été transmis « horizontalement » depuis certaines cyanobactéries (*Microcystis*) vers d'autres bactéries (*Methylococcus*)



Ceci a pu se faire dans un lac stratifié (e.g., lac Pavin), il y a longtemps...



Des algues unicellulaires forment aussi des carbonates intracellulaires



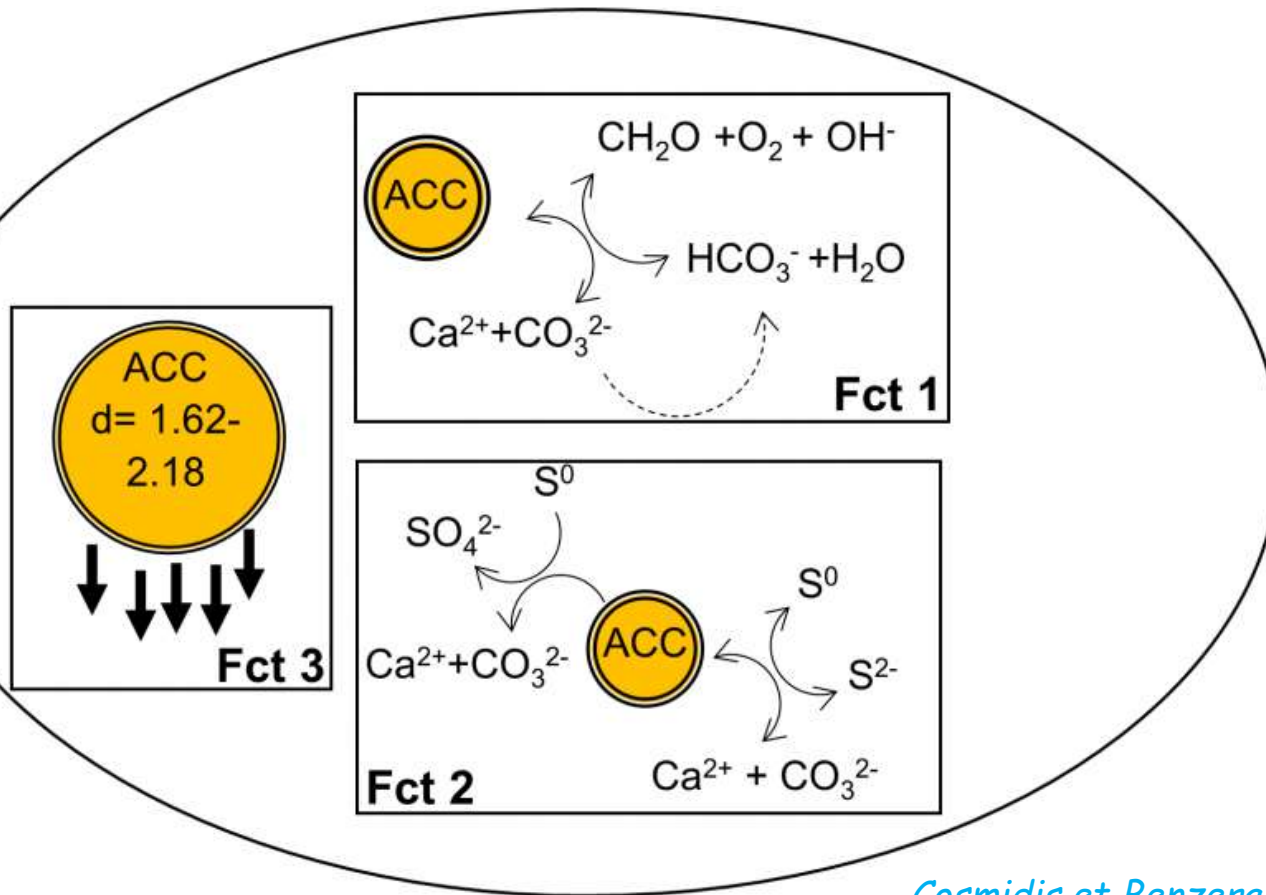
Comme toutes les plantes et algues, elles contiennent un compartiment intracellulaire nommé chloroplaste

= produit d'une symbiose avec une cyanobactérie il y a plus d'un milliard d'années

[illegible]

Transfert de la capacité de biominéralisation par endosymbiose?

A quoi les carbonates intracellulaires servent-ils aux bactéries ?



- 1: Réserve de carbone
- 2: Régulation du pH
- 3: Lest

Cosmidis et Benzerara (2022) CR Geoscience

Conclusions

- ★ Le vivant, y compris les bactéries, ont développé des stratégies pour former du minéral
- ★ Ces capacités se sont transmises de différentes manières au cours de l'évolution:
 - Par transmission parentale
 - Par échange de gènes entre espèces
 - Par symbioses
- ★ De nombreux processus microbiens de formation de minéraux par le vivant restent, très vraisemblablement, complètement inconnus
- ★ Leur étude requiert une approche fondamentalement interdisciplinaire entre biologie, sciences de la Terre, physique et chimie

Jean-Pierre Valet (1954-2024)



« Porteurs d'une aimantation rémanente très stable, les grains de magnétite biogénique sont probablement aussi impliqués dans l'aimantation rémanente de certains sédiments, en particulier loin de toute source volcanique. Toutefois, l'ampleur de leur contribution reste incertaine, faute de pouvoir distinguer clairement les grains biogéniques fossiles de ceux d'origine détritique. Ce domaine d'étude important devrait permettre de mieux caractériser l'origine des cristaux de magnétite dans les sédiments », 2014