

Fossilisation des microorganismes dans les roches primitives

Frances WESTALL

<https://doi.org/10.63133/scf.act-chem.2026.513.02>

La vie est apparue sur la Terre il y a plus de 4 milliards d'années (4,0 Ga), mais ses origines et ses premiers pas restent un mystère – la tectonique des plaques (avec un fort flux d'impacts d'astéroïdes et météorites) a détruit les roches les plus anciennes et profondément remanié celles datant d'après 4,0 Ga [1]. Si la vie a fait son apparition avant 4,0 Ga, existe-t-il des restes fossiles reconnaissables ?

Il s'avère que certaines roches datant de 3,5 Ga sont suffisamment bien préservées pour receler des traces de vie [2]. Bien sûr, ces anciennes traces sont difficilement identifiables et peuvent nécessiter l'utilisation d'instruments à haute résolution, parfois en recourant au rayonnement synchrotron. Les difficultés sont doubles : le niveau relativement primitif de la vie ancienne (avant l'évolution de la photosynthèse oxygénique) et le fait que les traces sont « noyées » dans une gangue de silice qui les a fossilisées. Pour comprendre le contexte de ces traces nous devons remonter à la Terre primitive, à ses océans et à ses terres clairsemées.

La Terre primitive ne ressemblait pas à la Terre actuelle [1]

En premier lieu, il n'y avait pas d'oxygène dans l'atmosphère et la composition et les caractéristiques des eaux étaient différentes. D'après ce que nous pouvons interpréter à partir des roches, il semble que les eaux aient été légèrement plus acides, avec un pH autour de 6-7.

La sursaturation des eaux en silice est critique pour la préservation des traces de vie les plus anciennes. Il y a plusieurs raisons à cela. Aujourd'hui, la silice dissoute est utilisée par des organismes tels les diatomées et les radiolaires pour construire leurs frustules ; l'eau de mer est alors sous-saturée en silice dissoute ($> 1\ 000$ ppm H_4SiO_4 au Précambrien [3], $\sim 6,1$ ppm aujourd'hui [4]). Ces organismes sont apparus beaucoup plus tard, vers 750 millions d'années (Ma) pour les radiolaires [5] et vers 240 Ma pour les diatomées [6]. La silice des océans anciens provient de la dissolution des roches exposées sur terre (la pluie était plutôt acide [7]), ainsi que de la croûte où les roches sont altérées par les fluides hydrothermaux et les effluents enrichis en silice des sources hydrothermales. En même temps, les sédiments au fond de la mer (volcaniques) se sont altérés au contact des eaux, libérant ainsi de la silice.

Le rôle de la silice dans la fossilisation des microorganismes

Ce sont des organismes à corps mous, sans exosquelette. Il est vrai qu'une grande partie des organismes se dégradent avant même d'être fossilisés. Cependant, des expériences en laboratoire ont démontré qu'ils peuvent être fossilisés [8]. Être

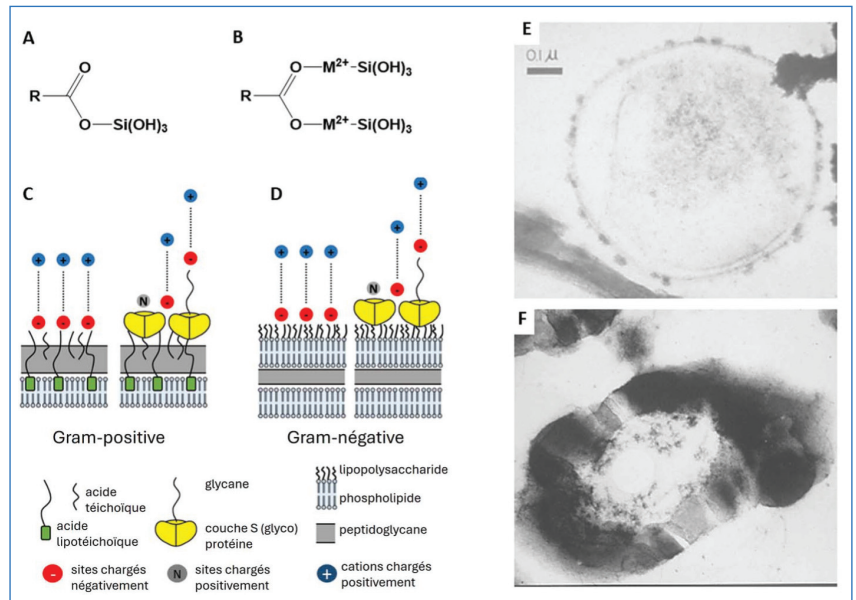


Figure 1 - Fossilisation des microorganismes. (A) Fixation de la silice directement à une molécule de carboxyle et (B) par l'intermédiaire d'un pontage cationique. (C,D) Structures des parois des bactéries Gram-positives et Gram-négatives (d'après [10]). (E,F) Fossilisation expérimentale de bactéries (coupes minces de microorganismes observées en microscopie à transmission) montrant l'amorce de fixation de la silice à la paroi (points sombres, E) et l'encroûtement total de la paroi (F).

fossilisé signifie ici encroûté par un minéral ; outre la silice, on trouve également des carbonates, des phosphates, des oxydes de fer, etc.). Des cations (par exemple Si, Ca, ou Fe) en solution sont attirés par des groupes fonctionnels des molécules, comme des carbonyles ou des phosphoryles, présentes dans la membrane des microorganismes (figure 1). Parfois, la liaison entre la molécule organique et le cation est directe, parfois elle se fait à travers un pont : si la paroi d'un organisme est fortement chargée négativement, la silicification de celle-ci est compromise en raison de la répulsion électrostatique entre les ligands organiques et les espèces de silice chargées négativement. Pour ces surfaces de parois cellulaires chargées anioniquement, la silicification nécessite une forme de pontage cationique (par exemple *via* Fe^{3+} ou Al^{3+}) (figure 1) [9]. La structure de la paroi du microorganisme joue un rôle clé dans la fossilisation car les microorganismes dotés d'une paroi externe riche en peptidoglycane, tels que les bactéries Gram-positives, possèdent davantage de groupes fonctionnels capables d'attirer les cations que les bactéries Gram-négatives, dont la paroi est plus complexe, le peptidoglycane se trouvant entre deux couches de lipides moins riches en groupes fonctionnels [10,11]. Une fois les groupes fonctionnels fixés, la fossilisation procède de manière purement chimique jusqu'à entraîner la formation d'une croûte autour du microorganisme.

Afin de bien préserver la morphologie du microorganisme, il faut que le processus de fossilisation s'effectue rapidement. En effet, les restes d'un microorganisme peuvent être préservés

même sous une forme très dégradée jusqu'à ce qu'il ne subsiste que des restes organiques englobés dans une matrice minérale et que toute structure morphologique ait disparue. Ensuite, les fossiles et les sédiments encaissants doivent être lithifiés et préservés de toute destruction physique, par exemple entraînée par la tectonique des plaques. Les roches sont souvent recouvertes par des couches de roches plus jeunes, qui s'érodent graduellement pour enfin laisser affleurer les fossiles. Il faut « beaucoup de chance » pour que des restes fossiles datant de 3,5 milliards d'années (Ga) survivent jusqu'à aujourd'hui...

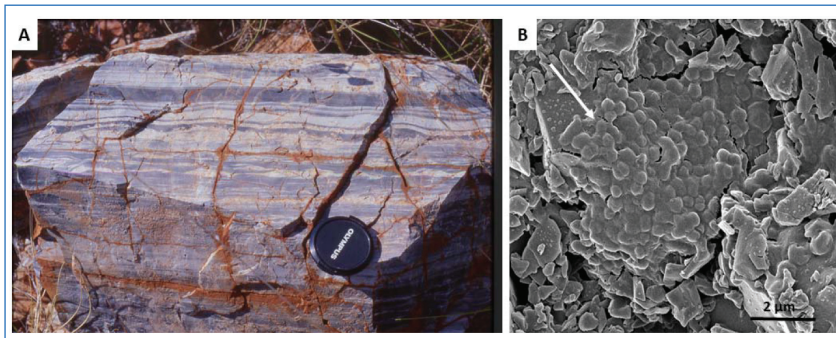


Figure 2 - Sédiments et microfossiles provenant du site de Kitty's Gap Chert, 3,45 Ga (Pilbara, Australie). (A) Sédiments côtiers montrant les différentes couches de grains volcaniques avec des structures sédimentaires entraînées par leur dépôt dans des eaux peu profondes et soumises aux marées. (B) Image d'une colonie de microorganismes fossilisés silicifiés dans les sédiments. (D'après [12,13]).

La silicification et les microorganismes fossiles

Les roches du Kitty's Gap Chert datant de 3,45 Ga trouvées dans le Pilbara au nord-ouest de l'Australie contiennent les plus anciennes cellules microbiennes connues à ce jour (figure 2).

Cette étude a duré 25 ans. Retrouvées en 2000 et publiées en 2006 [13], l'origine biologique (biogénicité) ou leur « grand âge » (syngénicité) ont été mis en cause et les observations originales ignorées. Les cellules sont très petites (< 1 µm) et, étant silicifiées, leur teneur en matière organique est très faible, sans parler de la forte dégradation des molécules organiques après presque 3,5 milliards d'années. Le métamorphisme entraîné par leur enfouissement sous plusieurs kilomètres de roches « plus jeunes », avant que l'érosion les fasse apparaître, il était primordial de pouvoir analyser les molécules organiques dans les cellules fossilisées *in situ* pour en démontrer la biogénicité et la syngénicité. Si les premières découvertes datent de 2000, il a fallu attendre vingt ans pour le développement d'un instrument suffisamment puissant et sensible pour réaliser ce genre d'analyse. Travaillant directement avec l'industrie qui a développé *Cluster SIMS* (« *Cluster Secondary Mass Spectrometry* », Ionoptika, Chandlers Ford, au Royaume Uni), nous avons pu détecter des molécules aromatiques (et quelques molécules aliphatiques) contenant les éléments essentiels à la vie, tels que le carbone, l'hydrogène, l'oxygène et l'azote [12]. Avant tout, nous avons constaté que la distribution de ces molécules était directement corrélée avec les colonies de cellules fossiles. De plus, ces molécules contiennent de la silice, une indication extrêmement forte que les molécules originales ont été silicifiées *in situ*, c'est-à-dire que les cellules ont été fossilisées de leur vivant, en même temps que les sédiments qui les enfouissaient.

Preuves de la biogénicité et de la syngénicité de ces cellules fossiles

Y-a-t-il d'autres informations à tirer ? Il s'avère que les microfossiles ont un lien spécifique avec les grains volcaniques dont sont composés les sédiments, ce qui suggère un possible lien métabolique, par exemple les microbes tireraient leur énergie d'un substrat volcanique (riche en nutriments). En ce cas, il est possible de supposer que les microbes originaux étaient des chimiotrophes, et plus précisément, des chimio-lithotrophes.

La découverte de ces cellules fossiles vieilles de 3,45 Ga pourrait présenter un intérêt pour la recherche de vie extraterrestre, sur Mars par exemple [12, 14]. Si la vie est apparue un jour sur Mars, elle aura été anaérobie et probablement chimiotrophe. D'un certain point de vue, l'environnement de la Terre primitive avait des similitudes avec l'environnement de Mars primitif et, par conséquent, les sédiments du Kitty's Gap Chert et ses « habitants microbiens » constituent des analogues de ce qui pourrait se trouver sur Mars. Les difficultés rencontrées pour établir la biogénicité et la syngénicité des microfossiles du Kitty's Gap donnent un aperçu des défis à relever pour détecter et interpréter les traces de vie martienne. Malheureusement, les instruments de mesure employés pour l'étude de Kitty's Gap ne sont pas disponibles sur Mars et la mission visant à ramener des échantillons de Mars a été arrêtée par le président Trump.

En principe, il serait souhaitable de pouvoir établir la présence de vie (passée ou présente) sur Mars avant que les humains ne contaminent la planète. Affaire à suivre...

- [1] F. Westall, A. Brack, A.G. Fairén, M.D. Schulte, *Front. Astron. Space Sci.*, **2023**, *9*, 1095701, <https://doi.org/10.3389/fspas.2022.1095701>
- [2] F. Westall, S. Xiao, *Precambrian Res.*, **2024**, *414*, 107589, <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2024.107589>
- [3] C.A. McCutchin, K.J. Edgar, C.L. Chen, P.M. Dove, *Biomacromolecules*, **2024**, *26*, p. 43-84, <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.4c00674>
- [4] R. Siever, Silica in the oceans: biological-geochemical interplay, In *Scientists on Gaia*, S.H. Schneider, P.J. Boston (eds), MIT Press, **1991**, p. 287-295.
- [5] M.M. Sandin, J. Renaudie, N. Suzuki, F. Not, *Curr. Biol.*, **2025**, *35*, p. 2524-38, <https://doi.org/10.1016/j.cub.2025.04.032>
- [6] W.H. Kooistra, L.K. Medlin, *Mol. Phylogenetics Evol.*, **1996**, *6*, p. 391-407, <https://doi.org/10.1006/mpev.1996.0088>
- [7] J.P. Grotzinger, J.F. Kasting, New constraints on Precambrian ocean composition, *J. Geol.*, **1993**, *101*, p. 235-43, <https://doi.org/10.1086/648218>
- [8] F. Orange *et al.*, *Geobiology*, **2009**, *7*, p. 403-418, <https://doi.org/10.1111/j.1472-4669.2009.00212.x>
- [9] K.O. Konhauser, B. Jones, V.R. Phoenix, G. Ferris, R.W. Renaut, *Ambio*, **2004**, *33*, p. 552-58, <https://doi.org/10.1579/0044-7447-33.8.552>
- [10] T.D. Hoffmann, B.J. Reeksting, S. Gebhard, *Microbiology*, **2021**, *167*, 001049, <https://doi.org/10.1099/mic.0.001049>
- [11] F. Westall, Influence of cell wall composition on the fossilisation of bacteria and the implications for the search for early life forms, In *Astronomical and Biochemical Origins and the Search for Life in the Universe*, C.B. Cosmovici, S. Bowyer, D. Werthimer (eds), Editrice Compositori, Bologna, **1997**, p. 491-504, <https://doi.org/10.1017/S0252921100015025>
- [12] F. Westall *et al.*, *Nat. Astron.*, **2025**, *9*, p. 1615-23, <https://doi.org/10.1038/s41550-025-02661-0>
- [13] F. Westall *et al.*, The 3.466 Ga "Kitty's Gap Chert", an early Archaean microbial ecosystem, In *Processes on the Early Earth*, W.U. Reimold, R. Gibson (eds), GeoScienceWorld, **2006**, *405*, p. 105-31, [https://doi.org/10.1130/2006.2405\(07\)](https://doi.org/10.1130/2006.2405(07))
- [14] F. Westall *et al.*, *Astrobiology*, **2015**, *15*, p. 998-1029, <https://doi.org/10.1089/ast.2015.1374>

Cette fiche a été préparée par **Frances WESTALL**, directrice de recherche émérite au CNRS au Centre de Biophysique Moléculaire d'Orléans (UPR CNRS 4301) dans le département Chimie, Imagerie et Exobiologie (frances.westall@cnrs.fr).

Les fiches « Un point sur » sont coordonnées par Jean-Pierre FOULON (jpfoulon@wanadoo.fr) et Julien LALANDE (jlalande@nordnet.fr). Elles sont en téléchargement libre sur www.lactualitechimique.org