



## Analyse d'ouvrages/Book review

**Revue critique de l'ouvrage *Aux origines de la vie : une nouvelle histoire de l'évolution*, A. El Albani, R. Macchiarelli, A. Meunier. Dunod, Paris (2016). 221 pp., 22,00 €**

## Version française

Ce livre présente non seulement les intrigantes trouvailles d'organismes complexes par le groupe d'El Albani au Gabon, mais également tout le contexte géologique et paléoenvironnemental, ainsi que l'histoire précoce de la Terre se focalisant sur l'Hadéen, l'Archéen et, surtout, le Protérozoïque. Il est rédigé dans un langage simple et il s'adresse donc à une large audience.

En plus d'un bref préambule, le livre comporte six chapitres, un épilogue, un glossaire, une abondante bibliographie et un index. Le préambule, qui présente l'approche pluridisciplinaire nécessaire pour étudier de tels fossiles, est intéressant, mais contient une petite erreur. Dans la discussion sur l'âge des roches, les auteurs écrivent (p. 7) : « Il a fallu attendre la découverte de la radioactivité naturelle par Rutherford au début du XX<sup>e</sup> siècle pour mesurer l'âge des roches par une méthode fiable, reproductible et précise. » Cette phrase télescope deux trouvailles distinctes et semble les attribuer toutes les deux (ou au moins la première) à Rutherford, mais, en réalité, c'est Becquerel qui a découvert la radioactivité, en 1896. La radioactivité est d'ailleurs mesurée en becquerels dans le Système international (SI). Rutherford a cependant découvert le phénomène de demi-vie des isotopes radioactifs, ce qui a effectivement permis la datation des roches anciennes.

Le premier chapitre décrit en détail la Terre archéenne. Imaginez une planète presque entièrement couverte d'eau, au ciel orangé, et dont la lune paraît bien plus grande que la nôtre, parce qu'elle est bien plus rapprochée. Ainsi, le clair de lune est bien plus brillant, et les marées bien plus hautes, que ceux que nous connaissons. Des lacs de lave en fusion sont formés par des éruptions volcaniques, et sont refroidis lentement par des pluies acides. Cette description, qui évoque une exoplanète de roman de science-fiction, c'est la Terre, à l'Archéen. En effet, il y a environ 3,5 Ga, la Lune était bien plus proche de la Terre (25 000 km) que maintenant (385 000 km) et lorsque les fossiles du Gabon se sont formés, bien plus tard (2,1 Ga), la Lune n'était encore qu'à 100 000 km de la Terre. Les océans étaient plus grands qu'aujourd'hui, alors les terres émergées étaient rares.

L'atmosphère était dépourvue d'oxygène moléculaire (O<sub>2</sub>), mais elle contenait de l'azote (N<sub>2</sub>), du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et du méthane (CH<sub>4</sub>). Ces deux derniers gaz ont dû donner la couleur orangée au ciel d'alors, et bien entendu, l'atmosphère de l'époque était irrespirable pour les humains, ainsi que pour la plupart des organismes vivants actuels. L'océan était plus salé que maintenant (60 g/L de sel, contre 35 aujourd'hui). On apprend également que l'intense pluie de météorites qui tomba sur la Terre à l'Hadéen (vers 3,8 Ga) ne s'est ralentie que graduellement, pour tomber à un faible niveau il y a 2,5 Ga ; les protocontinents qui existaient à cette époque conservent en effet des structures de failles concentriques, seuls vestiges d'impacts très puissants. Les auteurs expliquent également comment la tectonique des plaques était initialement dominée par des mouvements verticaux (sagduction), et que la transition vers la tectonique mieux connue, fondée surtout sur des mouvements plus horizontaux (mais plus ou moins obliques), s'est opérée graduellement, avec une situation intermédiaire datant d'environ 3,6 Ga.

Logiquement, le deuxième chapitre décrit la Terre au Protérozoïque. Il s'ouvre par une description de l'immense glaciation qui sévissait au début du Protérozoïque et qui est documentée, entre autres, par des diamirites glaciaires. Même les tropiques, vers 2,2 Ga, furent recouverts de glace ; c'est ce qu'on a appelé la « Terre boule de neige ». Cette glaciation fut causée par une diminution des gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub> et, dans une moindre mesure, CH<sub>4</sub>) qui avaient compensé la faible luminosité du soleil d'alors. Lorsque les volcans eurent rejeté suffisamment de CO<sub>2</sub>, cette glaciation prit fin. La vie survécut à cette glaciation, soit dans les glaces, soit dans des portions de l'océan qui n'auraient pas été forcément recouvertes entièrement de glace. Les auteurs décrivent également le *Great Oxidation Event* (GOE, qu'on peut traduire en français par « grand événement d'oxydation »), une brusque augmentation de la concentration d'oxygène moléculaire (O<sub>2</sub>) atmosphérique survenue il y a 2,4 Ga, et qui dura jusqu'à 2,1 Ga, période à laquelle cette concentration est retombée. Cette augmentation fut toutefois modeste ; elle passa de 100 000 fois moindre qu'aujourd'hui (pendant la plus grande partie de l'Archéen) à environ 3000 fois moins qu'aujourd'hui pendant le GOE. L'explication fournie mentionne brièvement la photosynthèse, directement productrice d'O<sub>2</sub>, mais également l'action combinée de volcans continentaux, qui

émettent des oxydes de soufre, et des bactéries sulfato-réductrices, qui transforment ces oxydes de soufre en hydrogène sulfuré et en oxygène moléculaire. Avec cette augmentation de la concentration de l'oxygène moléculaire atmosphérique, les *Banded Iron Formations* (BIF, ou « gisements de fer rubané ») deviennent plus rares, et les *Red Beds* (sédiments rouges) apparaissent. La couleur de ces derniers est due à des oxydes de fer (hématite et goëthite). L'ozone apparaît dans la haute atmosphère, ce qui a pu favoriser l'apparition de la vie sur les continents, en bloquant la lumière ultraviolette. Les perturbations biotiques engendrées par les dernières grandes météorites du *Late Heavy Bombardment* (LHB, ou « bombardement lourd tardif ») et l'histoire des continents, dont celle du premier supercontinent, Nuna-Columbia (1,9–1,3 Ga) sont ensuite décrites.

L'origine de la vie est traitée dans le chapitre trois. La théorie de la panspermie (origine extra-terrestre de la vie sur notre planète) et la chimie prébiotique y sont évoquées. Sur ce dernier point, après une présentation des expériences classiques d'Oparin et de Miller, on y apprend que les sources hydrothermales océaniques auraient pu produire des hydrocarbures par des processus abiotiques. L'hypothèse d'un « monde de l'ARN » ayant précédé la vie qui utilise l'ADN pour stocker l'information génétique y est également expliquée, ainsi que le débat concernant l'environnement des premières formes de vie (d'une température ou d'une salinité modérée, ou très élevée, selon les auteurs). Les études sur *Last Universal Common Ancestor* (LUCA, qu'on pourrait traduire par DACU pour « dernier ancêtre commun universel » en français), toujours très mal caractérisé, sont évoquées, mais, dans cette discussion, les auteurs confondent LUCA avec ce qu'on pourrait appeler « FUCA » (pour *First Universal Common Ancestor*, ou PACU, pour « premier ancêtre commun universel » en français ; on pourrait aussi l'appeler simplement le premier ancêtre), et qui serait le premier être vivant sur notre planète (si celui-ci n'est pas tombé de l'espace interstellaire). En effet, LUCA devait être un organisme déjà très complexe, partageant la plupart des caractéristiques communes aux archées et aux bactéries (puisque'il est le dernier ancêtre commun de ces deux groupes), alors que FUCA, encore plus difficile à caractériser, fut le premier être vivant, sans doute bien plus simple. Cette confusion entre LUCA et FUCA conduit les auteurs à se demander (p. 85) si LUCA possédait déjà de l'ADN, et s'il y a eu « une génération de cellules plus modernes que les protobiontes », ce qui me semble certain, dans les deux cas. Les auteurs présentent ensuite l'hypothèse presque consensuelle de l'origine endosymbiotique des eucaryotes, qui postule qu'une archée a phagocyté une bactérie, qui est ensuite devenue le noyau cellulaire. Ce phénomène est encore plus largement accepté pour expliquer l'origine des mitochondries et des chloroplastes, ces derniers provenant probablement de cyanobactéries qui furent phagocytées. On découvre ensuite le débat sur la nature des virus : êtres vivants très simples et descendants simplifiés des premières formes de vie, ou simples parasites cellulaires qui seraient apparus après les premières formes de vie et dérivant probablement de plasmides de conjugaison (Sonea et Panisset, 1983) ? Malheureusement, les auteurs indiquent

que si les virus ne sont généralement pas représentés dans l'arbre du vivant, c'est parce que celui-ci a été largement fondé sur l'ARN ribosomique (cela a été vrai à une certaine période, mais l'est de moins en moins), et que les virus ne possèdent pas de ribosomes (ce qui est exact). En réalité, il y aurait bien moyen de mettre les virus dans l'arbre du vivant, car ce dernier est à présent fondé sur de nombreuses sources, et des génomes entiers sont maintenant connus pour plusieurs taxons de bactéries et quelques archées (Hedges, 2009) ; les virus en sont exclus, surtout à cause des doutes que suscite leur nature. En effet, si les virus sont des parasites dérivant de plasmides de conjugaison (Sonea et Panisset, 1983), mettre les virus dans le même arbre que les organismes dont ils dérivent n'aurait peut-être pas beaucoup de sens. Ce chapitre conclut avec une intéressante section sur les plus anciens fossiles, dont les premiers stromatolites, datant de 3,45 Ga. En effet, on considère généralement que la plupart de ces structures en forme de coussinets ont été produites par des colonies de cyanobactéries, même si un modèle abiogénique de formation de stromatolites a également été proposé (Grotzinger et Rothman, 1996). Les auteurs y débattent de l'âge d'origine des eucaryotes (avant ou après 1,8 Ga) et de la découverte de structures filamenteuses interprétées comme des mattes microbiennes continentales (d'un milieu émergé) datant de 3,3 à 3,5 Ga (près de Barberton, Afrique du Sud). Cette dernière découverte suggère que la vie s'est installée sur les continents avant même que la couche d'ozone la protège des ultraviolets.

Le chapitre quatre présente la macroévolution, le contexte géologique et le registre fossile du Néoprotérozoïque (entre 1 Ga et 540 Ma). On y apprend que, même si deux millions d'espèces sont reconnues, et qu'on pense que la biodiversité actuelle comprend probablement entre trois et dix millions d'espèces, à peine deux cent mille espèces éteintes ont été décrites. On ne peut qu'être d'accord avec le raisonnement des auteurs, qui suggèrent qu'une infime partie de la paléobiodiversité a été décrite pour l'instant, même si leur estimation de cette paléobiodiversité (« plusieurs milliards de taxons » ; page 102) semble audacieuse ! Cependant, il est vrai que, même pour des parties du registre fossile qui ont été considérées comme très bien documentées, moins de 14 % des branches de l'arbre qui ont existé semblent avoir laissé des fossiles (Didier et al., 2017). Les auteurs suggèrent également que l'absence de macrofossiles très anciens (autres que ceux du Gabon) pourrait résulter de la faible chance de préservation d'organismes à corps mou.

Le chapitre cinq présente le Gabon antique, ainsi que le contexte géologique (spécialement sédimentologique et paléoenvironnemental) dans lesquels ont été trouvés les fossiles fascinants dont la découverte a inspiré la rédaction de ce livre. Les auteurs interprètent l'environnement de dépôt de ces fameux fossiles comme un niveau marin peu profond (moins de 50 m). Cependant, selon d'autres auteurs, cet environnement pourrait avoir été situé à plus de 200 m (Bouton et al., 2012 ; Parize et al., 2013). Les auteurs y décrivent également les étranges réacteurs nucléaires naturels qui ont existé au Gabon, pendant environ 800 000 ans, il y a 1,95 Ga. Ce chapitre se termine par une description de l'intense glaciation de la fin du

Protérozoïque, qui eut lieu juste avant l'Édiacarien, période de laquelle datent (à partir de 600 Ma) les premières faunes diversifiées d'organismes pluricellulaires (Conway Morris, 1989), hormis celles du Gabon. Cette faune édiacarienne inclut les premiers métazoaires avérés (Lin et al., 2006).

Les fameux fossiles du Gabon de 2,1 Ga ne sont décrits qu'au chapitre six, qui raconte également l'histoire mouvementée de leur découverte et de leur étude. Les auteurs y évoquent les difficultés qu'ils ont eu à faire accepter leur interprétation de ces structures comme des fossiles (plutôt que des formations purement minérales) et les approches pluridisciplinaires (isotopiques et imagerie 3D, entre autres) qu'ils ont utilisé pour leur étude. Les difficultés d'étude de fossiles anciens sont grandes, comme le rappellent les auteurs, à travers les controverses qui ont entouré divers autres fossiles, dont de possibles eucaryotes datant de 3,2 Ga. Les auteurs décrivent ensuite l'étonnante diversité des fossiles du Gabon, comprenant sept grandes catégories communes, ainsi que des formes plus rares et des microfossiles, qu'ils avaient déjà décrite ailleurs (El Albani et al., 2014). Cette section est très bien illustrée par des photos (dont certaines en couleur). Les auteurs proposent d'appeler cette faune le « Gabonionta ». Le chapitre conclut par des considérations plus spéculatives, comme la possible influence de la radioactivité de l'uranium, alors présent dans l'environnement du Gabon, sur la vitesse d'évolution des êtres vivants d'alors (ce qui rappelle un peu une version plus scientifique de X-Men !) et sur les causes de la disparition du Gabonionta, que les auteurs supposent avoir été brutale. Ce dernier point ne me semble pas bien établi, vu qu'on a peu cherché des fossiles similaires ailleurs et dans des couches d'autres âges ; on peut seulement dire que localement, ces taxons semblent s'être éteints assez rapidement.

Pour résumer, ce livre bien rédigé et illustré passionnera tous les lecteurs qui s'intéressent à l'histoire de la vie. Ils y découvriront un monde inconnu, très différent et bien plus ancien que celui, archi-médiatisé, des dinosaures du Mésozoïque. Bien que le livre soit accessible à un large public (mais ayant au moins le bac), même le paléontologue professionnel travaillant sur des périodes plus récentes en apprendra beaucoup.

## English version

This book presents the intriguing discoveries of complex Proterozoic organisms by El Albani's group in Gabon, as well as the geological and paleoenvironmental context and the history of the early Earth, focusing on the Hadean, Archean, and especially the Proterozoic. It is written in simple language and is thus aimed at a broad audience.

In addition to a brief preamble, the book includes six chapters, an epilogue, a glossary, an abundant bibliography, and an index. The preamble, which describes the multidisciplinary approach necessary to study such fossils, is interesting, but it includes a small error. In the discussion on the age of rocks, the authors wrote (p. 7): "We had to wait for the discovery of natural radioactivity by Rutherford in the early 20th century to measure the age of rocks through a reliable, reproducible and precise method" (all

translations in this review are mine). This sentence telescopes two distinct discoveries and seems to attribute both (or at least the first one) to Rutherford, but in fact, it was Becquerel who discovered radioactivity, in 1896. Indeed, radioactivity is measured in becquerels in the « International System of Units (SI) ». Rutherford discovered the phenomenon of half-life of radioactive isotopes, and this allowed the dating of rocks.

The first chapter describes in detail the Archean Earth. Imagine a planet almost entirely covered by water, with an orange sky, and with a moon that looks much larger than ours, because it is closer. Thus, moonlight is much brighter, and the tides, much higher than today. Lava lakes are formed by volcanoes and are slowly cooled down by acid rain. This description, which evokes an exoplanet from a science-fiction novel, is the Archean Earth. Indeed, about 3.5 Ga, the Moon was much closer to the Earth (25,000 km) than it is now (about 385,000 km), and when the Gabon fossils were formed, much later (2.1 Ga), the Moon was still only about 100,000 km from the Earth. The oceans were larger than today, so emerged lands were few. The atmosphere lacked molecular oxygen (O<sub>2</sub>), but it contained nitrogen (N<sub>2</sub>), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), and methane (CH<sub>4</sub>). These last two gases would have given the sky an orange color, and of course, the atmosphere would have been toxic to humans and most other extant life forms. The ocean was saltier than today (60 g/L of salt, as compared to 35 today). We also learn that the intense meteorite shower that fell on Earth in the Hadean (around 3.8 Ga) slowed down gradually to a low level around 2.5 Ga; the protocontinents that existed at that time preserve concentric faults, the only vestiges of these very powerful impacts. The authors also explain how vertical movements (sagduction) initially prevailed in plate tectonics, and that the transition towards the better-known tectonics based on more horizontal (though more or less oblique) movements was gradual, with an intermediate situation prevailing around 3.6 Ga.

Logically, the second chapter describes the Proterozoic world. It opens with a description of the intensive ice age that prevailed at the beginning of the Proterozoic and which is documented, among others, by glacial diamictites. Even the tropics, around 2.2 Ga, were covered by ice; this is what has been called the "Snowball Earth". This ice age was caused by a decrease in greenhouse gas (CO<sub>2</sub> and, to a lesser extent, CH<sub>4</sub>) that had compensated for the low luminosity of the early Sun. When the volcanoes emitted sufficient CO<sub>2</sub>, the ice age ended. Life survived, either in the ice, or in portions of the ocean that were not necessarily covered with ice. The authors also describe the GOE (« Great Oxidation Event »), a sudden increase in atmospheric molecular oxygen (O<sub>2</sub>) concentration that happened at 2.4 Ga and ended at around 2.1 Ga, when the concentration again lowered. This increase was modest, nevertheless; it went from about 100,000 times to about 3000 times less than today, in the GOE. The explanation presented includes photosynthesis, which produces O<sub>2</sub> directly, but also the combined action of continental volcanoes, which emit sulfur oxides, and sulfur-reducing bacteria, which transform these oxides into sulfuretted hydrogen and molecular oxygen. With this increase in atmospheric oxygen concentration, the Banded Iron Formations (BIFS) became rare,

and the “Red Beds” appeared. Their color results from the presence of iron oxides (hematite and goethite). Ozone appears in the high atmosphere, which may have facilitated the move of life on the continents, by blocking the ultraviolet light. The biological perturbations caused by the last large meteorites of the Late Heavy Bombardment (LHB) and the history of continents, including the first supercontinent, Nuna-Columbia (1.9–1.3 Ga), are then described.

The origin of life is discussed in chapter three. The theory of panspermia (the extra-terrestrial origin of life on Earth) and prebiotic chemistry are evoked. On this last point, after a description of the classical experiments of Oparin and Miller, we learn that the oceanic hydrothermal vents may have produced hydrocarbons by abiotic processes. The authors then present the hypothesis of the “RNA World” that would have preceded life forms that use DNA to store its genetic information, as well as the debate about the environment in which the first life forms lived (of moderate or high temperature or salinity). Studies of “Last Universal Common Ancestor” (LUCA), which is still poorly known, are evoked, but in this discussion, the authors confuse LUCA with what we could call “First Universal Common Ancestor” (FUCA; we could also call it the first ancestor), which is the first biological organism that inhabited this planet (unless life arrived on Earth from the outer space). Indeed, LUCA must have been already very complex, sharing most features in common with archaeans and bacteria (given that it is the last common ancestor of both groups), whereas FUCA, which is even harder to characterize, was the first living being on Earth, and hence, must have been much simpler. This confusion between LUCA and FUCA led the authors to wonder (p. 85) if LUCA already possessed DNA, and if there was “a generation of cells more modern than the protobionts”, which seems certain, in both cases. The authors then present the well-accepted hypothesis of an endosymbiotic origin of eukaryotes, which postulates that an archaean phagocytosed a bacterium, which subsequently became the cell nucleus. This phenomenon is even more widely accepted to explain the origin of mitochondria and chloroplasts; the latter probably originated as a cyanobacterium that was phagocytosed. We then discover the debate about the nature of viruses: very simple living beings and possible simplified descendants of the first life forms, or simple cellular parasites that appeared after the first life forms and derived from conjugative plasmids (Sonea et Panisset, 1983)? Unfortunately, the authors indicate that if viruses are generally not shown in the tree of life, this is because this tree is based mostly on ribosomal RNA (this was true early on, but no longer), and that the viruses lack ribosomes (which is correct). In fact, we could place viruses in the tree of life, because the latter is now based on many data sources, and whole genomes are now known for several bacterial taxa, and a few archaea (Hedges, 2009); viruses are excluded mostly because of the debate about their nature. Indeed, if viruses are cellular parasites derived from conjugative plasmids (Sonea et Panisset, 1983), placing them in the tree of life might not make much sense. The chapter concludes with an interesting section on the oldest fossils, including the first stromatolites, which date back to 3.45 Ga. Indeed, we generally consider that most of these pillow-shaped structures

were produced by cyanobacteria colonies, even though an abiogenic stromatolite formation model has been proposed (Grotzinger et Rothman, 1996). The authors discuss the debate about the age of the first eukaryotes (before or after 1.8 Ga) and the discovery of fibrous structures dating back to 3.3–3.5 Ga and interpreted as microbial mats from an emerged continental environment (from near Barberton, South Africa). This last discovery suggests that life moved onto land even before the ozone layer protected them from ultraviolet rays.

Chapter four presents macroevolution, the geological context, and the fossil record of the Neoproterozoic (between 1 Ga and 540 Ma). We learn that even though two million species are currently recognized and that extant biodiversity probably includes between three and ten million species, barely two hundred thousand extinct species have been described. We can only agree with the authors, who suggest that a tiny proportion of the paleobiodiversity has been described so far, even though their estimate of this paleobiodiversity, at “several billion taxa” (p. 102) seems bold! However, it is true that, even for some parts of the fossil record that were previously considered to be well documented, less than 14% of the branches of the tree of life seem to have left a fossil record (Didier et al., 2017). The authors also suggest that the absence of very old macrofossils (other than those from Gabon) might result from the low preservation potential of soft-bodied organisms.

Chapter five presents the old Gabon and the geological (mostly sedimentological and paleoenvironmental) context in which the fascinating fossils that inspired this book were found. The authors interpret the fossiliferous beds as a shallow marine environment (less than 50 m). However, according to other authors, this environment may have been located at a depth of over 200 m (Bouton et al., 2012; Parize et al., 2013). The authors also describe the strange natural nuclear reactors that existed in Gabon, for about 800,000 years, about 1.95 Ga. The chapter concludes with a description of the intensive ice age that prevailed at the end of the Proterozoic, just before the Ediacaran (starting at 600 Ma), when the first diversified faunas of multi-cellular organisms are known (Conway Morris, 1989) outside Gabon. This Ediacaran fauna includes the first undisputed metazoans (Lin et al., 2006).

The famous Gabon fossils (2.1 Ga) are described only in chapter six, which also relates the eventful history of their discovery and study. The authors evoke the difficulties they experienced to convince their colleagues that these structures were indeed fossils (rather than purely mineral structures) and the multi-disciplinary approach (including isotopic and 3D imaging techniques) they used to study these fossils. Studying old fossils is typically difficult, as they remind us, as shown by the controversies that surrounded various other old fossils, including the oldest putative eukaryotes dating from 3.2 Ga. The authors then describe the surprising diversity of the Gabon fossils, which includes seven large categories represented by several specimens, and a few rare forms, in addition to microfossils. They had of course described this previously (El Albani et al., 2014). This section is well illustrated by pictures (including some in color). The authors suggest the name “Gabonionta” for this fauna. The chapter concludes by more

speculative ideas, such as the possible influence of radioactivity released by the uranium that was then present in the environment on the evolutionary rate of living beings (which is reminiscent of a more scientific version of X-Men!) and on the causes of extinction of the Gabonionta, which the authors suppose was sudden. This last point does not seem well-established, given that we have not prospected intensively for such fossils elsewhere in strata of other ages; we can only say that locally, these taxa seem to have vanished fairly quickly.

To sum up, this well-written and well-illustrated book will captivate all readers interested in the history of life. It unveils an unknown world, very different from that of Mesozoic dinosaurs, which has been intensively covered by the media. Although this book is accessible to a wide public (though with a college education), even the professional paleontologist working on more recent periods will learn much from it.

### Références

- Bouton, P., Preat, A., Thiéblemont, D., Eban Obang, M., 2012. *Le Gabon à l'aube de la vie*. *Science* 413, 50–57.
- Conway Morris, S., 1989. *Burgess Shale faunas and the Cambrian explosion*. *Science* 246, 339–346.
- Didier, G., Fau, M., Laurin, F. M., 2017. Likelihood of tree topologies with fossils and diversification rates estimation. *Syst Biol* (in press, <https://doi.org/10.1093/sysbio/syx045>).
- El Albani, A., Bengtson, S., Canfield, D.E., Riboulleau, A., Bard, C.R., Macchiarelli, R., Pemba, L.N., Hammarlund, E., Meunier, A., Mouele, I.M., Benzerara, K., Bernard, S., Boulvais, P., Chaussidon, M., Cesari, C., Fontaine, C., Chi-Fru, E., Ruiz, J.M.G., Gauthier-Lafaye, F., Mazurier, A., Pierson-Wickmann, A.C., Rouxel, O., Trentesaux, A., Vecoli, M., Versteegh, G.J.M., White, L., Whitehouse, M., Bekker, A., 2014. *The 2.1 Ga old Francevillian biota: biogenicity, taphonomy and biodiversity*. *PLoS One* 9, 1–18.
- Grotzinger, J.P., Rothman, D.H., 1996. *An abiotic model for stromatolite morphogenesis*. *Nature* 383, 423–425.
- Hedges, S.B., 2009. In: Hedges, S.B., Kumar, S. (Eds.), *Life*. Oxford University Press, New York, pp. 89–98.
- Lin, J.-P., Gon III, S.M., Gehling, J.G., Babcock, L.E., Zhao, Y.-L., Zhang, X.-L., Hu, S.-X., Yuan, J.-L., Yu, M.-Y., Peng, J., 2006. *A Parvancorina-like arthropod from the Cambrian of South China*. *Hist Biol* 18, 33–45.
- Parize, O., Feybesse, J.-L., Guillocheau, F., Mulder, T., 2013. *Were the 2.1-Gyr fossil colonial organisms discovered in the Francevillian basin (Palaeoproterozoic, Gabon) buried by turbidites?* *C R Geoscience* 345, 101–110.
- Sonea, S., Panisset, M., 1983. *A new bacteriology*. Jones and Bartlett Publishers, Inc, Boston (140 p).

Michel Laurin

CR2P, CNRS/MNHN/UPMC, centre de recherches sur la paléobiodiversité et les paléoenvironnements, université Paris-6, Sorbonne universités, Muséum national d'histoire naturelle, bâtiment de géologie, case postale 48, 43, rue Buffon, 75005 Paris, France

Adresse e-mail : [michel.laurin@mnhn.fr](mailto:michel.laurin@mnhn.fr)

Reçu le 5 mai 2017

Accepté le 9 mai 2017

Disponible sur internet le 2 juin 2017