

Les biominéralisations microbiennes Quelques exemples en République de Djibouti et en Grèce continentale

Antoine, Marie Caminiti*

Chef de Projet chargé de l'Exploration Pétrolière

*Correspondance, courriel : antoinecaminiti@yahoo.fr

Résumé

Tout géologue se pose la question sur l'origine d'une formation géologique et les minéraux qui la constituent et dont elle est issue. Dans les formations sédimentaires de nombreux exemples de minéraux et de minerais observés sur le terrain et étudiés au laboratoire proviennent d'une origine microbienne ou étroitement associée, et dont de nombreux chercheurs géologues, microbiologistes, biologistes, géochimistes et chimistes s'accordent actuellement que les microbes peuvent jouer un rôle direct dans la minéralisation, mais surtout un rôle important de piégeage et de concentration des métaux. Des études menées sur certains horizons carbonatés à ooïdes, des niveaux riches en sulfure du Jurassique Supérieur d'Ali Sabieh, les pseudo-pisolithes et les pseudo-ooïdes de fer d'âge Crétacé d'Ali Sabieh, les travertins hydrothermaux carbonatés du lac Abhé et du lac Asal, les billes de sel du lac Asal, ont montré des minéralisations issues de métabolismes microbiens. Entre 1982 et 1985, l'étude sédimentologique menée sur la bauxite du Crétacé Moyen et sur les ferro-phosphates Tertiaire de la Grèce continentale a pu démontrer une relation étroite entre stromatolithes, ooïdes et ces minerais. De nombreux chercheurs à travers le monde ont démontré que le rôle des microbes est important dans la genèse des minéraux et des minerais. La décomposition de la matière organique, biodégradation microbienne avec libération du CO₂, amène aux kérosènes qui sont à l'origine des hydrocarbures et des gaz naturels. Une biodégradation microbienne de certaines substances peut aboutir à des minéralisations métalliques et non métalliques.

Mots Clefs : Biominéralisation, biodégradation, microbes, bactéries, stromatolithes, travertins hydrothermaux carbonates, sel, gypse, minéraux, métaux, Ali Sabieh, Abhé, Asal, Djibouti, Parnasse, Grèce

Abstract

Any geologist asks the question of the origin of the geological formation and minerals that constitute it and which it is derived. In sedimentary formations many examples of minerals and ores found in the field and studied in the laboratory are from microbial origin or strongly associated, and which many scientists' geologists, microbiologists, biologists, geochemist and chemist agree that microbes may play a direct role in mineralization, but especially important trapping and concentration of metals.

Studies of some carbonate horizons ooids and rich sulfide levels in the Upper Jurassic of Ali Sabieh, pseudo-iron pisolites and pseudo-iron ooids in the Cretaceous of Ali Sabieh, hydrothermal carbonate chimneys of Abhe lake and Asal lake, salt balls of Asal lake, showed mineralization from microbial metabolisms. Between 1982 and 1985, the sedimentological study of bauxite Middle Cretaceous and Tertiary ferro-phosphate in Greece has demonstrated a close relationship between stromatolites, ooids and these ore deposits. Studies conducted by many researchers around the world have shown that the implication of microbes is important in the genesis of minerals and metals. The decomposition of organic matter, microbial biodegradation with CO₂ release, leads to the kerosene is the source of hydrocarbons and natural gases. A microbial biodegradation of some substances may lead to mineralization metallic and nonmetallic.

Keywords: biomineralization, biodegradation, microbes, bacteria, stromatolithes, hydrothermal carbonate travertine, salt, gypsum, minerals, ores, Ali Sabieh, Abhe, Asal, Djibouti, Parnassos, Greece

Introduction

La formation, la croissance, ainsi que la dégradation de nombreuses minéralisations par les écosystèmes microbiens ont largement été observées et décrites par de nombreux chercheurs depuis fort longtemps (Gall, 1995).

La littérature est très vaste dans cette Science où de nombreuses disciplines sont impliquées et notamment un travail entre géologues découvrant sur le terrain des structures organisées et construites centimétriques à décimétriques, et les microbiologistes analysant et déterminant des microorganismes de taille micrométrique. Dans ce domaine, des ouvrages de base ont été publiés notamment ceux de Kuznetsov et al. (1963) sur l'"Introduction à la microbiologie géologique", de Trudinger et Swaine (1979) sur les "Cycles biogéochimiques de la formation des minéraux", de Ehrlich (1981) sur la "Géomicrobiologie", l'article de Vologdin (1947) sur l'"Activité géologique des microorganismes", celui de Mendelsohn (1976) sur les "Dépôts de minerais associés aux stromatolithes", et celui de Dexter-Dyer et al., (1984) sur la "Possibilité de voies microbiennes dans la formation des dépôts métalliques au Précambrien".

Le terme de "Géomicrobiologie" vient probablement de celui de "Microbiologie Géologique" de Beerstecher (1954) définissant la géomicrobiologie comme "l'étude de relation entre l'Histoire de la Terre et la Vie Microbienne". Kuznetsov et al. (1963) l'a défini comme "l'étude des processus microbiologique prenant couramment place dans les sédiments actuels des différents corps d'eau, dans la circulation d'eau sous-terrain à travers les sédiments, les roches ignées, et l'érosion de la croûte terrestre ...et aussi la physiologie des micro-organismes spécifiques prenant part dans les processus géochimiques présents".

Pour Dévigne (in *Encyclopédie Universelle*. 2012), la "Géomicrobiologie est l'une des applications de la microbiologie aux milieux naturels", notamment en pétrologie sédimentaire, en géochimie des couches stratiformes, en géologie minière et en minéralogie.

De tels objets biogéologiques ont été répertoriés en République de Djibouti et en Grèce, et, des modèles purement scientifiques et d'application dans l'industrie minière et

pétrolière ont été élaborés. Le sel en tant qu'ingrédient dans les aliments est sujet de convoitise pour les billes de sel du lac Asal, et très prisé par les grands chefs de restaurants parisiens. Les travertins carbonatés de l'Afar ont été choisis comme modèle de réservoirs pétroliers avec plus de 30% de porosité et comparables à ceux retrouvés dans l'Atlantique Sud au large du Brésil et à plus de 5 000 mètres de profondeurs. L'étude sur les travertins a permis de mettre en place un modèle schématique du système pétrolier pouvant contribuer à une meilleure compréhension des monticules carbonatés dans l'exploration pétrolière de type continental/lacustre. L'étude du troisième horizon bauxitique du Parnasse, en Grèce, et l'étude sédimentologique, paléoécologique et paléogéographique, correspondant au toit de cette bauxite ont permis de cerner son origine et de comprendre l'évolution de la plate-forme carbonatée du Parnasse au Crétacé Supérieur. La limite Crétacé/Tertiaire est marquée par une tectonique cassante suivi d'un arrêt de sédimentation puis d'une colonisation de stromatolithes ferro-phosphatées dans un milieu marin plus ou moins profond et apport de matière organique du à des courants de type upwellings.

La biominéralisation est un sujet très délicat et malgré les avancées scientifiques considérables du fait que certains microbes disparaissent lors de la précipitation d'un minéral ou d'un minerai ne fait que compliquer l'objectif final entre l'élaboration d'une substance vivante et d'une substance inerte.

Dans la nature, les microbes sont présents dans tous les environnements et colonisent tous les écosystèmes tels que : sol, eaux douces, eaux marines, eaux saumâtres, l'air, mais aussi hostiles et extrêmes (extrémophiles ou archéobactéries) : les pôles, les déserts, les sources d'eau chaude-geysers et le fond des océans.

Le monde microbien (bactéries, cyanobactéries, algues *incertae sedis*, protozoaires ...), ou l'écosystème microbien, joue un rôle considérable sur le façonnement de la surface du globe terrestre : biostabilisation microbienne des sédiments, laminations microbiennes, biodégradations microbiennes, biocorrosion microbienne, biominéralisation microbienne. Ils participent à la fossilisation des organismes, participent d'une manière active ou favorisent la précipitation de divers minéraux, de sulfures de divers métaux, et participent aussi à la dépollution des eaux et des sols (biodépollution) (Lagny et Michel, 2003).

Une synthèse entre minéraux, métaux et microbes a été élaborée par le microbiologiste Gabb (2010). Il met l'accent sur l'importance des processus de biominéralisation microbiens, et dont la plupart des biominéraux sont le carbonate de calcium, les silicates, les oxydes de fer et les sulfures.

Pour l'"Année Internationale de la Biodiversité" tenue en 2010, la revue du BRGM pour une Terre Durable "Geosciences", intitulée "Les frontières géologie-biologie" a été consacrée sur le rôle de la géologie dans l'origine de la vie, mais aussi sur le rôle de la biologie dans la construction des formations géologiques. L'accent a été mis sur le rôle de la géomicrobiologie à travers l'échelle géologique, où les microbes ont joué et jouent un rôle dans certains processus géologiques de la valorisation des ressources minérales et interviennent à la dépollution des sols et des eaux.

Les minéralisations d'origine microbienne

Les carbonates d'origine microbienne

La précipitation du carbonate de calcium par des souches bactériennes ont fait état de nombreuses publications depuis fort longtemps, et dont de nombreux auteurs y ont contribué (Drew, 1911 ; Kellerman et Smith, 1914 ; Kellerman, 1915 ; Cayeux, 1935 et 1936 ; Lalou, 1957 ; Oppenheimer, 1961 ; Cloud, 1962 ; Krumbein, 1972, 1974, 1979 ; Adolphe et Billy, 1974 ; Monty, 1982, 1983 ; Castanier, 1984, 1987, Castanier et *al.*, 1984, 1987, 1988, 1989 ; Monty and Van Laer, 1984 ; Van Laer, 1988.

"*La carbonatogenèse bactérienne*", en tant que production de précipités carbonates apparait comme un phénomène normal dans les systèmes sédimentaires et diagénétiques actuels, dans les environnements marins, paraliques et continentaux. La diversité morphologique, écophysiological et métabolique des "espèces" bactériennes sont capables de produire des ions carbonates et bicarbonates et de précipiter activement et passivement les carbonates (Castanier, 1994). Ces souches carbonatogènes sont présentes aussi dans les environnements considérés extrêmes, les milieux évaporitiques par exemple (Perthuisot, 1975 ; Cornee, 1983).

L'étude expérimentale sur la production bactérienne de corpuscules carbonatés, sphéroïdaux à structure fibro-radiale, en aérobiose, à l'obscurité et par eutrophisation d'eau de mer (Castanier et *al.*, 1989) reste une référence, avec une description des diverses espèces minérales produites de particules carbonatées par embryogénèse. Une séquence de croissance enregistrée suivant neuf étapes a été établie. Différentes souches bactériennes interviennent et dont leur métabolisme influence sur le pH du milieu ambiant. Cette étude expérimentale permet de préciser les conditions de la microbiodiagenèse carbonatée dans les séries fossiles (Castanier & *al.* 1989).

Folk (1993) a constaté que les bactéries et les nannobactéries ont joué probablement un rôle de premier plan dans la catalyse de la précipitation des matériaux carbonatés, dans les roches du Paléozoïque et du Mésozoïque, ainsi que dans les dépôts de travertins de sources chaudes, des oïdes de Bahamas et celles du Grande-Salt Lake.

Exemples en République de Djibouti

Les stromatolithes du Jurassique Supérieur

Les stromatolithes de la Formation "Calcaires marneux, marnes gypsifères et dolomies" du Thitonique Supérieur n'ont jamais été décrits auparavant. Pour la première fois, ils ont été observés en 1998 (Caminiti) lors d'une visite de terrain sur le site de Boholaley, et décrits par la littérature comme des roches en lits minces ! Par la suite, ils ont été observés à maintes reprises, avec l'équipe de géologues de l'UBO, et surtout avec la compagnie Oyster Oil & Gas Ltd, étude de terrain pour l'exploration pétrolière. Toland (2013) a estimé cette formation à une quarantaine de mètres d'épaisseur, et elle est constituée de laminites stromatolithiques, de calcaires micritiques lités, de passées dolomitiques et de gypse associés. Elle correspondrait à des zones de rivage intertidal à subtidal.

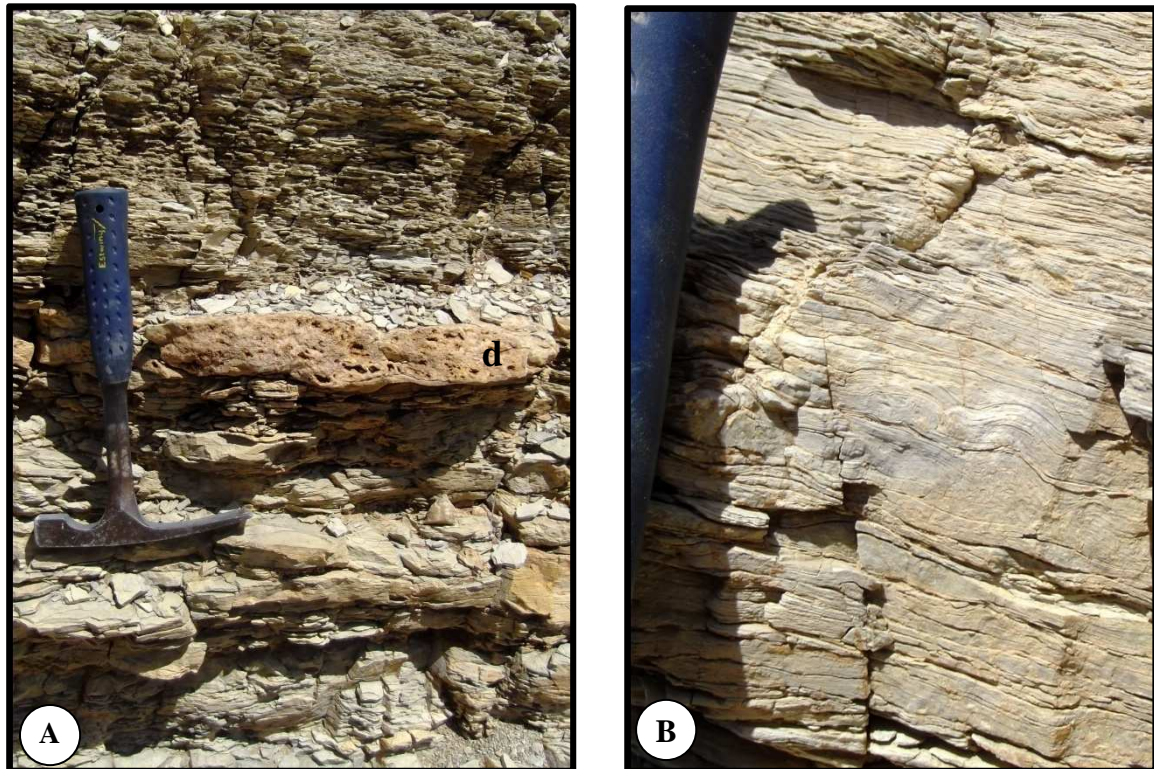


Figure n° 1 : **A :** Calcaires micritiques lités, feuilletés et passé dolomitique (d). **B :** Structures organo-sédimentaires (stromatolithes) stratiformes et parfois hémisphériques d'âge Tithonique Moyen à Supérieur (Photos : A.M.C.).

Les stromatolithes (tapis de pierre, en grec) correspondent à des structures organo-sédimentaires définies par Aitken (1967) et reprises par Monty (1976). Ce sont des constructions microbiennes laminées constituées généralement de carbonate de calcium. L'origine des stromatolithes est considérée comme des communautés complexes composées de bactéries autotrophes, d'algues eucaryotes, de bactéries hétérotrophes et d'algues bleu-vert ou cyanobactéries. Elles ont un rôle de liant et/ou de précipiter des minéraux, comme le bicarbonate en carbonate de calcium, ou, l'oxyde de fer. Concernant la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), d'après Gebelein and Hoffman (1973) dans les niveaux de laminites stromatolithiques, la dolomitisation serait formée ultérieurement par la décomposition de la matière organique et au dépend de la quantité de magnésien contenue dans les couches microbiennes. L'origine microbienne de la dolomite a été discuté par Monty (1986b) et démontrée par Vasconcelos and *al.*(1995).

Les oïdes du Jurassique Supérieur

Les niveaux étudiés proviennent des oueds Dabiley et Biyyadigley de la Formation "Grès et calcaires gréseux" du Tithonique Terminal (Caminiti, 1985b ; 2015). Ils correspondent à des sables de type grainstone à packstone à oïdes, de fragments bioclastiques et de grains de quartz.

Les ciments précoces aciculaires, les ponts micritiques et les laminites cryptalgaires ont permis de stabiliser et de préserver ces horizons. La présence d'une porosité intra-granulaire et d'une microporosité dans les oïdes peuvent constituer de bons réservoirs pétroliers.

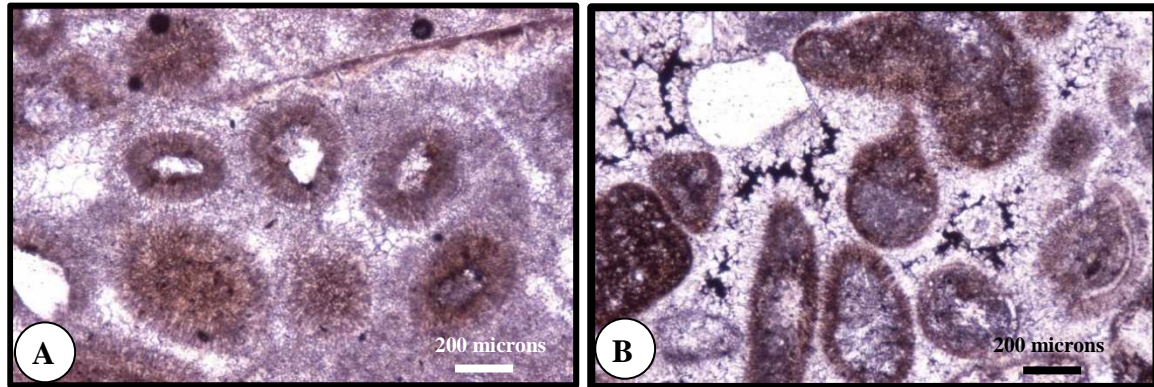


Figure n° 2 : **A :** Grainstone/Packstone à oïdes et grains de quartz et dont les grains sont reliés par une micrite et des ponts micritiques. Les nucléus des oïdes sont : soient des grains de quartz subanguleux, soient une calcite en mosaïque, soient des péloïdes, ou sans nucléus, oïde à structure fibro-radiée et concentrique. **B :** Grainstone à bioclastes, à oïdes et grains de quartz entourés d'un ciment fibreux précoce, d'un second et d'un troisième ciment sparitique asymétrique. La relation étroite entre le substrat micritique (mucilage organique) et le développement des cristaux fibro-radiés et microgranulaires semble être un argument pour invoquer des phénomènes de cristallisation d'origine microbienne (Monty, 1982, 1983 ; Monty & Van Laer, 1984 ; Bernet-Rollande et *al.*, 1984 ; Caminiti, 1985a et b, 2015 ; Van Laer, 1988 ; Castanier et *al.*, 1989). Les pores inter-granulaires ne sont pas colmatés. Le dépôt de ces niveaux à oïdes correspond à un milieu calme et peu agité, domaine côtier avec apports détritiques continentaux (grains de quartz). La couleur rouille des certains oïdes serait due à la présence de bactéries ferroxydantes (Photos : AM.C.).

Les lames minces ont été confectionnées par TOTAL Exploration, département des Carbonates en 1985.

Petites cheminées carbonatées d'âge Pliocène

Entre le site de Goubétto et celui de Boullé, au sommet de la formation des basaltes du Dalha, des nombreuses petites cheminées carbonatées ont été observées entre 1997 et 1999. Les basaltes du Dalha sont altérés et très fissurés. Ces fissures sont colmatées par de la calcite.

De telles structures ont été observées au fond des lacs du Tanganyika par une équipe de Tanganyidro Group (Tiercelin et *al.*, 1992), notamment sur le site de Cape Banza où des cheminées d'aragonite de 3 à 5 cm d'hauteur et de diamètre entre 1 et 3 cm se sont formées par des fluides entre 66 et 103° C. Des tapis filamenteux microbiens, hyperthermophiles et hétérotrophes, recouvrent ces événements.



Fig. n° 3 : Cheminée carbonaté issue de microfissures des basaltes du Dalha très altérés. La hauteur est de 5 cm et le diamètre de 1,5 cm. Ces cheminées sont l'œuvre d'une population active microbienne précipitant le carbonate de calcium (Photo : AM.C.).

Les Oncoïdes de Garabbayis Pléistocène

Le site aurifère de Garabbayis représente la partie superficielle d'un gisement épithermal constituée d'objets géologiques caractéristiques : des fumerolles actives, des travertins, une coupole siliceuse constituée de cherts (silica sinter), des veines carbonatées, des brèches hydrothermales silicifiées, à calcite, des brèches hydrauliques et des roches basaltiques altérées (Green River Geology Co. Pty. Ltd., 2004 ; Caminiti, 2007). Les trois collines rouges, dont le dôme principal, ne peuvent s'expliquer que par la présence d'un corps magmatique en profondeur (intrusion), provoquant ainsi plusieurs dômes fracturés avec injection de fluides hydrothermaux permettant une minéralisation aurifère, de sulfures, de silice et de carbonates. La partie sommitale identifiée comme étant une coupole silicifiée (silica sinter) correspond à des dépôts de cherts, des dépôts sédimentaires silicifiés parfois lités et la présence d'oncoïdes silicifiés et d'oncoïdes carbonatés au pied du principal dôme.

Le terme d'oncoïde a été défini par Heim (1916), caractérisé par une forme ovoïde, arrondie ou bosselée, de taille pouvant dépasser 1 cm, des contours flous et un cortex constitué d'une succession d'enveloppes plus ou moins concentriques. Le cortex des oncoïdes est formé principalement de carbonate cryptocristallin sans structure et d'un réseau flou à filaments d'algues bleu-vert (Purser, 1975). Son origine est incontestablement microbienne constituée soit d'un réseau filamenteux à cyanobactéries, soit cyptalgues (Caminiti, 1985a).

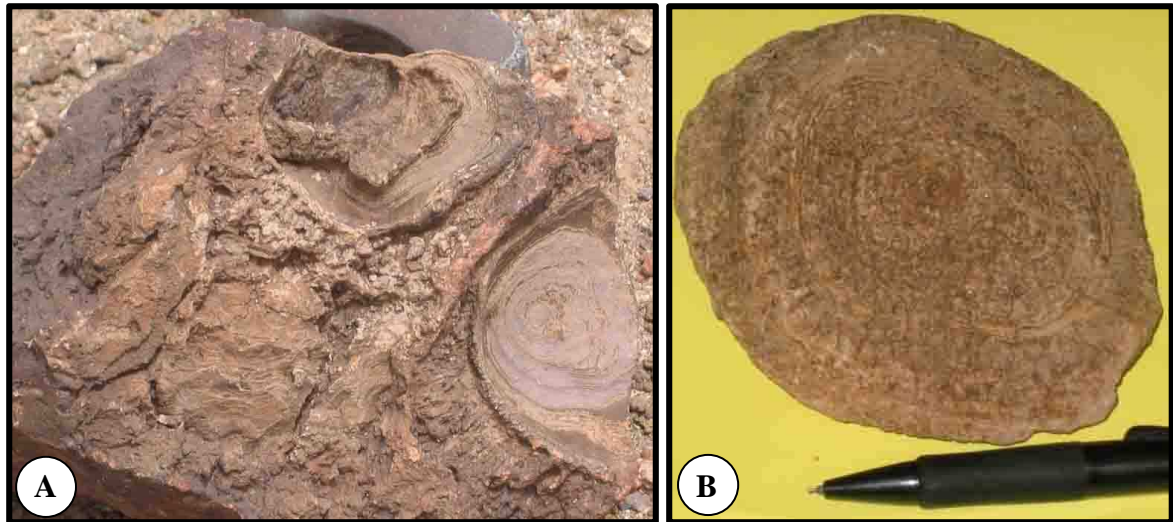


Fig. n°4 : Oncoïdes de Grabbayis, **A** : Silica sinter à oncoïdes silicifiés ; **B** : Oncoïde carbonaté présentant des laminations plus ou moins régulières et continues (Photos : A.M.C.).

Dans le Parc National de Yellowstone aux Etats Unis, des stromatolithes colonnaires de silice amorphe ont été décrits dans les sources d'eaux thermales et les sites à geysers (Walter & *al.*, 1972). En Nouvelle Zélande, Jones & *al.* (2002) ont décrit aussi dans des sources d'eaux chaudes à pH acide et dans les effluents de geysers, zone volcanique de Taupo, la formation de stromatolithes de forme colonnaire siliceuse. Pelras et Le Ribault (1981) ont mentionné que les bactéries pouvaient jouer, dans certains cas, un rôle actif dans la précipitation de la silice.

Les travertins hydrothermaux de l'Afar d'âge Holocène

Une étude de terrain a été réalisée pour le compte du CNRS-TOTAL en 2013. Le but de ce projet était de comprendre les différents faciès des corps carbonatés observés et de mettre en place un système pétrolier continental/lacustre dont les travertins hydrothermaux de l'Afar, par analogie, seraient de très bons réservoirs pétroliers. Cette demande d'étude, fait suite à une découverte majeure d'hydrocarbures dans l'Atlantique Sud, bassin de Campos et bassin de Santos, au large du Brésil. L'exploration pétrolière a détecté, sous des évaporites, des réservoirs carbonatés lacustres d'âge Crétacé Inférieur (Held et *al.*, 2013 ; Held et *al.*, 2014 ; Virgone et *al.*, 2014).

Les dépôts lacustres synrift des bassins de Campos et de Santos sont formés de carbonates microbiens et de nombreuses fabriques ont été enregistrées : travertins, tufas, stromatolithes, thrombolites, oolithes etc...

La morphologie de ces carbonates microbiens en mounds, détectée par la sismique, et, dont certains ont été interprétés comme des édifices volcaniques intercalés au sein des dépôts pré-sel, suggère une nature bioconstruite comparable aux mounds travertins du lac Abhé et du lac Asal.

Au lac Abhé, ces cheminées sont alignées suivant des fractures Nord Ouest - Sud Est, Ouest Nord Ouest - Est Sud Est, Est - Ouest, Nord Est - Sud Ouest, et Est Nord Est - Ouest Sud Ouest.

Ces travertins associés à l'hydrothermalisme, à l'évolution du lac et comme indicateurs climatiques ont été étudiés par Gasse (1975), Fontes et Pouchan (1975) et Dekov et *al.* (2014). Leur origine, la température de la formation des carbonates par isotopie du carbone et de l'oxygène, la datation de leur formation, la température des sources thermales et leur pH ainsi que celui du lac ont été étudiés par ces auteurs.

Concernant les compositions isotopiques en C, pour Fontes et Pouchan, la précipitation des carbonates serait de 25°C. Pour Dekov et *al.* (2014), les compositions isotopiques en C et O, ont donné une précipitation des carbonates des cheminées de 22° C à l'extérieur et de 14° C à l'intérieur. Ces températures semblent très basses et surtout la partie intérieure de la cheminée, mais dont fort probablement l'eau du lac plus fraîche serait intervenue, ou, en fin de phase du fluide hydrothermal.



Fig. n° 5 : Butte basaltique, d'une soixante de mètres à l'Est du lac Abhé, est marquée par des horizons blanchâtres correspondant aux encroûtements stromatolithiques et indiquant les différents paléo-niveaux du lac à l'Holocène (Photo : A.M.C.)

De par la complexité de croissance de ces corps carbonatés à des stades divers et de localisation, la datation de 800 ans pour l'ensemble des cheminées fournie par Dekov et *al.* (2014) semble peut probable mais aussi ne donne aucune image de l'évolution paléoclimatique. L'échantillon prélevé est beaucoup trop jeune pour rendre compte la formation et l'évolution de ces cheminées. Un seul échantillon prélevé n'est pas représentatif, surtout sur un petit monticule de 1,80 m de hauteur et de 0,90 m de diamètre. Ceci ne reflète qu'une image à 800 ans, période probablement régressive du

lac. Les différents minéraux répertoriés ont été piégés par les bio-films stromatolithiques apport extérieur contact avec l'eau du lac et l'interne avec le fluide. Les datations données par Fontes et Pouchan (1975) restent plus réalistes et en accord avec Gasse (1975), montrant les divers épisodes de crue en 6 300, 2 700, 1 500 B.P, et il y a un siècle.

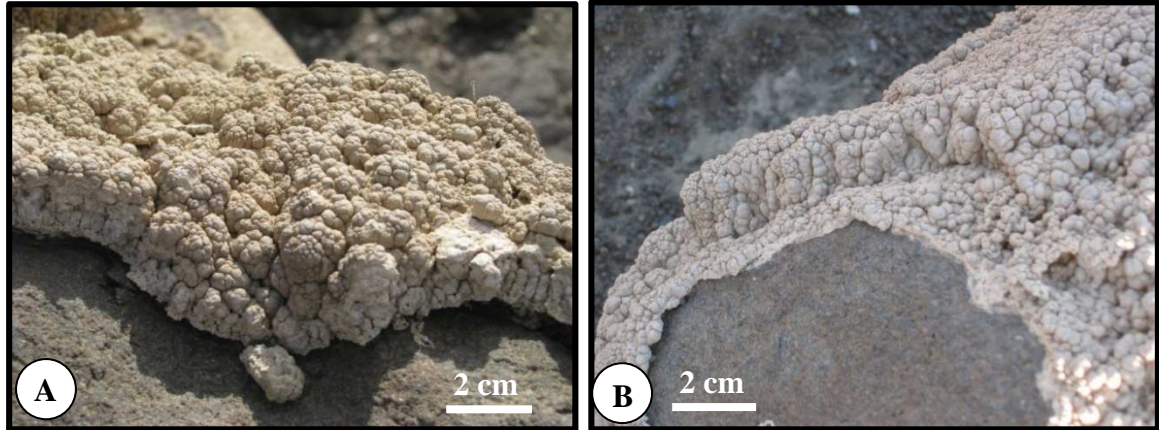


Fig n° 6 : A et B : Les encroûtements carbonatés de calcite magnésienne du haut niveau lacustre avant la régression qui se poursuit actuellement. Aux moins deux générations de stromatolithes montrant un développement microbien colonnaire. De telles structures organo-sédimentaires ont été décrites au lac de Bogoria, Kenya (Casanova, 1986 ; Tiercelin et *al.*, 1987) (Photos : A.M.C.).

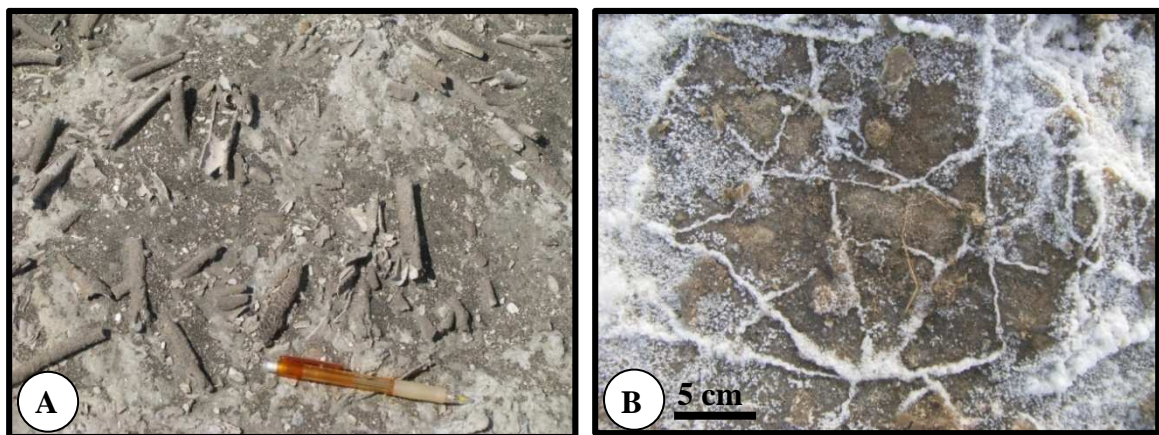


Fig n° 7 : A : Encroûtements cylindriques stromatolithiques ayant enrobé des branches et des tiges d'arbustes (Récent) ; **B :** Le sol du lac Abhé entre les travertins est formé d'une croûte stromatolithique fine, peu consolidée, et parfois d'une formation d'un réseau anastomosé et d'ooïdes de sel d'origine fort probablement microbienne (Photos : A.M.C.)

Dans les lacs sodiques, riches en carbonate de sodium et à des pH proches de 10, comme le Lac Abhé, les haloalcaliphiles y prospèrent. Près des sources thermales, d'autres types de bactéries se développent, ce sont les thermophiles (entre 60 et 80°C) ou les hyperthermophiles (100°C et plus) (Soléty, *in* Lagny et Michel, 2003).

Au Nord du lac Abhé, entre Aeylou et l'île Longue, Valette (1975) a noté une très forte odeur d'hydrogène sulfuré (H_2S) provenant d'une importante activité bactérienne dans les vases. Le H_2S , incolore, est un gaz lourd et se concentre dans les parties basses et

confinées. Il est caractérisé par son odeur d'œuf pourri, légèrement acide, et peut devenir très toxique. La décomposition de la matière organique par les bactéries peut développer d'autres gaz toxiques, comme le méthane (CH_4), le dioxyde de carbone (CO_2) et l'ammoniac (NH_3) (Weiler, 2011). L'origine de ces gaz au lac Abhé, vases et sources thermales serait bactérienne, population complexe et adaptée produisant notamment du méthane (d'après D. Prieur, in Byrne, 2008).

Le système racinaire de ces travertins a été observé, soit à partir des basaltes de la série stratoïde Afar inférieur, soit à partir des sédiments lacustres. Au niveau des basaltes, ces derniers sont affectés par des fissures remplies de calcite d'où les fluides ont permis d'apporter les éléments nécessaires au contact du chimisme de l'eau douce pour la formation de ces travertins. Au niveau des sédiments, des intrusions de carbonates stromatolithiques ont déformé et brûlé les dépôts sédimentaires adjacents (Caminiti et Ahmed, 2013).



Fig. n° 8: "*Microbial Monument of Afar Hydrothermal Travertin*". Construction carbonatée hydrothermale d'origine microbienne (hauteur environ 20 mètres), lac Abhé (Photos : A.M.C.).

Les études au microscope et au microscope électronique à balayage, menées par le CERGE et TOTAL sur les échantillons prélevés, ont montrés que la calcite microbienne est étroitement liée à la température, au CO_2 et au chimisme du fluide riche en calcium. La partie interne d'une cheminée est constitué d'un réseau lâche de cristaux de calcite en forme de dendrite et à forte porosité. Au microscope électronique à balayage, sur la surface de cristaux rhomboédrique de calcite, de nombreuses bactéries ont été constatées.

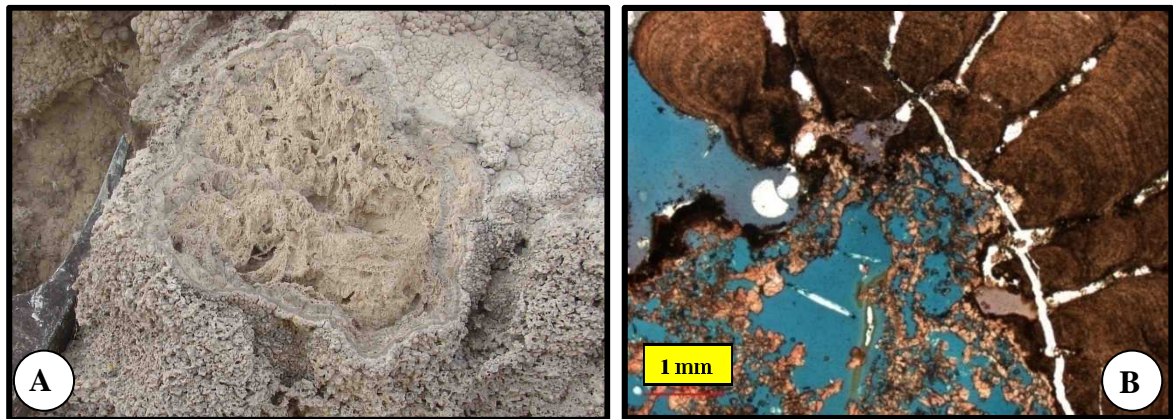


Fig n° 9 : A : Coupe d'un événement fossilisé montrant le cœur formé de calcite anastomosée et très poreux enveloppé de plusieurs lamines stromatolithiques et recouvert par un encroûtement stromatolithiques (photo : A.M.C.) ; **B :** Microfaciès montrant la partie interne croissance de cristaux de calcite à réseau lâche avec une porosité importante, et la partie externe croissance stromatolithiques dense avec une porosité réduite (photo : CEREGE).

Stromatolithes de morphologie type "Cerveau" Holocène Inférieur

Ces stromatolithes de variété particulière ont été observés dans la partie médiane du Rift d'Asal, dépression Fanti-Garrayto - Kadda Garrayto. Ces édifices carbonatés présentent une structure de croissance en forme de boudin et une morphologie de type en "cerveau", et seraient formés dans un milieu plus saturé en sel (Caminiti, 2000).

Des objets identiques ont été observés et décrits dans l'oued Doubye, donnant un âge entre 9 045 et 6280 BP, leur forme est cylindrique et leur structure laminaire est comparable à celle des stromatolithes (Gasse, 1975 ; Gasse et Fontes, 1989). Ils sont constitués d'aragonite, de calcite magnésienne et de calcite, et, le centre du cylindre contient parfois des restes de végétaux (*Tamarix*). Des buissons auraient été envoyés lors de la transgression Holocène et seraient enveloppés par des stromatolithes. Ces structures sont coiffés par des limons dont la paragenèse minérale indique une eau magnésienne et à salinité assez forte, due probablement à des infiltrations d'eaux marines.

Des structures identiques ont été décrites dans l'Eocène de Green River Formation par Bradley (1929), des observations faites entre deux couches de gypse, d'âge Miocène Moyen, par Monty (1980) à Wadi Feiran (Sinäi), et par Marie (com. Oral) à Gebel Zeït (Egypte) et finalement étudiés par Monty et *al.* (1987), sur plusieurs sites le long du Golfe de Suez et de la Mer Rouge. La structure externe est lisse, parcourue par de nombreuses cannelures rappelant l'aspect d'un cerveau et se débite en fines lamelles. La structure interne présente soit un réseau anastomosé, soit une croissance fibro-radiale. La nature minéralogique du carbonate est l'aragonite ou la calcite magnésienne qui précipite sous l'effet du métabolisme de populations bactériennes.

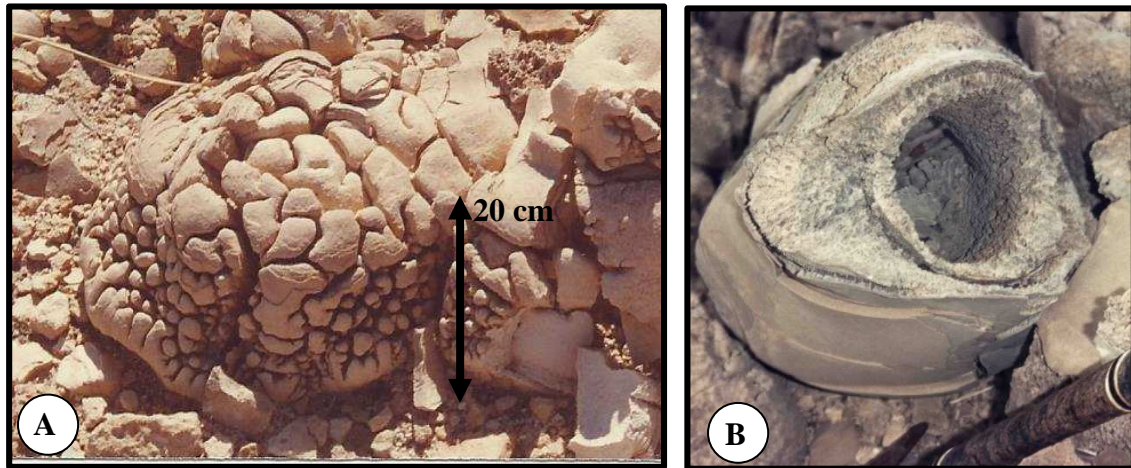


Fig. n° 10 : **A :** Stromatolithe en forme de "cerveau" (Cerebroid Stromatolites), constitués de dômes stromatolithiques individualisés ; **B :** Stromatolithe cylindrique (Travertine "pipe") probablement ayant enrobé et encroûté un tronc de *Tamarix* (Photos : A.M.C.).

Stromatolithes de l'ancien rivage lacustre du lac Asal d'âge Holocène

Dans l'axe du Rift d'Asal, et dans l'oued Doubyé, le plus haut niveau du lac Holocène est situé à l'altitude + 160 m, et dont la ligne de rivage est marquée par des encroûtements stromatolithiques carbonatés recouvrant les basaltes. L'âge de ces stromatolithes serait de 8 620 ans BP et l'épaisseur des enveloppes carbonatées atteindrait une 50 cm environ (Gasse, 1975 ; Gasse et Fontes, 1989).

Des observations ont été faites au Nord de l'axe du Rift d'Asal, au pied du Kadda Somma. Ces structures correspondent à de fines lamines carbonatées crypto-algaires enrobant les basaltes.

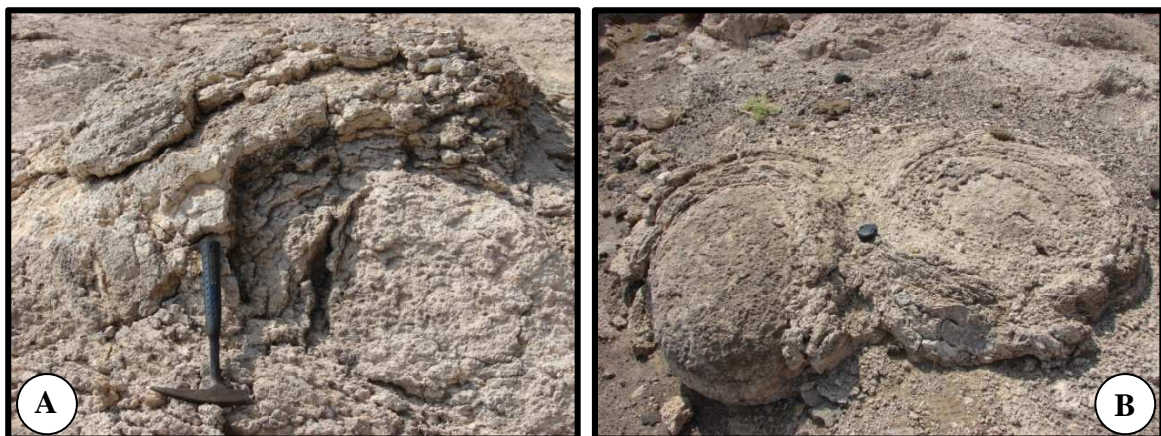


Fig. n° 11 : **A et B :** Encroûtements stromatolithiques carbonatés recouvrant les basaltes de l'axe du Rift Asal et matérialisant la limite du rivage de haut niveau du lac à l'Holocène. Secteur au pied du Kadda Somma (Photos : A.M.C.)

Les encroûtements carbonatés enrobant les blocs basaltiques de la plaine de Djibouti

Entre Djibouti ville et Arta, un sol rouge issu de l'altération des basaltes du Golfe de Tadjourah (2,8 à 1 Ma, Daoud et *al.*, 2011) occupe surtout des cuvettes fermées. En bordure de ces dépressions, on peut observer l'évolution : à partir d'un basalte sain, basalte altéré en boules avec des fissures colmatées en calcite, et enfin altération complète du basalte en argile limoneuse ocre. De nombreuses boules basaltiques sont enrobées d'un cortex blanc constitué de calcite microcristalline. La formation de ce cortex serait un phénomène d'épigénie, apport extérieur de la calcite et non un phénomène d'altération (Fournier et *al.* 1983). Dans le cas des processus d'érosion des roches magmatiques, comme c'est le cas ici, le rôle des microorganismes autotrophes est important, sachant que les éléments majeurs des magmas sont l'oxygène, le silicium, l'aluminium, le fer, le calcium, le magnésium le sodium le potassium et le titane.

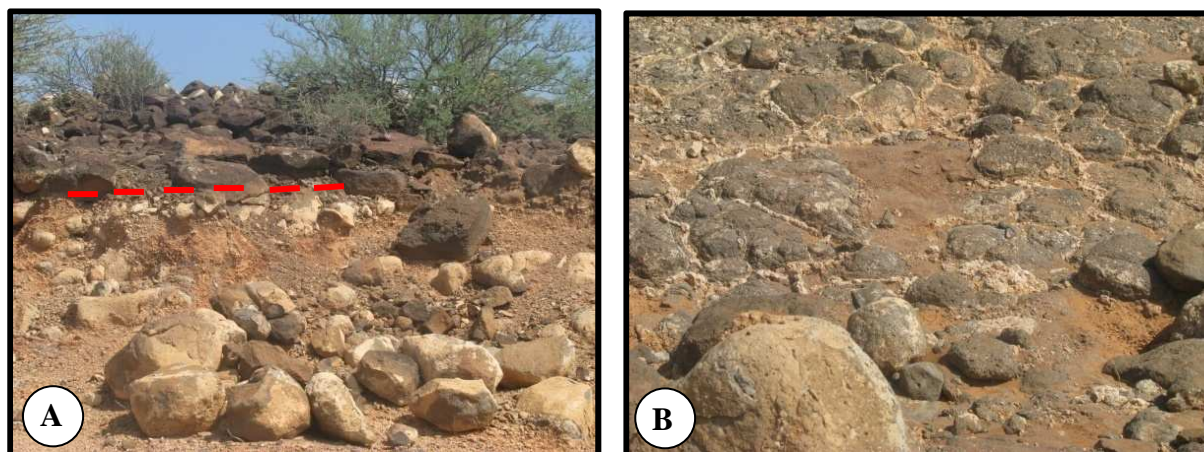


Fig. n° 12 A et B : Encroûtements carbonatés autour des blocs de basaltes, basaltes du Golfe de Tadjourah. Les traits rouges marquent un niveau de nappe d'eau (A) (Photos : A.M.C.).

La formation de cette croûte carbonatée, d'origine microbienne, serait liée à des nappes chargées de sels minéraux en relation avec des hauts niveaux marins du Pléistocène, le calcium proviendrait soit en partie des basaltes, soit, et plus probable, par la carbonatogenèse bactérienne (Castanier & *al.*, 1989). L'érosion finale, donnant le sol latéritique, proviendrait de la décomposition des feldspaths transformés en kaolin ainsi que la décomposition du minéral de fer par les bactéries ferro-oxydantes.

Minéraux carbonatés et autres aux niveaux des fumerolles, Actuel, Garabbayis et Asa Leyta

Deux sites ont été choisis pour leurs proximités et leurs activités géomicrobiologiques au niveau de l'hydrothermalisme Actuel. Le site de Garabbayis près du forage thermique 2, où de nombreuses fumerolles jaillissent et une altération argileuse ocre des basaltes est intense toujours actif, sol altéré et chaud. Les fumerolles sont situées au niveau de

nombreuses cavités dans le basalte de la formation de stratoïde inférieur, odeur soufrée, avec une forte pression. Le second site est situé sur la route menant au lac Asal, et en contre bas du site aurifère d'Asa Leyta. Au niveau de ces fumerolles, des encroûtements de carbonates tapissent les roches volcaniques (basaltes et ou trachytes) altérés.

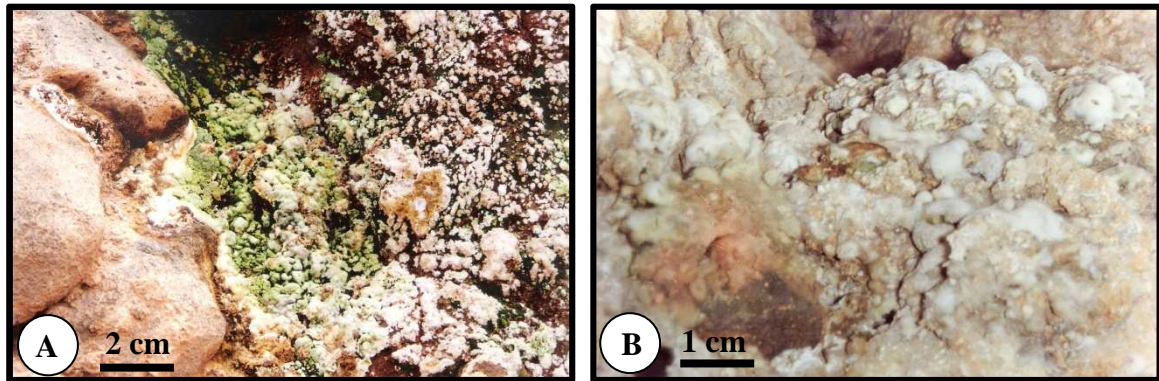


Fig n° 13 : **A :** Tapis microbiens associés aux dépôts de carbonates, de soufre et de cristaux de gypse observés ; **B :** Biohermes stromatolithiques bulbeux carbonatés tapissant une fumerolle, site des fumerolles de Garabbayis (Photos : A.M.C.).

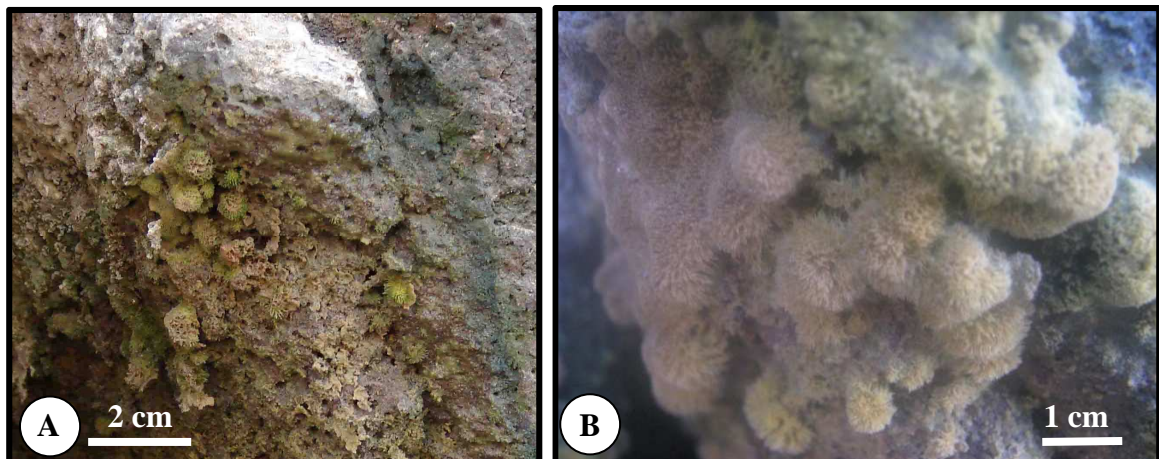


Fig. n° 14 : **A et B :** Event de fumerolle : Croissance momentanément de sphérules organiques fibro-radiées sous substrat de gel organique dues aux émanations hydrothermales, carbonates et soufre activité microbienne, site Asa Leyta - route Asal (Photos : A.M.C.).

Les fumerolles correspondent à des sites ayant une concentration en substances réductrices intermédiaires à faibles. La couleur blanche correspond à la zone des bactéries sulfoxydantes, les lisérés bleu-vert ceux des cyanobactéries, et les lisérés de couleur brun-bronze aux diatomées (Selosse et *al.*, 2008)

Tapis microbiens thermophiles dans les sources d'eau chaude du lac Asal et du lac Abhé

De nombreuses sources thermales ressurgissent autour du lac Asal et autour des cheminées du lac Abhé (Stieltjes, 1972, 1973 ; Demange et Stieltjes, 1975). La source de Korili, très connue pour la géothermie, étant la plus chaude au lac Asal a une température de près de 80 ° C, ceux du lac Abhé, étant plus élevées, autour de 95 à 98 ° C. Près de ces sources chaudes existent une prolifération importante de tapis cyanobactéries- microbiens de type thermophiles.

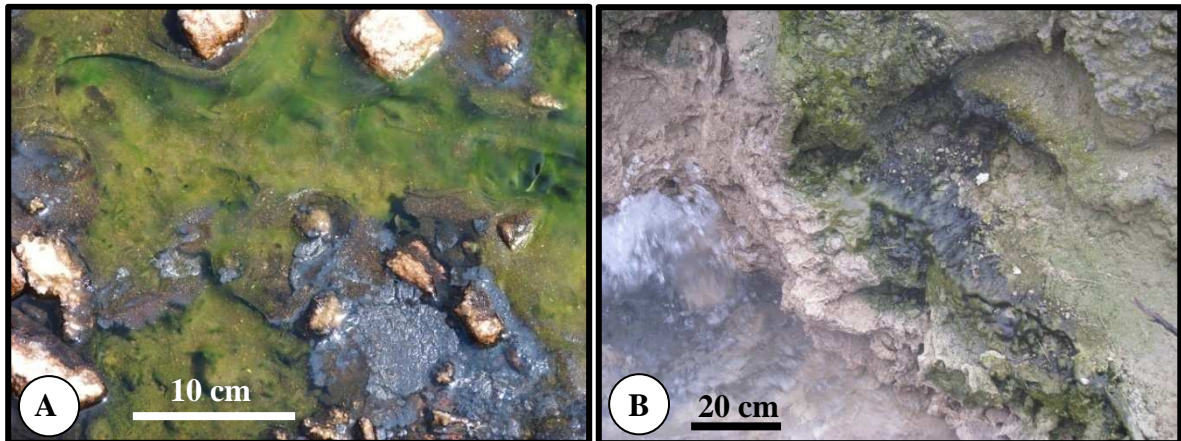


Fig. n° 15 : **A :** Source de Korili (lac Asal), tapis microbiens gélatineux verdâtres, présence d'une forte teneur de matière organique se développe avec des tâches grasses sur la surface d'eau (pellicule métallique ?). Les tâches de rouilles étant l'œuvre des bactéries ferro-oxydantes (Caminiti, 2000) ; **B :** Près d'une source thermique à fort débit au lac Abhé, un développement de tapis microbiens gélatineux et verdâtres prend sa place écologique (Photos : A.M.C.).

Stieltjes (1972) et Demange et Stieltjes (1975) ont constaté que les saumures des sources bordant le lac Asal contenaient des sels métalliques (Zn, Cu, ...)

L'écosystème microbien, cyanobactéries et autres thermophiles photosynthétiques, est différent en fonction de la localité (isolement d'habitat), de la composition chimique des sources chaudes, de la température du site (Castenholz, 2008). Aussi, certaines cyanobactéries sont capables de changer leur physiologie, leur métabolisme et leur appareil photosynthétique.

Les beach rocks Actuel ou grès de plage de Doraleh Actuel

Les "*beachrocks*" ou "*grès de plage*" se forment par lithification précoce des sédiments littoraux. Cette cohésion se fait par un ciment carbonaté (aragonite ou calcite magnésienne) au niveau de la zone des battements des marées, milieu intertidal et généralement dans un climat semi-aride tropical. Plusieurs paramètres doivent être pris en compte, surtout dans une zone intermédiaire entre le continent et la mer, notamment : la salinité, la température ambiante, celle de la mer, et l'évaporation,

Des échantillons ont été prélevés par l'auteur en 1980 sur les beach rocks de la plage de Doraleh pour une étude de microfaciès (cf. fig. 16).

Doraleh est situé à l'Ouest de Djibouti-Ville et à environ 10 km du centre ville. Les beach rocks se présentent en une succession de deux à trois bancs inclinés vers la mer (pendage entre 5° et 15°), et dont les sédiments sous-jacents sont meubles, non consolidés.

L'observation faite au microscope montre une cimentation, en frange, aragonitique aciculaire dont la longueur des cristaux est entre 0,001 et 0,002 mm (Fig. n° 16B).

Les cyanobactéries filamenteuses joueraient un rôle de stabilisateur du substrat et leurs processus métaboliques (pH, CO₂) participeraient activement à la cimentation, surtout calcite magnésienne ou aragonitique.

Les études de Taylor et Illing (1969), sur les beachrocks de Qatar, ont démontré qu'ils se forment uniquement à partir de l'eau de mer, et la présence d'une nappe douce n'est pas nécessaire.

L'étude microbiologique faite sur les beachrocks du golfe d'Aqaba par Kumbain (1979) et celle de Neumeier (1998) sur des beachrocks de la Mer Rouge et de l'Australie, ont montré que dans la majorité des beachrocks, c'est l'activité microbienne qui contrôle la formation du premier ciment micritique (cristaux d'aragonite larges et petits en fonction de la taille des bactéries) et qui permet aux autres ciments de se développer par la suite d'une manière inorganique. D'après les recherches menées par Monty, 1982, 1983, Van Laer, 1988 et Castanier et *al.*, 1989, à partir de cette première génération de souche bactérienne, la fabrication du ciment aragonitique aciculaire ou fibro-radiare ne serait toute autre qu'une autre population bactérienne dans la précipitation des carbonates.

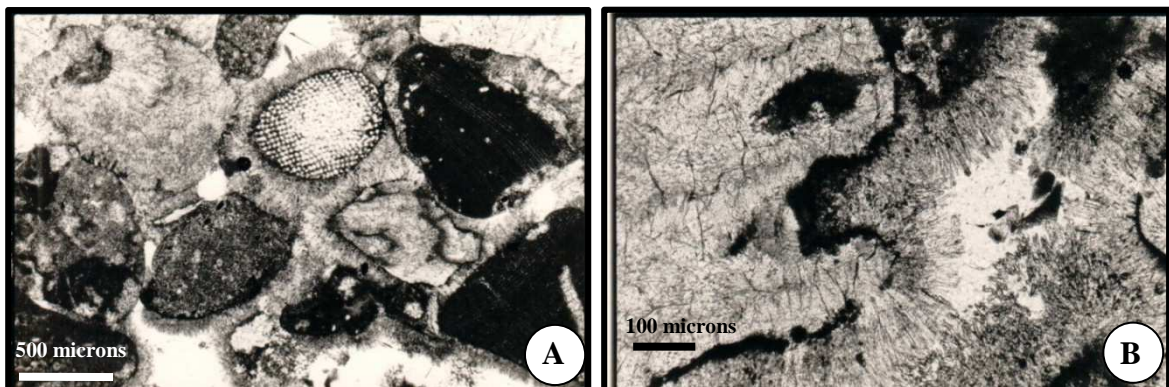


Fig n° 16 : Microfaciès de beachrocks de Doraleh : **A :** Grainstone lithoclastique et bioclastique (échinodermes, algues rouges, et autres bioclastes). Les grains sont reliés entre eux par un ciment fibreux précoce. La plupart des grains sont sub-arrondis attestant un milieu d'énergie modérée du littoral ; **B :** Le ciment fibreux aragonitique précoce se développe à partir d'un substrat constitué d'un gel organique (ciment micritique en aragonite ou en calcite magnésienne) enveloppant les bioclastes. Le ciment micritique, fixant les grains, se forme sous l'activité microbienne. (Photos : A.M.C.).

Les lames minces ont été confectionnées au Laboratoire de Stratigraphie et de Paléocéologie, Centre de Recherches sur l'Evolution des Systèmes Biosédimentaires, Université de Provence (Aix-Marseille I) en 1981.

Autres minéraux d'origine microbienne

Le gypse ($CaSO_4 - 2H_2O$)

A Ali Sabieh, une couche de gypse de 1,50m appartenant à la Formation "Calcaires marneux, marnes gypsifères dolomie" d'âge Thitonique Supérieur est constituée de stromatolithes et de laminites crypalgaires gypsifiés. Dans le Miocène de diverses régions, de nombreux auteurs (Vai and Ricci-Lucchi, 1978 ; Rouchy et Monty, 1981 ; Rouchy, Bernet-Rollande et Maurin, 1986) ont décrit que des filaments étaient préservés dans les cristaux de gypse.

Au lac Asal, actuellement, des bâtonnets de gypse se développent à partir d'un substrat riche en matière organique où prolifère des souches bactériennes participant au métabolisme des sulfates (Caminiti, 2000).

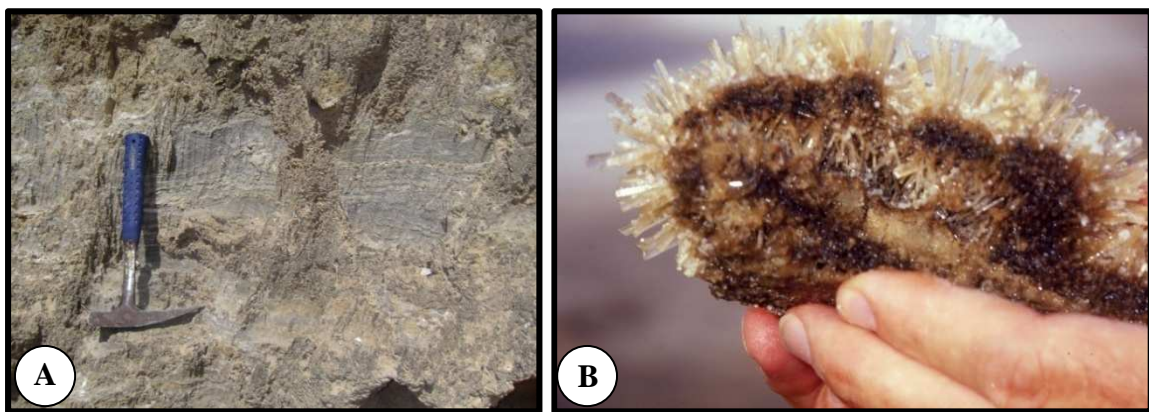


Fig n° 17 : **A :** Stromatolithes et laminites crypalgaires gypsifères du Tithonique Supérieur, au Sud d'Ali Sabieh, secteur de Dahawley ; **B :** Bâtonnet de gypse se développant à partir d'une couche de matière organique. La matière organique est fournie par l'activité des bactéries sulfureuses et photosynthétiques (Photos : A.M.C.).

Le sel (Halite : $NaCl$)

Les dépôts halitiques du lac Asal ont fait l'objet d'une étude granulométrique montrant une croissance discontinue. Par la suite des études de lames minces, au microscope optique et de cassure au MEB (microscope électronique à balayage) ont montré la structure fibro-radiale et concentrique de ces grains et aussi la présence de corps bactériens fossilisés dans le réseau cristallin. Ces édifices bio-cristallins seraient dues à des populations bactériennes occupant la surface des grains, à une augmentation de la quantité de nutriments dans la saumure et au phénomène périodique d'immersion et d'émersion des grains (Perthuisot et *al.*, 1993). Les bactéries halophiles se développent à partir d'une concentration en sel de 80g/l de sel dissous. Ce sont des bactéries extrêmes. L'eau du lac verdâtre est due aux bactéries chlorophylliennes, "Les Fleurs d'eau de Cyanobactéries" ou "Boom" en anglais effet de prolifération massive forment des "écumes" ou des "mousses" (Lavoie et *al.*, 2007). Ces écumes sont souvent présentes en bordure du lac.

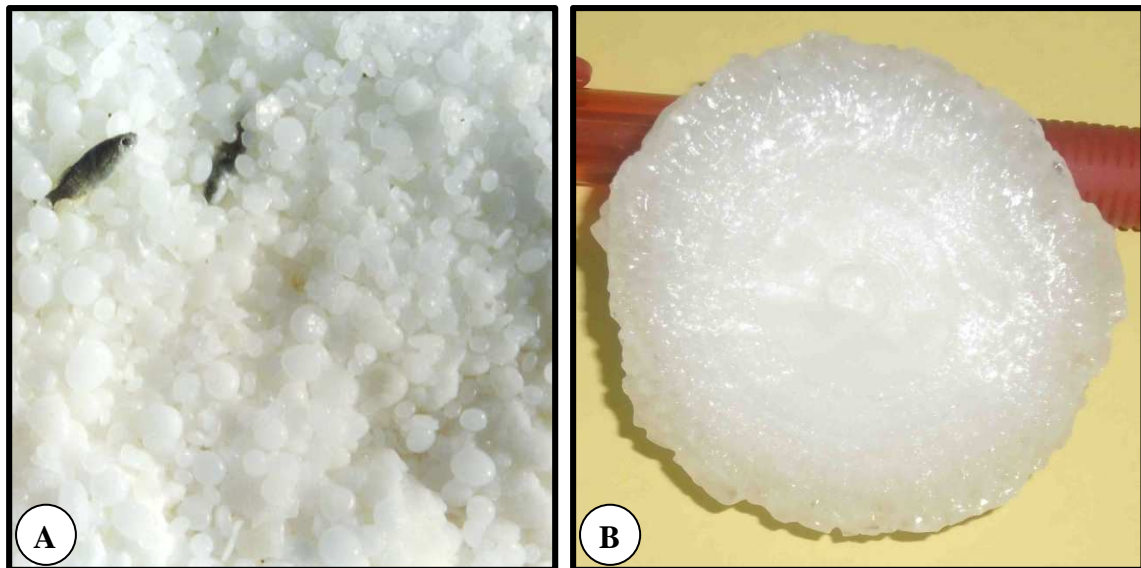


Fig n° 18 : A : Billes de sel et *Aphanius Dispar* (donnant l'échelle 2 cm) ; **B :** Haloolithe ou halooïdes montrant la structure fibro-radiale et concentrique d'origine microbienne halophiles. Le diamètre de cette bille de sel est de 5 cm, et correspondrait plus à une pissoïde. Généralement, les ooïdes ne dépassent pas les 2 mm (Photos : A.M.C.).

Les sulfures, croissance minérale et dégradation d'origine microbienne du Jurassique Supérieur d'Ali Sabieh

De nombreux sulfures (pyrite et marcassite) ont été observés dans principalement deux niveaux, celui des calcaires bitumineux de la "Formation Marnes gréseux à ammonites" d'âge Kimméridgien, correspondant à une roche mère avec un TOC de plus de 2% (comm. orale Machhour, 2000 ; Toland, 2013) et celui des grès sombres à la base de la Formation "Calcaires marneux, Marnes gypsifères et Dolomies" d'âge Thitonique Supérieur, correspondant à une roche réservoir avec un TOC de 1,08% (Toland, 2014). La première formation évoluant dans un milieu fermé anoxique, la matière organique présente est dégradée par les bactéries sulfato-réductrice des minéraux sulfureux (pyrite, marcassite) auraient précipités. La seconde ayant reçu des hydrocarbures, le même processus métaboliques aurait favorisé la formation de sulfures à partir de la réduction bactérienne du sulfate. Certains sulfures pourraient résulter de la décomposition du soufre contenant des composés organiques par voie microbienne. L'origine de ces sulfures serait due à des souches microbiennes capables de récupérer et d'associer le soufre et le fer à partir de la décomposition de la matière organique.

Le rôle des bactéries sulfato-réductrices dans la formation de la matrice de concentration métallifères de roches sédimentaires (minerais sulfurés) est connu et dont la formation de la pyrite intervient durant la diagenèse précoce. Elle s'élabore dans les sédiments quand les conditions suivantes sont réunies : milieu réducteur, micromilieu, concentration de matière organique. Sa précipitation provient de la dissolution des sulfates dans les pores du sédiment par réduction bactérienne (sidérobactéries), et, elle est le plus souvent altérée en oxyde de fer (limonite et/ou goethite).



Fig n° 19: **A:** Calcaires bitumineux à nombreux grains de pyrite et de marcassite, roche mère; **B:** Grès fins à grains de pyrite et marcassite, présence d'asphalte dans les pores, roche réservoir. Les grains de sulfures ont été oxydés en limonite soit par des bactéries sulfo-oxydantes dégradants le métal dans un milieu aérobique, soit dans un milieu sans oxygène des bactéries sulfurogènes (Photos : A.M.C.).

Pseudo-Pisooïdes et Pseudo-Ooïdes de fer du Crétacé d'Ali Sabieh

Récemment, dans l'oued Obolley, une lentille de grès a été observée portant des anomalies de concentration de fer de type pseudo-pisooïdes et pseudo-ooïdes. D'après Mazet et *al.* (1988), autour du noyau sédimentaire le plus ancien, entre Dagahha-Dabanayya et Obolley, la base des "Grès d'Ali Sabieh" sont représentés par des grès roses à ciment hématitique peu épais et le reste de la série par des grès blancs à ciment siliceux.

Ces concentrations de type pisooïdale ou ooïdale de fer au sein des grès seraient formées par le métabolisme des ferro-bactéries. La nucléation de ces sphérulites étant la ferro-bactérie, la croissance se fait d'une manière centrifuge dans les grès à quartz. L'apport du fer et du manganèse reste à être élucider (Caminiti, 2016). Une étude est en cour.

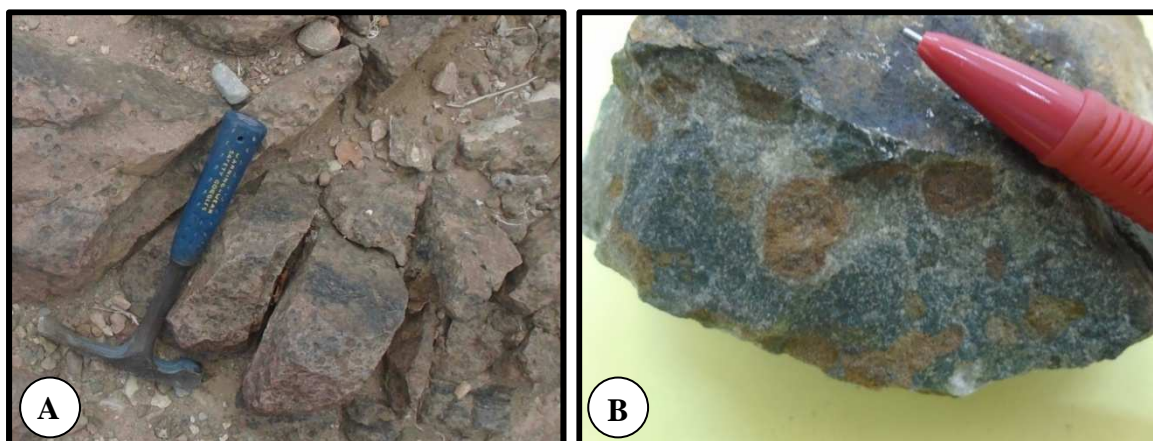


Fig n° 20 : **A :** Affleurement et **B :** échantillon de grès à pisooïdes et ooïdes ferreux, altérées en limonite ou goethite, dans l'oued Obolley au Sud d'Ali Sabieh. La partie sensiblement bleutée correspondrait à du manganèse (Photos : A.M.C.).

Autres minéralisations ayant une origine microbienne

La croissance de minéraux et d'amas ferromanganèse observés sur des roches volcaniques seraient dus à une part importante de l'activité du métabolisme microbien, et postérieur à la mise en place des coulées et des intrusions magmatiques. Les ramifications des dendrites de manganèse sont l'œuvre d'une bactérie, *Bacillus cereus*, découverte en 1887, et démontré par Billy et Cailleux (1969). Les agrégats de magnétite en surface du basalte seraient des biominéralisations formées par les bactéries magnétotactiques. Ces microorganismes ont été découverts par Blakemore en 1975, et étudiés récemment par Amor et al. (2015).

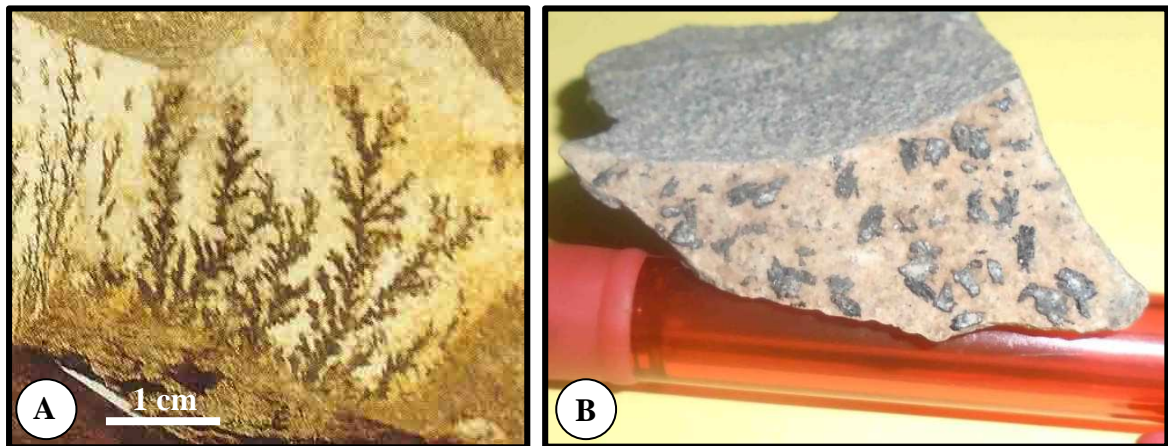


Fig. n° 21 : **A :** Dendrites de manganèse sur une surface d'un dyke rhyolitique, région de Werka (Ali Sabieh) ; **B :** Concentration d'agrégats de magnétite (Fe_3O_4) sur une surface de basalte (Basalte du Dalha : 8,9 à 3,6 Ma), région d'Arta.

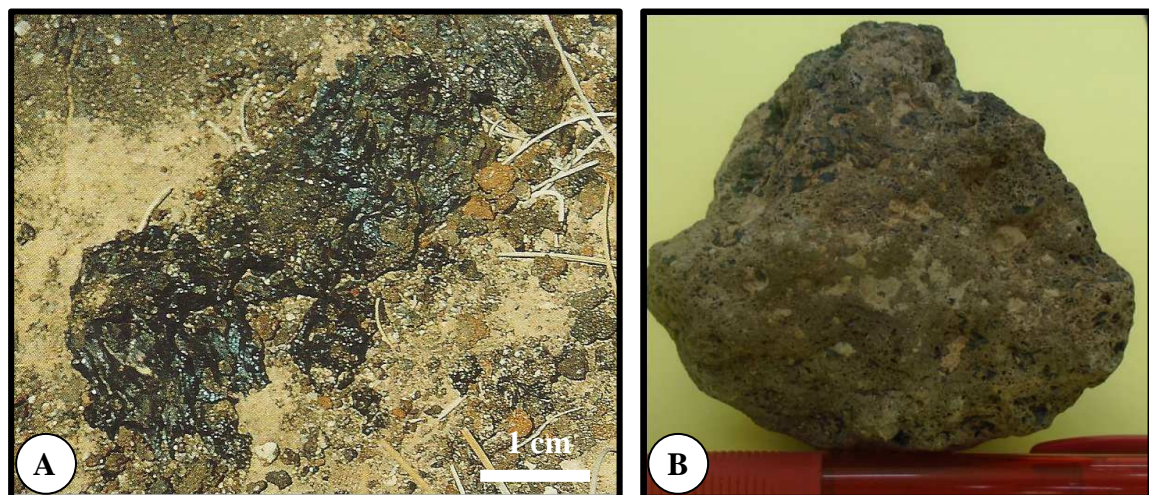


Fig. n° 22 : **A :** Revêtement de fer (hématite : Fe_2O_3) et de manganèse, volcanisme Actuel, zone axiale du rift Ghoubbet-Asal ; **B :** Vacuoles remplies de calcite, de dolomite et de fer (hématite), basalte vacuolaire du Dalha altéré par l'hydrothermalisme dans la région d'Arta. Dans un contexte de rift actif, outre l'énergie de chaleur, les fluides hydrothermaux apportant les éléments nécessaires, la prolifération de bactéries, au voisinage de ces événements, ont piégé et biominéralisé par métabolisme la calcite, la dolomite, le fer et le manganèse.

Association étroite entre stromatolithes et minerai de bauxite et celui du ferro-phosphate en Grèce Continentale

Bauxite d'âge Crétacé Moyen

La bauxite (*divers oxydes et hydroxydes d'aluminium*) du troisième horizon du Mont Parnasse, Grèce, a fait état d'une étude ponctuelle permettant d'observer une association entre stromatolithes en dômes, lamines et oïdes ou oolithes ferro-bauxitiques, surtout à la base (Caminiti, 1985a). D'un point de vue minéralogique, le principal constituant du troisième horizon bauxitique est un hydroxyde d'alumine "la diaspore" ($\text{AlO}(\text{OH})$). La formation de cette bauxite serait une succession de conditions de milieu, d'abord oxydantes puis réductrices dont le rôle des bactéries a été actif. La genèse de cette bauxite a été décrite par Nia (1971) dont le matériel originel serait un gel kaolinique et d'hydroxyde alumino-ferrique en suspension dans l'eau, issus du démantèlement de l'arrière pays constitué de roches ophiolitiques et flyschoides.

La précipitation de l'aluminium et du fer dépend du pH chimique de l'environnement, et dont les premiers stades, les microorganismes (bactéries, algues, champignons) de par leur processus métaboliques et de dégradations, contrôlent le pH et le potentiel redox (Eh) de l'environnement. D'après Nia (1971), les oïdes et les pisolites se sont formées dans une eau stagnante et sont autochtones. Mais, contrairement à l'interprétation de celles écrasées ou craquelées qui seraient dues à des phénomènes climatiques, alternance de sécheresse et d'humidité, la croissance de ces sphéroïdes correspond à une substance molle non encore lithifiée, pouvant avoir une concentration osmotique plus élevée que le milieu environnant et subir ainsi des tensions internes propres à lui (Van Laer com. orale, 1982 ; Caminiti, 1985a). L'étude au M.E.B. (microscope électronique à balayage réalisée à l'Université de Provence I, Marseille) sur cette bauxite a permis de dévoiler au niveau de ces oïdes-pisolites de nombreux éléments en baguettes qui sembleraient être des bactéries en bâtonnet de nature alumino-ferreuse, confirmé par Castanier, microbiologiste *in* Caminiti (1985a). De nombreux auteurs ont contribué à la formation de la bauxite ou la précipitation du matériel bauxitique par l'intervention directe des bactéries ferreuses et filamenteuses (Holland, 1903 ; Vologdin, 1947 ; Kuznetsov et *al.*, 1963 ; Tricart et Cailleux, 1972 ; Mac Farlane, 1983. Pour Vologdin (1947). L'élément structural principal de la bauxite est la bactérie ferreuse, et que le faciès de bauxite était leur niche écologique dans laquelle elles se développaient en grande quantité.

D'après le microbiologiste Gadd (2010), *"l'aluminium est le troisième élément le plus abondant de la croûte terrestre après le silicium et l'oxygène. Divers microbes sont impliqués dans la formation de minéraux contenant de l'aluminium à travers la bioérosion. La formation de la bauxite (bauxitisation) est réalisée par l'intervention microbienne en deux phases. Les constituants majeurs de la bauxite sont Al_2O_3 , Fe_2O_3 et SiO_2 ou des aluminosilicates de forme variée, et l'origine du matériel de bauxitisation serait volcanique ou des roches riches en aluminosilicate, calcaires et alluvionnaires. L'érosion des roches mères (formation de la protobauxite) est l'intervention de l'activité des bactéries et des champignons qui mobilisent l'aluminium, le fer et le silicium, qui sont par la suite précipités en minéraux d'oxydes, de silice et de silicate. La maturation de la protobauxite à la bauxite est réalisée par des bactéries ferro-réductrices et la*

fermentation dans des conditions anaérobiques qui mobilisent sélectivement les oxydes de fer et la silice ou le silicate, et d'enrichir ainsi la bauxite en aluminium".

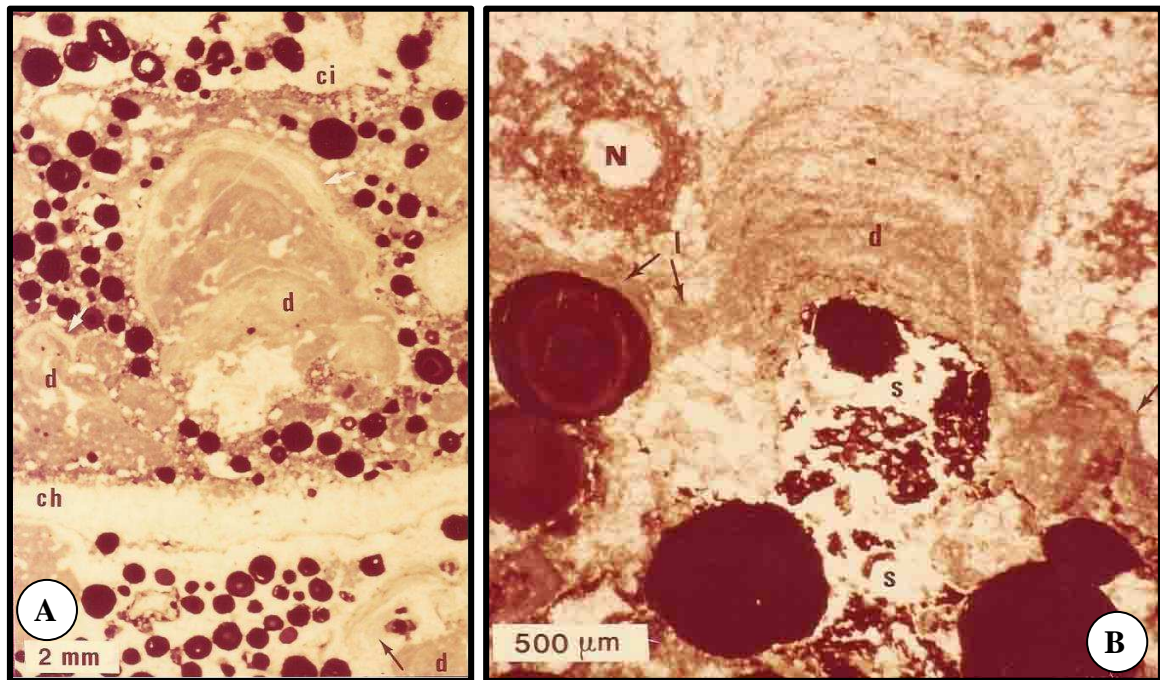


Fig. n° 23 : Troisième horizon bauxitique du Parnasse, Grèce : **A :** Alternance de bandes sombres correspondant aux stromatolithes de calcite à micro-dôme micritiques (d) associés aux ooïdes bauxitiques, et bandes claires correspondant à des cavités horizontales de type "Zebra" (ch) ou à des niveaux "Thrombolithiques" (ci) ; **B :** Structures organiques laminées à ondulées micritiques et biominéralisées en oxyde de fer formant parfois des dômes (d) et piégeant des grains d'ooïdes. Sous le dôme stromatolithique (d), une croissance fibro-radiale siliceuse à partir d'un substrat ferreux ! (N) : "Ooïde nébuleuse" à noyau sparitique. (Echantillon du secteur Polidrossos, Parnassos, Caminiti, 1985a) (Photos : A.M.C.).

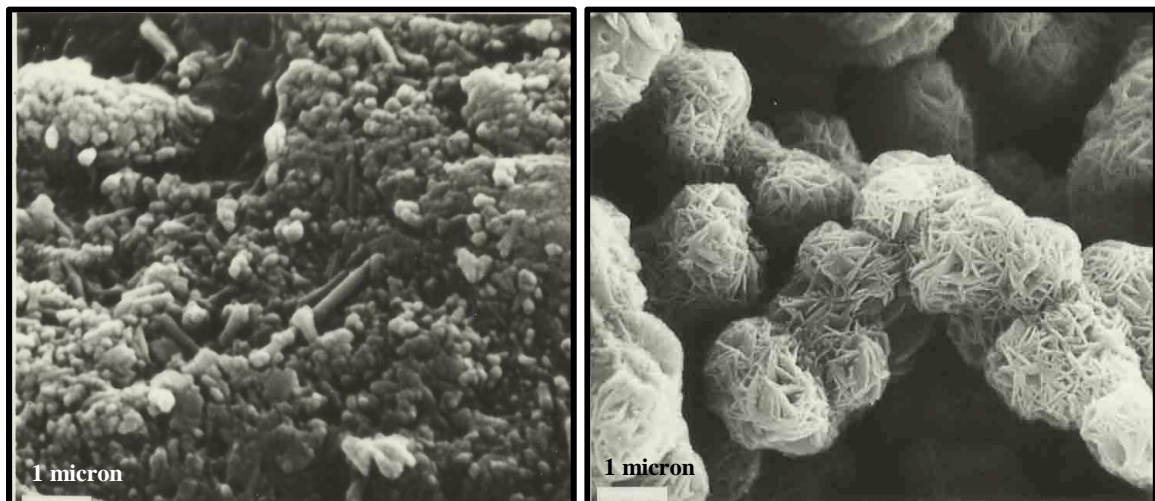


Fig. n° 24 : Nanofaciès : **A :** nombreuses bactéries alumino-ferreuses, en bâtonnet, ancrées dans la masse d'une pisooïde bauxitique : **B :** Oxyde de fer "Oligiste" (hématite), représentée sous forme de cristaux à faciès aplatis en tablettes formant des rosettes régulières, matrice bauxitique (Caminiti, 1985, photos : Université Aix-Provence I).

Horizon ferro-phosphate d'âge Paléocène

L'étude sédimentologique et géochimique ont montré qu'après le dépôt bauxitique dans la zone du Parnasse, une transgression marine du Crétacé Supérieur envahie l'ensemble de la zone avec des dépôts de la base au sommet, laguno-lacustre à teneurs élevées en fer, aluminium, potassium, manganèse et silice, puis une série néritique et récifale, absence quasi-totale de fer, et coiffée par une série pélagique avec augmentation des teneurs en éléments pour atteindre un maximum au niveau de la croûte stromatolithiques ferrophosphatées d'âge Danien (Paléocène). A la fin du Crétacé Supérieur, Maastrichien Terminal, la zone subit une tectonique régionale cassante, un arrêt de sédimentation et relayé par le développement de stromatolithes piégeant une grande quantité de foraminifères planctoniques. Le phosphore, associé aux oxydes de fer, serait en grande partie hérité du phosphore biologique libéré après la mort du plancton (Caminiti, 1985a).

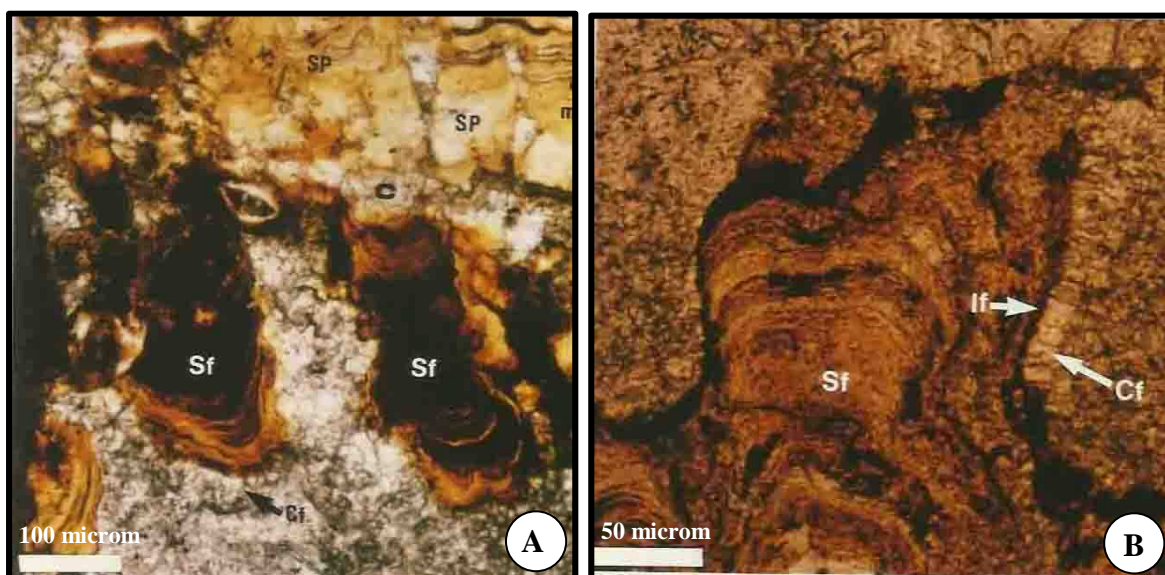


Fig. n° 25 : **A :** Structure stromatolithique ferrophosphatée columnaire. Sp : stromatolithes de couleur jaune à brune : collophanite amorphe et présence de microlamines de calcite (ms) ; Sf : stromatolithes riches en oxyde de fer séparés de la structure stromatolithiques précédente par une calcite en mosaïque (c) ; **B :** Cf : ciment de calcite fibro-radié développé à partir d'un substrat organique stromatolithique (If : film organique oxydé). Site : Peralakkos-Rhodia, Parnassos (Caminiti, 1985a) (Photos : A.M.C.).

Cayeux (1936) a décrit la présence de nombreuses bactéries dans les phosphates sédimentaires de tout âge. L'étude menée par Soudry (1983) sur les phosphates du Neguev central en Israël, d'âge Crétacé Supérieur, a montré que la phosphatogenèse était due en grande partie par l'activité cyanobactérienne.

Monty (1973) a contribué à une meilleure approche et connaissance du monde microbien des fonds océaniques où les nodules de manganèse sont des stromatolithes océaniques, en mentionnant que "*Ces nodules résultent de la croissance rythmée de films bactériens concentrant dans leur fourreaux des sels ferriques et/ou manganiques*".

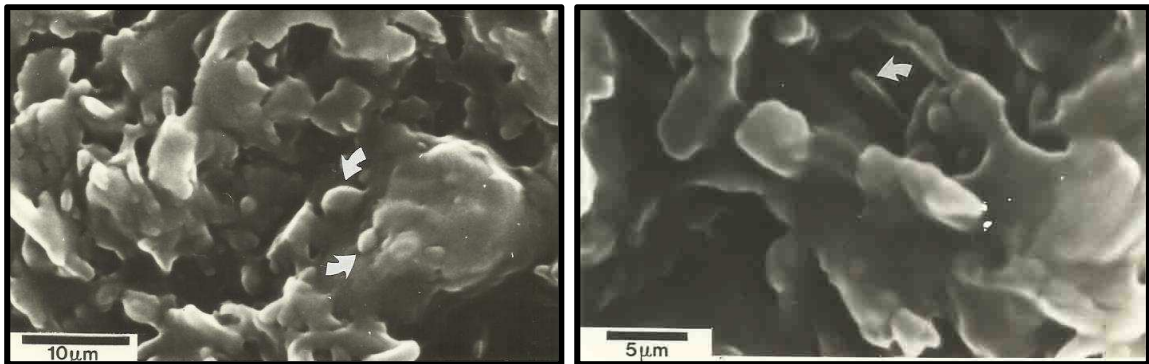


Fig. n° 26 : **A :** Nannofaciès (MEB) : **A :** Bactéries (bâtonnets et coques) associées au phosphate amorphe (collophanite). Certaines formes sphériques sont dues à la sporulation des bâtonnets : **B :** l'axe d'un prisme d'apatite est jalonné par une bactérie (bâtonnet, cf flèche) ancré dans la masse. (Caminiti, 1985, photos : Université Aix-Provence I).

Conclusion

Les quelques exemples présentés montrent que l'activité microbienne et/ou stromatolithique a contribué et continue de nos jours à jouer un rôle important à la formation des minéraux et des métaux dans les milieux sédimentaires et hydrothermaux. En sédimentologie, la compréhension de la genèse des sédiments, la diagenèse ou la biodiagenèse des minéraux et la formation de minerais fait appel à la biogéochimie, et à la microbiologie, sans oublier la minéralogie. La cristallographe, H. Metzger (1969) a précisé que "*tout corps de forme arrondie, globuleuse, ovoïde, sinueuse ou contournée ne la doit qu'aux substances animales ou végétales*". Le monde microbien est le passage indispensable entre la substance vivante et la substance inerte (minérale). Dans ce domaine, nos connaissances ne font que s'enrichir de jour en jour avec une collaboration pluridisciplinaire géoscientifique apportant non seulement des avancées purement scientifiques mais surtout dans l'appliquée que ce soit en médecine, en biologie, en géologie minière et pétrolière, mais, aussi dans la rémédiation de sites pollués, et ceux de la corrosion due aux activités humaines concernant les édifices classés dans le Patrimoine Mondial par l'UNESCO.

Les micro-organismes sont exceptionnels, premiers organismes fossiles de plus de 3,8 milliards d'années, longévité étonnante (réveil de bactéries après 300 Ma dans des roches charbonneuses : "fossiles vivants"), résistance dans des sites extrêmes aux froids (terrains gelés), aux chauds (à plus de 120° C), salinité importante, dans des milieux confinés, à des profondeurs de - 4 000 m, dans l'atmosphère (Dévigne, 1976).

Sans exclure les minéraux et minerais de nature chimique mis en place par des différentes phases issus des activités tectoniques, volcaniques et hydrothermales, d'autres espèces minérales ont été étroitement confrontés à l'activité microbienne dans des roches sédimentaires. Ainsi au Précambrien, les dépôts sédimentaires métalliques correspondent à la plus importante accumulation d'or, d'uranium, de fer (BIF) et associés à des métaux lourds et rares. La présence dans ces dépôts de minerais, de fossiles et de traces de fossiles, appartient aux premiers écosystèmes biologiques de la Terre. Des études sur des terrains plus récents entre le Secondaire et l'Actuel ont permis de corroborer des données

et d'interpréter les résultats (Dexter-Dyer & *al.*, 1984 ; Monty, 1986a), et notamment toutes les recherches menées aux niveau des dorsales océaniques aux niveau des sources abyssales des "Fumeurs Noirs ou Blancs" où des biocénoses microbiennes se sont développées et adaptées aux divers milieux, et, contribuant aux divers minéralisations.

De nombreux dépôts de minerais sont étroitement associés à des récifs stromatolithiques carbonatés, de dolomites d'origine algale, des dépôts sableux et des argilites et dont les microbes auraient joué un rôle actif ou de piégeage et de concentration. Mendelshon (1976) a fourni quelques exemples, au début du Protérozoïque : dépôts d'or et d'uranium au Witwatersrand (Afrique du Sud), dans la zone de "Rum Jungle" en Australie ; au Protérozoïque : gisements de fer (B.I.F. : Banded Iron Formation) au Canada, Etats Unis et Afrique du Sud ; les importants gisements de cuivre de Zambie/R.D.C., et ceux du Botswana ; au Protérozoïque Terminal : gisements de phosphates en Inde, Russie et Chine ; des dépôts stratiformes de manganèse en R.D.C. et Botswana ; au Cambrien-Ordovicien et Phanérozoïque des gisements de Plomb-Zinc (présence de baryte, de fluorite, de cuivre et de cobalt), gisements de type MVT (Mississippi Valley Type) ; au Dévonien : dépôts stratiformes de cuivre en Alaska ; au Dévonien/Carbonifère : dépôts de Plomb et zinc au Canada, en Ireland et en Allemagne ; au Jurassique : dépôts de Plomb et Zinc stratiformes au Nord-Ouest de l'Afrique, Maroc et Algérie ; des dépôts non stratifiés en Plomb, Zinc et Fer en Espagne.

La galène produit d'une métallogenèse microbienne en milieux sédimentaires a été démontré dans la nature et par des différentes expériences en laboratoire (Dévigne, 1974). Sa conclusion dans cette article reste incontournable *"les microbes plombophiles dans leur microhabitats seraient responsables de l'apparition de germes cristallins, qui se nourrissent ensuite par des réactions géochimiques pendant l'évolution de la diagenèse"*.

Les découvertes des événements médio-océaniques actuels, tapissés de bactéries de soufre à des températures avoisinant les 200° C, et des pressions importantes, de telles conditions correspondent à des minéralisations de basse température, et amèneraient à considérer les dépôts de blende (sphalérite) zonaire comme des stromatolithes de zinc accompagnés de pyrite, chalcopirite, galène, calcite, etc...(Monty, 1986a). Les matras microbiens jouent un rôle fort important comme support d'adsorption et de concentration de métaux : plomb, cuivre, manganèse, or (Bischoff, 1994, 1995 ; Gall, 1995). Aussi, Nisbet et *al.* (1994) pensent que le diamant serait issu de communautés bactériennes ! Le carbone des diamants proviendrait d'un produit de très anciennes bactéries. *"L'hypothèse se fonde sur deux faits : un carbone léger dans les dépôts de méthane sous-marin et un gaz carbonique solide dans les diamants. Le premier bien connu, le second étant un artefact soumis à des pressions importantes, mais dans certains cas, il reste des bulles de CO₂ non métabolisé. Ce gaz léger serait d'origine organique et confirmé par les taux de soufre trouvés dans les éclogites. De ce fait, le carbone de certains diamants pourrait être d'origine bactérienne (comme le graphite) ou bien du carbone en phase gazeuse (carbone léger d'origine bactérienne et du CO₂ provenant de carbonates)"* (Science et Vie, 1994),

Remerciements

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes et dont certains malheureusement ont quitté notre Terre-Mère, et qui m'ont apporté une grande connaissance dans cette "*Science Microbiogéologique*" et en "*Pétrographie*" dans mon parcours scientifique et professionnel : A.F. Maurin, M.C. Bernet-Rollande, P. Lapointe et L. Machhour (**TOTAL EXPLORATION**) ; C.L.V Monty et P. Van Laer (**Université de Liège**) ; J.P. Perthuisot et S. Castanier (**Université de Nantes**) ; G. Camoin (**CNRS-CEREGE**) ; J-M. Rouchy (**CNRS, Muséum de Paris**) et le Prof. S.S. Augustithis (**Université Technique Nationale d'Athènes**).

Je remercie encore une fois G. Camoin (**CNRS-CEREGE**), A. Virgone (**TOTAL EXPLORATION**) et A.E. Held (**CEREGE**) de m'avoir fait revivre récemment cette passion avec les travertins hydrothermaux de l'Afar, et qui sont exceptionnels dans ce monde microbiomatériel, fort important dans l'exploration industrielle.

Je remercie mes collègues de terrain de *l'Université de Brest Occidentale* : Le Gall, J. Rolet, R. Maury ; de *l'IFREMER* : Y. Fouquet ; de *Oolithica Geoscience Ltd* : Dr. C. Toland à travers l'exploration pétrolière de *Oyster Oil & Gas Ltd* et dont je leur suis reconnaissant ; du *C.E.R.D.* : le regretté Dr. I. Guirreh, Dr. M.A. Daoud, Dr. M.O. Awaleh, doctorant I.M. Ahmed et Dr. N. Moussa.

Mes remerciements font aussi au Directeur Général *C.E.R.D.*, Dr. Jalludin Mohamed qui m'a intégré dans son équipe scientifique en contribuant à la recherche minière et pétrolière, et à l'élaboration de la nouvelle carte géologique de la République de Djibouti au 1/200 000ème, récemment publiée. *Je le remercie surtout de m'avoir permis d'exercer mon métier de géologue d'explorateur.*

Références bibliographiques

La littérature de ce sujet impliquant plusieurs disciplines scientifiques est très vaste pour permettre une liste complète.

Adolphe J.P. et Billy C., 1974. Biosynthèse de calcite par une association bactérienne aérobie. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 278, Série D, p. 1873-2875.

Aitken J.D., 1967. Classification and environmental significance of crypt-algal limestone and dolomites, with illustrations from the Cambrian and Ordovician. *J. Sedim. Petrol.*, 37, p. 1163-1178.

Amor M., Busigny V., Durand-Dubief M., Tharaud M., Ona-Nguema G., Gélabert A., Alphanéry E., Menguy N., Benedetti M.F., Chebbi I. and Guyot F., 2015. Chemical signature of magnetotactic bacteria. *PNAS* 112(6), doi:10, 1073/pnas.1414112112.

Blakemore R.P., 1975. "Magnetotactic bacteria". *Science*, n° 190, 24 octobre 1975, p. 377-379.

Beerstecher E., 1954. *Petroleum Microbiology*. Elsevier, New York.

- Bernet-Rollande M.C., Mercadier G. et Maurin A.F., 1984.** Sedimentological and stratigraphical bearing of Urgonian (Barremian-Aptian) ooids from France and Tunisia. *5th Eur. Congr. Sedim. I.A.S.*, Marseille (Abstr.).
- Billy C, Cailleux A (1969).** Dépôts dendritiques d'oxydes de fer et de manganèse par action bactérienne. *CR Ac Sc*, 266:1643-1645
- Bischoff G.C.O., 1995.** Adsorption of Pb-Cu-Mn by microbially-accumulated iron-containing aluminosilicates in a gossan environment, Brown's Deposit, Northern Territory Australia. *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.* 196, 1, p. 19-43.
- Bischoff G.C.O., 1994.** Gold-adsorbing bacteria as colonizers on alluvial placer gold. *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.* 194, 2-3, p. 187-209.
- Bradley W.H., 1929.** Algal reefs and oolites of the Green River Formation. U.S.G.S. Profess. Paper 154-G, p. 203-233.
- BRGM, 2010.** Les frontières géologie-biologie. *Géosciences*, La revue du BRGM pour une Terre Durable, N° 11, juillet 2010, 100 p.
- Byrne N., 2008.** "Etude de la diversité métabolique des micro-organismes des sources hydrothermales océaniques". *Thèse Université de Brest*, 205p.
- Caminiti A.M., 2016.** Minéralisations et réservoirs pétroliers d'origine hydrothermale au Sud d'Ali Sabieh. *Science et Environnement*, CERD Djibouti, revue n° 30, p. 1-15.
- Caminiti A.M., 2015.** Horizons à oïdes en tant que réservoirs pétroliers. *Science et Environnement*, CERD Djibouti, revue n° 28, p. 84-99.
- Caminiti A.M., 2007.** Hydrothermalisme et minéralisation dans un contexte de rift actif - République de Djibouti. *Science et Environnement*, CERD Djibouti, revue n° 21, 27-51.
- Caminiti A.M., 2000.** Le fossé d'Asal et le lac Abhé - Deux sites géologiques exceptionnels en République de Djibouti. *Ed. Couleur Locale Djibouti*, 131 p.
- Caminiti A.M., 1985a.** Le Crétacé Supérieur de la plate-forme carbonatée du Parnasse-Ghiona, et de la formation carbonatée-détritique de Koulovate (zone béotienne), Grèce Continentale. Thèse : Doctorat de l'Université de Provence (Aix-Marseille 1), 3 tomes.
- Caminiti A.M., 1985b.** Etude de quelques microfaciès du Jurassique Supérieur de la région d'Ali Sabieh (République de Djibouti). *Rapport Interne TOTAL*.
- Caminiti A.M. et Ahmed I.M., (2013).** Compte rendu de la mission Afar - Lac Abhé & Lac Asal du 20 au 26 mai 2013. Rapport interne du CERD pour le compte du CEREGE-CNRS d'Aix en Provence, 106p.
- Casanova J., 1986.** East Africa Rift stromatolites. In: *Sedimentation the African Rifts* (Ed; by L.E. R.W. Renault, I. Reid and J.J. Tiercelin), pp 201-210, Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Castanier S, 1987.** Microbiogéologie: processus et modalités de la carbonatogénèse bactérienne. Doctorat d'Etat, Laboratoire de Biogéologie et Biostratigraphie, Université de Nantes, Faculté des Sciences et des Techniques, 541 p.
- Castanier S, 1984.** Etude de l'évolution quantitative et qualitative des populations bactériennes précipitant le carbonate dans différents cas artificiels de confinement réalisés à partir d'eau et de sédiment lagunaires Méditerranéens. Thèse de 3^{ème} cycle, Université AIX-MARSEILLE II, 131 p.

- Castanier S., Maurin A. et Perthuisot J.P., 1989.** Production bactérienne expérimentale de corpuscules carbonatés, sphéroïdaux à structure fibro-radiale. Réflexion sur la définition des ooïdes. *Bull. Soc. Géol. France*, (8), t. V, n° 3, p. 589-595.
- Castanier S., Maurin A. et Perthuisot J.P., 1988.** Les Cugnite : Carbonates amorphes de Ca et Mg, précurseur possible de la dolomie. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 306, Série II, p. 1231-1235.
- Castanier S., Maurin A. et Perthuisot J.P., 1987.** Intensification of microbial dolomitization in a natural continental environment by continuous fertilization in calcium and magnesium acetates (Perigord, France). *8th Intern. Symp. On Environ. Biogeochem., Sep.*, p. 14-18, Abstr. P. 60.
- Castanier S., Maurin A. et Bianchi A., 1984.** Participation bactérienne à la précipitation du carbonate. *C.R.Acad. Sciences, Paris*, 299, pp. 1333-1336.
- Castenholz R.W., 2008.** Le rôle des cyanobactéries et autres phototrophes dans les écosystèmes des sources chaudes. *Press Therm Climat*, 2008, 145, 129-134.
- Cayeux L., 1936.** Existence de nombreuses dans les phosphates sédimentaires de tout âge, Conséquences. *C.R. hebd. Séanc. Acad. Sci. Paris*, 203, pp. 1198-1200.
- Cayeux L., 1935.** Les roches sédimentaires de France ; les roches carbonatées. *Masson*, 463 p.
- Celet P. 1962.** Contribution à l'étude géologique du Parnasse-Kiona et d'une partie des régions méridionales de la Grèce continentale. *Ann. Géol. Pays Hél.*, t. XIII.
- Cloud P.E., 1962.** Carbonate precipitation in the marine environment. *Chemical Oceanography*, Riley, & Skirrow G., Eds., Academic Press, New York, 2, p. 125-158.
- Combes P.J., 1984.** Regards sur la géologie des bauxites: aspects récents sur la genèse de quelques gisements à substratum carbonate. *Bull. centres Rech. Explor. Prod. Elf Aquitaine*, 8, 1, p 251-274, 13 fig., Pau.
- Combes P.J., 1978.** Nouvelles données sur les relations entre la paléogéographie et la gîtologie des bauxites du 3^e horizon dans la zone du Parnasse (Grèce), *4th Intern. Congr. ICSOBA*, Athens, 1, p 92-100.
- Cornee A., 1983.** Sur les bactéries des saumures et des sédiments de marais salants méditerranéens. Importance et rôle sédimentologique. *Doc. GRECO 52*, Lab. Geol. Muséum Paris, 126p.
- Daoud M.A., Le Gall B., Maury R., Rolet J., Huchon P. et Guillou H., 2011.** Young rift kinematics in the Tadjoura rift, western Gulf of Aden, Republic of Djibouti. *Tectonics*, Vol. 30, TC102, 20 p.
- Demange J. et Stieltjes L., 1975.** Géologie de la région sud-ouest du TFAI. (région lac Abhé - lac Asal). *Bull. BRGM*, deuxième série, section IV, n° 2-1975, pp. 83 - 119, 20 fig., 2 tabl., 4 pl., 1 carte h-t.
- Devigne J.P., 2012.** « Géomicrobiologie ». <http://www.universalis.fr/encyclopedie/geomicrobiologie/>
- Devigne J.P., 1976.** Microflore et processus sédimentaires. *La Recherche*, n° 67, 433-443.
- Devigne J.P., 1974.** Une métallogenèse microbienne probable en milieux sédimentaires : celle de la Galène. ? , p. 35-37.

- Dexter-Dyer B., Kretzschmar M. & Krumbein W.E., 1984.** Possible microbial pathways in the formation of Precambrian ore deposits. *J. geol. Soc. London*, Vol. 141, 1984, pp. 251-262, 6 figs., 1 table.
- Drew G.H., 1914.** On the precipitation of calcium carbonate in the sea by marine bacteria and on action of denitrifying bacteria in tropical and temperature seas. *Publs. Carnegie Instn. Wash. Publ. 182 papers from Dept. Mar. Biol.*, 5 : 1-45.
- Ehrlich H.L., 1981.** Geomicrobiology. *Marcel Dekker INC.*, New York, 393 p.
- Fontes J.-C. et Pouchan P., 1975.** Les cheminées du lac Abbé (TFAI) : stations hydroclimatiques de l'Holocène. *C.R. Acad. SC. Paris*, t. 280, Ser. D, p. 383-386.
- Fournier M., Gasse F., Lepine J.C., Richard O. et Ruegg J.C., 1983.** Carte géologique de la République de Djibouti : feuille de Djibouti. *Ministère Français des Relations Extérieures et ISERST-ORSTOM Ed.*
- Gadd G.M., 2010.** Metals, minerals and microbes : geomicrobiology and bioremediation. *Microbiology*, 156, 609-643.
- Gall J.C., 1995.** Biofilms et mattes microbiennes : leur contribution à la sédimentogénèse. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 321, série II a, p. 823-835.
- Gasse F., 1975.** L'évolution des lacs de l'Afar central (Ethiopie et T.F.A.I.) du Plio-Pléistocène à l'Actuel. Thèse de Doctorat Univ. Paris VI, 390 p.
- Gasse F. and Fontes J.C., 1989.** Palaeoenvironments and palaeohydrology of a tropical closed lake (lac Asal, Djibouti), since 10 000 yr B.P. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 69, 67-102, Elsevier Science Publisher, Amsterdam.
- Gebelein C.D. and Hoffman P., 1973.** Algal origin of dolomite laminations in stromatolitic limestone. *Jour. Sed. Petrology*, v. 45, N° 3, pp. 603-613, fig. 1-8.
- Green River Geology Co. Pty. Ltd., 2004.** Djibouti Venture - Report on the Phase I - Epithermal Gold Exploration Work on Garrabayis and Gaggade Permit Area. By AM. Surtees, Vol 1 & 2.
- Heim A., 1916.** Monographie der Churfürsten - Mattstock - Gruppe. III., Stratigraphie der Unteren Kreide und Jura - Zur lithogenesis. *Beitr. Geol. Karte Schweiz, Bern*, NF, 20, 50, p. 369-662.
- Held A.E., Gisquet F., Virgone A., Camoin G., Rouchy J-M et Caminiti A.M., 2014.** New Ideas From Prospects in Middle East - The Carbonate Build-ups: The Plays of Tomorrow. *Third EAGE Exploration Workshop Moving Forward by Exploring Differently Abu Dhabi*, United Arab Emirates.
- Held A.E., Camoin G., Virgone A., Rouchy J-M et Caminiti A.M., 2013.** Microbial carbonate build-ups in a Presalt environment, the Afar Rift Lake System. *COCARDE Workshop and Field Seminar 2013*, September 23-27th, Sicily, Italy.
- Holland, 1903.** The constitution, origin and dehydration of laterite. *Geol. Mag.*, 10, p. 59-69.
- Jones B., Renaut R.W. and Rosen M.R., 2002.** Stromatolites Forming in Acidic Hot-Spring Waters, North Island, New Zealand. *PALAIOS*, v. 17, n° 1, p. 84-103.
- Kakowsky E., 1908.** Oolith and Stromatolith in norddenschen Buntsandstein. *Z. Dent. Geol. Ger.*, 60, p 68-125.

- Kalpakis G., 1979.** Contribution à l'étude sédimentologique de la zone Parnasse-Kiona. Biomicrite, stromatolithes, horizons hard grounds à la limite du Crétacé-Tertiaire. *Thèse*, Univ. Athènes.
- Kappler A., Pasquero C., Konhauser K.O. and Newman D.K., 2005.** Deposition of Banded Iron Formations by photoautotrophic Fe(II)-oxidizing bacteria. *Geology*, 33, 865-868.
- Kellerman K.F., 1915.** Relation of bacteria to deposition of calcium carbonate. *Geol. Soc. Am. Bull.*, Boulder, 26, p. 58.
- Kellerman K.F. Smith N.R., 1914.** Bacterial precipitation of calcium carbonate. *J. Wash. Acad. Sci.*, 4, p. 400-402.
- Konhauser K.O., Hamade T., Raiswell R., Morris R.C., Ferris F.G., Southam G., Canfield D.E., 2002.** Could bacteria have formed the Precambrian banded iron formations? *Geology*, 30, 1079-1082.
- Krumbein W.E., 1979.** Photoautotrophic and chemoorganotrophic activity of bacteria and algae as related to beachrock formation and degradation (Gulf of Aqaba, Sinai). *Geomicrobiol. J.*, 1, 139-203.
- Krumbein W.E., 1974.** On the precipitation of aragonite on the surface of marine bacteria. *Die naturwissenschaften*, Berlin
- Krumbein W.E., 1972.** Rôle des microorganismes dans la genèse, la diagenèse et la dégradation des roches en place. *Rev. Ecol. Biol. Sol.*, T, IX, p. 283-319.
- Kuznetsov S.I., Ivanov M.V., Lyalikova N.N., 1963.** Introduction to Geological Microbiology. *McGraw Hill, New-York*, (Transl. From Russian), p. 252 (372 ref.).
- Lagny Ph. et Michel J.C., 2003.** Les bactéries. *Géochronique*, n° 86, 13-35.
- Lalou C., 1957.** Studies on the bacterial precipitation of carbonate in sea water. *J. Sedim. Petrol.*, 27, : 190-197.
- Mac Farlane, 1983.** Laterites : Precipitates and Residues in the near-surface environment. In *Chemical sediments and Geomorphology*, Goudie A.S and Kenneth P. eds., Academic Press, p. 7-58.
- Lavoie I., Laurion I. et Vincent W., 2007.** Les Fleurs d'eau de cyanobactéries - Document d'information vulgarisée. Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau, Terre et Environnement, Québec, G1K 9A9, et, Département de Biologie, Université Laval, Québec, G1K 7P4.
- Mazet G., Recroix F., Barberie F., Gasse F. et Varet J., 1986.** Carte géologique de la République de Djibouti : feuille d'Ali Sabieh. *ORSTOM Ed.*, Ministère Français des Relations Extérieures et ISERST.
- Medelsohn F., 1976.** Mineral deposits associated with stromatolites. *Stromatolites*, Walker M.R. Ed., Elsevier Sc. Publ., Amsterdam, p. 645-662.
- Metzger H., (1969).** La genèse de la Science des Cristaux. *Librairie Scientifique et Technique Albert Blanchard*, Paris, 248 p.
- Monty C.L.V., 1986a.** Interactions événements géologiques - Stromatolithes. *Bull. Centres Rech. Explor.-Prod. Elf-Aquitaine*, 10, 2, pp. 537-553, 4 pl.
- Monty C.L.V., 1986b.** Microbial dolomites. Abstracts, 12th Int. Sediment. Congr. (Australia), Session C4, 215-216.
- Monty C.L.V., 1983.** Microbial spars. *Rapport interne C.F.P.*, 41 p., 52 pl.ph.

- Monty C.L.V., 1982.** Microbial spars. *11th Congr. I.A.S.*, Hamilton, Canada, Abstr. P. 26.
- Monty C.L.V., 1976.** The origin and development of crytalgal fabrics. *Ed. M.R. Walter: Stromatolithes*, Elsevier, p. 193-249.
- Monty C.L.V., 1973.** Les nodules de manganèse sont des stromatolithes océaniques. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 276, sér. D, p 3285-3288.
- Monty C.L.V., Rouchy J.M., Marin A., Bernet-Rollande M.C. et Perthuisot J.P., 1987.** Reef-Stromatolites-Evaporites facies relationships from Middle Miocene examples of the Gulf of Suez and Red Sea. *Ed. T.M. Peryt, Evaporite Basins, Lecture Notes in Earth Sciences*, Vol. 13, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1987, pp 133-188.
- Monty C.L.V. and Van Lear P., 1984.** Experimental radial calcite ooïds of microbial origin and fossil counterparts. *5th European Regional Meeting of Sedimentology*, Abstracts, 296-297.
- Neumeier U., 1998.** Le role de l'activité microbienne dans la cementation précoce des beachrocks (sediments interdidaux). Thèse N° 2994, Université de Genève, Suisse, 183p.
- Nia R., 1971.** Genesis of boehmite and diaspore in Greece Upper Cretaceous bauxites of the Parnassos-Kiona zone. *Second Intern. Symp. ISCOBA*, Budapest, 2, p. 69-98.
- Nisbet E.G., Matthey D.P. and Lowry D., 1994.** Can diamonds be dead bacteria? *Nature*, 367, p. 694.
- Oppenheimer C.H., 1961.** Note on the formation of spherical aragonite bodies in the presence of bacteria from the Bahama Bank. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 23, P. 295-296.
- Pelras M. et Le Ribault L., 1981.** Certains microbes jouent-ils un rôle dans les phénomènes de silification ? *Rev. Géol. Dyn. Et Géog. Phys.*, v. 23, fasc. 2, p. 151-160.
- Perthuisot J.P., 1975.** La sabkha el Melah de zarzis. Genèse et évolution d'un bassin salin paraliq. *Trav. Lab. Géol. ENS Paris*, 9, 252 p.
- Perthuisot J.P., Castanier S., Perthuisot J.-P., Rouchy J.-M., Maurin A. et Guelorget O., 1993.** Le rôle des bactéries dans la précipitation du sel : exemple du lac Asal (Djibouti). *In Jevade du Sel (Ed.)*. Actes Coll. Int. du sel, Salies de Bearn, pp 119-144.
- Purser B.H., 1980.** Sédimentation et diagenèse des carbonates néritiques récents. *Ed. Technip*, I.F.P., Tome 1, 366 p.
- Purser B.H., 1975.** Sédimentation et diagenèse précoce des series carbonatées du Jurassique de Bourgogne. *Thèse Paris*, 375 p.
- Rouchy J.-M., Bernet-Rollande M.C. et Maurin A.F., 1986.** Pétrographie descriptive des évaporites. Applications sur le terrain en subsurface et au laboratoire. Editions Technip, GRECO 52 (CNRS) : Les séries à évaporites en exploration pétrolière, 1 méthodes géologiques, pp 73-122.
- Taylor J.M.C and Illing L.V., 1969. Holocene intertidal calcium carbonate cementation, Qatar, Persian Gulf. *Sedimentology*, 12, 69-107.
- Rouchy J.-M. and Monty C.L.V., 1981.** "Stromatolites and crypalgal laminates associated with Messinian gypsum of Cyprus". In: *Phanerozoic Stromatolites*, C.L.V. Monty Ed., Springer-Verlag, Heidelberg, London, New York, 155-178.
- Science et Vie, 1994.** Le diamant : produit de microbes. *Science et Vie*, n° 920, -mai 1994, pp. 17.

- Selosse M.-A., Busti D. et Thomas P., 2008.** Les sources thermominérales d'Auvergne : chimiolithotrophie et photosynthèse. Publié par Olivier Dequincey, site internet : planet - terre - ens - Lyon, 10/03/2008.
- Soudry D., 1983.** Etude de la série phosphatée de la région d'Ein yahav (Neguev central, Israël). Logique séquentielle, pétrologie, approche de la phosphatogenèse. Thèse de Doctorat d'Etat, Inst. Nat., Polyt. De Lorraine, ecole nat. Sup., Géol. Appl. Et de Prop. Min., 177 p., 45 pl.
- Stieltjes L., 1973.** L'axe tectono-volcanique d'Asal (Afar Central – Territoire Français des Afars et des Issas). Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle. Université de Paris-Sud, centre Orsay, 7-11-1973.
- Stieltjes L., 1972.** Les ressources naturelles du T.F.A.I.. Note technique B.R.G.M., 10 août 1972.
- Taylor J.C.M. and Illing L.V., 1969.** Holocene intertidal calcium carbonate cementation Qatar, Persian Gulf. *Sedimentology*, 12, p. 69-107.
- Tiercelin J.J., Stoffers P., Kimun'a D.T., Ndontoni Z. and Nzojibwami E., 1992.** Sublacustrine hydrothermal seeps in northern Lake Tanganyika, East African Rift : 1991 Tanganyidro Expedition.
- Tiercelin J.J., Vincens A., Barton C.E., Carbonel P., Casanova J., G., Gasse F., Grosdidier E., Herbin J.P., Huc A.Y., Jardiné S., Le Fournier J., Mélières F., Owen R.B., Pagé P., Palacios C. Paquet H., Péniguel G., Peyp J.P., Raynaud J.F., Renaut R.W., de Renéville P., Richet J.P., RIFF R., Robert P., Seyve C., Vandenbroucke M. & Vidal G., 1987.** Le demi-graben de Baringo-Bogoria, Rift Gregory, Kenya - 30 000 ans d'histoire hydrologique et sédimentaire. *Bull. Centres Rech. Explor.-Prod. Elf Aquitaine*, 11, 2, pp. 249-540.
- Toland C., 2013.** "Reconnaissance Geology of Ali Sabieh, Bolck 1, onshore Djibouti". Oolithica Geoscience Ltd, prepared for Oyster Oil & Gas Djibouti, 73 p.
- Toland C., 2014.** "The Reconnaissance Geology of The Ali Sabieh, Bolck 1, onshore Djibouti: Results of the 2014 field campaign". Oolithica Geoscience Ltd, prepared for Oyster Oil & Gas Djibouti, 198 p.
- Tricart J. and Cailleux A., 1972.** Introduction to climatic geomorphology. Longman, London.
- Trudinger P.A. and Swaine D.J., 1979.** Biogeochemical cycling of mineral-forming elements. *Elsevier*, Amsterdam, VIII, 612 p.
- Valette J.N., 1975.** Le lac Abhé (T.F.A.I.) : étude morphologique et géochimique. *Bulletin B.R.G.M., deuxième série, Section II, n° 2, 1975*, pp 143-155, 5 fig. 6 tabl.
- Vai G.B. and Ricci-Lucchi F., 1978.** "The vena del Gesso in Northern Apennines : growth and mechanical breakdown of gypsified algal crusts". In: Messinian Evaporites in Mediterranean, Catalano, R. et al. Ed., *Mem. Soc. Geol. Ital.*, 1976, XVI, p. 217-249.
- Vasconcelos C, McKenzie J.A., Bernasconi S., Grujic D. and Tien A.J., 1995.** Microbial mediation as a possible mechanism for natural dolomite formation at low temperatures. *Nature*, 377, p. 220-222.
- Virgone A, Gisquet F., Richard L., Masine E., Gaucher E., Lopez B., Held A.E., Teboul P.A., Camoin G., Rouchy J.M., Caminiti A.M. et Durlet C., 2014.** Pre-Salt South Atlantic Carbonates : why are they so unconventional ? 19th *International*

Sedimentological Congress, from 22 to 24 august 2014, in Geneva, Switzerland, "*Sedimentology at the crossroads of new frontiers*", Université de Genève - IAS.

Vologdin A.G., 1947. The geological activity of micro-organisms. *Izvestiya AN. SSSRn.*, Ser., Geol., n° 3.

Walter T.R., J. Bauld and Brock T.D., 1972. Siliceous Algal and Bacterial Stromatolites in Hot Spring and Geyser Effluents of Yellowstone National Park. *Science*, vol. 178, p. 402-405.

Weiler N., 2011. Quand les algues vertes et leur gaz mortel tuent aussi des hommes. *Site internet : Toxiques*, 13 septembre 2011.