

# Résumé

---

Apparues il y a plus de 3,5 milliards d'années, les microbialites représentent l'un des plus anciens écosystèmes sur Terre. Ces architectes de la photosynthèse oxygénique dominent le registre fossile durant près de 80% de l'histoire de la Terre, ayant influencé l'évolution de la planète notamment en modifiant les propriétés de l'atmosphère. Malgré un déclin dramatique de leur abondance depuis le début du Phanérozoïque, ils se développent encore aujourd'hui dans un large spectre d'environnement de dépôt (Bahamas, Australie, Brésil, etc.). La distribution spatio-temporelle des microbialites en font donc une archive précieuse tant de la vie que de l'évolution de la Terre. Pourtant, après plus de 100 ans de recherche, leur origine ainsi que leur signification font toujours l'objet de débats. On sait peu de choses sur la formation des microbialites, en particulier sur le rôle relatif des facteurs microbiens et environnementaux déterminant leur croissance. La Laguna de los Cisnes, située à 53 ° 25' S et 70 ° 40' W en Terre de Feu chilienne, en Patagonie, nous offre un site unique pour combler cette lacune. Ce bassin s'est formé après la dernière glaciation, il y a environ 10 000 ans. Par la suite, le lac a été densément colonisé par des communautés microbiologiques à l'origine des microbialites carbonatées vivantes et fossiles affleurant dans le bassin. Nous avons exploré la contribution relative des facteurs environnementaux et biologiques contrôlant la morphogenèse de ces microbialites à différentes échelles.

Macroscopiquement, ces dépôts organo-sédimentaires ont une extension de presque 8 km<sup>2</sup> englobant plusieurs morphologies exceptionnellement grandes, avec des hauteurs et des largeurs maximales de 1,5 m et 5,0 m respectivement. La forme de type « cratère » est dominante, présentant un caractère sphérique à allongé, le plus souvent creux. La distribution spatiale et la succession temporelle des morphotypes indiquent que les caractéristiques physico-chimique de l'eau sont critiques dans la localisation ainsi que dans le style de l'usine carbonatée microbienne, qui à son tour se reflète dans le caractère morphologique du dépôt ultérieur. La mésostructure des microbialites révèle un schéma constitué par l'empilement de trois couches lithologiquement distinctes. Cette structure interne reflète une histoire de formation multiphasée, liée à la succession écologique de communautés microbiologiques spécifiques à travers le temps qui sont toujours fortement influencées par les conditions environnementales dominantes. Il est intéressant de noter que la présence simultanée de plusieurs tapis bactériens vivants donne un aperçu des interactions à micro-échelle entre les différentes composantes de l'écosystème microscopique (cyanobactéries, bactéries sulfato-réductrices, algues vertes et diatomées) et de leurs rôles relatifs dans les processus de calcification.

Enfin, la présence d'affleurements fossiles extraordinairement bien conservés en plus que des microbialites vivantes, donne une dimension temporelle à cette étude, posant les bases vers le développement d'un nouveau modèle de formation. En appliquant ce dernier à d'autres microbialites affleurant à différentes échelles spatiales et temporelles, les carbonates microbiens de la Laguna de los Cisnes pourraient fournir des informations essentielles afin d'améliorer la reconstruction des conditions environnementales dominantes au cours de l'évolution précoce de la vie sur Terre.

# Abstract

---

Appeared more than 3.5 billion years ago, microbialites represent one of the oldest ecosystems on Earth. These architects of oxygenic photosynthesis dominate the fossil record for nearly 80% of Earth's history, having influenced the evolution of the planet notably by changing the properties of the atmosphere. Despite a dramatic decline in their abundance from the start of the Phanerozoic, they still develop today in a wide spectrum of depositional environments (The Bahamas, Australia, Brazil, etc.). The spatio-temporal distribution of microbialites therefore make them a valuable archive of both life and Earth evolution. However, after nearly 100 years of research, their origin as well as their significance is still a matter of debate. Little is known about microbialite formation, in particular the relative roles of microbial versus environmental factors ruling their growth. Laguna de los Cisnes located at 53 ° 25' S and 70 ° 40' W in Chilean Tierra del Fuego, Patagonia, provides us with a unique site to fill this gap. This basin was formed during the retreat of the ice following the last glaciation about 10,000 years ago. Subsequently, the lake was densely colonized by microbiological communities that developed the presently living and fossil carbonate microbialites. We have explored the relative contribution of environmental versus biological factors controlling microbialite morphogenesis across various scales.

Macroscopically, these organo-sedimentary deposits have an extension of almost 8 km<sup>2</sup> encompassing several morphologies exceptionally large with maximum heights and widths of 1.5 m and 5.0 m respectively. Crater-like shapes are dominant, displaying a spherical to elongated character most frequently unfilled. Both spatial distribution and temporal succession of morphotypes indicate that the dominant physico-chemical character of the water is critical in the localization as well as in the style of the microbial carbonate factory, which in turn is reflected in the morphological character of the subsequent deposit. The microbialite meso-structure reveals a pattern of three lithological distinctive stacked layers. This fabric reflects a multiphase history of formation, linked with the ecological succession of specific bacterial communities throughout time that are still strongly influenced by the prevailing environmental conditions. Interestingly, the simultaneous occurrence of various living bacterial mats provides insights regarding the microscale interactions between the different compounds of the microscopic ecosystem (cyanobacteria, sulfate-reducing bacteria, green algae and diatoms) and their relative roles in the calcification processes.

Finally, the presence of extraordinary well-preserved fossil outcrops along with living microbialites gives a temporal dimension to this study, laying the foundation for the development of a new formation model. By applying the latter to other microbialites outcropping at different geographical and temporal scales, the microbial carbonates of Laguna de los Cisnes can provide critical information to better reconstruct the dominant environmental conditions during the early evolution of life on Earth.