



UNIVERSITE DE LIEGE

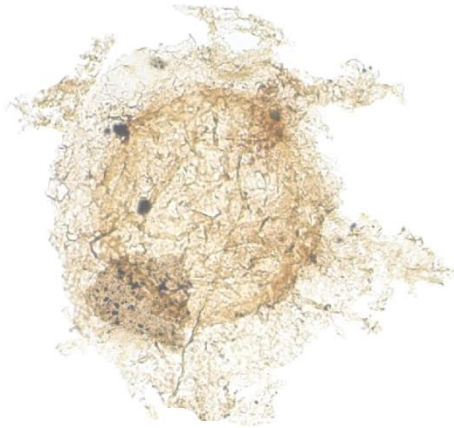
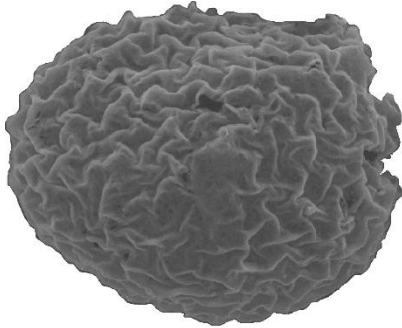
FACULTE DES SCIENCES

UR ASTROBIOLOGY

Early Life Traces & Evolution-Astrobiology

DEPARTEMENT DE GEOLOGIE

Morphologie, ultrastructure et composition
de microfossiles du Protérozoïque,
et implications pour l'évolution des eucaryotes



Thèse de doctorat
présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Science
par
Yohan Cornet
2020



UNIVERSITE DE LIEGE

FACULTE DES SCIENCES

UR ASTROBIOLOGY

Early Life Traces & Evolution-Astrobiology

DEPARTEMENT DE GEOLOGIE

Morphologie, ultrastructure et composition de microfossiles du Protérozoïque, et implications pour l'évolution des eucaryotes

Thèse de doctorat

Présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Science par

Yohan Cornet

Soutenance publique du 31 août 2021, devant un jury composé de :

Prof. Frédéric BOULVAIN (Université de Liège) – Président

Dr. Marie-Catherine SFORNA (Université de Liège) – Secrétaire

Prof. Emmanuelle JAVAUX (Université de Liège) – Promotrice

Dr. Philippe COMPÈRE (Université de Liège) – Membre

Dr. Kevin LEPOT (Université Lille 1) – Membre

Cette recherche a reçu le financement de :



European Research Council

Established by the European Commission

European Research Council

ERC Stg Elite



Belgian Science Policy

Projet *PAI Planet Topers*



Fonds de la Recherche Scientifique – FNRS & Fonds Wetenschappelijk Onderzoek-
Vlaanderen

Projet *EOS ET-HOME*

Résumé

Vouloir étudier et comprendre les mécanismes et facteurs influençant l'apparition et l'évolution de la Vie demande par nécessité une approche pluridisciplinaire au cœur de l'astrobiologie. En effet la Vie est liée intimement à la géosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère, influençant et influencée par ces dernières. Une approche combinée est également essentielle pour l'étude des traces de Vie du précambrien et, pour l'étude de potentielles traces de vie pouvant exister ailleurs dans l'Univers, chacune avec ses défis propres.

La présente étude avait comme objectif de contraindre les modalités et temporalités de la diversification des eucaryotes durant une période de temps s'étendant entre la fin du Mésoprotérozoïque et le début du Néoprotérozoïque (Tonien). Cette période de temps voit en effet l'apparition et la diversification de nouveaux groupes couronnes eucaryotes, mais aussi de microfossiles qui restent énigmatiques. Trois genres de microfossiles emblématiques de cette période ont été choisis comme sujets d'analyses morphologiques, ultrastructurales et chimiques combinées: *Cerebrosphaera*, *Jacutianema* et *Trachyhystrichosphaera*, provenant de différentes localités en Australie, au Spitsbergen et en Afrique.

Les résultats obtenus par les méthodes d'analyse (microscopie optique, microscopie électronique à balayage, microscopie électronique à transmission, microspectroscopies Raman et FTIR) ont révélés de nouveaux caractères morphologiques, ultrastructuraux et moléculaires permettant de proposer, confirmer ou discuter des affinités biologiques concrètes. Le genre *Cerebrosphaera* représente possiblement des œufs d'un groupe racine de Métazoaires. Le genre *Jacutianema* voit sa position au sein des algues vaucheriales confirmée. Bien qu'aucune affinité biologique n'ait pu être identifiée pour *Trachyhystrichosphaera*, les précédentes propositions de la littérature ont pu être réfutées. Ces découvertes permettent de mieux contraindre l'évolution des eucaryotes au Protérozoïque en démontrant l'importante diversification des groupes couronnes au sein de la période temporelle étudiée. Elles permettent également d'apporter de nouveaux points de calibrations pour les horloges moléculaires.

Abstract

The study and comprehension of the mechanisms and factors influencing the appearance and evolution of Life require a multidisciplinary approach at the centre of Astrobiology. Indeed, Life is intimately bound to the geosphere, hydrosphere and atmosphere, influencing and being influenced by them. Investigating Precambrian traces of life is challenging and also demands such a combined approach. Similar methods can also be applied to study potential traces of life in the Universe.

The present work aimed to constraining the modalities and timing of eukaryotic diversification during a time period ranging from the end of the Mesoproterozoic to the early Neoproterozoic (Tonian). This time is marked by the apparition and diversification of new eukaryotic crown groups. Three interesting microfossils genera that are characteristic of this stratigraphic range have been chosen for a combined morphological, ultrastructural and chemical studies: *Cerebrospiraera*, *Jacutianema* and *Trachyhystrihosphaera*. These fossils come from different localities in Australia, Spitsbergen and Africa.

The results obtained with the different methods of analyses (optical microscopy, scanning electron microscopy, transmitting electron microscopy, Raman and FTIR microspectroscopies) revealed new characters allowing to propose, confirm or discuss biological affinities. The genus *Cerebrospiraera* is proposed to represent eggs of a possible stem Metazoan. The genus *Jacutianema* is confirmed as a vaucheriale alga. Although no biological affinity could be proposed for the genus *Trachyhystrihosphaera* the previously published propositions were refuted. These results improve our understanding of eukaryotic evolution by demonstrating the importance of crown group diversification during the studied time range. They also provide new calibration points for molecular clocks.

Table des matières

Remerciements

Résumé

Abstract

Table des matières

Avant-propos	1
Chapitre 1 : Introduction	4
1. La Terre au Précambrien	4
1.1. L'Hadéen	6
1.2. L'Archéen.....	7
1.3. Le Protérozoïque	8
2. L'apparition de la Biosphère et l'évolution du vivant	11
2.1. Les différentes formes du vivant	11
2.2. Les origines du vivant	12
2.3. Les caractéristiques biologiques des Procaryotes.....	12
2.4. Les caractéristiques des organismes Eucaryotes	14
2.5. L'eucaryogenèse et les grands groupes Eucaryotes	15
2.6. La classification moderne des Eucaryotes.....	18
3. La diversité et l'évolution des eucaryotes au Protérozoïque	19
3.1. Au Paléoprotérozoïque	19
3.2. Au Mésoprotérozoïque	21
3.3. Au Néoprotérozoïque	24
3.3.1. Au Tonien	24
3.3.2. Au Cryogénien.....	28
3.3.3. A l'Ediacarien.....	29
4. Les critères de reconnaissance d'un microfossile eucaryote	32
4.1. La taille	33
4.2. La multicellularité	33
4.3. La morphologie	33
4.4. Les processus.....	34
4.5. Les structures de désenkystements	35
4.6. L'ultrastructure des parois	36
4.7. La composition de la matière organique	38
4.8. La combinaison des critères	39

Chapitre 2 : Contextes géologiques, matériels et méthodes	40
1. Contextes géologiques	40
1.1. Officer Basin (Australie)	41
1.1.1. Forage Lancer 1	45
1.1.2. Forage Empress 1A	46
1.1.3. Micropaléontologie.....	48
1.2. Svalbard (Norvège)	49
1.2.1. Formation de Svanbergfjellet	51
1.2.2. Micropaléontologie.....	54
1.3. Bassin de Taoudeni (Mauritanie)	54
1.3.1. Le Supergroupe 1 Hodh.....	56
1.3.2. Micropaléontologie.....	59
1.4. Bassin du Congo (République Démocratique du Congo)	60
1.4.1. Le Supergroupe de Mbuji-Mayi	61
1.4.2. Micropaléontologie	64
1.5. Bassin du Niari (République du Congo)	64
1.5.1. Le Sous-groupe de Bouenza	66
1.5.2. Echantillons	67
2. Matériel, préparation des échantillons et méthodes d'analyses	68
2.1. Matériel.....	68
2.2. Extraction acide des microfossiles	73
2.3. Préparation des lames palynologiques pour le microscope optique	76
2.4. Microscopie Optique	77
2.5. Microscopie électronique à Balayage (MEB)	78
2.6. Microscopie électronique en transmission à balayage	81
2.7. Microspectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier	86
2.8. Microspectroscopie Raman	88
Chapitre 3 : Paléobiologie de <i>Cerebrosphaera globosa</i>	94
1. Mise en contexte	94
2. Résumé de l'article	95
Chapitre 4 : Paléobiologie de <i>Jacutianema solubila</i>	119
1. Mise en contexte	119
2. Résumé de l'article	121

Chapitre 5 : Paléobiologie du genre <i>Trachyhystrichosphaera</i>	177
1. Introduction	177
2. Matériel et méthodes	181
3. Résultats	181
3.1. Microscopie Optique et Mesures Morphologiques	181
3.2. Morphologie au microscope électronique à balayage	191
3.3. Ultrastructure au microscope électronique en transmission	196
3.4. Microspectrométrie Raman	199
3.5. Microspectrométrie Infrarouge.....	206
4. Discussion	209
4.1. Eucaryotité du genre <i>Trachyhystrichosphaera</i>	209
4.2. Comparaison en <i>T. aimika</i> et <i>T. botula</i>	212
4.3. Les hypothèses d'affinité biologique de <i>Trachyhystrichosphaera</i>	212
5. Conclusion	216
Chapitre 6 : Conclusions et perspectives	217
1. Principaux résultats et comparaison entre trois genres de microfossiles énigmatiques et cosmopolites du Méso-Néoprotérozoïque	217
2. Impacts des résultats sur la compréhension de l'évolution des eucaryotes et perspectives	220
Bibliographie	222
Annexes	256

Avant-propos

La période allant de la fin du Mésoprotérozoïque au début du Néoprotérozoïque est le siège de bouleversements des conditions environnementales globales mais aussi d'une diversification du domaine Eukaryota, avec l'apparition de nombreux groupes couronnes. Si certains microfossiles de cette période ont pu être reliés à ces groupes modernes et leurs ancêtres possédant les caractéristiques du groupe (groupes couronnes), une large majorité n'est pas identifiée, soit par un manque d'études, soit du fait de l'absence de caractères diagnostiques permettant une classification.

Afin de mieux contraindre les modalités et la temporalité de la diversification des eucaryotes lors de cette période charnière, trois genres fossiles énigmatiques ont été sélectionnés afin de déterminer leur paléobiologie. Le matériel étudié comporte un échantillonnage représentatif de chaque espèce provenant de plusieurs bassins sédimentaires en Australie, en Mauritanie, en République Démocratique du Congo, en République du Congo, et au Svalbard. Chaque espèce de microfossile a été examinée en combinant l'analyse de la morphologie et la morphométrie des fossiles, ainsi que l'ultrastructure et la composition de leur paroi organique, grâce à l'utilisation de microscopie optique, microscopies électroniques à balayage et en transmission, et de micro-spectroscopies Raman et infrarouge. Le choix s'est porté sur ces morphotaxa car il s'agit de fossiles index, excellents marqueurs temporels de la période d'intérêt, et de morphologie bien distinctive. Il s'agit des acritarches *Cerebrosphaera globosa* (~798-732 Ma) et *Trachyhystrichosphaera aimika* et *T. botula* (~1100-720 Ma) ainsi que du microfossile multicellulaire *Jacutianema solubila* (~1100-720 Ma) (Fig. 1). Ces analyses ont permis de tester des hypothèses existantes d'affinités biologiques ou d'en proposer de nouvelles pour les 3 espèces étudiées, et ainsi d'améliorer nos connaissances sur l'évolution des eucaryotes du Protérozoïque moyen.



Figure 1. Spécimens représentatifs des microfossiles analysés. A : *Cerebrosphaera globosa*. B : *Jacutianema solubila*. C : *Trachyhystrichosphaera aimika*. Les barres d'échelles représentent 20 μm .

Ce manuscrit est constitué de 6 chapitres et d'annexes. Le chapitre 3 est constitué d'un article publié, les chapitres 4 et 5 sont en cours de soumission.

Le Chapitre 1 constitue l'introduction générale. Il présente un bref état de l'art sur la Terre au Précambrien, ainsi que la biosphère, en particulier la diversification des eucaryotes au Protérozoïque et les critères de reconnaissance des eucaryotes parmi les microfossiles.

Le Chapitre 2 présente le matériel fossile analysé, les contextes géologiques spécifiques d'où proviennent les différents microfossiles ainsi que les méthodes préparatoires et analytiques utilisées.

Les résultats des analyses sont décrits et discutés au sein du Chapitre 3 pour *Cerebrospira globosa*, du Chapitre 4 pour *Jacutianema solubila* et du Chapitre 5 pour *Trachyhystriosphera aimika*.

Le Chapitre 6 présente les conclusions du présent travail sous la forme d'un rappel des principaux résultats et d'une discussion des implications sur le contexte de l'évolution des eucaryotes au Protérozoïque.

Les annexes comprennent deux articles publiés en tant que co-auteur, un article soumis en tant que second auteur, deux articles soumis en tant que co-auteur ainsi que l'ensemble des images MEB, TEM et spectres FTIR réalisés sur les microfossiles étudiés.