

TITRE DU PROJET (limité chacun à 255 caractères)

Micrites et argiles néoformées en lagons tropicaux : formation, diagénèse précoce et stockage du carbone

1) Renseignements administratifs sur la direction de thèse¹ (1 page maximum) :

Directeur de thèse HDR :

Nom : Vennin

Prénom : Emmanuelle

Section CNU : 36

Grade : PE Ex2

HDR : Date de soutenance...2004. Discipline : Sciences de la Terre.

L'HDR devra être soutenue, ou sa soutenance autorisée, au moment du dépôt du présent projet.

Coordonnées (adresse, courriel, téléphone) : 6 Bvd Gabriel 21000 Dijon,
emmanuelle.vennin@ube.fr

Unité d'appartenance (intitulé, label, n°, directeur) : Biogéosciences-CNRS 6282, Thomas Saucède

Co-directeur de thèse éventuel :

Nom : Bundelewa

Prénom : Irina

Section CNU : 36

Grade : MCF

HDR : non ☒ ; oui ☐ Date de soutenance..... Discipline :

Coordonnées (adresse, courriel, téléphone) : 6 Bvd Gabriel 21000 Dijon,
irina.bundelewa@ube.fr

Unité d'appartenance (intitulé, label, n°, directeur) : Biogéosciences-CNRS 6282, Thomas Saucède

2) Descriptif du projet de thèse (devra inclure les rubriques suivantes) :

- nom et label de l'unité de recherche (ainsi que l'équipe interne s'il y a lieu)

Biogéosciences UMR6282 Université Bourgogne Europe, CNRS, EPHE, équipes SEDS & SAMBA

- localisation

Sciences Gabriel, 6 boulevard Gabriel, 21000 Dijon

¹ ATTENTION : selon l'article 16 de l'arrêté du 25 mai 2016, le total d'encadrants ne peut pas dépasser 2, sauf si l'un des encadrants appartient au monde socio-économique, qui peut venir en sus, ou en cas de co-tutelle; Le décompte des co-encadrements se fera au prorata du nombre d'encadrants : 1 pour 1 encadrant, ½ pour deux encadrants.

- nom du directeur de thèse et du co-directeur s'il y a lieu

Emmanuelle VENNIN & Irina BUNDELEVA

- adresse courriel du contact scientifique

emmanuelle.vennin@ube.fr

irina.bundeleva@ube.fr

- titre du projet

Micrites et argiles néoformées en lagons tropicaux : formation, diagénèse précoce et stockage du carbone

- description du projet (2 pages maximum)

Ce projet de thèse vise plus largement à comprendre les mécanismes régissant le stockage et la libération du CO₂ dans les lagons tropicaux, en étudiant l'équilibre entre précipitation carbonatée microbienne et néoformations silicatées (reverse weathering), deux processus étroitement liés qui influencent la composition minéralogique et chimique des sédiments et leur potentiel de séquestration ou de libération du carbone.

Depuis la révolution industrielle, les concentrations atmosphériques de CO₂ sont passées d'environ 280 ppm à plus de 420 ppm, avec des projections de forte hausse d'ici 2100 (Berry, 2021 ; IPCC, 2023). Cette augmentation, liée principalement à l'exploitation des combustibles fossiles, entraîne une hausse de la teneur en carbone inorganique dissous et des perturbations liées à l'acidification des océans et des cycles biogéochimiques (Liaskas et al., 2000 ; Ruddiman, 2005 ; Adil et al., 2023 ; Sabine & Tanhua, 2009). Le développement de stratégies de capture et de stockage du carbone est donc devenu prioritaire (IPCC, 2007 ; Bachu, 2008 ; Massarweh & Abushaikh, 2024). Parmi les solutions de capture du CO₂ proposées aujourd'hui, généralement associées à un stockage, notamment dans d'anciens réservoirs pétroliers, un mécanisme naturel fondé sur la production carbonatée, en particulier micritique, apparaît comme une solution plus sûre et durable. Les micrites, dominantes dans les sédiments lagunaires et peu profonds, sont favorisées par l'activité microbienne et la dégradation des substances polymériques extracellulaires (EPS), qui libèrent le calcium nécessaire à la croissance cristalline (Krumbein & Stal, 1991 ; Glunk et al., 2011 ; Dupraz & Visscher, 2005). Ces boues micritiques, présentes depuis 3,7 milliards d'années, constituent un puits majeur de carbone et peuvent composer jusqu'à 80 % des dépôts carbonatés (Grotzinger & James, 2000 ; Milliman & Droxler, 1993 ; Reijmer, 2021).

À l'inverse, les argiles néoformées jouent un rôle antagoniste. Si elles peuvent stabiliser la matière organique et piéger le méthane, leur formation en présence de cations dissous et de gels silicatés précurseurs modifie l'alcalinité du milieu. Les réactions chimiques associées (reverse weathering) peuvent alors favoriser un relargage de CO₂, jouant ainsi un rôle tampon important dans les processus de stockage ou de déstockage du CO₂ au sein des environnements sédimentaires propices aux néoformations (Baldermann et al., 2025 ; Aubineau et al., 2019). Micrites et argiles traduisent ainsi deux dynamiques contrastées du cycle du carbone : la précipitation carbonatée contribue au stockage géologique durable du CO₂, alors que la néoformation d'argiles peut limiter ce stockage, voire induire un relargage net de CO₂. Néanmoins, plusieurs travaux suggèrent que l'intensification de l'activité microbienne en contexte enrichi en carbone pourrait stimuler la production carbonatée, mettant en évidence le potentiel de bioremédiation des systèmes micritiques (Lal, 2004 ; Boussagol et al., 2024). Ces mécanismes demandent à être mieux compris et quantifiés dans les environnements de lagons tropicaux modernes.

Ce projet s'organise en 2 volets expérimentaux :

Volet 1 : étude *in situ/in natura*: Ce volet vise à quantifier les interactions biotiques (microorganismes, EPS) et abiotiques (pH, température, alcalinité, concentration ionique) contrôlant la formation conjointe des micrites et des argiles et leur impact net sur la capture ou la libération du CO₂. L'étude sera menée dans trois lagons tropicaux : Nouvelle-Calédonie (système carbonaté-silicoclastique), Mayotte (système volcanique) et Tahiti (système récifal carbonaté), offrant un gradient de conditions géochimiques et biologiques. Le volet « terrain et carottages » comprend 5 carottes de 30 cm respectivement à Mayotte et en Nouvelle-Calédonie, actuellement en analyse, et 10 nouvelles carottes de 50 cm à Tahiti (prévues novembre 2026). Les transects depuis la mangrove

au milieu marin ouvert seront cartographiés via des images satellitaires et MNT (IGN-F) et complétés par des acquisitions LiDAR. Les carottes seront datées ^{14}C (restes végétaux, ciments et mollusques calcitiques) et des repères chrono-stratigraphique seront obtenus par analyse du ^{137}Cs . Le volet « analytique » inclut pour la caractérisation des sédiments : 5 échantillons par carotte pour (1) les analyses microscopiques : Cryo-MEB (microscope électronique à balayage), confocal, à balayage laser (MCBL) sur la plateforme DIMACELL, INRAE ; MEB et MET (microscope électronique à transmission) sur la plateforme ARSEN) et DRX sur la plateforme GISMO ; (2) les analyses spectroscopiques : IR-FTIR et Raman (sur la plateforme de l'ICMUB) pour la minéralogie et les composés organo-minéraux. Les éléments majeurs et traces seront quantifiés en WD-XRF (fluorescence X), spectrométrie de masse ICP-AES, ICP-MS pour les terres rares (à Nancy), et par spectrométrie LA-ICPMS pour l'isotopie, et en spectrométrie plasma laser (LIBS, GISMO) pour les éléments légers, et ainsi que par cartographie XFM au synchrotron SOLEIL (Saclay). La diversité microbienne sera étudiée par ADN et microscopie confocale sur boues colorées pour détecter Ca^{2+} et acides nucléiques.

Cette approche permettra de relier la formation des micrites et des argiles à l'activité microbienne, aux conditions physico-chimiques et à la séquestration ou libération de CO_2 et de mieux comprendre le rôle antagoniste de ces deux processus dans le cycle du carbone des lagons tropicaux. Afin de tester plusieurs hypothèses concernant le rôle des microbes et des EPS sur la formation des micrites et des argiles néoformées, des analyses en laboratoire seront réalisées dans le cadre du second volet.

Volet 2 : étude *in vitro* :

Ce volet consiste en l'extraction, la quantification et la caractérisation des EPS issus des carottes sédimentaires étudiées et de la colonne d'eau, ainsi qu'en la mise en place d'expériences en présence d'EPS. L'extraction et l'analyse des EPS seront réalisées selon le protocole utilisé en routine au laboratoire Biogéosciences. Ce protocole repose sur une succession d'étapes de filtration, d'ultrafiltration et de dialyse, avec pour objectif d'obtenir des EPS purifiés sous forme de lyophilisat. Le lyophilisat d'EPS sera ensuite quantifié afin de déterminer l'évolution de la concentration en EPS dans l'eau à différentes profondeurs, à l'interface eau-sédiment et les carottes sédimentaires en fonction de la profondeur et du contexte environnemental. Des analyses biochimiques (tests colorimétriques, tests ELISA) seront ensuite effectuées sur les EPS extraits afin de déterminer leur composition, notamment la concentration en protéines, en sucres et en groupes fonctionnels chargés négativement, qui constituent des sites potentiels, de stockage des cations et de nucléation des carbonates. Les EPS extraits et caractérisés seront ensuite utilisés pour des expériences *in vitro* visant à tester : (a) leurs interactions avec les argiles (réactions de cristallisation et de recristallisation) ; (b) la dégradation des EPS (par des enzymes et possiblement par des bactéries hétérotrophes), afin d'évaluer la cinétique de libération du calcium (Ca^{2+}) impliqué dans la précipitation des carbonates. (c) la précipitation des carbonates en présence d'EPS.

Ce projet de thèse s'inscrit dans une dynamique collaborative internationale impliquant des équipes suisses (N. Zeyen) et américaines (P. Visscher). Il mobilise également des chercheurs de INRAE, du Laboratoire Chrono-environnement et de Biogéosciences, contribuant notamment à l'initiative HARMI (Harnessing Microbiomes for Sustainable Development ; PIA d'excellence). Une collaboration scientifique est d'ores et déjà menée avec l'Université de Nouvelle Calédonie et le Service Géologique de Nouvelle Calédonie (M. Mathian, P. Maurizot) et l'Université de Mayotte (C. Gollety) sur la compréhension des boues carbonatées et des argiles.

Les objectifs de la thèse s'inscrivent pleinement dans les thématiques portées par les équipes SEDS (Systèmes, Environnements et Dynamique Sédimentaire) et SAMBA (Structuration des communautés aquatiques et Biominéralisation) et plus particulièrement au questionnement transversal : « Minéralisation et préservation des carbonates microbiens ». L'encadrement de la thèse se déroulera au sein du laboratoire Biogéosciences, de l'équipe SEDS (E. Vennin ; P. Pellenard, P. Boussagol et C. Odobel) et SAMBA (I. Bundeleva) et s'appuiera sur l'environnement disponible du laboratoire, sa plateforme analytique GISMO et le service analytique SC2B (Biologie et biominéralisation).

sandstone formations in western Canada. *Energy Procedia*, 37, 4428–4436. **Baldermann**, A., Banerjee, S., Löhr, S. C., Rudmin, M., Warr, L. N., & Chakraborty, A. (2025). Exploring reverse silicate weathering across geological time: a review. *Clay Minerals*, 60(1), 1–27. **Berry**, E. X. (2021). The impact of human CO₂ on atmospheric CO₂. *Science of Climate Change*, 1(2), 1–46. **Boussagol**, P., Vennin, E., Monna, F., Millet, L., Bonnotte, A., Motreuil, S., Bundeleva, I., Rius, D., & Visscher, P. T. (2024). Carbonate mud production in lakes is driven by degradation of microbial substances. *Communications Earth & Environment*, 5, 533. **Boussagol**, P. (2024). Les carbonates microbiens, un avenir pour la capture et le stockage de CO₂ (CARBOSTOCK). PhD thesis, Université de Bourgogne. **Dupraz**, C., & Visscher, P. T. (2005). Microbial lithification in marine stromatolites and hypersaline mats. *Trends in Microbiology*, 13, 429–438. **Glunk**, C., Dupraz, C., Braissant, O., Gallagher, K. L., Verrecchia, E. P., & Visscher, P. T. (2011). Microbially mediated carbonate precipitation in a hypersaline lake, Big Pond (Eleuthera, Bahamas). *Sedimentology*, 58(3), 720–736. **Grotzinger**, J. P., & James, N. P. (2000). Precambrian carbonates: evolution of understanding. In *Carbonate Sedimentation and Diagenesis in the Evolving Precambrian World* (SEPM Special Publication 67, pp. 3–20). **IPCC**. (2023). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1–34). IPCC, Geneva, Switzerland. **Krumbein**, W. E., & Stal, L. J. (1991). The geophysics of marine cyanobacterial mats and biofilms. *Kieler Meeresforschungen-Sonderheft*, 8, 137–145. **Lal**, R. (2004). Offsetting China's CO₂ emissions by soil carbon sequestration. *Climatic Change*, 65(3), 263–275. **Liaskas**, K., Mavrotas, G., Mandaraka, M., & Diakoulaki, D. (2000). Decomposition of industrial CO₂ emissions: the case of European Union. *Energy Economics*, 22(4), 383–394. **Massarweh**, O., & Abushaikh, A. S. (2024). CO₂ sequestration in subsurface geological formations: A review of trapping mechanisms and monitoring techniques. *Earth-Science Reviews*, 104793. **Milliman**, J. D., & Droxler, A. W. (1996). Neritic and pelagic carbonate sedimentation in the marine environment: Ignorance is not bliss. *Geologische Rundschau*, 85, 496–504. **Pace**, A., Bourillot, R., Bouton, A., Vennin, E., Braissant, O., Dupraz, C., Duteil, T., Bundeleva, I., Patrier, P., Galaup, S., Yokoyama, Y., Franceschi, M., Virgone, A., & Visscher, P. T. (2018). Formation of stromatolite lamina at the interface of oxygenic–anoxygenic photosynthesis. *Geobiology*, 16(4), 378–398. **Reijmer**, J. J. G. (2021). Marine Carbonate Factories: Review and Update. *Sedimentology*, 68, 1729–1796. **Ruddiman**, W. F. (2005). Plows, Plagues and Petroleum: How Humans Took Control of Climate. Princeton University Press. **Sabine**, C. L., & Tanhua, T. (2010). Estimation of anthropogenic CO₂ inventories in the ocean. *Annual Review of Marine Science*, 2, 175–198. **Talon**, J., Pellenard, P., Baele, J. M., Quesnel, F., Briais, J., Iakovleva, A., Dupuis, C., Bruneau, L., & Vennin, E. (2025). A model for the concomitant early formation of dolomite and fibrous clays in coastal bay systems: Evidence from the Eocene (Paris Basin, France). *Sedimentology*, 72, 1860–1898.

- Financement du projet – partie Recherche (montants acquis, type de contrat)

Acquis

1. AAP1 International M-CARBO-STORE–HARMI–ANR21 EXS0014 projects- 173270€- Microbial carbonate muds, a potential for Carbon capture and STORAgE ;Ce projet a démarré en octobre 2025- pour 3 ans (E. Vennin).
2. SRO- Diagenèse précoce des micrites carbonatées et interactions avec les argiles néoformées dans les lagons tropicaux de Nouvelle-Calédonie – LagCO₂ (E. Vennin & P. Boussagol)- 8000 euros (2026-acquis) et demande en année 2 (9950-2027- à venir)
3. Financement ATTRACT- Région Bourgogne Franche Comté (2026-28) - Microbial CaRbONate Induced Trapping and Export- 149948€ (E. Vennin)- une partie des équipements demandés dans le cadre de ce projet (Post-doc de C. Odobel) seront à disposition et donc déjà acquis pour mener à bien le projet de thèse.

Etape 1 de l'acquisition

4. Appel à projet Transbio/ Dispositif Structuration de la Recherche en Bourgogne-Franche-Comté – SHALLOW-CLAY : Processus de formation des argiles dans les boues carbonatées de lacs, lagunes et lagons en contextes évaporitiques à tropical - comparaison d'environnements modernes et cénozoïques- 98973€ (P. Pellenard, co-financement Harmi- 22% - résultat après vote des élus de la région, Mai 26).

A venir

5. Une demande SRO-OSU « envergure » – sera déposée en novembre 2026 pour le financement de deux ans (15 000 euros au total) par I. Bundeleva – pour cofinancer le volet expérimental de cette thèse.

En synthèse, le projet de thèse bénéficie d'un montage financier permettant toutes les analyses tant sur le terrain (les crédits de mission et pour les analyses chimiques sont déjà acquis, M-Carbo-Store) qu'en laboratoire (les principaux équipements nécessaires aux analyses microbiennes et des EPS sont déjà acquis et disponibles et ont fait l'objet d'un récent financement, ATTRACT, OSU-SRO). Les datations prévues bénéficient également d'un financement qui a été demandé dans le cadre du SRO.

- connaissances et compétences requises

Ce projet de thèse concerne les domaines de la géomicrobiologie et la sédimentologie des carbonates et de la minéralogie des argiles en lien avec une activité microbienne. Le candidat doit avoir des compétences d'analyses sur le terrain et en laboratoire. Le candidat devra se former ou posséder des compétences en caractérisation minéralogique, géochimique, en analyses des communautés microbiennes à travers leurs métabolismes pour comprendre leur rôle dans la précipitation des minéraux.

Les objectifs de ce travail seront de : (1) Cartographier les environnements de lagon (à travers plusieurs exemples) et quantifier les boues carbonatées et argileuses néoformées. (2) Modéliser la formation de micrite et des argiles néoformées et leur évolution lors de la diagenèse précoce. (3) Identifier l'origine et la transformation de la matière organique sédimentaire (principalement microbienne), en analysant des carottes de sédiments avec des méthodes géochimiques et isotopiques, ainsi que via les observations pétrographiques et chimique (microscopies confocal, électronique en transmission et à balayage en cryogénisation ; spectrométrie IR-FTIR et Raman) pour caractériser finement les phases carbonatées, argileuses, phases organo-minérales et gels silicatés contenus dans les sédiments des lagons. (4) Caractériser la diversité microbienne via la mise en culture et des analyses génotypiques. (5) Extraire, quantifier et caractériser les substances exopolymériques (EPS). (6) Discuter du rôle des carbonates et des argiles néoformées sur le stockage du carbone à travers des méthodes de modélisation et de quantification des flux élémentaires.

Résumé en français et anglais (limité chacun à 1800 caractères)

Ce projet de thèse vise à comprendre les mécanismes contrôlant le stockage et la libération du CO₂ dans les lagons tropicaux, à travers la dualité entre la précipitation carbonatée microbienne et la néoformation d'argiles (reverse weathering). Ces deux processus sont étroitement liés et déterminent la composition minéralogique, la porosité et le potentiel de séquestration du carbone des sédiments. Trois sites contrastés ont été sélectionnés : Mayotte, dominé par la formation d'argiles dans un contexte volcanique ; Nouvelle-Calédonie, système mixte silicoclastique-carbonaté ; et Tahiti, environnement majoritairement carbonaté. À ce jour, Mayotte a été étudié, les analyses de Nouvelle-Calédonie sont en cours, et Tahiti est planifié. L'approche proposée dans ce projet combine observations terrain et expérimentations en laboratoire.

Une caractérisation des communautés microbiennes sera réalisée dans la colonne sédimentaire et dans la colonne d'eau après prélèvements sur le terrain pour identifier les métabolismes et leur rôle dans la formation de biominéraux. Les expérimentations en laboratoire viseront à explorer le rôle des substances exopolymériques (EPS), notamment l'influence de leur dégradation sur la cinétique de précipitation des carbonates et sur la néoformation d'argiles. L'approche adoptée sera multifactorielle, intégrant l'influence des conditions physico-chimiques, de l'activité métabolique microbienne et de la dynamique de la matière organique extracellulaire. L'interaction de ces facteurs contrôle la nucléation, la croissance et la composition des minéraux carbonatés et silicatés.

En reliant les dynamiques microbiennes aux processus biogéochimiques, cette étude multi-échelle, permettra de mieux comprendre la régulation microbienne du cycle inorganique du carbone. Elle offre ainsi un cadre pour évaluer le rôle environnements de lagons tropicaux comme puits ou sources de carbone à long terme et pour contraindre les mécanismes d'organo-minéralisation dans les milieux carbonatés, volcaniques et silicoclastiques.

This PhD project aims to understand the mechanisms controlling CO₂ storage and release in tropical lagoons, focusing on the duality between microbial carbonate precipitation and clay neoformation ("reverse weathering"). These two processes are closely linked and determine the mineralogical composition, porosity, and carbon sequestration potential of sediments. Three contrasting sites have been selected: Mayotte, dominated by clay formation in a volcanic context; New Caledonia, a mixed siliciclastic-carbonate system; and Tahiti, an environment largely dominated by carbonate production. To date, Mayotte has been studied, analyses in New Caledonia are ongoing, and Tahiti is planned. The approach combines field observations with laboratory experiments. Sediment and water column samples are used to characterize microbial communities and their role in biomineral formation. Laboratory experiments will aim to investigate the role of extracellular polymeric substances (EPS), particularly the influence of their degradation on carbonate precipitation kinetics and on clay neoformation. The adopted approach will be multifactorial, integrating the effects of physicochemical conditions, microbial metabolic activity, and the dynamics of extracellular organic matter. The interaction of these factors controls the nucleation, growth, and composition of carbonate and silicate minerals.

By linking microbial dynamics to biogeochemical processes, this multi-scale study, from the lagoon to the crystal nanostructure, provides insight into microbial regulation of the inorganic carbon cycle. It offers a framework to evaluate the role of tropical lagoons as long-term carbon sinks or sources and

to constrain the mechanisms of organo-mineral formation in carbonate, volcanic and siliciclastic environments.

Préciser le domaine de compétence dans la liste ci-dessous :

2 choix possibles maximum –les intitulés sont ceux d’ABG).

- Ecologie, Environnement
- Terre, univers, espace

Indiquez quelques mots clés concernant votre sujet) : Microbe, Substance extracellulaire polymérique (EPS), Carbonates, Argiles, *in natura/in vivo*, lagon