

Ecole doctorale Environnements-Santé
Dossier de projet de thèse « Contrat doctoral Etablissements »
ANNEE 2025

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

Directeur de thèse HDR :

Nom : PUCEAT

Prénom : Emmanuelle

Section CNU : 36

Grade : PR1

HDR : Date de soutenance...6/09/2016..... 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 bd Gabriel Université de Bourgogne, 21000 Dijon ; emmanuelle.puceat@u-bourgogne.fr

Unité d'appartenance (intitulé, label, n°, directeur) : Biogéosciences UMR 6282

CNRS/ub/EPHE/ directeur unité Thomas SAUCEDE

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 UMR 6282 CNRS/ub/EPHE, équipe SEDS

- localisation

Biogéosciences UMR 6282 CNRS/ub/EPHE, Université de Bourgogne Europe

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

Emmanuelle PUCEAT

- adresse courriel du contact scientifique

emmanuelle.puceat@u-bourgogne.fr

- titre du projet

Interactions entre l'altération des silicates, le climat et la précipitation carbonatée : Impact sur la productivité primaire et les communautés microbiennes dans les bassins Éocène-Miocène du Massif central et ses contreforts

- description du projet (2 pages maximum)

La séquestration naturelle du carbone et le stockage de certains métaux traces reposent sur l'altération des roches cristallines silicatées sur les continents associés à la précipitation des carbonates, processus interconnectés qui capturent durablement le CO₂ atmosphérique. Bien que les facteurs qui influencent l'altération des silicates soient largement étudiés, les facteurs de contrôle de la formation des carbonates restent quant à eux encore mal compris, et en particulier l'importance relative des facteurs abiotiques et de l'intervention de communautés microbiennes. Des études récentes ont suggéré que la précipitation de

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.

carbonates par les communautés microbiennes pourrait en particulier agir sur des échelles de temps courtes, à l'échelle de l'histoire humaine. Les carbonates d'origine microbienne pourraient ainsi représenter un réservoir de carbone réactif, ayant le potentiel, en association avec l'altération continentale, de limiter le réchauffement climatique à court terme.

L'objectif de ce projet est d'apporter de nouvelles connaissances sur les facteurs de contrôle de la production carbonatée microbienne, susceptibles d'être mobilisés pour stimuler ce processus. L'étude des environnements anciens offre une multitude d'opportunités d'observer la réaction des producteurs de carbonates face à des forçages abiotiques variés liés à différents contextes climatiques, tectoniques, ou lithologiques. Ils fournissent ainsi des laboratoires d'étude naturels sur différentes échelles de temps, donnant accès à des informations précieuses pour identifier les facteurs de contrôle de la production carbonatée. Les paléo-lacs en particulier en font des milieux réactifs, dont les paramètres physico-chimiques des eaux sont rapidement impactés par les variations de température, d'apport d'eau douce ou d'évaporation, ou encore d'apport de nutriments et d'ions en solution par l'altération des roches silicatées des reliefs adjacents. Ce projet cible les paléo-lacs du Massif Central (Éocène-Miocène) comme laboratoires naturels pour étudier les facteurs de contrôle de la production carbonatée, en particulier d'origine microbienne, dans un contexte de changements environnementaux majeurs.

Les différents bassins lacustres du Massif Central et de ces contreforts (Bassin du Sud-Est : Ales, Issirac, Narbonne, Vistrenque ; bassin du Massif Central : Forez, les Limagnes) sélectionnés pour cette étude, préservent des sédiments lacustres datés de la fin de l'Eocène au début du Miocène (entre 35 et 20 millions d'années), offrant un enregistrement continu et détaillé des changements climatiques et écologiques sur cette période. Le remplissage sédimentaire de ces différents bassins est déjà bien contraint dans la littérature, et se marque par des séquences sédimentaires qui évoluent depuis des systèmes fluviolacustres détritiques à des systèmes lacustres carbonatés ou évaporitiques et plus particulièrement par l'installation de dépôts microbiens au cours de cet intervalle de temps. En particulier, les bassins du Sud-Est de la France présentent d'épaisses séries lacustres à l'Éocène supérieur et à l'Oligocène, une période cruciale marquant à la fois la transition climatique majeure Eocène-Oligocène (EOT), correspondant à la première installation des calottes polaires permanentes en Antarctique, et l'évolution tectonique du passage de la compression pyrénéenne au rifting liguro-provençal (Létteron et al., 2022 ; Semmani et al., 2023 ; Fournier et al., 2024). Le développement des dépôts carbonatés microbiens précède la limite EOT et intervient à la fin du Priabonien (Eocène sup.). Par comparaison, les bassins des Limagnes enregistrent plusieurs événements climatiques majeurs, dont deux refroidissements globaux à la fin de l'Eocène et à la limite Oligocène-Miocène séparés par une phase de réchauffement (Roche et al., 2018 ; Wattinne et al., 2018 ; Vennin et al., 2022), avec un développement de la sédimentation carbonatée microbienne au Chattien (Oligocène). Ces événements climatiques et tectoniques, par leur influence sur le cycle hydrologique local et l'efficacité de l'altération des silicates, sont susceptibles d'impacter la production primaire par des variations dans les apports en nutriments aux paléo-lacs, et la précipitation de carbonates microbiens.

Ce projet vise à examiner l'impact relatif des facteurs abiotiques (température de l'eau, humidité/aridité, et altération continentale qui apporte ions et nutriments dans les masses d'eau adjacentes) sur la productivité primaire et la formation des dépôts carbonatés microbiens dans ces environnements anciens. Le développement des communautés microbiennes étant diachrone à l'échelle des différents secteurs géographiques, l'un des objectifs sera de mettre en regard les changements de productivité carbonatée et le développement de ces communautés microbiennes avec la variabilité spatiale dans l'intensité de l'altération des silicates des masses continentales, pouvant être liées à une

déclinaison locale de changements climatiques globaux ou aux différentes phases d'uplift et de volcanisme du Massif Central (Olivetti et al., 2020).

Pour répondre à ces objectifs, des méthodes géochimiques et minéralogiques seront utilisées afin de contraindre l'évolution des paramètres abiotiques : l'hydrolyse en lien avec l'altération continentale qui apporte les ions nécessaires à la production carbonatée (notamment la source du Ca, Mg, Si mais également de nutriments comme le phosphate en particulier) et les variations de température des masses d'eaux dans les bassins lacustres étudiés. L'évolution des températures sera déterminée par l'analyse de la composition isotopique de l'oxygène de dents de mammifères et de carbonates issus de gastéropodes et d'ostracodes, abondants dans les séries. Les variations de l'intensité de l'altération des silicates des bassins versants seront approchées par un nouveau traceur géochimique, basé sur la combinaison des systèmes isotopiques Lu-Hf et Sm-Nd dans la fraction argileuse des sédiments, développé sur des systèmes actuels et récemment appliqué avec succès dans les environnements anciens (Bayon et al., 2016 ; Corentin et al., 2022 ; Gaitan et al., 2023). La composition élémentaire des sédiments sera également analysée, par fluorescence X (XRF), spectroscopie par plasma induit par laser (LIBS) et par ICP-MS, fournissant une approche complémentaire de l'intensité de l'altération chimique des silicates (Davies et al., 2015). Ces données seront comparées avec les celles des roches magmatiques et métamorphiques disponibles dans le Massif Central (Negrel et al., 2000 ; Steinmann & Stille, 2008). L'utilisation de certains rapports élémentaires est adaptée à la reconstruction des paléoenvironnements (i.e. K/Al, K/Ti ; Zr/Rb ; Rb/Sr) et des changements de productivité primaire (i.e. Ba/Ca, Ba/Sr ; P/Ti ; P/Al). Ces données géochimiques seront couplées à des données minéralogiques, en particulier des assemblages argileux, qui apportent des renseignements complémentaires sur les conditions d'hydrolyse (indice d'altération CMAI ; Warr et al., 2023) et l'érosion mécanique (Corentin et al., 2022). Ces nouvelles données seront mises en regard de l'évolution des communautés microbiennes, dans le contexte tectonique extensif et physiographique des bassins lacustres du Massif Central et de ses contreforts SE.

Les objectifs de la thèse s'inscrivent pleinement dans les thématiques portées par l'équipe SEDS (Systèmes, Environnements et Dynamique Sédimentaire) sur l'altération continentale et le rôle des processus microbiens dans la sédimentation. L'encadrement de la thèse se déroulera au sein du laboratoire Biogéosciences et de l'équipe SEDS (E. Pucéat, E. Vennin ; P. Pellenard) et s'appuiera sur l'environnement disponible du laboratoire et sa plateforme analytique GISMO.

Une collaboration opérationnelle et scientifique sera établie avec le BRGM (Justine Briais et Eric Lasseur), notamment à travers le PEPR sous-sol Massif Central (porté par F. Cagnard) ainsi qu'avec le laboratoire CEREGE (François Fournier, Philippe Léonide) et Géosciences Rennes (Guillaume Dupont-Nivet).

Bayon, G., Skonieczny, C., Delvigne, C., Toucanne, S., Bermell, S., Ponzevera, E., André, L. 2016. Environmental Hf–Nd isotopic decoupling in World River clays. *Earth and Planetary Science Letters* 438, 25–36.

Corentin, P., Puceat, E., Pellenard, P., Freslon, N., Guiraud, M., Blond, J., Adatte, T., Bayon, G., (2022). Hafnium-neodymium isotope evidence for enhanced weathering and uplift-climate interactions during the Late Cretaceous. *Chemical Geology*, 120724 <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.120724> (IF= 4.015)

Davies, S., Lamb, H., Roberts, S., 2015. Micro-XRF Core Scanning in Palaeolimnology: Recent Developments. pp. 189–226. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9849-5_7

Fournier F., Semmani N., Lettéron A., Suc J.P., Tosal A., Fauquette S., Séranne M., Popescu S-M., Melinte-Dobrincescu M-C, Borgomano J. Les climats et la géographie du Sud-Est de la France au Paléogène enregistrés dans les lacs. *Géochronique*, 2024, 169, pp.51-55.

Gaitan, C.E., Pucéat, E., Pellenard, P., Blondet, J., Bayon, G., Adatte, T., Israel, C., Robin, C., Guillocheau, F. (2023). Late Cretaceous erosion and chemical weathering record in the offshore Cape Basin: Source-to-sink

system from Hf-Nd isotopes and clay mineralogy. *Marine Geology*
<https://doi.org/10.1016/j.margeo.2023.107187>.

- Lettéron, A., Hamon, Y., Fournier, F., Demory, F., Séranne, M., Joseph, P., 2022. Stratigraphic architecture of a saline lake system: From lake depocentre (Alès Basin) to margins (Saint-Chaptes and Issirac basins), Eocene–Oligocene transition, south-east France. *Sedimentology*, 69, 2, 651-695.
- Négre, P., Guerrot, C., Cocherie, A., Azaroual, M., Brach, M., & Fouillac, C. (2000). Rare earth elements, neodymium and strontium isotopic systematics in mineral waters: evidence from the Massif Central, France. *Applied Geochemistry*, 15(9), 1345-1367.
- Olivetti, V., Godard, V., Bellier, O., & Aster Team. (2016). Cenozoic rejuvenation events of Massif Central topography (France): Insights from cosmogenic denudation rates and river profiles. *Earth and Planetary Science Letters*, 444, 179-191.
- Semmani, N., Fournier, F., Suc, J.-P., Fauquette, S., Godeau, N., Guihou, A., Popescu, S.-M., Melinte-Dobrinescu, M., Thomazo, C., Marié, L., Deschamps, P., Borgomano, J., 2023. The Paleogene continental basins from SE France: New geographic and climatic insights from an integrated approach. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 615, 111452.
- Steinmann, M., & Stille, P. (2008). Controls on transport and fractionation of the rare earth elements in stream water of a mixed basaltic–granitic catchment basin (Massif Central, France). *Chemical Geology*, 254(1-2), 1-18.
- Roche, A.; Vennin E., Bouton A., Olivier N., Wattinne A., Bundeleva I., Deconinck J.F., Virgone A., Gaucher E.C., and Visscher P.T., 2018. Oligo-Miocene lacustrine microbial and metazoan buildups from the Limagne Basin (French Massif Central), *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 10.1016/j.palaeo.2018.05.001.
- Vennin, E., Bouton, A., Roche, A., Gérard, E., Bundeleva, I., Boussagol, P., Wattinne A., Kolodka C., Gaucher E., Virgone A & Visscher, P. T. 2022. The Limagne Basin: a journey through modern and fossil microbial deposits Le bassin des Limagnes: une excursion à travers les dépôts microbiens modernes et fossiles. *Bulletin de la BSGF-Earth Sciences Bulletin*, 192(1).
- Warr, L. N., Grathoff, G. H., & Haberzettl, T. (2024). The Clay Mineral Alteration Index (CMAI) as an improved indicator of climate change. *Applied Clay Science*, 256, 10741
- Wattinne A., Lécuyer C., Vennin E., Châteauneuf J.-J. & Martineau F. 2018. Environmental changes around the Oligocene/Miocene boundary in the Limagne graben, Massif Central, France. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 189, (4-6): 19.

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

Projet CNRS Tellus-Systemer (2025-26), porteur P. Pellenard (participant E. Pucéat et E. Vennin) - 7k€)- Chronologie et couplage volcanisme-sédimentation du système lacustre et microbien des Limagnes dans un contexte de changement climatique Greenhouse-Icehouse (LIM-AGES).

Le BRGM sera partenaire du projet de thèse. Une demande de financement PEPR est également en cours de via le programme et équipement prioritaire de recherche « sous-sols bien communs Massif Central » (CNRS/BRGM)- en cours 10 k€)-. Une demande d'environnement de la thèse par le BRGM pourra être effectuée dès 2026.

Un projet a également été déposé dans le cadre de l'AAP Région Graduate Schools (GS Transbio), le projet MASCARBONE (MécAniSmes de séquestration du CARBONE : Étude des interactions entre altération des silicates, climat et précipitation carbonatée), porteur E. Pucéat, montant demandé 209k€ (2025-2027).

- connaissances et compétences requises

Connaissance en sédimentologie de faciès (description de coupes et forages) ;

Connaissance en minéralogie (diffraction des rayons X) ;

Connaissance en géochimie isotopique (O, C, Nd, Hf) et élémentaire (majeurs et traces) ;

Connaissance en pétrographie sédimentaire (microfaciès) ; caractérisation et interprétation de structures microbiennes ;

Compétences rédactionnelles et orales en français et en anglais (écriture de rapports, articles scientifiques, communications orales lors de colloques nationaux et internationaux).

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

La séquestration naturelle du carbone repose sur l'altération des roches silicatées et la précipitation des carbonates, deux processus interconnectés capturant le CO₂. Lorsque les silicates se dissolvent, ils capturent du CO₂ et libèrent des ions, comme le calcium et le bicarbonate, qui finissent par précipiter sous forme de carbonates dans les océans ou les lacs, stockant durablement le carbone. Si l'altération des silicates est bien étudiée, les facteurs contrôlant la formation des carbonates, notamment ceux d'origine microbienne, restent encore mal compris. Ce projet cherche à mieux comprendre les facteurs de contrôle de la production de carbonates microbiens, en étudiant les paléo-lacs du Massif Central (Éocène-Miocène). Les paléo-lacs en particulier sont des milieux réactifs où les conditions physico-chimiques peuvent changer rapidement en réponse à ces différents forçages. Ces environnements fournissent ainsi des laboratoires naturels qui permettent d'examiner l'impact de ces facteurs sur la productivité primaire et la formation de dépôts carbonatés. Les paléo-lacs ciblés, en particulier dans les bassins du sud-Est, préservent des sédiments datant de 35 à 20 millions d'années qui offrent un enregistrement détaillé des changements climatiques et écologiques majeurs de cet intervalle. En analysant les signatures géochimiques et minéralogiques de ces dépôts, le projet vise à mieux contraindre la distribution spatiale et temporelle de paramètres abiotiques (température, intensité de l'altération liée aux apports en nutriments aux masses d'eaux adjacentes) et à la mettre en regard de celle de la productivité primaire et du développement de carbonates microbien.

Natural carbon sequestration relies on silicate rocks weathering on the continents and on the precipitation of carbonates, two interconnected processes that capture CO₂. When silicates dissolve, they capture CO₂ and release nutrients like phosphate and ions such as calcium and bicarbonate, which eventually precipitate as carbonates in oceans or lakes, storing carbon sustainably. While silicates weathering is well studied, the factors controlling carbonate formation, particularly those of microbial origin, are still poorly understood. This project seeks to better understand the controlling factors of microbial carbonate production by studying the paleo-lakes of the Massif Central (Eocene-Miocene). Paleo-lakes are reactive environments where physico-chemical conditions can change rapidly in response to various forcings. These environments thus provide natural laboratories to examine the impact of these factors on primary productivity and the formation of carbonate deposits. The targeted paleo-lakes, especially in the Southeastern Basins, preserve sediments dated from 35 to 20 million years ago, offering a detailed record of the major climatic and ecological changes that occurred during this interval. By analyzing the geochemical and mineralogical signatures of these deposits, the project aims to better constrain the spatial and temporal distribution of abiotic parameters (temperature, intensity of weathering related to nutrient inputs to adjacent water bodies) and compare it with primary productivity and microbial carbonate development.

Préciser le domaine de compétence dans la liste ci-dessous (2 choix possibles maximum – ne pas modifier les intitulés : ils sont imposés par certains sites web) :

Ecologie, Environnement

Terre, univers, espace

Mots clés : Altération, microbialites, productivité primaire, Lacs, changements climatiques