

Proposition de sujet de thèse 2024

(A remplir par les équipes d'accueil et à retourner à Isabelle HAMMAD : hammad@cerege.fr
*à renseigner obligatoirement pour la validation du sujet, (1) : A remplir lors de la campagne d'attribution des allocations, à l'issue de la session de juin des Masters

Sujet de doctorat proposé *:

Encadrant Beaufort Luc, beaufort@cerege.fr

Laboratoire *: CEREGE

Tableau récapitulatif du sujet

Candidat(e) ⁽¹⁾	
Nom - Prénom :	
Date de naissance :	
Licence (origine, années, mention) :	
Mention et classement au Master 1 année (Xème sur Y)	
Mention et classement au S3 du Master 2 (Xème sur Y)	
Mention et classement au S4 du Master 2 (Xème sur Y)	
Mention et classement au M2 (année) (Xème sur Y)	
MASTER (nom, université)	
Sujet de doctorat proposé*	Effet de la calcification des coccolithophores sur le $\delta^{13}\text{C}$
Encadrants (2 max, indiquer si HDR ou pas)*	Luc Beaufort (HDR)
Laboratoire*	CEREGE
Programme finançant la recherche (indiqué si obtenu ou envisagé) (1)	ANR ITCH (2022-2026)

Sujet de doctorat proposé*

Intitulé* : Effet de la calcification des coccolithophores sur le $\delta^{13}\text{C}$

Descriptif *:

Le cycle du carbone joue un rôle crucial dans le climat de la Terre, l'océan étant le plus grand réservoir de carbone en surface, influencé par des processus naturels tels que l'activité volcanique et les activités humaines comme la combustion des combustibles fossiles. Sur de longues échelles de temps, un déséquilibre entre les entrées et les sorties de carbone peut entraîner des perturbations climatiques significatives, soulignant l'importance de comprendre les mécanismes biogéochimiques en jeu. Les coccolithophores et les foraminifères jouent un rôle majeur dans la production de carbonate en haute mer, influençant la contre-pompe carbonatée océanique lors de la calcification de leurs tests. Pendant la calcification, les coccolithophores fractionnent différemment les isotopes du carbone entre les espèces (Ziveri et al., 2003). Rickaby et al. (2007) ont démontré que la production de coccolithophores et le $\delta^{13}\text{C}$ des coccolithes variaient cycliquement avec des périodes de 400.000 ans liées à l'excentricité de l'orbite de la Terre. Beaufort et al. (2022) ont montré que ces cycles influençaient également l'évolution morphologique des coccolithophores dans plusieurs enregistrements sédimentaires couvrant les 3 derniers millions d'années. Cependant, ces cycles sont absents des cycles climatiques mondiaux tels que la variabilité glaciaire/interglaciaire. Néanmoins, ces cycles de 400.000 ans sont présents dans les séries chronologiques de $\delta^{13}\text{C}$ des tests de foraminifères (Wang et al., 2010) et dans les séries chronologiques de concentration en CaCO_3 dans les sédiments océaniques (Westerhold et al., 2020) dans des séquences pré-quatérnaires. Il est donc probable qu'il existe un lien entre l'évolution et la production de

coccolithophores et les carbonates océaniques, bien que ce lien reste à déterminer. C'est l'objectif principal de ce projet de thèse. Ce projet présente une approche double, visant à caractériser la relation entre la production de carbonate des coccolithophores et le $\delta^{13}\text{C}$ des coccolithes-à la fois dans l'océan actuel et dans le registre fossile du Plio-Pléistocène.

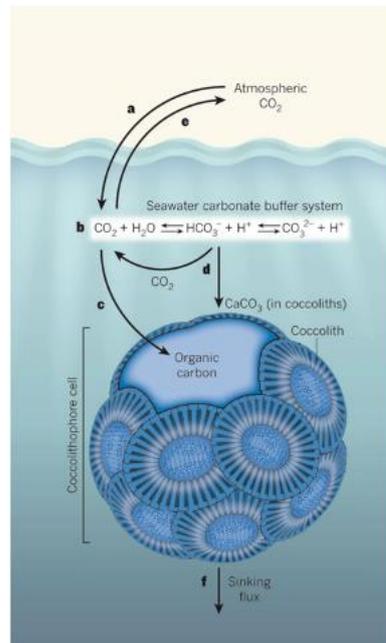


Figure 1 : Le rôle des coccolithophores dans le cycle du carbone océanique (de Hutchins, 2011).

Cette thèse propose une approche expérimentale pour comprendre l'effet de la production de phytoplancton organique et carbonaté sur le cycle du carbone en étudiant les coccolithes (quantité, taille, morphométrie) et leur composition isotopique du carbone (en relation avec le carbone inorganique dissous de l'eau de mer) à partir d'échantillons prélevés in situ, de cultures et de fossiles.

1- Proposition de recherche, méthodologie, expériences et techniques

1.1- Des cellules de deux espèces de Noelaerhabdaceae (*Emiliania huxleyi* et *Gephyrocapsa oceanica*) seront isolées en deux saisons à 30 km au large de Marseille avec la mesure de la chimie carbonatée complète (y compris $\delta^{13}\text{C}$ de l'eau). Ces sites sont actuellement suivis pour les coccolithophores. L'eau sera collectée pour produire un milieu de culture local. Les techniques de collectes et de mise en culture seront faites conjointement avec Ian Probert de la Station Biologique de Roscoff qui est un des meilleurs spécialistes de la culture des coccolithophoridés.

1.2- Ces nouvelles souches seront cultivées à 5 pH différents et à 3 niveaux de nutriments différents, selon un protocole récemment développé au CEREGE : un microscope inversé automatisé avec mesure continue du carbonate par une caméra numérique et un logiciel d'intelligence artificielle localement conçu est utilisé à différents niveaux de pH dans une atmosphère contrôlée de concentration en CO_2 . L'eau et le carbonate de calcium seront collectés à la fin de chaque expérience pour des analyses de $\delta^{13}\text{C}$. La production de carbonate et la production organique seront mesurées en continu pendant la culture. Cette expérience permettra d'évaluer l'effet séparé de la production de carbone organique et de carbonate sur la fractionation des isotopes du carbone dans le carbonate des coccolithes en mer Méditerranée.

1.3- Ces résultats seront appliqués au passé en étudiant quatre séquences plio-pléistocènes de carottes situées dans les océans tropicaux indo-pacifiques, en mesurant l'évolution des assemblages de coccolithophores et leur production au cours des 4 derniers millions d'années, parallèlement aux changements de la composition $\delta^{13}\text{C}$ des coccolithes et des foraminifères. Les coccolithophores évoluent rapidement et cycliquement durant cette

période et il y a un lien fort entre le degré de calcification des espèces et le $\delta^{13}\text{C}$ des coccolithes. L'importance de la calcification des coccolithophores liée à l'évolution biologique et morphologique dans le cycle du carbone sera quantifiée et comparé au $\delta^{13}\text{C}$ (voir les premiers résultats dans la Figure 2). Comme le montre la Figure 2 et la publication de Rickaby et al. (2007) ce lien existe mais n'est pas encore compris. Le but de cette thèse est de mieux le comprendre, ce qui permettra de placer la production

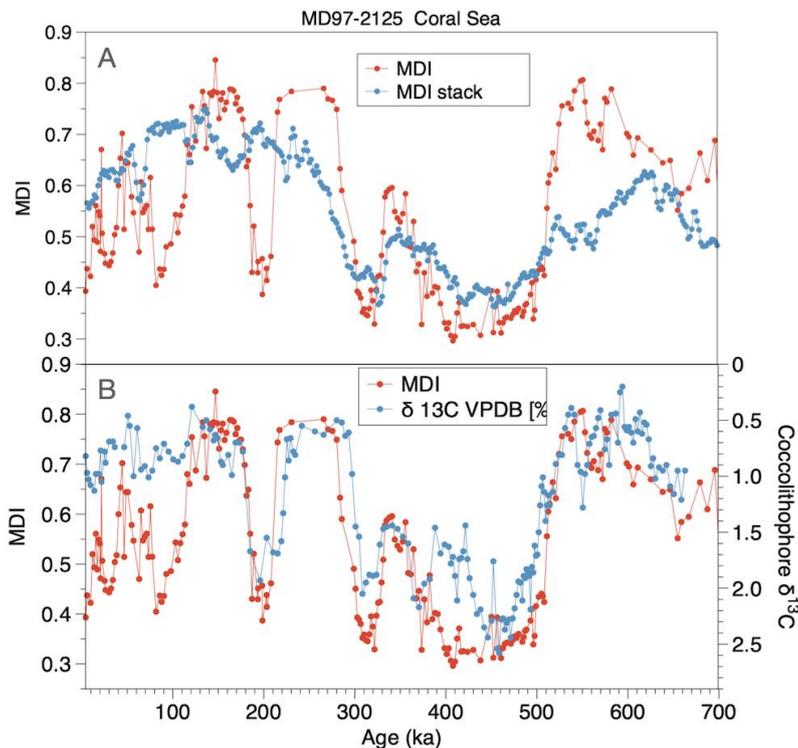


Figure 2 : Coccolithophore evolution index (MDI) and coccolithophore $\delta^{13}\text{C}$ during the last 700kyr. A: comparaison of Morphological Divergence Index in core MD97-2125 and from the stacked (Beaufort et al., Nature 2022), B : comparaison of the MDI and coccolithophore $\delta^{13}\text{C}$ in core MD97-2125 (Beaufort Vidal, in prep.). This records shows that biological evolution of coccolithophore is significantly well correlated with the isotopic record, indicating a strong link between biology and chemistry in this phytoplanktonic group

2-Matériel et techniques disponibles

2.1- L'eau sera collectée à 30 km au large de Marseille au-dessus du canyon de Planier. Une collection saisonnière de 12 ans de coccolithophores est disponible à partir de ce site.

2.2- Carottes disponibles :

- La carotte MD21-3601 et -3607, récupérée dans le canal du Mozambique lors de la croisière SRATCH en 2021, couvre en 52 m les derniers 2 et 0,8 millions d'années, respectivement. Les chronologies sont établies et continues. Les coccolithophores et les foraminifères sont abondants et bien conservés.
- La carotte MD90-0940, récupérée au large des Seychelles lors de la croisière SEYMAMA en 1990, couvre en 33m les derniers 5 millions d'années. La chronologie est bien établie. Les coccolithophores et les foraminifères sont abondants et bien conservés.
- Le site IODP U1490, récupéré sur la dorsale d'Euripick dans le Pacifique équatorial occidental,

2.3- Expériences sur les organismes vivants :

- Un microscope Leica automatisé inversé avec atmosphère de CO_2 contrôlée est disponible, permettant des cultures dans de petits puits qui peuvent être surveillés en temps réel avec une caméra numérique haute résolution.
- Un spectromètre laser (IRIS Delta Ray) avec URI Connect (Thermo Scientific) permettant la mesure du $\delta^{13}\text{C}$ sur les carbonates et sur le carbone inorganique dissous dans les échantillons d'eau.

2.4- Expériences sur les fossiles :

- Un microscope Leica automatisé droit avec caméra numérique et polarisation circulaire bidirectionnelle (Beaufort et al., 2021).

- SYRACO, un système d'intelligence artificielle pour la taxonomie et la morphologie automatisées des coccolithophores.
- Un spectromètre de masse (Delta V Plus, Thermo Scientific) connecté à une ligne de préparation automatisée de carbonates (Dispositif de carbonates Kiel IV, Thermo Scientific).

3 Collaborations

Ian Probert est ingénieur de recherche (IRE) à l'Université de la Sorbonne, chargé du Centre de Ressources Biologiques Marines (Collection de Culture de Roscoff et Service d'Aquarium de Roscoff) du FR2424 à la Station Marine de Roscoff. Il formera l'étudiant et l'aidera pour l'isolation et les cultures

Dans la plateforme PANISSE du CEREGE, Clara Bolton et Laurence Vidal, toutes les deux spécialistes des isotopes du carbone dans les coquilles de plancton marin aideront l'étudiant.

4 References

- L. Beaufort, Y. Gally, B. Suchéras-Marx, P. Ferrand and J. Duboisset: A universal method for measuring the thickness of microscopic calcite crystals, based on bidirectional circular polarization, *Biogeosciences*, 18, 775-785, 10.5194/bg-18-775-2021, 2021.
- L. Beaufort, C. T. Bolton, A. C. Sarr, B. Suchéras-Marx, Y. Rosenthal, Y. Donnadieu, N. Barbarin, S. Bova, P. Cornuault, Y. Gally, E. Gray, J. C. Mazur and M. Tetard: Cyclic evolution of phytoplankton forced by changes in tropical seasonality, *Nature*, 601, 79-84, 10.1038/s41586-021-04195-7, 2022.
- D. A. Hutchins: Forecasting the rain ratio, *Nature*, 476, 41, 10.1038/476041a, 2011.
- R. E. M. Rickaby, E. Bard, C. Sonzogni, F. Rostek, L. Beaufort, S. Barker, G. Rees and P. D. Schrag: Coccolith chemistry reveals secular variations in the global ocean carbon cycle?, *Earth and Planetary Science Letters*, 253, 83-95, 2007.
- P. Wang, J. Tian and L. J. Lourens: Stable isotope record of mediterranean sea sediments, 10.1594/PANGAEA.790008, 2010.
- T. Westerhold, N. Marwan, A. J. Drury, D. Liebrand, C. Agnini, E. Anagnostou, J. S. K. Barnet, S. M. Bohaty, D. De Vleeschouwer, F. Florindo, T. Frederichs, D. A. Hodell, A. E. Holbourn, D. Kroon, V. Lauretano, K. Littler, L. J. Lourens, M. Lyle, H. Pälike, U. Röhl, J. Tian, R. H. Wilkens, P. A. Wilson and J. C. Zachos: An astronomically dated record of earth's climate and its predictability over the last 66 million years, *Science*, 369, 1383-1387, doi:10.1126/science.aba6853, 2020.
- P. Ziveri, H. Stoll, I. Probert, C. Klaas, M. Geisen, G. Ganssen and J. Young: Stable isotope 'vital effects' in coccolith calcite, *Earth and Planetary Science Letters*, 210, 137-149, [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00101-8](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00101-8), 2003.

Détail du Programme finançant la recherche* :

ANR ITCH Paleoclimate Cycles and Plankton Evolution in the Pleistocene equatorial Indian Ocean (Bolton 2022-2026)

Cette thèse émerge dans deux WP :

WP2: Plankton evolution (Lead: Probert/Beaufort):

WP4: Carbonate Productivity and Sea Level (Lead: Beaufort)

Directeur(s) de thèse proposé(s)*

(limiter au plus à deux personnes principales, dont au moins une titulaire de l'HDR)

Directeur HDR proposé*

Nom - Prénom : Beaufort Luc

Corps : Directeur de Recherche CNRS

Laboratoire (i.e. formation contractualisée de rattachement, éventuellement équipe au sein de cette formation) :

CEREGE, équipe Climats

Adresse mail : beaufort@cerege.fr

Choix de cinq publications récentes (souligner éventuellement les étudiants dirigés co-signataires) :

Beaufort, L. and Sarr, A. C.: Eccentricity forcing on Tropical Ocean Seasonality, *Clim. Past Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/cp-2023-80>, 2023.

- Beaufort, L.**, L. C. Bolton, A.-C. Sarr, B. Sucheras-Marx, Y. Rosenthal, Y. Donnadieu, N. Barbarin, S. Bova, P. Cornuault, Y. Gally, E. Gray, J. C. Mazur and M. Tetard (2022). "Cyclic evolution of phytoplankton forced by changes in tropical seasonality." *Nature* 601(1): 79–84.
- B. Suchéras-Marx, S. Viseur, C. E. Walker, **L. Beaufort**, I. Probert and C. Bolton: Coccolith size rules – what controls the size of coccoliths during coccolithogenesis?, *Marine Micropaleontology*, 170, 102080, <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2021.102080>, 2022.
- Tetard, M., Licari, L., Ovsepyan, E., Tachikawa, K., and **Beaufort, L.**: Toward a global calibration for quantifying past oxygenation in oxygen minimum zones using benthic Foraminifera, *Biogeosciences*, 18, 2827–2841, <https://doi.org/10.5194/bg-18-2827-2021>, 2021.
- Tetard, M., R. Marchant, G. Cortese, Y. Gally, T. De Garidel-Thoron and **L. Beaufort**: A new automated radiolarian image acquisition, stacking, processing, segmentation and identification workflow, *Clim. Past.*, 16, 2415-2429, 10.5194/cp-16-2415-2020, 2020.

Thèses encadrées ou co-encadrées au cours des quatre dernières années*

Nom : Guillaume Lassus

Intitulé : Conception et développement d'un système de microscopie automatisé appliquant l'approche microfluidique pour l'identification du plancton marin et le triage par espèce des microfossiles de coccolithophore

Type d'allocation : CIFRE

Date de début de l'allocation de doctorat : Octobre 2022

Date de soutenance (si la thèse est soutenue) :

Programme finançant la recherche : société ZORTH

Situation actuelle du docteur (si la thèse est soutenue) :

Pourcentage de participation du directeur à l'encadrement en cas de co-direction :

Nom : Majd Habib

Intitulé : Évolution et adaptation des coccolithophores aux changements environnementaux récents en méditerranée

Type d'allocation : Bourse du Liban

Date de début de l'allocation de doctorat : Octobre 2019

Date de soutenance (si la thèse est soutenue) : Bourse suspendue (crise libanaise) étudiant/travailleur

Programme finançant la recherche : FRB COCCACE

Situation actuelle du docteur (si la thèse est soutenue) : (non soutenue – statut : étudiant travailleur)

Pourcentage de participation du directeur à l'encadrement en cas de co-direction : .50% (Abed Hassoun CNRSL)