

Stage de Master 2

Impact de la position des vents d'Ouest sur le cycle du carbone dans l'océan Austral durant le dernier cycle glaciaire-interglaciaire

Impact of westerly wind patterns on the carbon cycle in the Southern Ocean during the last glacial-interglacial cycle

Lieu du stage / Internship location : Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), CEA Orme des Merisiers, bâtiment 714, 91190 Gif sur Yvette.

Durée / Duration : 5 à 6 mois, date de début à convenir / 5 to 6 months, start date to be agreed

Encadrant.es / Supervisors :

- Léna Andrzejewski (Doctorante / PhD student, lena.andrzejewski@lsce.ipsl.fr)
- William Gray (Chercheur / Researcher, william.gray@lsce.ipsl.fr)
- Elisabeth Michel (Chercheuse / Researcher, elisabeth.michel@lsce.ipsl.fr)

Indemnité / Compensation : gratification selon la réglementation en vigueur au 1er janvier 2025 (financement déjà acquis par l'IPSL) - Gratification according to regulations in force on January 1, 2025 (funding already secured by the IPSL)

Contexte / Context :

Le cycle du carbone (CO₂) constitue un élément clé de la régulation climatique globale, mais les mécanismes contrôlant la variabilité des échanges de CO₂ entre l'océan Austral et l'atmosphère demeurent mal contraints. En raison de sa dynamique modulée par les vents d'Ouest de l'hémisphère Sud (Southern Hemisphere Westerlies, SHW), et d'une activité biologique n'épuisant pas totalement les macro-nutriments disponibles, l'océan Austral joue un rôle majeur dans les échanges de carbone océan-atmosphère. Il constitue ainsi un puits de CO₂ par le biais de la productivité biologique, des échanges air-mer en déséquilibre avec l'atmosphère et de la formation des eaux intermédiaires et profondes. Parallèlement, il représente une source de CO₂ en raison de l'upwelling associé à la divergence des eaux de surface induite par les SHW (Morrison et al., 2015). Cet upwelling entraîne la remontée d'eaux profondes riches en carbone et en nutriments provenant des océans Atlantique, Pacifique et Indien profonds. Au cours des cycles glaciaires-interglaciaires les variations de l'intensité et de la position des SHW et, par conséquent, de l'upwelling dans l'océan Austral restent à ce jour mal quantifiées.

L'objectif principal de ce stage est de reconstruire la position des Southern Hemisphere Westerlies (SHW) au cours du dernier cycle climatique (25–140 ka), en appliquant la méthodologie développée par Gray et al., (2023). Cette approche repose sur la relation linéaire entre le gradient latitudinal maximal des températures de surface et la latitude du vent zonal correspondant au maximum de la contrainte zonale moyenne.

La température exerce une influence beaucoup plus marquée que la salinité ($\delta^{18}\text{O}_{\text{seawater}}$) sur la distribution spatiale du $\delta^{18}\text{O}_{\text{calcite}}$ dans l'océan Austral. Cela permet d'utiliser le $\delta^{18}\text{O}_{\text{calcite}}$ des foraminifères planctoniques comme un proxy du gradient thermique, et donc comme un traceur indirect de la migration des vents d'ouest de l'hémisphère sud (SHW). Pour reconstruire le gradient maximal des températures, le stagiaire devra constituer une base de données rassemblant les mesures isotopiques en oxygène de foraminifères planctoniques déjà acquises sur un ensemble de carottes sédimentaires provenant des océans Indien-

Austral. Chaque enregistrement possédant son propre modèle d'âge, établi à partir de différentes données (susceptibilité magnétique, XRF, foraminifères, diatomées, coccolithes...), un cadre chronologique commun devra être élaboré avant de calculer la position des SHW. La reconstruction de la migration des SHW pourra être comparée à des sorties de simulations numériques afin d'évaluer l'influence des SHW sur le cycle du carbone durant l'Éémien et la période préindustrielle.

The carbon cycle (CO₂) is a key element in global climate regulation, but the mechanisms driving the variability of CO₂ exchanges between the Southern Ocean and the atmosphere remain poorly constrained. Due to its dynamics, which are modulated by the Southern Hemisphere Westerlies (SHW), and biological activity that does not completely consume the available macronutrients, the Southern Ocean plays a major role in ocean-atmosphere carbon exchanges. It thus acts as a CO₂ sink through biological productivity, air-sea exchanges in disequilibrium with the atmosphere, and intermediate and deep water formation. At the same time, it represents a source of CO₂ due to upwelling associated with surface water divergence induced by the SHW (Morrison et al., 2015). This upwelling brings up deep waters rich in carbon and nutrients from the deep Atlantic, Pacific and Indian oceans. During glacial-interglacial cycles, variations in the intensity and position of SHW and, consequently, the upwelling of the Southern Ocean remain poorly quantified to date.

The main objective of this internship is to reconstruct the position of the Southern Hemisphere Westerlies (SHW) during the last glacial-interglacial cycle (25–140 ka), applying the methodology developed by Gray et al., (2023). This approach is based on the linear relationship between the maximum latitudinal surface temperature gradient and the latitude of the zonal wind corresponding to the maximum average zonal stress.

Temperature has a much more pronounced influence than salinity ($\delta^{18}\text{O}_{\text{seawater}}$) on the spatial pattern of $\delta^{18}\text{O}_{\text{calcite}}$ across the Southern Ocean. This allows for the use of $\delta^{18}\text{O}_{\text{calcite}}$ from planktonic foraminifera as a paleo temperature-gradient proxy, and thus as an indirect tracer of SHW migration. To reconstruct the maximum temperature gradient, the intern will compile a database of oxygen isotope measurements of planktonic foraminifera already acquired from a set of sediment cores from the Indian and Southern Oceans. As each record has its own age model, established from different data (magnetic susceptibility, XRF, foraminifera, diatoms, coccoliths, etc.), a common chronological framework will be developed before calculating the position of SHWs. The reconstruction of SHW migration can be compared with numerical simulation outputs in order to assess the influence of SHWs on the carbon cycle during the Eemian and the pre-industrial period.

Profil recherché / Desired profile :

Le stagiaire aura de préférence une formation en sciences du climat, géosciences ou physique, avec un fort intérêt pour la paléoclimatologie. L'utilisation de R ou python est appréciée, tout comme la connaissance du fonctionnement générale de modèles climatiques.

The intern should preferably have a background in climate science, geoscience or physics, with a strong interest in paleoclimatology. Experience with R or Python is appreciated, as is knowledge of how climate models work.

Références / References :

Gray, W. R., De Lavergne, C., Jnglin Wills, R. C., Menviel, L., Spence, P., Holzer, M., ... & Michel, E. (2023). Poleward shift in the Southern Hemisphere westerly winds synchronous with the deglacial rise in CO₂. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 38(7), e2023PA004666.

Morrison, A. K., Frölicher, T. L., & Sarmiento, J. L. (2015). Upwelling in the Southern Ocean. *Physics Today*, 68(1), 27-32.