Neige Marine : simulation numérique de particules poreuses

Porteur : Marie Poulain-Zarcos
(Le porteur s'engage à participer et présenter son projet aux journées de la GI-EIF)
Laboratoire : Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (UMR 5502)

Nature du financement demandé : Stage de M2
Dates : à partir de février 2027

Résumé : Ce stage a pour application la modélisation de la sédimentation de la neige marine, connu pour être le principal vecteur de la pompe à carbone biologique. Cette pompe permet de séquestrer le carbone atmosphérique dans les océans. Elle a notamment piégé 25 % des émissions de gaz à effet de serre anthropiques entre 1990 et 2010. Néanmoins à ce jour, les paramétrisations utilisées dans les modèles de climat ne permettent pas de reproduire ni les observations, ni les mesures en laboratoire. Parmi les explications possibles à ces décalages, on trouve la porosité très importante de la neige marine, actuellement non prise en compte.
Ce stage a donc pour vocation d'étudier l'influence de la porosité d'une particule pour mieux modéliser sa vitesse de sédimentation en fluide au repos ainsi que sont temps de rétention à l'interface. Une approche numérique utilisant OpenFOAM est proposée. Dans un premier temps, une validation des simulations numériques sera faite par comparaison avec des données expérimentales sur une gamme de paramètres réduits, qui sera ensuite étendue en simulation numérique.

Sujet développé :
L'absorption du carbone atmosphérique par le phytoplancton, la consommation de cette matière organique par les zooplanctons, et autres bactéries marines, ainsi que l'export de ce carbone dans les océans constituent la pompe biologique. Cette pompe, associée à des flux verticaux de carbone, joue un rôle central aussi bien dans la distribution du carbone inorganique, de l'oxygène et des nutriments dans les océans que dans la répartition des stocks de dioxyde de carbone océanique et atmosphérique. A titre d'exemple cette pompe biologique a permis de séquestrer, dans l'océan, 25 % des émissions de carbone anthropiques entre 1990 et 2010, temporisant ainsi l'effet des gaz à effet de serre (Gruber et al., 2023). Comprendre la dynamique de la pompe à carbone biologique est donc un enjeu important.
Les modèles océaniques grande échelle, utilisés pour prédire le climat à l'échelle planétaire, utilisent des modèles empiriques pour les flux de carbone (Burd, 2024). Bien que ces derniers permettent de facilement interpréter les résultats et de tirer des conclusions sur les mécanismes majeurs influençant le transport vertical du carbone, ils ne reproduisent ni les flux de carbone des observations ponctuelles ni ceux des expériences (Williams& Giering, 2022). Il est donc important de comprendre et prédire la dynamique des flux verticaux de la pompe biologique via des modèles phénoménologiques, i.e. basés sur la physique.

Objectifs et hypothèses

Les flux verticaux de carbone sont associés à la sédimentation de particules marines, communément appelées neige marine (Fig. 1A). Ces particules, entre 0.5 mm et 20 mm, sont constituées de matières organique et inorganique agrégées. Leurs vitesses de sédimentation sont comprises entre 10 et 400 m/jour (Riley et al., 2012) et dont que la porosité de la neige marine varie de 66 % à 99.8 % (Shanks, 2002).

Notre objectif principal est d'améliorer la compréhension de la sédimentation de la neige marine pour, à terme, mieux quantifier les flux de carbone. Plus spécifiquement, nous souhaitons comprendre et prédire l'influence de la porosité sur la sédimentation des particules en fluide homogène au repos (estimation de la vitesse de chute et du coefficient de traînée) et en fluide stratifié (temps de rétention à l'interface).
Devant l'impossibilité de contrôler précisément les propriétés de la neige marine et/ou de l'océan, nous privilégions une approche de mécanique des fluides fondamentale. De plus, nous modélisons les agrégats par des particules poreuses de tailles équivalentes aux agrégats réels (Fig. 1B). Enfin, bien, nous étendons cette gamme entre 0 (particule pleine qui servira de référence) et 95 % (particules très poreuses).

A B

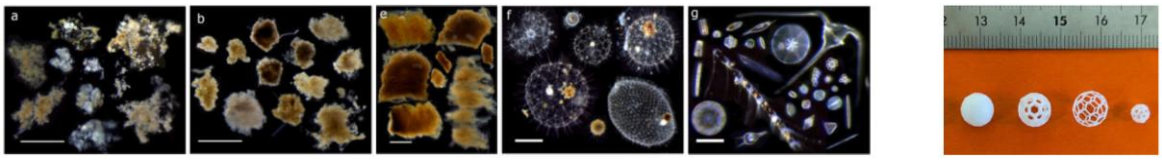


Figure 1 : A : Photographies de neige marine tirées de Durkin et al. (2021). Chaque sous-figure correspond à une classe de neige marine. La barre blanche sur les photos est une échelle de 1 mm. B : Particules poreuses utilisées en laboratoire pour valider les simulations numériques.

Déroulé du stage

Dans le cadre de ce stage, des simulations numériques sont envisagées en utilisant OpenFOAM. Nous aborderons la sédimentation d'une sphère dans un fluide au repos à l'aide de la méthode overset. Cette méthode consiste à superposer un maillage mobile fin décrivant la sphère avec un maillage fixe de fond résolvant le fluide au repos. Il s'agit d'une approche déjà existante dans OpenFOAM qui sera enrichie par la prise en compte de la porosité de la particule. Les résultats des simulations numériques seront validés par comparaison avec des expériences de laboratoire réalisées dans le cadre de la thèse de M. Poussereau (Bourse ED).
Une fois cette étape franchie, la simulation numérique sera utilisée pour élargir la gamme de paramètres étudiés et obtenir des informations sur l'évolution des champs de vitesse et de pression dans le fluide entourant la particule en sédimentation, en complément de la vitesse de sédimentation des particules. Par ailleurs, les simulations numériques permettront l'accès aux champs de vitesse et de pression dans le fluide autour de la particule ainsi qu'au calcul des forces exercées et leur suivi en temps.
Dans un second temps, l'effet de la stratification et de la présence de la pycnocline seront introduits. Le solveur buoyantPimpleFoam sera couplé à la méthode overset et au suivi de la particule poreuse en sédimentation. Les résultats seront confrontés aux expériences avec en particulier la comparaison des temps de rétention ainsi que de l'évolution du champ de densité du fluide. Les simulations numériques seront ensuite utilisées pour élargir la gamme de paramètres sondés afin d'atteindre des conditions de stratification plus réalistes. En effet, celles-ci sont contraintes expérimentalement par le choix de la résine utilisée pour les particules. Comme dans le fluide homogène au repos, l'étude des champs de vitesse et de pression mais aussi des forces exercées sera a réalisée par la personne recrutée.

Références

Burd, A. B 2024 Modeling the vertical _ux of organic carbon in the global ocean. Annual Review of Marine Science 16 (1), 135_161.

Durkin, C. A., Buesseler, K. O., Cetini¢, I., Estapa, M. L., Kelly, R. P. & Omand, M. 2021 A visual tour of carbon export by sinking particles. Global Biogeochemical Cycles 35 (10), e2021GB006985.

Gruber, N., Bakker, D. CE., DeVries, T., Gregor, L., Hauck, J., Landschützer, P., McKinley, G. A & Müller, J. D. 2023 Trends and variability in the ocean carbon sink. Nature Reviews Earth & Environment 4 (2), 119_134.

Riley, J.-S., Sanders, R., Marsay, C., Le Moigne, F. A.-C., Achterberg, E. P. & Poulton, A. J. 2012 The relative contribution of fast and slow sinking particles to ocean carbon export. Global Biogeochemical Cycles 26 (1).

Shanks, A. L. 2002 The abundance, vertical _ux, and still-water and apparent sinking rates of marine snow in a shallow coastal water column. Continental Shelf Research 22 (14), 2045_2064.

Williams, J.-R. & Giering, S.-L.-C. 2022 In situ particle measurements deemphasize the role of size in governing the sinking velocity of marine particles. Geophysical Research Letters 49 (21), e2022GL099563.