

Modélisation et échantillonnage pilotés par les données pour déterminer l'origine des particules dans les pièges à particules profonds (Pompe Biologique de Carbone) MOMOPAR

Equipes : LEMAR – LOPS/IUEM (Université Bretagne Occidentale) ; IMT Atlantique
Techonople Brest Iroise, 29280 Plouzané, France
Directeur : Laurent Mémery (LEMAR) , laurent.memery@univ-brest.fr ; (33) 2 98 49 88 97
Co-directeurs : Ronan Fablet (IMT) : ronan.fablet@imt-atlantique.fr; Jonathan Gula (LOPS) :
Jonathan.gula@univ-brest.fr

Positionnement

La Pompe de Carbone (PC) représente les processus qui régulent l'absorption et le stockage du CO₂ atmosphérique dans les profondeurs de l'océan. La PC joue un rôle majeur dans le climat et les cycles biogéochimiques (C, O₂, nutriments, ..). La partie biologique de cette pompe réduit le CO₂ atmosphérique non perturbé de 35 à 50 %. Elle est alimentée par la photosynthèse à la surface de l'océan, qui crée des particules qui sont exportées par gravité vers l'océan profond (production d'export). Ces particules diffèrent par leur taille, leur composition et leur vitesse verticale, et sont partiellement reminéralisées dans l'océan.

La production exportée est historiquement observée à l'aide de pièges à particules depuis la thermocline supérieure (200m) jusqu'à plusieurs milliers de mètres. L'interprétation de ces données est basée sur une hypothèse très forte : l'océan est 1D sur la verticale, ce qui signifie que les trajectoires des particules, produites par la production primaire locale, sont verticales. En fait, la circulation océanique est tridimensionnelle, et se caractérise par des structures énergétiques à différentes échelles : l'origine des particules qui atteignent un piège à particules profond est ainsi répartie sur un domaine qui dépend de la circulation océanique horizontale à toutes les échelles. De plus, en raison des vitesses verticales contraintes par la dynamique frontale ou les effets topographiques, le temps de parcours de particules "identiques" (mêmes vitesses de chute) peut varier (ce qui régule la variabilité de la date de création des particules collectées par les pièges, potentiellement importante lors d'événements transitoires tels que les efflorescences).

Des programmes internationaux, tels que le programme américain EXPORTS ou le programme français APERO, se focalisent sur le devenir du carbone dans la couche mésopélagique (200-2000m) et sur l'estimation du carbone stocké dans l'océan profond. Ils s'appuient sur des campagnes ambitieuses qui visent à caractériser le flux de carbone en profondeur, c'est-à-dire la dynamique des particules qui sédimentent, de l'échelle régionale à la petite échelle. En outre, ces campagnes se déroulent à proximité de mouillages historiques de pièges à particules (plus de 20 ans de couverture temporelle), comme la station britannique PAP dans l'Atlantique Nord-Est. Il est donc crucial d'estimer le domaine qui définit la bouche de l'"entonnoir" alimentant les pièges à particules, car ce domaine doit être échantillonné pendant la campagne pour obtenir une image cohérente des flux de carbone.

Dans ce contexte, l'objectif général de cette thèse est d'établir un cadre permettant le suivi et l'échantillonnage des flux de particules dans l'océan profond à partir des synergies entre les ensembles de données, in situ, dérivées de satellites, de simulation et de ré-analyses disponibles.

Enjeux scientifiques

- Q1 : Pouvons-nous apprendre un modèle de reconstruction des flux de particules dans l'océan profond basé sur des données d'observation multimodales (par exemple, les champs de surface dérivés des satellites, les données in situ des flotteurs Argo BioGeoChemical (BGC)) ?

Pour atteindre l'objectif général considéré, nous cherchons à explorer et à développer des cadres de travail basés sur les données et l'apprentissage, en particulier des programmes d'apprentissage approfondi [1]. Formellement, les questions considérées seront énoncées comme la prédiction ou la reconstruction de la distribution à la surface de la mer de l'origine des particules collectées dans des pièges à particules dans l'océan profond (généralement à 2000 m de profondeur) compte tenu de certaines données d'entrée, telles que les champs de surface de la mer ainsi que les profils verticaux. Suite à des études récentes, ce problème de reconstruction sera abordé comme une question de régression basée sur l'apprentissage en utilisant des réseaux neuronaux profonds [1]. Les réseaux neuronaux standard, tels que le CNN (Convolutional Neural Network), et les schémas neuronaux associés à des formulations variationnelles [2] seront pris en compte. Ces derniers semblent bien adaptés pour traiter des données irrégulièrement échantillonnées et multimodales et peuvent offrir une plus grande capacité d'interprétation en termes de processus physiques sous-jacents.

- Q2 : Dans quelle mesure les conditions de surface de la mer contraignent-elles les flux de carbone vers l'océan profond ?

Les observations satellitaires (altimétrie, température de surface de la mer, couleur de l'océan) fournissent des images synoptiques des structures de surface en termes de dynamique et d'activité biologique à méso et sub-méso échelles. Étant donné qu'une grande partie du forçage physique et biologique (production primaire) de l'océan a lieu en surface, et que les données satellitaires sont globales, synoptiques et continues, on peut se demander s'il n'est pas possible de contraindre l'océan profond uniquement par des observations de surface. Plus précisément, l'une des hypothèses que plusieurs programmes en cours veulent tester est que les données satellitaires peuvent contraindre non seulement le flux de carbone exporté de la couche de surface, mais aussi ce flux de carbone aux niveaux plus profonds. De nombreuses hypothèses et simplifications se cachent derrière cette affirmation, principalement en ce qui concerne le fonctionnement de l'écosystème dans la couche mésopélagique, qui modifie les caractéristiques des particules et les spectres de taille. C'est la raison pour laquelle, dans un premier temps, la question qui est abordée ici est plus simple et plus facile à traiter. Est-il possible de déduire des distributions de particules en profondeur à partir des informations fournies par les satellites en supposant que les particules sont conservées (seuls les processus physiques sont pris en compte) ? Pour répondre à cette question, nous appliquerons la méthodologie développée en Q1, en considérant comme données d'entrée uniquement les informations relatives à la surface de la mer.

À des fins d'étalonnage (phase d'apprentissage), nous exploiterons des ensembles de données de ré-analyse (par exemple, des produits CMEMS) et des simulations numériques à haute résolution (résolution < 2 km) en utilisant une approche OSSE (Observing System Simulation Experiment), c'est-à-dire en simulant les observations dérivées des champs ré-analysés. Les modèles appris seront ensuite appliqués aux champs de surface dérivés des satellites, aux champs ré-analysés ainsi qu'aux simulations numériques à haute résolution. Une analyse statistique quantitative et qualitative sera effectuée pour diagnostiquer les différences et les similitudes entre les prédictions des origines des particules à la surface de la mer

- Q3 : Pouvons-nous déterminer des stratégies d'échantillonnage optimales pour des ressources d'observation données (par exemple, flotteurs Argo BGC et gliders profonds en plus des données satellite) afin de surveiller au mieux les flux de particules dans l'océan profond ?

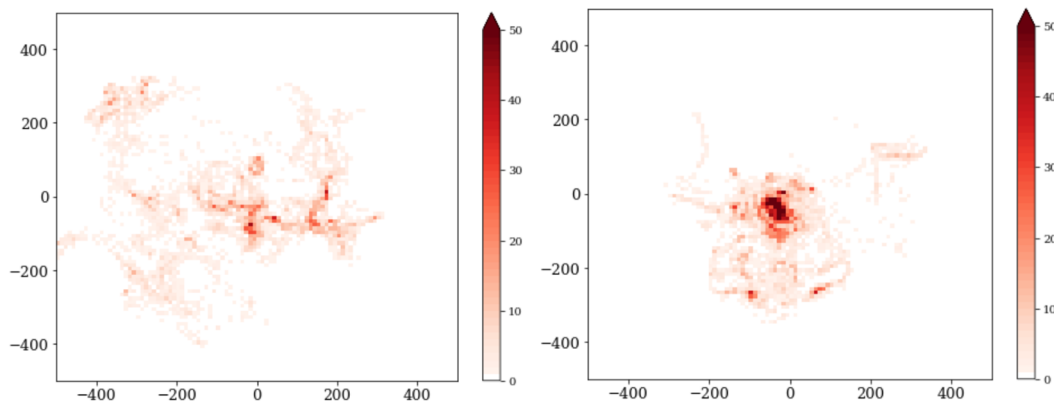
En raison de la complexité du problème et des différentes échelles impliquées, il n'y a aucune assurance que les conditions de surface de la mer à elles seules contraignent les flux de carbone dans l'océan profond (Q2), ce qui serait un résultat en soi. Dans ce cas, un diagnostic expliquant cet échec devra être posé. Une des raisons résulterait certainement d'une perte du signal de surface avec la profondeur, c'est-à-dire d'un découplage partiel entre la

dynamique de la surface et celle de l'océan profond. Une prochaine étape sera d'ajouter plus d'informations sur l'état de l'océan profond, informations provenant de flotteurs autonomes BGC Argo ou de gliders profonds, équipés d'UVP (qui donnent les distributions des grosses particules), qui peuvent être simulées dans le modèle de circulation 3D. Ceci est d'une importance capitale dans la conception d'une stratégie capable d'échantillonner correctement l'« entonnoir » des particules. En utilisant les cadres variationnels développés au cours de Q1, nous cherchons ici à déterminer des stratégies d'échantillonnage optimales vis-à-vis des profils verticaux tels que ceux donnés par les profileurs BGCArgo ou les gliders profonds. Formellement, dans le cadre variationnel considéré, cette question peut être considérée comme l'apprentissage d'un opérateur d'observations sous la contrainte de la rareté. Comme étude de cas, nous concevrons des OSSE en utilisant des ré-analyses ou des simulations numériques à haute résolution comme dans la phase d'apprentissage de Q2

Méthodologie et planning

Comme décrit dans la section précédente, cette thèse s'appuiera sur des méthodes génériques d'apprentissage contraint par les données (in situ, satellitaires, modèles 3D). En tant que tel, pour les questions ciblées (en particulier Q1 et Q2), l'acquisition de l'ensemble de ces données sera une tâche initiale importante.

Nous bénéficierons des résultats préliminaires obtenus dans le cadre du doctorat de Lu Wang supervisé par J. Gula et L. Memery. Ces résultats suggèrent une corrélation entre la dispersion et les structures de distribution en surface de la source de particules (entonnoir), et la dynamique à petite échelle et la présence de tourbillons dans la colonne d'eau. En utilisant un modèle à haute résolution (~2 km) de l'Atlantique Nord, ces résultats ont été obtenus à partir de simulations de rétro trajectoires de milliers de particules dans la région de la station PAP, en considérant des pièges à différentes profondeurs (1000, 2000, 3000 et 4000 m), avec différentes vitesses de sédimentation des particules (de 20 à 200 m/jour). Les résultats de ces simulations dans différentes configurations de champs dynamiques seront utilisés comme base de la modélisation statistique (apprentissage). L'algorithme reliera la structure du champ à la surface de l'océan (EKE, présence de tourbillons avec leurs caractéristiques - cyclone vs anticyclone, taille, durée de vie, etc...), qui peut être obtenue par altimétrie, et la distribution de la source des particules atteignant les pièges à particules.



Distribution de densité de probabilité de la source de particules alimentant un piège à 2000m de profondeur (position centrale) pour une vitesse de chute de 20m/jour (thèse Lu Wang). Gauche : situation hiver 2006 ; droite : situation hiver 2008. La différence de distribution provient de la dynamique tourbillonnaire différente durant ces deux périodes. La thèse cherche à relier l'origine des particules en surface à cette dynamique en surface et dans la colonne d'eau.

Le plan de travail proposé est le suivant

- M1-3 : Bilan de l'état des connaissances
- M1-6 : Collecte de données et conception des expériences de type OSSE envisagées, y compris la création de différents ensembles de données d'entraînement et de test comprenant les conditions de la surface de la mer et des cartes de distribution simulées des origines des particules à l'aide de simulations lagrangiennes rétrospectives. Différents ensembles de données seront issus de simulations numériques à haute résolution, de ré-analyses Mercator et de données satellitaires.
- M2-18 : Focus on Q2 et développements méthodologiques associés à Q1
- M18-30 : Focus sur Q3 et les développements méthodologiques associés à Q1
- M30-36 : Préparation de la soutenance de thèse avec rédaction d'articles scientifiques

Résultats et perspectives

Les trois principaux résultats attendus de cette étude sont les suivants :

- une méthode contrainte par les données pour relier conditions de surface (à partir d'observations par satellite) et distribution de la source des particules atteignant les pièges à particules profonds à la station PAP
- une meilleure description et compréhension de l'impact de la circulation océanique à petite et moyenne échelles sur le devenir des particules qui sédimentent dans l'océan profond
- une aide à la conception d'études permettant de prélever de manière adéquate l'« entonnoir » des particules, en considérant, si nécessaire, également les flotteurs BioArgos et les gliders profonds (OSSE : Observing System Simulation Experiment).

Cette approche pourrait alors être :

- généralisée dans différentes régions de l'océan, plus précisément aux sites d'observation à long terme équipées de pièges à particules, comme DYFAMED en Méditerranée ou US PAP dans le Pacifique Nord
- appliquée pour établir l'évolution dans le temps de l'origine des particules à ces stations en utilisant des ré-analyses, comme celles de Mercator, et pour relier la source des particules à la production primaire à la surface
- exploitée pour caractériser comment les modèles biogéochimiques et les produits d'assimilation associés diffèrent ou convergent dans la manière avec laquelle ils mettent en relation les conditions de surface de la mer et les flux de carbone en profondeur.

On peut également souligner que, si l'approche n'est pas concluante, même en tenant compte des informations supplémentaires dans la colonne d'eau, cette étude aura rejeté l'hypothèse de base (les observations de surface peuvent contraindre les flux de carbone en profondeur), bien que les processus aient été grandement simplifiés (aucune interaction entre les particules, aucune modification due à l'activité biologique et aux processus chimiques). Bien que décevant, ce sera aussi un résultat très fort en tant que tel.

[1] LeCun et al. Deep learning, Nature, 2015.

[2] Fablet et al. Learning Variational Data Assimilation Models and Solvers, arXiv 2020.

[3] Siegel et al., Prediction of the Export and Fate of Global Ocean Net Primary Production: The EXPORTS Science Plan. Front. Mar. Sci. 2016