

MEDLEY : Hétérogénéité de la couche de mélange

Les transferts de chaleur, d'énergie et de gaz à travers la couche de mélange océanique sont extrêmement complexes et spatialement hétérogènes. La couverture de glace de mer discontinue et dynamique ainsi que la présence de tourbillons, de fronts et de filaments océaniques à l'échelle du kilomètre sont des hétérogénéités majeures qui régissent l'épaisseur et les propriétés de cette couche. Les modèles climatiques actuels utilisés pour les projections climatiques du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) présentent des divergences importantes avec les observations en ce qui concerne la simulation de la profondeur de la couche de mélange, en partie à cause d'une mauvaise représentation de l'effet intégré de ces hétérogénéités. Cela limite l'utilité de ces modèles dans l'évaluation des impacts du changement climatique futur en Europe et sur les écosystèmes marins.

MEDLEY était un projet européen au sein du JPI Oceans & Climate qui visait à améliorer notre compréhension de l'hétérogénéité de la couche de mélange dans le nord de l'Atlantique Nord, une région clé pour le stockage du CO₂ anthropogénique, et dans l'océan Arctique qui se réchauffe rapidement. Les principaux objectifs du projet étaient (1) d'évaluer l'hétérogénéité spatiale des flux et processus contrôlant la couche de mélange océanique, et (2) d'améliorer la représentation des transferts à travers cette couche dans les modèles climatiques en prenant en compte cette hétérogénéité.

Le projet a intégré des ensembles de données d'observation de pointe et des modèles océaniques à l'échelle du bassin résolvant l'échelle du kilomètre, des modèles innovants de glace de mer et la dernière génération de modèles climatiques globaux avec une composante océanique tourbillonnaire. S'appuyant sur des collaborations interdisciplinaires entre ses partenaires (six institutions, dont l'UCLouvain), MEDLEY a tiré parti des méthodes d'analyse de données les plus avancées. Plus spécifiquement, le projet visait à améliorer la calibration et la cohérence de la représentation de la couche de mélange dans la composante océanique des modèles climatiques globaux par le biais d'une modélisation multi-échelle et d'une validation par rapport à des observations récentes à haute résolution. Dans le cadre de ce projet, l'attention de l'UCLouvain s'est portée sur les régions couvertes de glace de l'océan Arctique et de ses mers périphériques. Le point culminant de nos efforts a été la publication de deux résultats clés dans des revues scientifiques majeures.

Dans une première étude, nous avons évalué la capacité des modèles de circulation générale océan-glace de mer ayant participé au projet CMIP6 Ocean Modeling Intercomparison Project (OMIP) à simuler la profondeur de la couche mélangée océanique et son cycle saisonnier dans la région arctique. Pendant les mois d'été, tous les modèles sous-estiment systématiquement la profondeur de la couche mélangée par rapport aux données d'observation provenant de la Monthly Isopycnal Mixed layer Ocean Climatology et des Ice Tethered Profilers. En automne et en hiver, des différences de plusieurs dizaines de mètres ont été observées entre les modèles eux-mêmes et entre les modèles et les données d'observation. Nous avons ensuite analysé l'origine des biais des modèles en automne et en hiver dans les régions couvertes de glace, où la salinité de surface et la profondeur de la couche de mélange sont fortement déterminées par le rejet de saumure associé à la croissance de la glace de mer. En nous concentrant d'abord sur le centre de l'océan Arctique, défini ici comme la région située

au nord de 80° N, nous avons constaté que tous les modèles simulent plus ou moins le même bilan de masse de la glace de mer et donc le même flux de sel vers l'océan pendant la formation de la glace de mer. En outre, tous les modèles présentent une relation marquée entre le profil de stratification verticale de l'océan en septembre et la profondeur de la couche de mélange à la fin de l'hiver. Nous avons conclu que les divergences entre les modèles ne sont donc pas tant liées au bilan salin de surface qu'à la précision avec laquelle ces modèles reproduisent le profil vertical de salinité. En bref, un océan faiblement stratifié tend à créer une couche de mélange profonde, tandis qu'une forte stratification conduit à une couche de mélange peu profonde. Pour étayer cette conclusion, nous avons appliqué un modèle conceptuel simple, qui calcule l'évolution mois par mois de la profondeur de la couche de mélange en utilisant comme données d'entrée les gradients verticaux de salinité et les flux de sel de surface provenant des modèles de circulation générale océanique. De manière surprenante, ce modèle simplifié reproduit très bien le comportement des modèles plus complexes de circulation générale océanique, soulignant le rôle de la stratification verticale dans le contrôle de la profondeur de la couche de mélange durant la saison de croissance de la glace. De plus, ce lien peut également expliquer les importants biais de la couche de mélange notés dans d'autres régions couvertes de glace des mers pan-arctiques, même si les interactions entre la glace de mer et l'océan ne sont pas le seul moteur de la variabilité de la couche de mélange en automne et en hiver dans ces régions.

Dans une deuxième étude, nous avons évalué les performances du schéma de mélange vertical d'énergie cinétique turbulente (TKE) du modèle global d'océan et de glace de mer NEMO-SI³ (Nucleus for European Modelling of the Ocean – Sea Ice Modelling Integrated Initiative) à 1° de résolution dans les régions couvertes de glace de l'océan Arctique. Plus précisément, nous avons testé la sensibilité du modèle aux paramètres impliqués dans une paramétrisation ad hoc (appelée paramétrisation TKE MLP, pour pénétration de la couche de mélange) récemment ajoutée au schéma de mélange TKE par défaut afin de simuler l'effet de processus océaniques à petite échelle, tels que les oscillations quasi inertielles, la houle et les vagues océaniques. Nous avons évalué cette paramétrisation pour la première fois dans trois régions de l'océan Arctique : les bassins de Makarov, eurasien et canadien. Nous avons démontré l'effet important du paramètre d'échelle qui rend compte de la présence de glace de mer. Nos résultats confirment que la paramétrisation TKE MLP doit être atténuée sous la glace de mer pour éviter des couches de mélange trop profondes. Les autres paramètres considérés étaient le pourcentage d'énergie pénétrant sous la couche de mélange et l'échelle de longueur de sa décroissance avec la profondeur. Tous ces paramètres affectent la simulation de la profondeur de la couche de mélange et de son cycle saisonnier, des températures et salinités de surface de l'océan ainsi que de la stratification verticale de l'océan sous-jacent. En particulier, nous avons observé des impacts significatifs sur l'épaisseur de la glace de mer dans l'océan Arctique dans deux scénarios : lorsque le paramètre d'échelle dû à la présence de glace de mer est absent et lorsque la paramétrisation TKE MLP est désactivée. Dans le premier cas, nous avons constaté une augmentation de plusieurs mètres de la profondeur de la couche de mélange ainsi qu'une réduction de l'épaisseur de la glace de mer allant de 5 à 30 cm, reflétant l'impact d'un mélange accru. A l'inverse, dans le second cas, nous avons remarqué qu'une profondeur de couche de mélange plus faible s'accompagne d'une augmentation de l'épaisseur de la glace de mer allant de 5 à 20 cm, comme attendu d'un mélange plus faible. En outre, l'analyse de la variabilité interannuelle des caractéristiques des couches supérieures de l'océan et de la glace de mer simulées par le modèle montre que les expériences incluant un paramètre d'échelle basé sur la concentration de glace de mer affichent une profondeur accrue de la couche de mélange pendant les périodes de réduction de la glace de mer, ce qui est cohérent avec les tendances

observées. Ces résultats soulignent l'importance de prendre en considération correctement l'influence des processus à petite échelle sur le mélange vertical dans les océans couverts de glace grâce à l'utilisation de paramétrisations physiques appropriées dans les modèles.

Mots clés : couche de mélange océanique, hétérogénéité spatiale, modèles climatiques, Atlantique Nord, océan Arctique, glace de mer, tourbillons à la méso-échelle, fronts sous-méso-échelle, ensembles de données d'observation, modèles à haute résolution.