



Sorbonne Université

*Modélisation numérique du climat*

Année 2025-2026

---

## **Mini-projet océan: Arctique**

Lola Goémé  
François Chaffard

---

23 février 2026

## I - Introduction

Dans le cadre du cours de modélisation numérique du climat, nous avons été amenés à travailler en binôme sur un mini-projet portant sur une problématique environnementale. Nous avons choisi de nous intéresser à l'océan Arctique, une région importante du système climatique global. L'océan Arctique est le plus petit des océans de la planète, il ne représente qu'environ 2,76 % de la surface océanique mondiale. Malgré sa taille, il joue un rôle fondamental dans la régulation du climat à l'échelle planétaire, notamment via ses interactions avec l'atmosphère, la cryosphère et la circulation océanique globale.

L'Arctique est aujourd'hui l'une des régions les plus impactées par le changement climatique. On y observe un phénomène d'amplification arctique avec un réchauffement environ quatre fois plus rapide que la moyenne globale. La glace de mer constitue un élément central de ce système, elle influence notamment les échanges de chaleur entre l'océan et l'atmosphère.

La recherche sur la glace de mer se fait par des approches variées, observations satellitaires, campagnes in situ ou modélisation numérique couplée océan-atmosphère-glace. Les modèles climatiques possèdent des modules de glace de mer décrivant sa croissance, sa fonte, sa dynamique et ses interactions avec l'océan et l'atmosphère. Comprendre la sensibilité de la banquise aux différents paramètres physiques, notamment la salinité, est essentiel pour améliorer les projections climatiques futures et évaluer les impacts environnementaux dans la région arctique.

Le but de ce projet est donc d'étudier cette zone en s'intéressant plus particulièrement à l'évolution de la fonte de la glace de mer et à son impact sur son environnement océanique. Nous tenterons ainsi de répondre à la question suivante : *Quel est l'impact de la modification de différents paramètres de salinité sur la fonte de la glace de mer en Arctique ?*

## II - Simulation de contrôle

Nous utilisons une simulation de contrôle, qu'on fait tourner sur 5 ans et qui nous permettra, par la suite, de comparer ses résultats avec ceux des simulations perturbées. Dans un premier temps cependant, nous utilisons ces résultats pour découvrir les données et le fonctionnement du modèle mais également pour avoir une première idée de la dynamique de cette zone géographique.

### 1 - épaisseur de glace moyenne

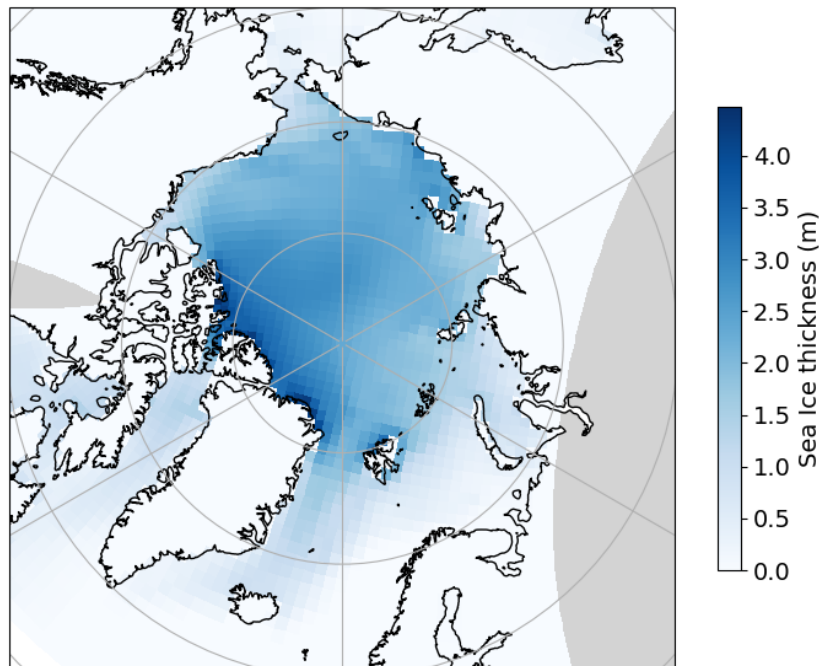


Figure 1: Carte d'épaisseur moyenne de la glace en hiver (JFM)

On observe sur la Fig.1 une épaisseur de glace moyenne en hiver autour de 2.5 m avec un maximum de 4 m au nord du Groenland.

## 2 - Comparaison des données du modèle

Nous nous intéressons ensuite à l'étendue de la glace en commençant par comparer les résultats pour notre simulation de contrôle et des données satellitaires. Pour cela, nous avons utilisé des données de glace de mer fournies par MET Norway dans le cadre du Sea Ice Index (OSI SAF). Ces données proviennent de satellites micro-ondes, qui permettent d'observer la glace de mer en continu depuis 1978, même en présence de nuages ou durant la nuit polaire. Elles donnent la concentration de glace, ainsi que l'extension et l'aire totale de glace, des indicateurs couramment utilisés pour suivre l'évolution de la banquise.

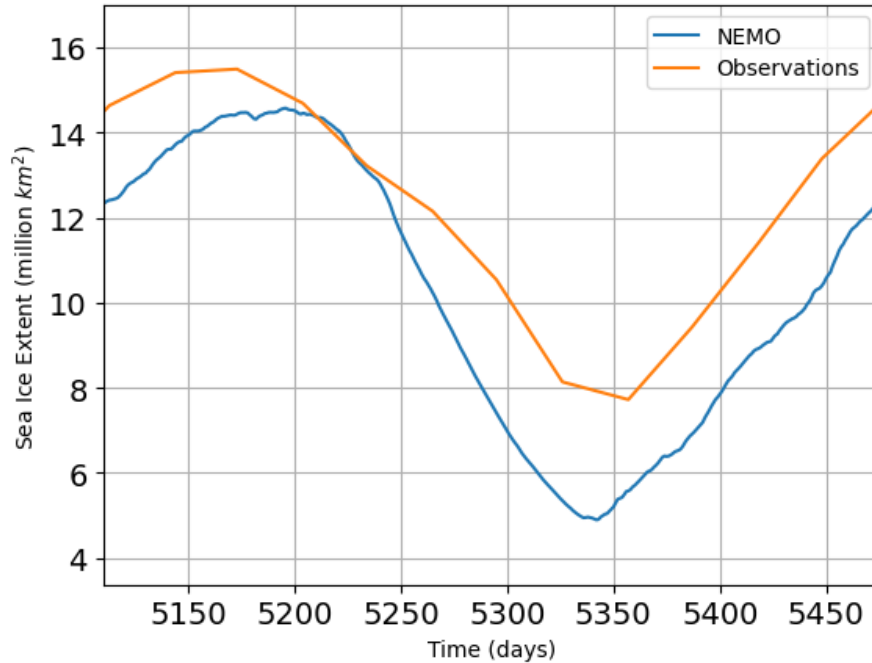


Figure 2: Climatologie de l'étendue de glace (en million de  $km^2$ ) pour la 5ème année de la simulation et pour une année (1992) pour les observations

Sur la Fig.2 on observe que les climatologies des observations et de NEMO sont cohérentes entre elles. On remarque cependant un décalage d'environ 2 km sur l'ensemble de l'année à l'exception d'à peu près un mois en hiver. Cette différence peut s'expliquer par le fait que nous n'utilisons qu'une seule année d'observation et non pas une moyenne. Cela nous confirme néanmoins que les données de NEMO sont cohérentes avec les observations.

Nous regardons ensuite la méthode de modélisation de l'épaisseur de la glace de mer en comparant un modèle simple à NEMO. Une approche simple est de partir de l'évolution temporelle de la hauteur de glace via cette équation:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q}{\rho_i L_f}$$

avec  $Q = -K \frac{\Delta T}{h}$  la chaleur par unité de surface créée à la base de la glace de mer nécessaire pour maintenir le gradient de température  $\Delta T$  entre le sommet et la base de la glace,  $L_f \approx 330000 J/kg$  la chaleur latente de solidification et  $\rho_i \approx 930 kg/m^3$  la densité de la glace.

On a donc

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{K(\Delta T/h)}{\rho_i L_f}$$

Pour faire simple on prend ici  $\Delta T$  constant avec  $\Delta T = |-20.5 - (-2.5)| = 17.5$  °C. A partir de cette équation on modélise l'évolution de la glace en prenant soit  $h(t=0) = 0$  pour voir combien de glace on peut créer au maximum en un hiver avec juste ce processus, soit  $h(t=0) = h_{0,NEMO}$  pour voir dans quelle mesure NEMO suit ce mécanisme simple.

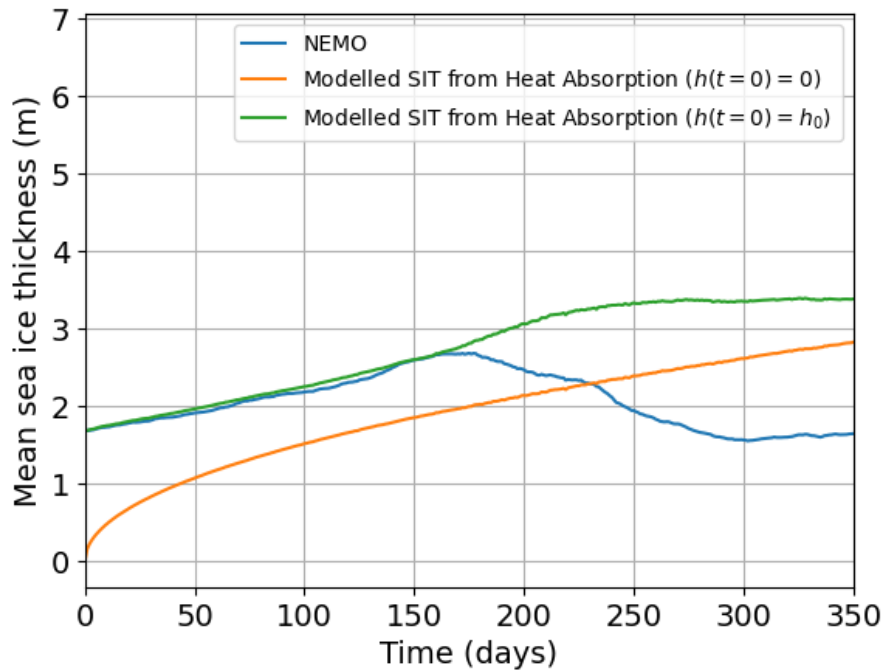


Figure 3: Évolution de l'épaisseur de glace moyenne selon NEMO, et selon un modèle simple 0D

La Fig.3 montre l'évolution de la hauteur de glace moyennée spatialement uniquement sur les grilles du modèle où il y a effectivement de la glace de mer selon NEMO, ainsi que les résultats du modèle 0D décrit ci-dessus. Le modèle 0D a une solution analytique en  $\sqrt{t}$ , il n'est donc adapté qu'à la création de glace en hiver. Néanmoins il donne une évolution assez proche de NEMO pendant cette période s'il part de la même condition initiale. Malgré une plus faible croissance, l'épaisseur de glace modélisée par NEMO atteint des valeurs plus grandes que ce que le modèle 0D prédit comme quantité atteignable en un hiver en partant de 0. Il est donc crucial d'avoir des zones où la glace de mer ne fond pas pendant l'été pour obtenir ces valeurs d'épaisseurs de glace supérieures à 2m.

### 3 - Pouvoir isolant

On regarde maintenant le pouvoir isolant de la glace. On utilise pour cela la différence entre les flux de chaleur conductifs au sommet et à la base de la couche de glace ce qui nous permet de calculer le pouvoir isolant de la glace pendant la nuit polaire.

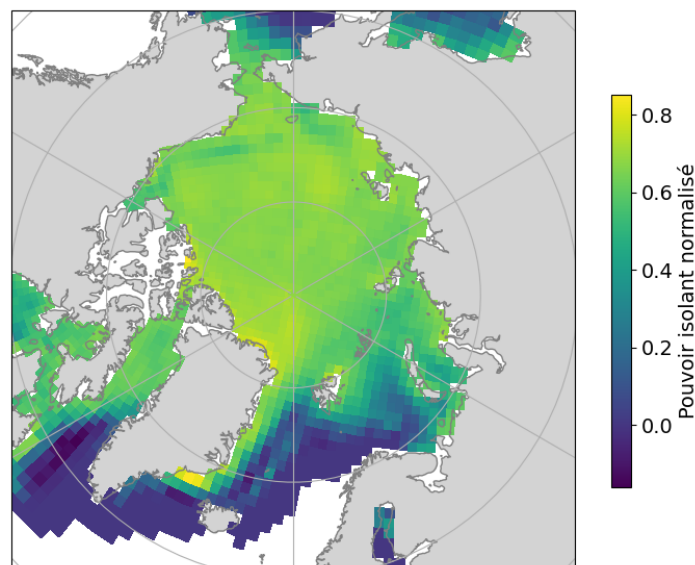


Figure 4: Pouvoir isolant normalisée de la glace en hiver (JFM) pour la 5ème année de simulation

On peut alors observer sur la Fig.4 qu'on trouve le maximum d'isolation au centre de la région et le minimum sur les bords de glace, cela correspond aux résultats trouvés pour l'épaisseur de glace montrant donc que plus la glace est épaisse plus son pouvoir isolant est important. Les légères variations, notamment au centre de la région, peuvent être expliquées par la présence plus ou moins importante de neige qui augmente le pouvoir isolant global.

#### 4 - Bilan de contribution création-fonte

Enfin, nous étudions les différentes contributions des mécanismes de créations et de fonte de glace de mer. Du côté des processus de création, on retrouve la croissance par le bas, qui correspond à la création de glace à l'interface glace-océan lorsque la température de l'eau atteint le point de congélation. Un second processus correspond à la formation de glace à partir de la neige lorsque celle-ci s'accumule en surface et s'enfonce sous la ligne de flottaison. Enfin, la formation de glace dans les zones d'eau libre contribue également à l'augmentation de l'extension de la glace. Concernant les mécanismes de fonte, plusieurs processus interviennent également. La fonte par le dessus, principalement due au rayonnement solaire, la fonte par le dessous qui résulte quant à elle des échanges thermiques avec l'océan, notamment lorsque des eaux plus chaudes sont advectées sous la banquise. Enfin, la fonte latérale affecte les bords des blocs de glace et devient particulièrement importante lorsque la banquise est fragmentée.

L'analyse de ces contributions permet alors de mieux comprendre quels processus dominent le bilan de volume de glace de mer dans le cadre du modèle.

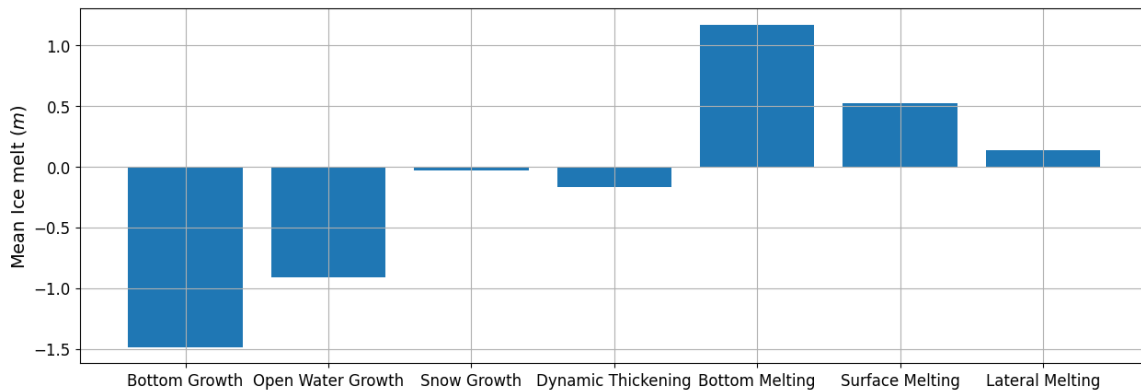


Figure 5: Histogramme des contributions des différents mécanismes de création et de fonte de glace

On observe sur la Fig.5 que la majorité de la glace se forme par le bas des blocs et une minorité avec la neige accumulée en surface. Pour la fonte, on observe qu'elle résulte principalement de la fonte par le bas et de manière moindre par les côtés, ce qui paraît cohérent.

### III - Simulations perturbées

Dans cette partie nous avons fait des simulations sur 1 an en modifiant les paramètres gérant la salinité de la glace de mer. Nous nous sommes concentrés sur 3 paramètres : le drainage, le flushing et la fraction d'eau liquide dans la glace. Le drainage correspond à l'évacuation du sel piégé dans la glace de mer par les pores de cette dernière par simple effet de gravité et peut être désactivé ou activé dans le modèle. De même le flushing est un type particulier de drainage qui intervient lorsque des quantités importantes d'eau de fonte s'accumulent au sommet de la glace de mer et s'infiltreront dedans en embarquant le sel piégé à l'intérieur. On récapitule les différentes simulations dans le Tab.1:

| Expérience       | Paramètres                                                  |
|------------------|-------------------------------------------------------------|
| EXP00 (Contrôle) | flush: True, drainage: True, 0.75 de fraction d'eau liquide |
| EXP01            | flush: True, drainage: False, 0.75 de fraction d'eau        |
| EXP02            | flush: False, drainage: False, 0.75 de fraction d'eau       |
| EXP03            | flush: True, drainage: True, 0.25 de fraction d'eau         |
| EXP04            | flush: False, drainage: False, 0.25 de fraction d'eau       |

Table 1: Tableau résumant les différentes expériences réalisées

## 1 - Flushing et drainage

Dans cette section on s'intéresse à l'influence du flushing et du drainage sur les simulations, en particulier sur la profondeur de mélange.

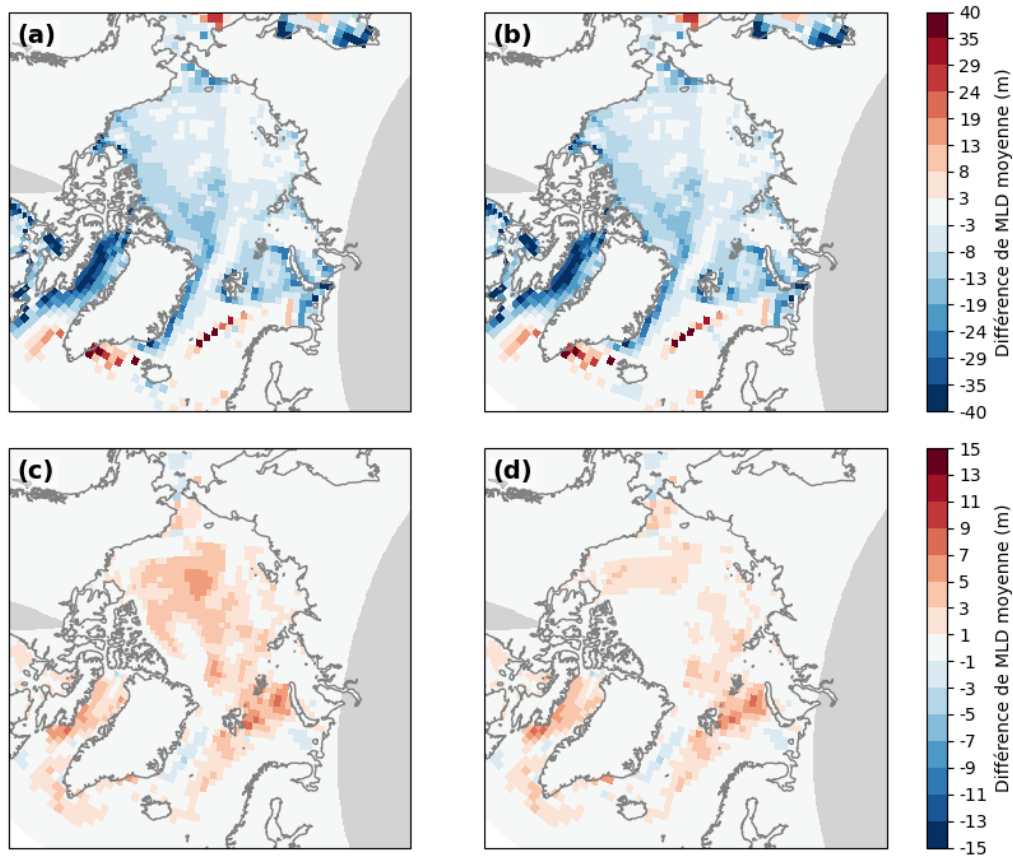


Figure 6: Différences de MLD entre la simulation de contrôle et la simulation avec flush mais sans drainage à 0.75 de fraction d'eau liquide dans la glace en (a) hiver (JFM) et (c) été (JJA) et différence de MLD entre la simulation de contrôle et la simulation sans drainage et sans flush à 0.75 de fraction d'eau liquide dans la glace en (b) hiver (JFM) et (d) été (JJA)

La Fig.6 montre que la désactivation des processus permettant au sel de s'échapper de la glace de mer entraîne un amincissement significatif de la couche de mélange en hiver. En effet lorsque le sel est introduit dans la couche de mélange en hiver par drainage depuis la glace de mer, la stratification est réduite et la MLD augmente, d'où sa diminution lorsque le drainage est désactivé. Aussi, on n'observe pas de différence significative entre les deux simulations en hiver ce qui est cohérent car le flushing joue un rôle majoritairement en été.

La couche de mélange s'approfondit en été pour les deux variantes de simulations perturbées mais significativement plus pour la simulation où le flushing est resté activé. Cela s'explique par le fait que le sel qui n'a pas été évacué par drainage pendant l'hiver l'est pendant l'été par flushing et diminue la stratification. Néanmoins une part non négligeable de cette augmentation, comparée à la MLD de référence en été qui est de l'ordre de la dizaine de mètres dans cette région, n'est pas due au flushing et nous n'avons pas pu identifier clairement un mécanisme pour l'expliquer.

En hiver, la MLD augmente drastiquement dans la simulation perturbée aux bords de la glace de mer hivernale. Une première hypothèse pour expliquer cette augmentation est un possible recul de la glace de mer dû à la désactivation du drainage qui permettrait les échanges de chaleur dans ces régions et une augmentation de la MLD. La Fig.7 montre la différence d'épaisseur de glace entre la simulation perturbée et celle de référence et semble confirmer un recul de la banquise là où on observe un approfondissement de la couche de mélange, même si l'épaisseur de glace est plus grande partout ailleurs.

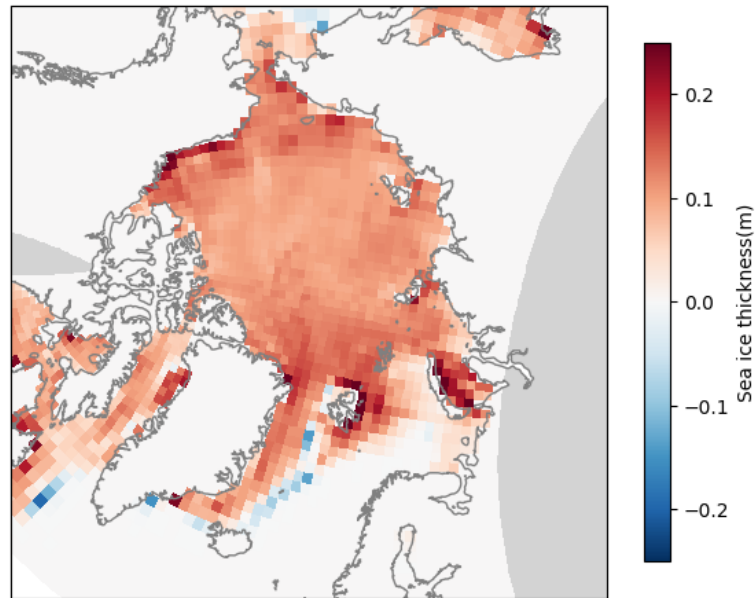


Figure 7: Différence d'épaisseur de la glace de mer entre la simulation EXP02 et la simulation de contrôle.

## 2 - Fraction d'eau liquide dans la glace de mer

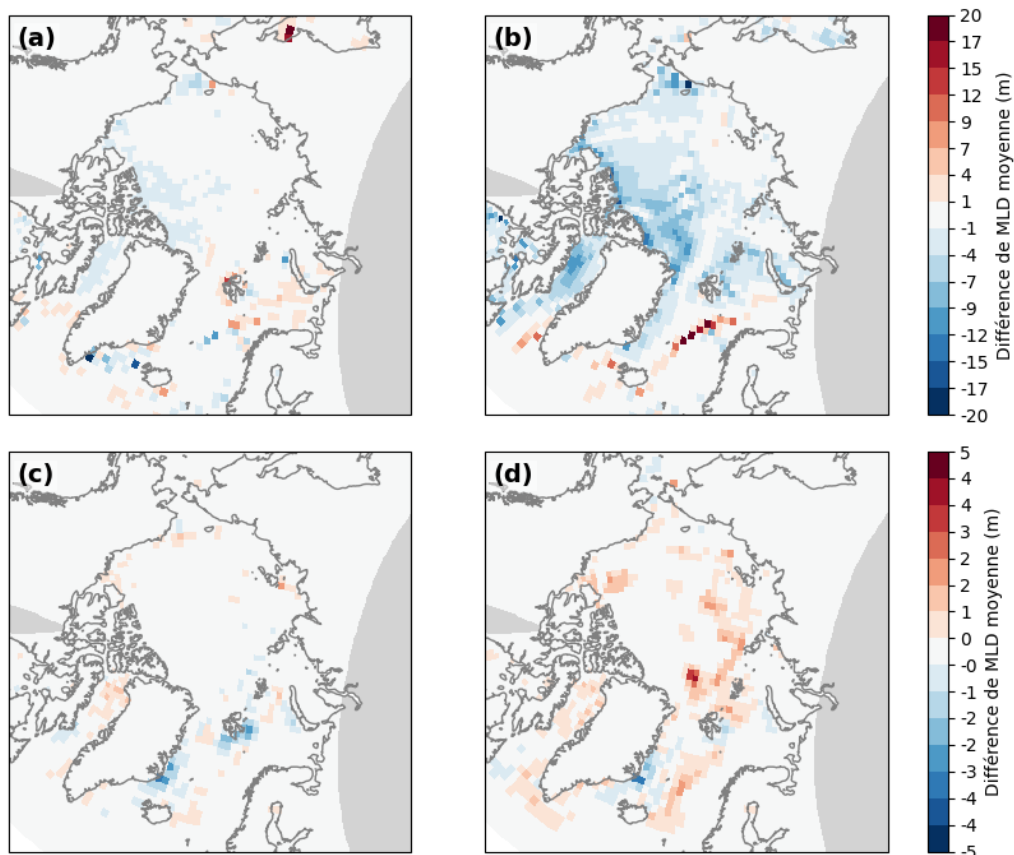


Figure 8: Différence de MLD entre la simulation de contrôle et la simulation avec 0.25 de fraction d'eau liquide dans la glace avec flushing et drainage en (a) hiver (JFM) et (c) été (JJA) et différence entre la simulation de contrôle et la simulation avec 0.25 de fraction d'eau liquide dans la glace sans flushing et sans drainage en (b) hiver (JFM) et (d) été (JJA).

Avec la Fig.8.a on remarque que la diminution de la fraction d'eau liquide dans la glace n'a pas un impact élevée par rapport à la simulation de contrôle. En effet, c'est l'expérience pour laquelle la différence est la plus

faible. On voit donc que la diminution de la fraction d'eau dans la glace et donc que la diminution de la salinité dans la glace sont compensées par le fait que le sel est rejeté dans l'eau de toute façon par le flushing et le drainage. Cela est confirmé par ce qu'on peut observer de la Fig.8.b. Dans ce cas il n'y a ni flushing ni drainage et l'eau salée contenue dans la glace (en faible quantité) n'est que très peu évacuée dans l'eau. On a donc une différence de MLD plus forte avec cette simulation avec une baisse de la MLD allant jusqu'à 8 m au nord du Groenland.

## **IV - Conclusion**

Ce projet nous a permis d'analyser la sensibilité de la glace de mer arctique à différents paramètres liés à la salinité dans un modèle couplé océan-glace. La simulation de contrôle a montré une dynamique globalement cohérente avec les observations et les ordres de grandeur attendus, que ce soit pour l'épaisseur que pour l'étendue de la glace. Les simulations perturbées mettent en évidence le rôle clé des processus d'évacuation du sel (drainage et flushing) dans la structuration de la couche de mélange. La modification de la fraction d'eau liquide montre par ailleurs que l'impact sur l'océan dépend fortement de la possibilité d'échanger le sel entre glace et océan. Les paramètres de salinité n'agissent alors pas uniquement de manière directe sur la fonte, ils modifient la stratification et les échanges thermiques glace-océan, influençant indirectement l'évolution de la banquise.