



Trajectoires et possibilités de remontées à la surface des flotteurs Argo déployés au pôle Nord

Maud MARTINEZ ALMOYNA
M1 - Physique Ocean et Climat, IUEM

Encadrants : **Camille LIQUE** (Chercheuse Ifremer), **Kevin Balem** (Ingénieur Ifremer),
Nicolas Kolodziejczyk (Physicien adjoint CNAP, UBO), **Claude Talandier** (Ingénieur CNRS)

Résumé

En septembre 2021, deux flotteurs Argo ont été déployés au pôle Nord par Camille Lique et Nicolas Kolodziejczyk dans le cadre du projet ARcticGO. Ces flotteurs sont programmés pour dériver à 500 m de profondeur. Ils sont équipés d'un algorithme qui leur permet de détecter la présence de glace en surface afin d'interrompre leurs remontées. Les flotteurs ne peuvent donc ni obtenir leurs positions GPS ni communiquer avec les satellites tant qu'ils n'ont pas atteint une zone libre de glace. Pour connaître leurs trajectoires potentielles ainsi que leurs probabilités de rejoindre surface, on réalise des simulations de flotteurs virtuels avec l'outil Virtual Fleet. On constate que les flotteurs dérivent peu et restent pendant les premières années dans une zone recouverte toute l'année par la glace. Les probabilités pour les flotteurs de rejoindre la surface sont donc faibles. Après quoi, on cherche, en étudiant les données de glace et de courants du modèle, des conditions permettant d'optimiser la sortie des flotteurs en zone libre de glace. Finalement, on choisit de faire dériver les flotteurs à 100m de profondeur. Avec une nouvelle simulation de flotteurs virtuels, on conclut que cette nouvelle programmation permet à la majorité des flotteurs de remonter à la surface au bout de 2 ans.

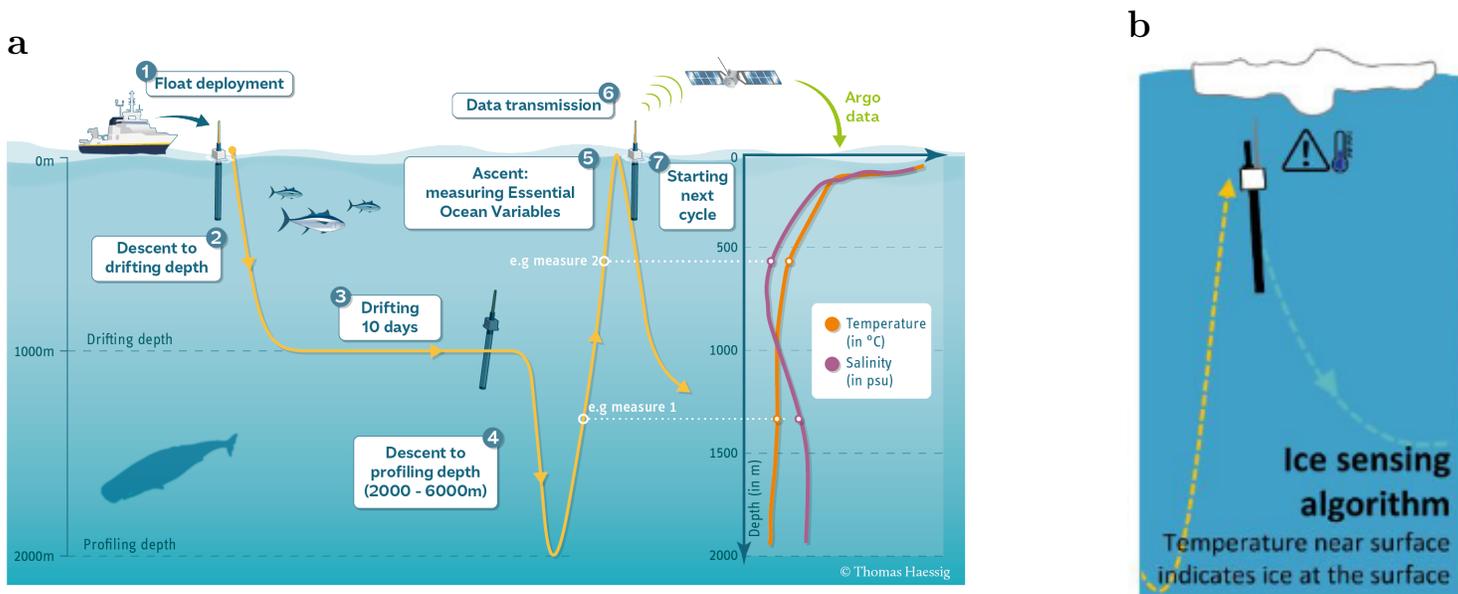


Figure 1: (a) Fonctionnement d'un cycle de flotteur Argo, source : <https://argo.ucsd.edu/how-do-floats-work/> (b) Comportement de l'algorithme de détection de la glace ISA, source : présentation Polar Argo update *Ingrid M. Angel Benavides* (BSH, Allemagne), 2022

1 Introduction

L'océan Arctique subit actuellement des transformations parmi les plus rapides causées par le réchauffement climatique sur la planète. Les températures de surface ont augmenté deux fois plus vite en Arctique que la moyenne mondiale depuis 1900. La glace de mer diminue et a atteint son étendue minimale la plus faible en Septembre 2012 (National Snow and Ice Data Center et al., 2022). En réponse à ces changements qui ont affecté l'atmosphère et la glace en Arctique, on peut logiquement s'attendre à des changements également dans l'océan.

Cependant l'océan Arctique demeure aujourd'hui peu observé par rapport aux autres régions du monde. La présence de glace rend impossible les campagnes océanographiques pendant une grande partie de l'année. De plus les instruments autonomes standards utilisés pour mesurer les propriétés des océans ne fonctionnent pas dans les régions couvertes par la glace. Il subsiste donc un manque de mesures in-situ dans une grande partie de l'Arctique, en particulier dans le bassin eurasien (Nguyen et al., 2020).

L'une des méthodes pour obtenir des mesures in-situ dans les océans est l'utilisation de flotteurs Argo. Un flotteur Argo a un comportement autonome qui



Figure 2: Interpolation de la trajectoire du flotteur n°7900549, déployé par l’équipe allemande BSH, source : <https://fleetmonitoring.euro-argo.eu/float/7900549>

permet de récolter un grand nombre de données (figure 1a). Lorsqu’il est déployé, le flotteur Argo descend jusqu’à une profondeur appelée profondeur de dérive ou profondeur de parking, généralement à 1000 m de profondeur. Durant une dizaine de jours, le flotteur reste à cette profondeur et dérive avec les courants. À la fin de son cycle, il coule jusqu’à 2000 m de profondeur puis remonte en mesurant des variables océaniques comme la température et la salinité, pour former un profil vertical de mesure. Lorsque le flotteur atteint la surface, il se connecte aux satellites et peut donc obtenir sa position GPS. Enfin il transmet ses données par les satellites et recommence un nouveau cycle en replongeant à sa profondeur de dérive (Ollitrault and Rannou, 2013).

Cependant en présence de glace de mer, le flotteur ne peut pas atteindre la surface et donc ne parvient pas à se connecter aux satellites. Il est donc incapable de calculer sa position GPS ou de transmettre ses données enregistrées lors de la remontée. La programmation des flotteurs Argo classiques ne leur permet pas de fonctionner sous la banquise.

Pour palier à ce problème de fonctionnement des flotteurs Argo en zone de glace, ceux-ci peuvent maintenant être équipés de méthodes de détection de la glace. Une des méthodes trouvées est un algorithme, appelé ISA pour *ice sensing algorithm*, qui utilise la présence d’une couche de mélange d’eau douce et au point de congélation située en-dessous de la glace de mer (Klatt et al., 2007). Il est implémenté ainsi : on choisit comme paramètres les profondeurs minimum

et maximum de la couche de mélange ainsi que la température du point de congélation correspondants à la région étudiée. Lorsque le flotteur remonte vers la surface à la fin de son profil de mesures et qu’il arrive dans la couche de mélange, il calcule la médiane des températures de la couche de mélange. Si la médiane est inférieure à la température du point de congélation, le flotteur considère qu’il y a présence de glace en surface et annule la remontée. Le profil de mesure est sauvegardé en mémoire et le flotteur retourne à sa profondeur de dérive pour recommencer un cycle.

Cet algorithme a commencé à être utilisé en Arctique, notamment au Nord du Svalbard où le flotteur n° 7900549, déployé par l’équipe allemande du BSH (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie) dans le cadre du projet EA-RISE, a rejoint la mer de Laptev après 9 mois passés sous la glace. On voit sur la figure 2 que le flotteur n’a pas pu enregistrer sa position lorsqu’il était sous la glace. Sa trajectoire a été interpolée linéairement entre les deux positionnements GPS obtenus lorsque le flotteur a fait surface. Cela amène à des situations physiquement impossibles, où la trajectoire du flotteur passe sur la terre ferme. Plusieurs méthodes ont été imaginées pour réinterpoler la trajectoire et obtenir des positions plus réalistes (Chamberlain et al., 2018). Il demeure cependant que pendant toute la période où le flotteur dérive sous la glace, il n’y a pas de moyen de connaître sa position actuelle, ni quand ou à quel endroit il refera surface à nouveau.

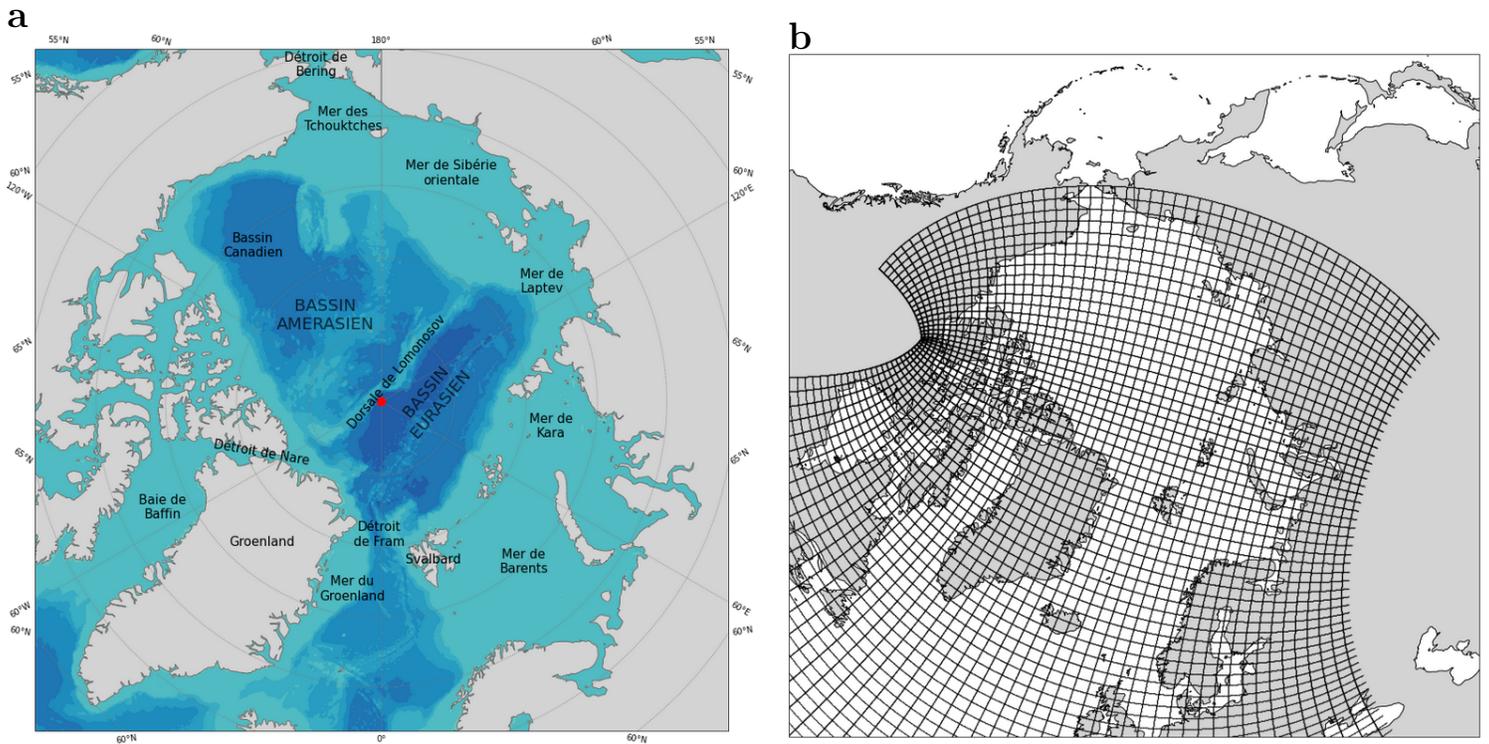


Figure 3: (a) Bathymétrie de l'océan Arctique issue de APDRC (Asia-Pacific Data-Research center), projection orthographique. Le point rouge représente le lieu de déploiement des flotteurs Argo. (b) Représentation de la grille CREG12. On représente 1 point de la grille sur 15

C'est dans ce contexte que 2 flotteurs Argo équipés de l'algorithme ISA ont été déployés au Pôle Nord en septembre 2021 par Camille Lique et Nicolas Kolodziejczyk lors d'une campagne en mer sur le brise-glace Le Commandant Charcot. Les flotteurs sont programmés pour dériver à 500 m de profondeur pendant 8 jours puis réaliser une plongée à 2000 m et remonter en enregistrant le profil. Pour la programmation de l'ISA, il a été choisi de calculer la médiane entre 30 m et 10 m de profondeur et de prendre $-1,6^{\circ}\text{C}$ comme température de seuil de la médiane. L'objectif de ce stage est de simuler le comportement de ces flotteurs en utilisant des champs de vitesse issus de sorties de modèles pour estimer des trajectoires ainsi que les probabilités de remontée à la surface hors zone de glace. Dans un second temps, on cherchera à déterminer les meilleures conditions pour déployer les flotteurs lors de la prochaine campagne. On verra qu'une dérive des flotteurs à 100 m de profondeur offre des résultats intéressants.

2 Méthodes

Afin de simuler le comportement des flotteurs déployés en Arctique, on utilise le code python *Virtual Fleet*, développé par Kevin Balem et Guillaume Maze, dans le cadre du projet Euro-ArgoRISE (Balem and Maze, 2021). Il s'agit d'un code permettant de simuler le comportement d'un flotteur Argo en choisissant ses paramètres de fonctionnement comme la profondeur de dérive, la durée du cycle ou encore la profondeur de profil. Il utilise la librairie Oceanparcels, un outil de simulation de dérive lagrangienne, en y ajoutant les comportements spécifiques des flotteurs Argo.

En entrée de ce code, on utilise les données de vitesses, températures, salinités et les paramètres de glace issus de la configuration régionale CREG12.L75 du modèle NEMO, entre 2006 et 2015. Il s'agit d'une configuration avec une résolution au 1/12ème de degrés sur 75 niveaux de profondeur. Les variables telles que la température, salinité et les vitesses sont calculées sur une grille Arakawa-C avec des latitudes et longitudes déformées afin de mieux échantillonner l'Arctique. Cette grille possède 2 points singuliers placés sur le continent américain et sur le continent

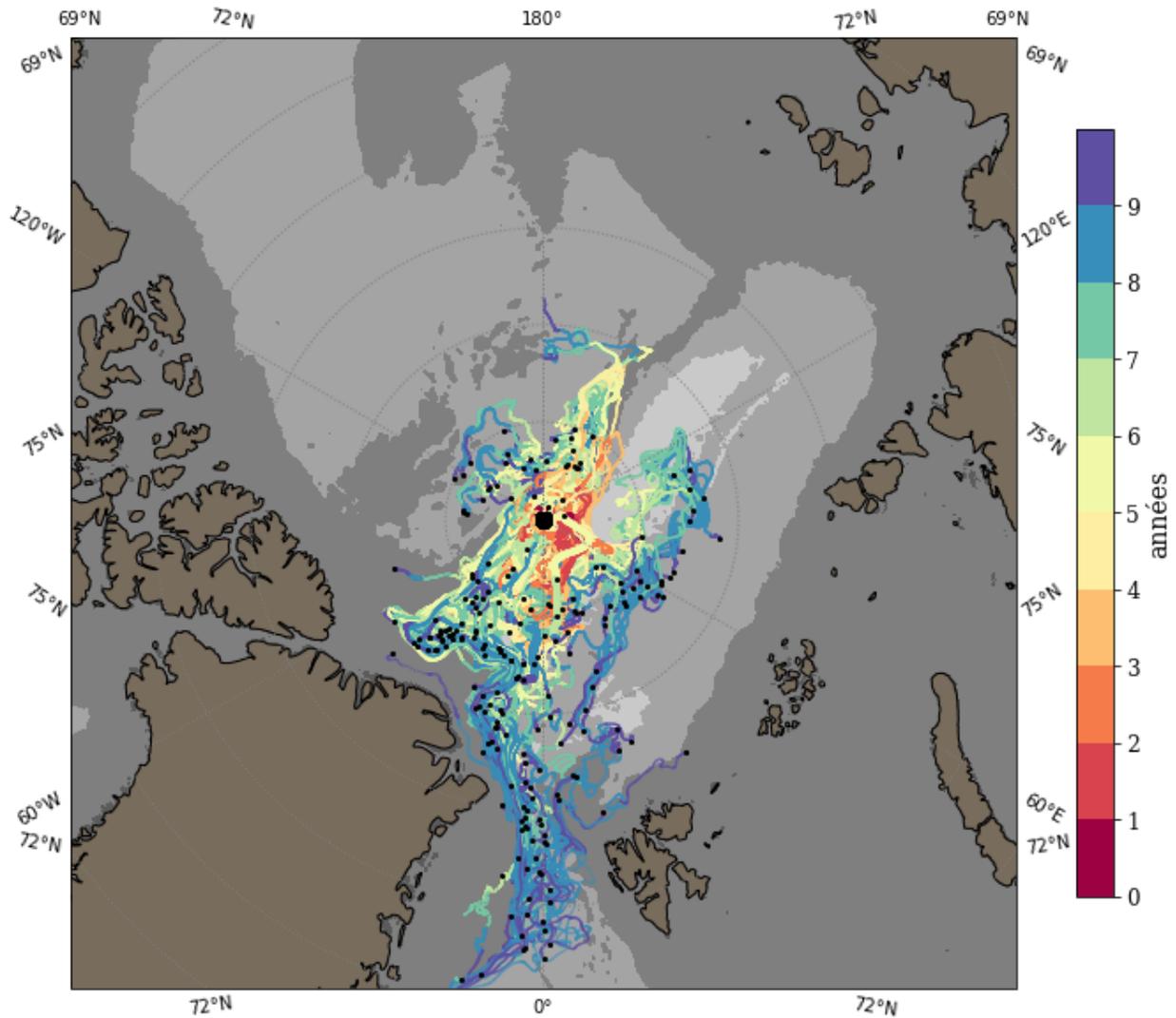


Figure 4: Trajectoires des flotteurs déployés au pôle Nord le 3 septembre 2006 et dérivant à 500 m jusqu'en décembre 2015. La barre de couleur correspond au temps écoulé depuis le déploiement des flotteurs.

eurasien (figure 3b). Cela permet d'éviter d'avoir un point singulier au pôle Nord, au milieu de l'océan, et donc d'avoir une résolution horizontale très petite qui nécessiterait un pas de temps du modèle bien trop petit également. On utilise cette configuration avec une sortie tous les 5 jours, correspondant à la moyenne sur les 5 jours écoulés. (Madec et al., 2022)

Pour notre simulation, on positionne 300 flotteurs au pôle Nord et on démarre la simulation en septembre 2006 pour obtenir plus de 9 ans de simulation jusqu'à décembre 2015. Les flotteurs sont programmés de façon à se comporter de la même façon que les flotteurs réels déployés au pôle : ils dérivent pendant 8 jours à 500 m de profondeur puis plongent à 2000 m avant de remonter vers la surface. Pour la configura-

tion de l'algorithme ISA, on choisit de prendre comme valeur de seuil la température à 20 m. Après observation de nos données, il a été constaté que celle-ci est quasiment identique à la médiane entre 10 et 30 m, et elle est par ailleurs moins coûteuse en calcul que la médiane. Le flotteur abandonne donc sa remontée si la température à 20 m est inférieure à $-1,6^{\circ}\text{C}$, ce qui correspond à la température du point de congélation dans cette région.

On fait tourner la simulation avec un pas de temps de 5 minutes jusqu'à la fin de l'année 2015, ce qui représente un peu plus de 9 ans de simulation. Toutes les 24 heures, on enregistre la position des flotteurs, la température, la salinité, les conditions de glace, ainsi que la condition ISA (on lorsque le programme

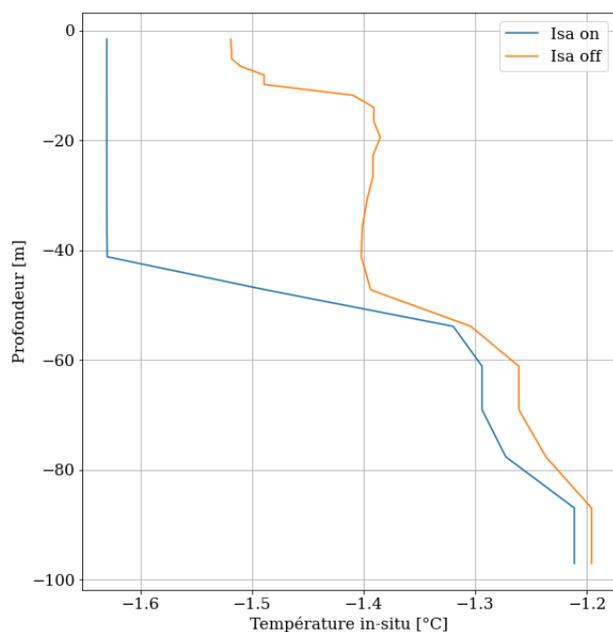


Figure 5: Profils de température du flotteur n°150 lorsque l’ISA interrompt la remontée à la surface (bleu) et lorsque l’ISA autorise le flotteur à faire surface (orange). Le profil bleu correspond au 31 janvier 2007 alors que le flotteur est situé à 89.6°N et -123.4°E. Le profil orange correspond au 13 septembre 2007 alors que le flotteur est situé à 89.3°N et -77.7°E.

se déclenche et que le flotteur ne remonte pas, ou **off** lorsque le programme ne se déclenche pas et que le flotteur remonte à la surface).

3 Résultats et analyses

3.1 Simulation de la dérive des flotteurs à 500m de profondeur

On observe sur la figure 4 que les flotteurs restent à proximité du pôle Nord, au-dessus des 87°N de latitude, pendant les 4 premières années. Ils circulent peu et tourbillonnent sur place pendant les premières années de la simulation. Certains semblent embarqués dans un courant vers le détroit de Fram après 5 ans mais mettent tout de même 6 à 7 ans pour l’atteindre. D’autres flotteurs dérivent dans le bassin Eurasien. Enfin quelques uns passent la dorsale de Lomonosov et entrent dans le bassin amérasien.

Si l’on ne peut pas prévoir une position exacte pour les flotteurs, on sait qu’ils ont tendance à rester proches du pôle durant les premières années. Or la région du pôle Nord est une zone généralement couverte par la glace tout au long de l’année. Il faut donc regarder quelles sont les probabilités pour les flotteurs de parvenir à atteindre la surface durant leur phase de remontée.

On trace en fonction du temps et du numéro des flotteurs le comportement de l’algorithme ISA sur la figure 6a. Chaque ligne horizontale correspond donc à un flotteur en fonction du temps. Pour rappel, ici le programme se déclenche lorsque la température à 20m est inférieure à -1,6°C (pour les vrais flotteurs, il s’agit de la médiane des température entre 10 m et 30 m). En effet, comme on peut le voir sur la figure 5, une température inférieure à la température de congélation à 20m est le signe de la présence d’une couche de surface homogène d’eau douce peu salée qui se forme sous la glace. Lorsque cet algorithme se déclenche, le flotteur n’essaie pas de remonter à la surface.

On constate une alternance saisonnière du comportement de l’ISA. Les flotteurs tentent de remonter chaque année à la fin de l’été sur des périodes plus ou moins longues en fonction des années. Les lignes blanches correspondent aux flotteurs qui ont disparus suite à un échouage ou bien si le code a échoué à calculer leur position.

Cependant l’ISA n’est pas fiable à 100% puisqu’il ne détecte pas directement la glace mais seulement la température de la couche de surface qui elle est un indicateur de la présence de glace. Il arrive donc que le programme ISA ne se déclenche pas mais que le flotteur rencontre tout de même de la glace lors de

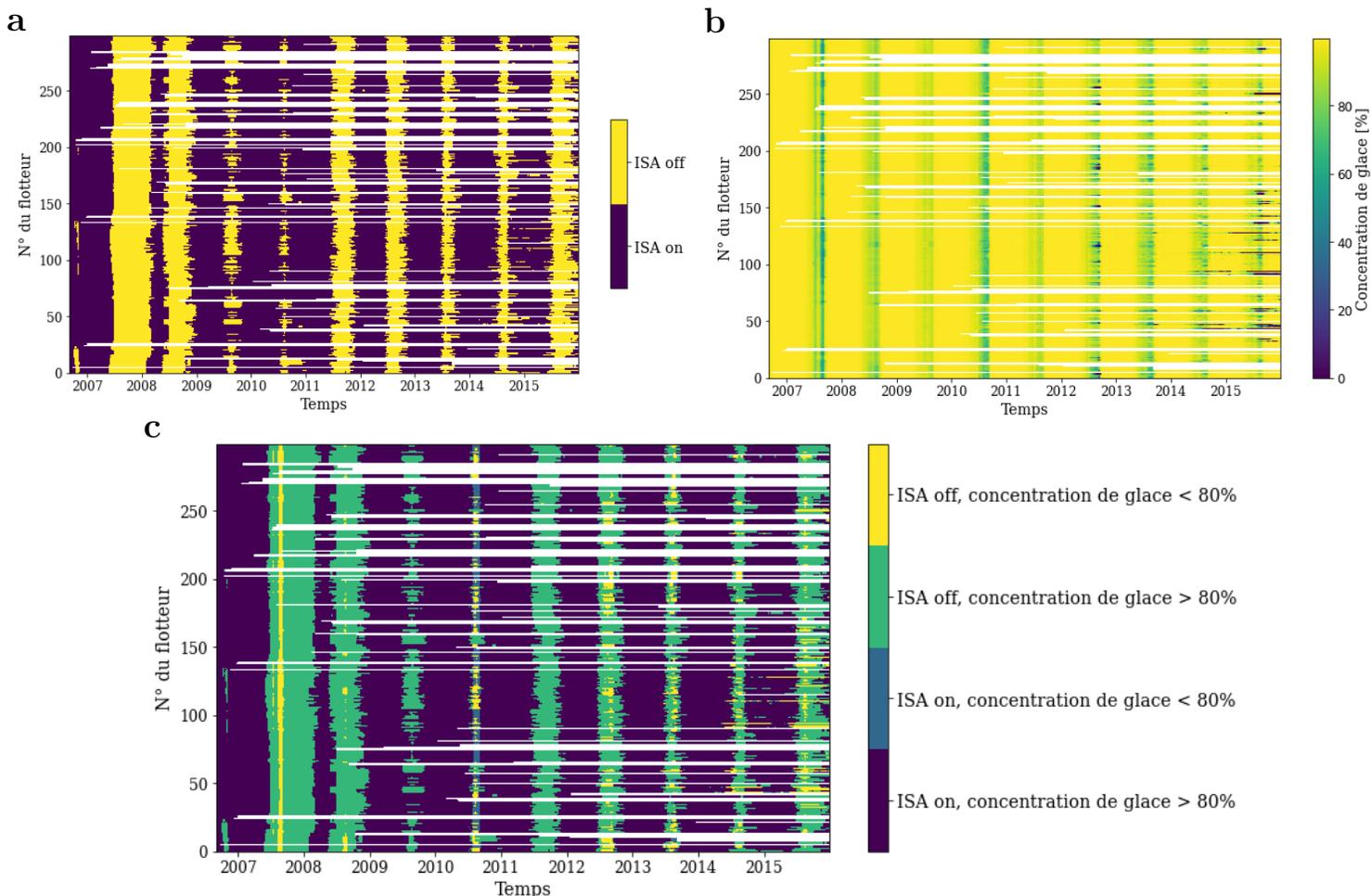


Figure 6: (a) Paramètre ISA en fonction du numéro du flotteur et du temps, (b) Concentration de la glace en fonction du numéro du flotteur et du temps, (c) Combinaison du paramètre ISA avec le seuil de 80% de concentration de glace.

sa remontée. Dans ce cas-là, s'il est bloqué dans sa remontée et qu'il ne peut pas émettre, une deuxième consigne le fait redescendre à sa profondeur de dérive et recommencer un nouveau cycle.

C'est pourquoi, pour connaître les chances qu'ont les flotteurs de faire surface, il faut combiner le paramètre de l'ISA à un autre paramètre, la concentration de glace à la position du flotteur. On voit sur la figure 6b, que la concentration de glace évolue également de manière saisonnière, avec un minimum sur la fin de l'été.

On considère que le flotteur peut faire surface si la concentration de glace est inférieure à 80%, c'est à dire si 20% de la surface de la maille du modèle n'est pas recouverte de glace. Ce seuil est l'un de ceux choisis arbitrairement dans l'article Nguyen et al. (2020) et est considéré comme une limite haute optimiste pour le critère de remontée des flotteurs Argo. On combine ce critère avec l'algorithme ISA pour obtenir le graphe

de la figure 6c. Pour que le flotteur émerge, on considère donc qu'il faut que l'ISA ne se déclenche pas et que la concentration de glace soit inférieure à 80%.

On constate qu'il y a peu de zones jaunes correspondant à une remontée des flotteurs à la surface. Tous les flotteurs semblent cependant pouvoir atteindre la surface lors de la première année, comme nous le montre la première barre jaune verticale. Cette remontée correspond à l'été de l'année 2007 qui a été l'un des records de minimum d'extension de glace. Cela en fait un cas particulier même si ce genre de conditions risquent de devenir plus fréquentes à cause du changement climatique.

De plus, les flotteurs tentent souvent de remonter alors que la concentration de glace est supérieure à 80%. La vitesse de remontée étant de 3 cm/s (Ollivault and Rannou, 2013) dans les derniers mètres avant la surface, les flotteurs ne devraient pas subir de chocs trop violents contre la glace pour être endom-

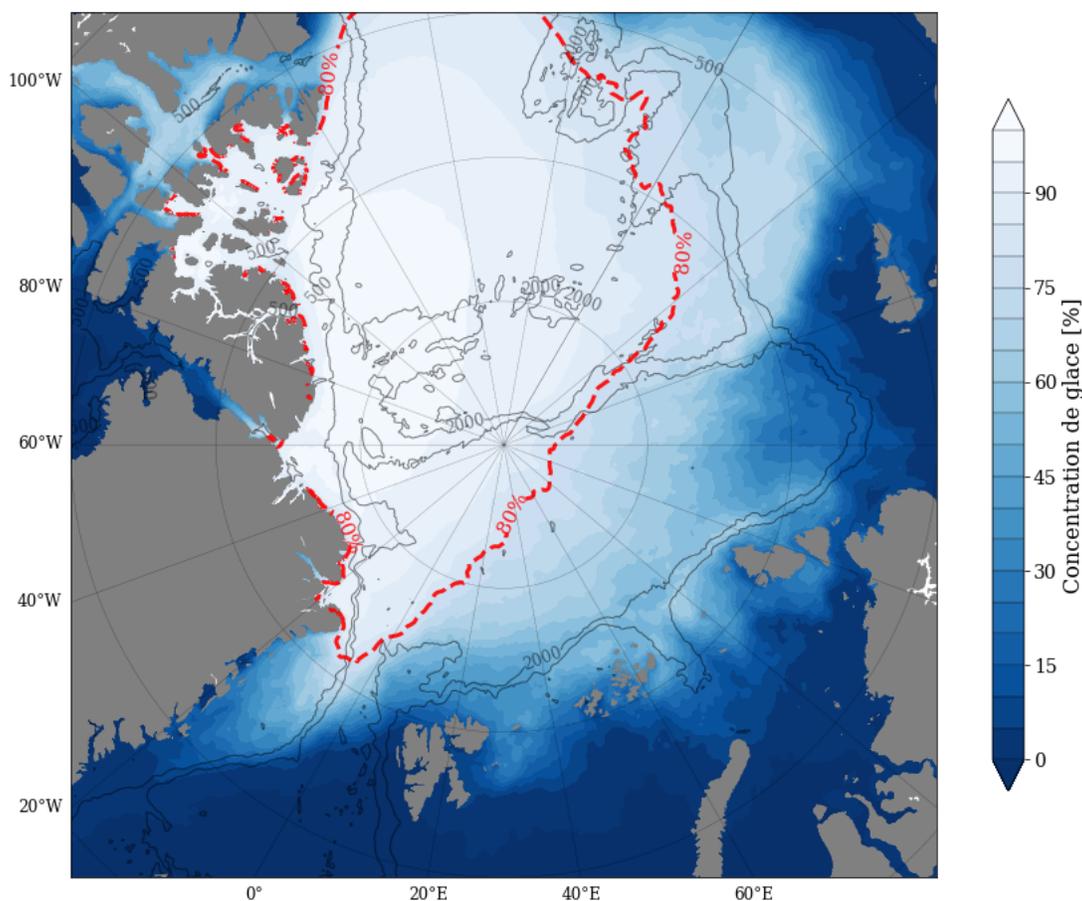


Figure 7: Moyenne de concentration de glace pour le mois de septembre entre 2006 et 2015. La ligne rouge représente la limite de 80% de concentration de glace.

magés. En revanche, il est possible que les flotteurs se bloquent dans des crevasses sous la glace lors de ces remontées ou encore qu'ils soient abîmés par la glace lors de leurs périodes en surface.

Mais ces remontées permettent néanmoins de maximiser les chances du flotteurs de faire surface. Il y a très peu de moments où l'algorithme ISA annule la remontée alors que la concentration de glace est inférieure à 80%. Qui plus est, il est arrivé par le passé que des flotteurs parviennent à la surface dans des conditions de glaces bien moins favorables. C'est le cas du flotteur n°7900634 déployé en Antarctique qui est parvenu le 24 juin 2006 à faire surface avec 97% de concentration de glace (<https://fleetmonitoring.euro-argo.eu/float/7900634>). Cette programmation permet donc de maximiser les opportunités pour le flotteur de faire surface dans un trou de glace.

Or dans nos circonstances, il est important de donner priorité à une possible remontée. En effet, on estime la durée de vie des flotteurs Argo à environ 3

ans en région polaire (Communication interne, Argo France). De plus, la mémoire pour stocker les profils enregistrés sous la glace a une capacité d'un an de données. Si le flotteur ne fait pas surface pendant plus d'un an, les premières données seront écrasées par les nouveaux enregistrements. C'est pourquoi il est primordial que le flotteur réussisse à faire surface au moins une fois avant 3 ans et de préférence au moins une fois par an afin de transmettre ses données.

Pour conclure, les flotteurs déployés au pôle Nord et dérivant à 500 m de profondeur n'atteindront pas de zone découverte par la glace de manière saisonnière au cours de leurs 3 années de durée de vie. Les meilleures chances qu'ils parviennent à la surface sont donc qu'ils remontent dans un trou de glace. Cela demeure cependant peu probable et dépendra grandement de la concentration de glace au pôle à la fin de l'été.

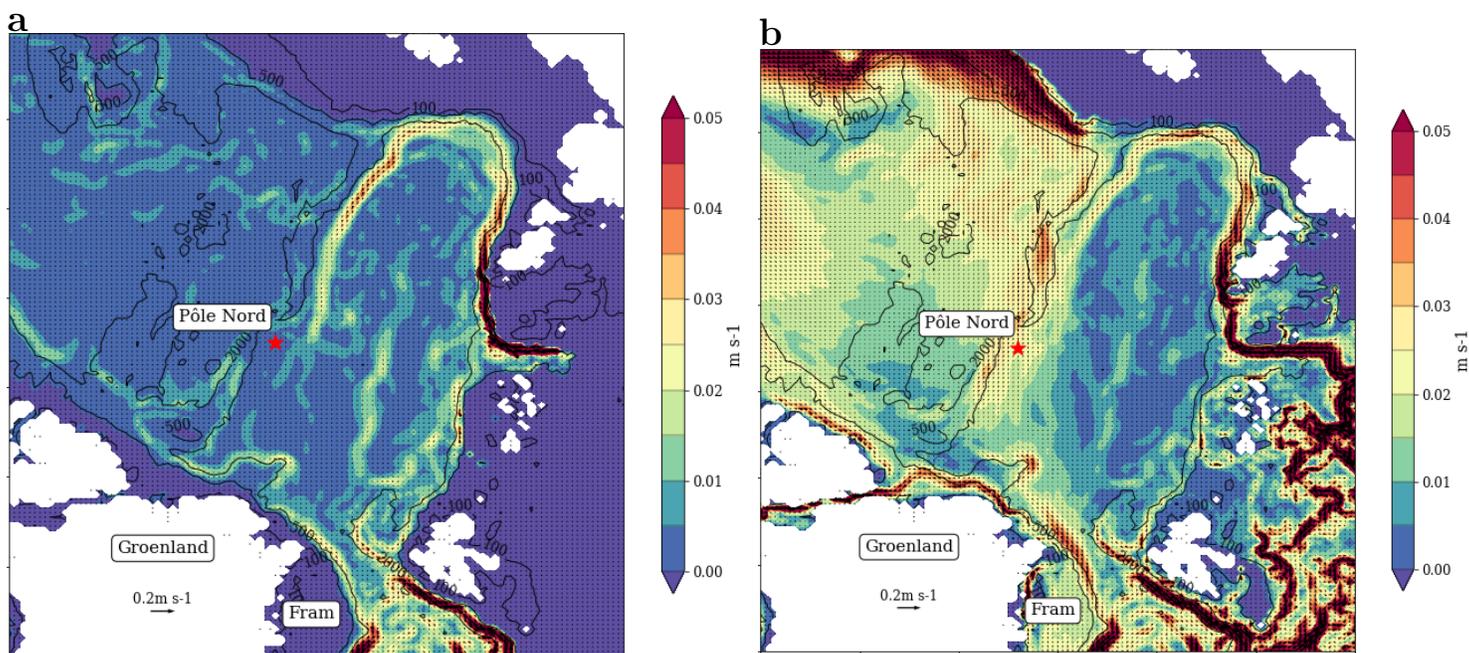


Figure 8: Moyenne des courants entre 2006 et 2015, à 500 m de profondeur (a) et à 100 m de profondeur (b). La couleur représente la norme des vitesses et l'échelle des vecteur est située en bas à gauche des cartes. Projection selon la grille GREG12.

3.2 Conditions de glace et des courants

Étant donné les faibles chances de remontées des flotteurs, il est nécessaire d'en comprendre les raisons afin de trouver des conditions plus optimales à la remontée des flotteurs.

Pour cela, on regarde la carte de la concentration moyenne de la glace de septembre sur la période 2006-2015 (figure 7). Ce mois correspond à la période où l'on observe les minimums d'extension de glace. On voit que les zones proches du pôle dont la couverture de glace diminue suffisamment en septembre sont celles au sud du bassin eurasien. Cela correspond à la mer de Barents et au détroit de Fram.

En théorie, comme les flotteurs dérivent à 500 m de profondeur, ils se situent au niveau de la circulation de l'eau venant de l'océan Atlantique. En Arctique, les eaux Atlantique rentrent par le détroit de Fram et la mer de Barents et subducent sous la couche d'eau froide et peu salée présente sous la glace de mer. Elles se rejoignent plus tard et circulent le long du plateau continentale eurasien jusqu'à la mer de Laptev. Une partie de ces eaux suit ensuite la dorsale de Lomonosov jusqu'au pôle Nord avant de redescendre au sud et de sortir de l'Arctique par l'ouest du détroit de Fram (Finnish Meteorological Institute et al., 2022). Cette circulation a été tracée et modélisée grâce au traçage

des isotopes d'iode radioactifs libérés dans les eaux Atlantique par le site de La Hague (Karcher et al., 2012).

Idéalement, les flotteurs devraient être entraînés par cette boucle de courant et sortir par le détroit de Fram. On constate cependant, sur la carte de la moyenne des courants à 500 m (figure 8a), qu'une partie de cette branche de courants n'est pas présente à cette profondeur au pôle Nord dans le modèle Nemo. On la voit nettement en haut de la carte faire le tour du bassin eurasien en longeant d'abord le plateau continentale de la Sibérie puis la dorsale de Lomonosov. Sur cet partie de son parcours, le courant a une vitesse moyenne comprise entre 3 cm/s et 5 cm/s. Mais un peu au-dessus du pôle Nord, la branche de courant semble bifurquer et la vitesse moyenne du courant diminue jusqu'à atteindre 1 cm/s. On retrouve la branche de courant le long de la côte nord du Groenland. De là le courant descend effectivement au sud en longeant le plateau continentale et passe par le détroit de Fram.

La zone entre le pôle Nord et le nord du Groenland présente des intensités de courant trop faible à 500 m pour emmener les flotteurs jusqu'au détroit de Fram. Il faut donc chercher une autre profondeur pour déployer les flotteurs.

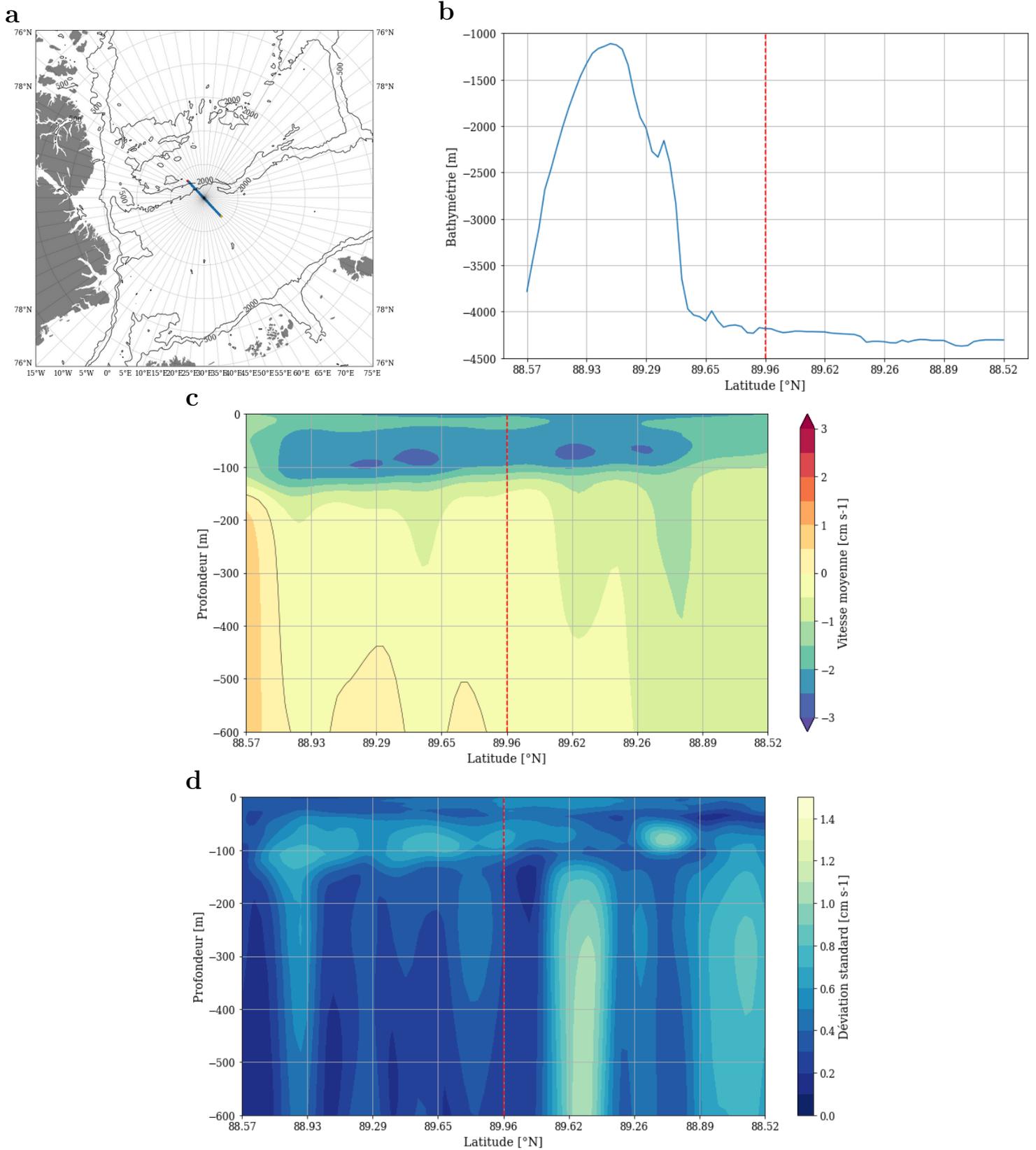


Figure 9: Section verticale entre 0 et 600 m de profondeur. (a) Localisation de la section, (b) Bathymétrie le long de la section, (c) Moyenne des vitesses à travers la section entre 2006 et 2015, (d) Déviation standard des vitesses à travers la section entre 2006 et 2015, calculée à partir des moyennes mensuelles de vitesse. La ligne rouge pointillée correspond au pôle Nord.

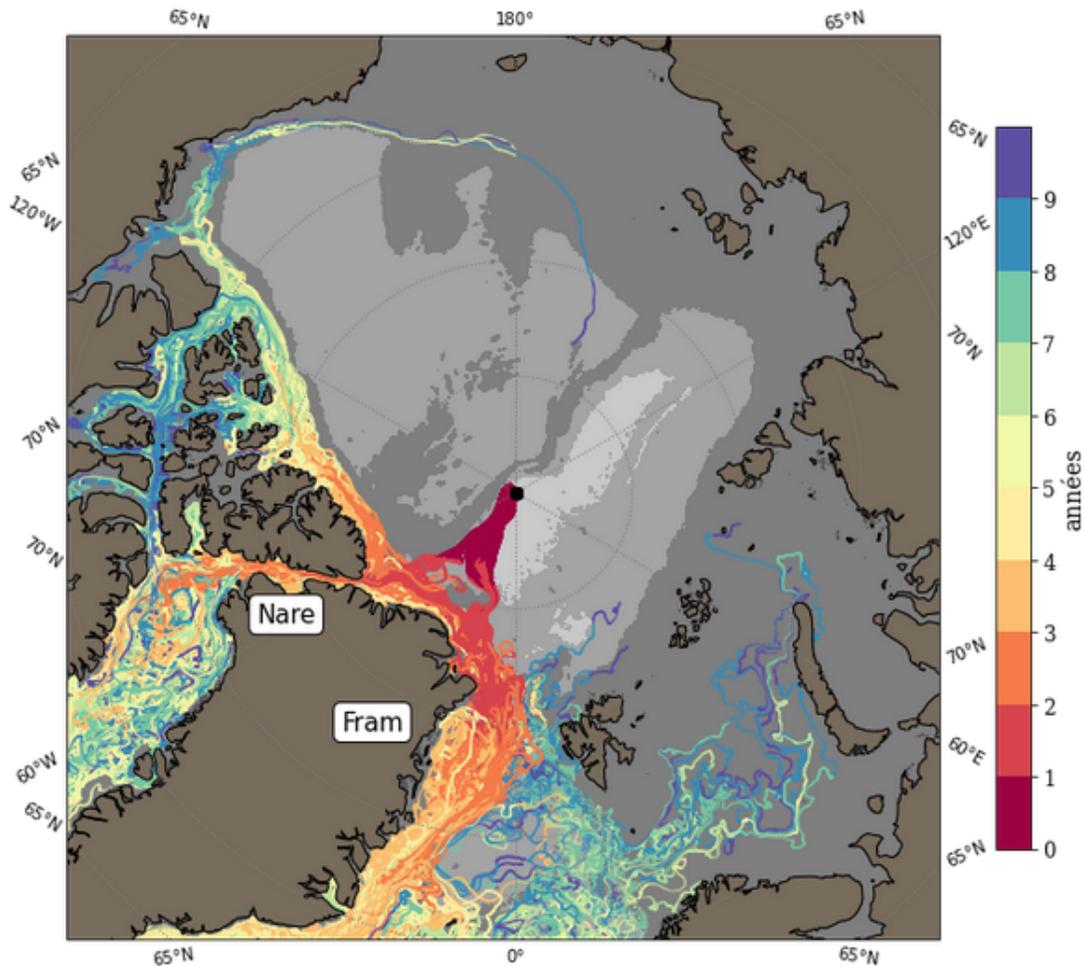


Figure 10: Trajectoires des flotteurs déployés au pôle Nord le 3 septembre 2006 et dérivant à 100 m jusqu'en décembre 2015. La barre de couleur correspond au temps écoulé depuis le déploiement des flotteurs.

On réalise une section verticale au niveau du pôle Nord pour observer la répartition des courants (figure 9). À 500 m de profondeur, les vitesses moyennes sont inférieures à 1 cm/s. Sur la gauche de la figure 9c, en dessous de 450 m de profondeur, on voit des boucles où le courant change de sens et repart en direction de la mer de Laptev. De plus, on observe que la déviation standard à 500 m atteint un maximum à la latitude 89.6°N où elle vaut plus de 1.4 cm/s. Les changements de directions du courants sont probablement dû au passage de tourbillons. Les vitesses moyennes sont suffisamment faibles pour que la présence de tourbillon puisse changer la direction des courants (Aagaard et al., 2008). Cela explique pourquoi les flotteurs sont restés longtemps autour du pôle Nord avant de se disperser.

En revanche, on observe que les courants sont bien plus forts à 100 m de profondeur avec des vitesses

moyennes allant jusqu'à 3 cm/s. Même si la déviation standard à cette profondeur est relativement élevée (environ 0.9 cm/s) à cause des tourbillons et de la variabilité saisonnière et annuelle, les courants semblent conserver la même direction.

Sur la carte des courants à 100 m de profondeur (figure 8b), les intensités des courants sont effectivement plus élevées. On retrouve la trace de la branche de courants qui descend du pôle Nord vers le détroit de Fram en longeant la bathymétrie, d'abord en suivant la dorsale de Lomonosov puis en descendant vers le sud le long des côtes du Groenland. On remarque toutefois une zone au Nord du Groenland où l'intensité du courant diminue jusqu'à atteindre 2 cm/s. Néanmoins, on peut faire l'hypothèse que les courants à 100 m de profondeur permettront aux flotteurs de dériver plus rapidement vers le détroit de Fram et donc d'atteindre des zones libre de glace. On

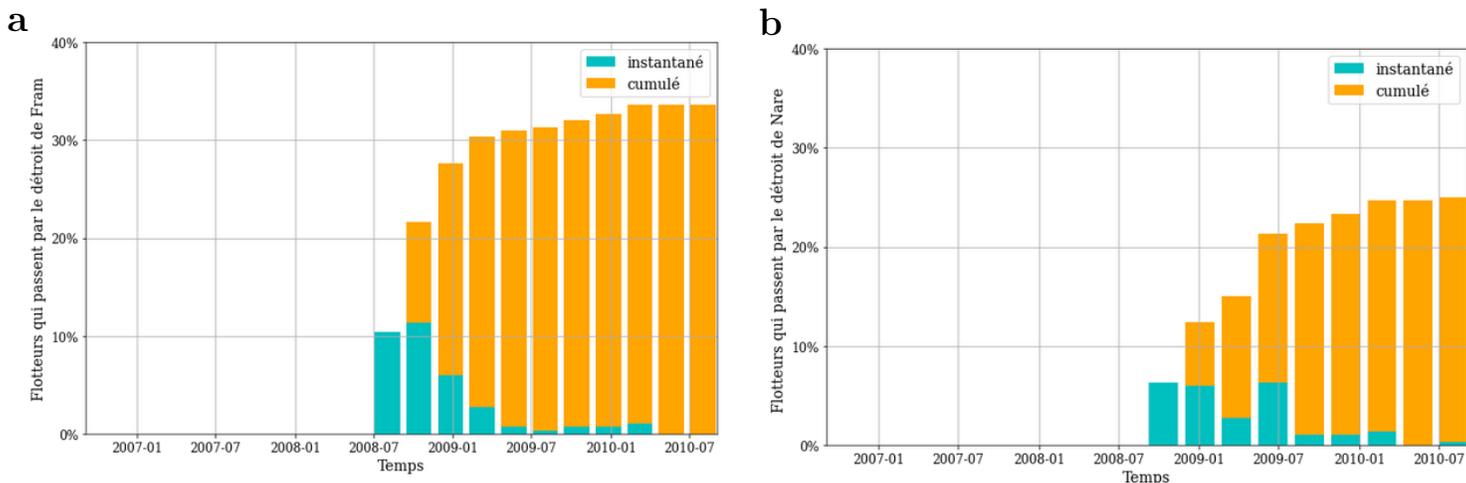


Figure 11: Pourcentage de flotteurs passant le détroit de Fram (a) et le détroit de Nare (b). En bleu, pourcentage de flotteurs qui arrivent au niveau des détroit pour la première fois. En orange, pourcentage cumulé des flotteurs qui sont passés par ces détroits.

testera cette hypothèse dans la section suivante.

3.3 Simulation de la dérive des flotteurs à 100m de profondeur

Pour tester cette hypothèse, on lance une simulation de 300 flotteurs virtuels dans les mêmes conditions que précédemment mais avec cette fois une profondeur de dérive programmée à 100 m. On trace la trajectoire des flotteurs sur la figure 10.

La première année, les flotteurs partent tous dans la même direction et suivent la branche de courant qui longe la dorsale de Lomonosov de la mer de Laptev jusqu'au Groenland. Contrairement à ceux programmés pour dériver à 500 m, les flotteurs ne se dispersent pas et ne sont pas déviés par le passage de tourbillons. À la fin de la première année, les flotteurs atteignent la zone de courants de faible intensité repérée au-dessus. À ce moment là, ils se séparent en 2 groupes. Une partie se dirige vers le sud-est et rejoint le détroit de Fram. L'autre bifurque vers l'ouest et passe au nord du Groenland. Un grand nombre de ces flotteurs entre en baie de Baffin en passant par le détroit de Nare. Le reste dérive à travers l'archipel canadien ou commence à faire le tour du bassin canadien, entraînés par la gyre de Beaufort.

Dans un premier temps, on s'intéresse aux flotteurs qui passent par le détroit de Fram. Ces flotteurs suivent la circulation des eaux Atlantique qui ressortent de l'Arctique. On regarde également les flotteurs qui entrent en baie de Baffin par le détroit de Nare, car celle-

ci n'est pas recouverte de glace en septembre (figure 7). On compte sur la figure 11 le nombre de flotteurs qui passent par le détroit de Fram et par le détroit de Nare en instantané, ainsi que le nombre cumulé de flotteurs à avoir passé ce détroit en fonction du temps.

Au total, près d'un tiers des flotteurs déployés au pôle Nord finissent par passer par le détroit de Fram dans les trois premières années de dérive. La majorité de ces flotteurs atteignent le détroit à la fin de la deuxième année de dérive, entre septembre 2008 et janvier 2009. Pour le détroit de Nare, 20% On peut donc espérer un nombre important de remontées à la surface sur cette période, en particulier en septembre où l'extension de glace est la plus faible.

Cependant les flotteurs qui ne passent pas par le détroit de Fram représentent deux tiers des flotteurs déployés au pôle. Pour connaître leurs probabilités de remontées à la surface, on reprend les critères de l'algorithme ISA et le seuil de 80 % de concentration de glace (figure 12).

On retrouve la première ligne jaune de septembre 2007. Comme cela a déjà été dit, cette année correspond à un minimum de glace et cette remontée n'est pas forcément représentative. À cette période, les flotteurs se situent tous au nord des 85°N de latitude (figure 10). Or comme on peut le voir sur la carte de concentration de glace de la figure 7, cette zone possède en septembre une moyenne de concentration de glace élevée. La probabilité que les flotteurs parviennent à remonter à la surface est donc faible.

En revanche, dès la deuxième année de dérive, on

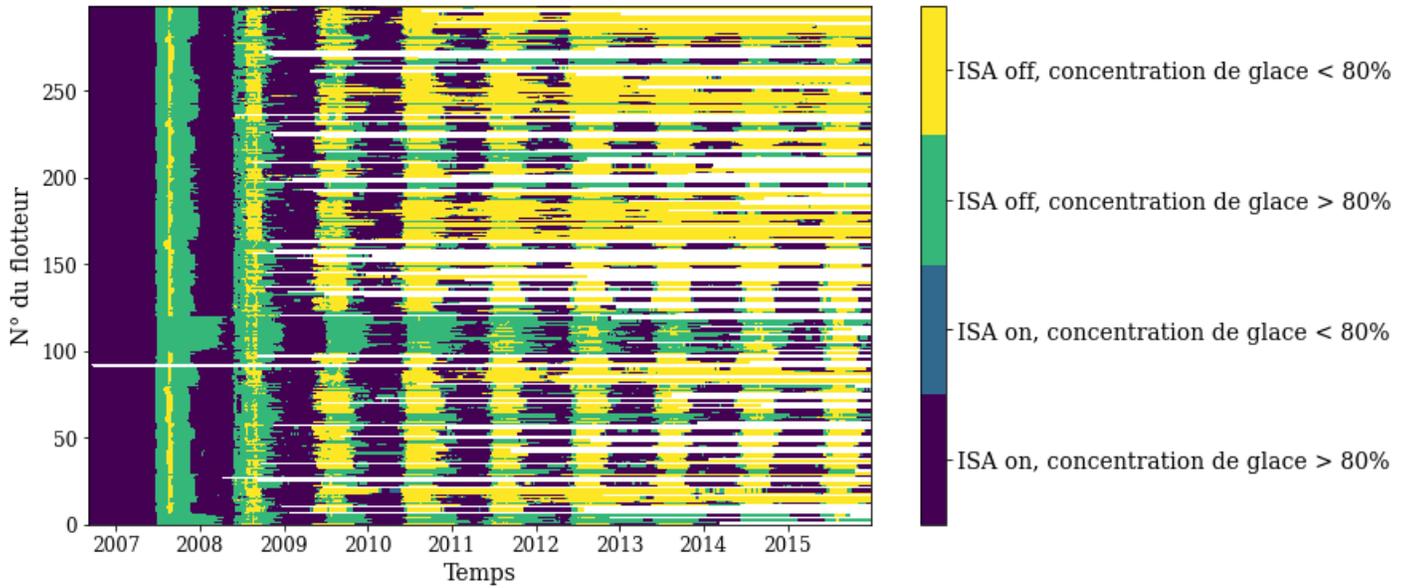


Figure 12: Combinaison du paramètre ISA avec le seuil de 80% de concentration de glace pour les flotteurs dérivant à 100 m de profondeur

observe beaucoup plus de zones jaunes. La majorité des flotteurs valident les deux critères de remontée. D’après la figure 10, ils sont alors positionnés soit au détroit de Fram, soit au nord du Groenland. Par la suite, quasiment tous les flotteurs ont des périodes de remontées à la surface saisonnières. Certains finissent même par atteindre des zones où la concentration de glace est suffisamment faible, voir nulle, pour pouvoir retrouver le comportement classique et remonter à la surface lors de chaque cycle. C’est le cas des flotteurs qui dépassent le détroit de Fram et dérivent dans l’océan Atlantique Nord.

Une faible proportion des flotteurs restent cependant dans des zones couvertes annuellement par la glace et ne semblent pas pouvoir effectuer de remontées saisonnières. Il serait intéressant de voir quels sont ces flotteurs et quelles trajectoires ils suivent.

Pour conclure, avec une programmation de dérive à 100 m de profondeur, les flotteurs suivent la dorsale de Lomonosov en direction du Groenland avant de diverger. Un tiers d’entre eux atteindront le détroit de Fram dans les trois années de leur espérance de vie. De manière générale, cette programmation permet une forte probabilité de remontée à la surface saisonnière à partir de la deuxième années de dérive. En revanche, cela aura pour conséquence que la couverture de l’ouest du bassin Eurasien sera moins bien échantillonné.

4 Conclusion et perspectives

On a vu que les flotteurs dérivant à 500 m de profondeur restent concentrés pendant 4 à 5 années au pôle puis se dispersent. Cela serait dû à des courants moyens faibles à cette profondeur par rapport aux vitesses de tourbillons qui créent de ce fait une grande variabilité dans la direction du champs de vitesse (Aagaard et al., 2008). Dans cette configuration, les flotteurs mettent plus de 6 ans pour sortir de l’Arctique par le détroit de Fram. De plus, les flotteurs bloqués au niveau du pôle Nord ont moins de 20% de probabilité de parvenir à atteindre la surface à cause de la concentration de glace trop importante (supérieure à 80%)

La direction du courant à 100 m de profondeur est plus stable. Lorsqu’on choisit cette profondeur de dérive pour les flotteurs, la majorité atteint le détroit de Fram ou le détroit de Nare au bout de 2 ans. Enfin, à partir de 2 années, la majorité des flotteurs rencontrent des périodes saisonnières où ils peuvent remonter à la surface. Mais ces meilleures possibilités pour transmettre les informations, s’obtiennent au prix d’une moins bonne couverture de l’ouest du bassin Eurasien.

Néanmoins ces observations comportent certaines limites. La simulation CREG12 est une simulation sans assimilation, c’est-à-dire que le modèle n’est pas ré-ajusté par rapport à des observations. Il pourrait être intéressant d’utiliser un autre jeu de données is-

sues d'une ré-analyse océanique telle que celle produite par Mercator-Océan international, avec assimilation de toutes les observations disponibles.

Le trajet des eaux Atlantiques entrant dans l'océan Arctique a été retracé et modélisé grâce à la mesure des concentrations d'iode radioactif libéré par le site de La Hague (Karcher et al., 2012). On retrouve la branche de courant qui fait le tour du bassin eurasien en suivant la dorsale de Lomonosov. Or après 2004, il a été observé un affaiblissement du courant longeant la dorsale de Lomonosov, ce qui est cohérent avec l'affaiblissement des vitesses de courants entre le pôle Nord et le Groenland entre 2006 et 2015 données par le modèle NEMO.

Cependant on ne dispose pas des sorties du modèle après 2015. Cet affaiblissement du courant n'est peut être plus valable pour l'année 2022 et dans ce cas, les courants seront plus intenses que ceux de nos simulations.

Pour conclure, si l'on se base sur ces simulations pour déterminer la trajectoires des flotteurs, les flotteurs dérivant à 100 m ont plus de chances d'atteindre la surface. Il serait donc intéressant de programmer

les prochains flotteurs à être déployés avec une profondeur de dérive à 100 m, voir de reprogrammer les flotteurs dérivant actuellement si ceux-ci parvenaient à faire surface. Cependant avec cette programmation, la partie ouest du bassin Eurasien sera moins bien échantillonné, étant donné que les flotteurs partiront plus rapidement vers le sud.

On a donc pu voir que la simulation de flotteurs virtuel permet d'optimiser les conditions de déploiement des flotteurs Argo. Une autre utilité de ce programme serait de retracer la trajectoire des flotteurs et ainsi d'obtenir une nouvelle façon d'interpoler les trajectoires des flotteurs Argo sous la glace. Ainsi sur un grand nombre de simulation et avec avec les positions des flotteurs à l'entrée et à la sortie de la zone de glace, on pourrait réaliser une étude statistique et obtenir la trajectoire la plus probable afin de calculer une interpolation probabiliste de la trajectoire du flotteur. Cette méthode pourrait donc venir en complément de celles existant déjà comme l'interpolation le long des contours de vorticité potentielle planétaire-géostrophique (Chamberlain et al., 2018).

References

- Aagaard, K., Andersen, R., Swift, J., and Johnson, J. (2008). A large eddy in the central Arctic Ocean. *Geophysical Research Letters*, 35(9). _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2008GL033461>.
- Balem, K. and Maze, G. (2021). Virtual fleet. <https://github.com/euroargodev/VirtualFleet>.
- Chamberlain, P. M., Talley, L. D., Mazloff, M. R., Riser, S. C., Speer, K., Gray, A. R., and Schwartzman, A. (2018). Observing the Ice-Covered Weddell Gyre With Profiling Floats: Position Uncertainties and Correlation Statistics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(11):8383–8410. _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2017JC012990>.
- Finnish Meteorological Institute, Rudels, B., and Carmack, E. (2022). Arctic Ocean Water Mass Structure and Circulation. *Oceanography*.
- Karcher, M., Smith, J. N., Kauker, F., Gerdes, R., and Smethie Jr., W. M. (2012). Recent changes in Arctic Ocean circulation revealed by iodine-129 observations and modeling. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C8). _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2011JC007513>.
- Klatt, O., Boebel, O., and Fahrbach, E. (2007). A Profiling Float’s Sense of Ice. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 24(7):1301–1308. Publisher: American Meteorological Society Section: Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.
- Madec, G., Bourdallé-Badie, R., Chanut, J., Clementi, E., Coward, A., Ethé, C., Iovino, D., Lea, D., Lévy, C., Lovato, T., Martin, N., Masson, S., Mocavero, S., Rousset, C., Storkey, D., Müeller, S., Nurser, G., Bell, M., Samson, G., Mathiot, P., Mele, F., and Moulin, A. (2022). NEMO ocean engine. Publisher: Zenodo.
- National Snow and Ice Data Center, Meier, W., and Stroeve, J. (2022). An Updated Assessment of the Changing Arctic Sea Ice Cover. *Oceanography*.
- Nguyen, A. T., Heimbach, P., Garg, V. V., Ocaña, V., Lee, C., and Rainville, L. (2020). Impact of Synthetic Arctic Argo-Type Floats in a Coupled Ocean–Sea Ice State Estimation Framework. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 37(8):1477–1495. Publisher: American Meteorological Society Section: Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.
- Ollivraut, M. and Rannou, J.-P. (2013). ANDRO: An Argo-Based Deep Displacement Dataset. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 30(4):759–788. Publisher: American Meteorological Society Section: Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.