

PROPOSITION DE SUJET POUR UN CONTRAT DOCTORAL

Laboratoire • LIENSs • MIA
Titre de la thèse Etude de l'effet de la fonte des glaciers continentaux sur le cycle du carbone et les échanges de gaz à effet de serre dans l'Océan Arctique côtier : une approche par modélisation numérique 3D à très haute résolution spatiale
Direction de la thèse <i>directeur-trice-s (grade, HDR) et éventuels co-directeur-trice-s</i> Le Fouest Vincent (50 %, PR, LIENSs), Choquet Catherine (50 %, PR, MIA)
Adéquation scientifique avec les priorités de l'établissement Ce projet s'inscrit dans la thématique de recherche « Transition environnementale » du LUDI (risque environnemental, submersion et érosion du trait de côte, biodiversité et services écosystémiques, santé, impacts sociaux). Ici, le sujet traité n'est pas l'érosion du trait de côte, mais l'ablation des glaciers continentaux à terminaison marine. Ce phénomène permet d'établir des parallèles, non seulement en matière de risque environnemental, mais aussi avec les impacts socio-économiques sur les populations littorales du Groenland confrontées au recul des glaciers. De plus, le site d'étude présente un intérêt stratégique pour l'avenir, car il est situé à proximité immédiate d'une future zone de protection marine. Les travaux menés dans le cadre de cette thèse contribueront ainsi à répondre pleinement aux enjeux de la transition environnementale.
Descriptif du sujet <i>(enjeux scientifiques, applicatifs, sociétaux...)</i> Enjeux internationaux Dans le contexte de la nouvelle zone de protection marine de <i>Tuvaijuittuq</i> (Arctique Canadien) créée par arrêté ministériel Canadien en 2019, un récent rapport Canadien souligne que de grandes zones de <i>Tuvaijuittuq</i> n'ont pas encore été explorées et que, par conséquent, il y a un cruel manque d'informations de base essentielles pour comprendre la biodiversité de la région, la répartition des espèces et l'utilisation de l'habitat, et comment ceux-ci sont modifiés en raison du changement climatique. La zone de protection marine de <i>Tuvaijuittuq</i>, soutenue par le Conseil de l'Arctique et le parc national du nord-est du Groenland (<i>Kalaallit Nunaanni nuna eqqissisimatitaq</i>), pourrait devenir la plus grande zone protégée de l'Océan Arctique. Il est donc fondamental de mener des recherches pionnières dans cette région arctique, considérée comme le dernier refuge de glace pluriannuelle de mer, avant que les effets du réchauffement global ne deviennent trop profonds et n'altèrent de manière irréversible la nature intrinsèque de ce refuge de biodiversité. Deux campagnes d'envergure ont été menées pour la première fois en 2024 dans cette région reculée et très difficile d'accès dans le cadre du projet international REFUGE-ARCTIQUE. C'est dans le cadre de ce projet international que s'inscrit le sujet de thèse. Contexte spécifique et objectif de la thèse Au cours des 40 dernières années, l'étendue de la glace pluriannuelle (i.e. ayant survécu à au moins un été, et excédant généralement 1,5 mètre) a diminué de 70 % mettant en péril tout un écosystème dépendant de la glace de mer. La mer de Lincoln et Nares Strait font partie de la « dernière zone de glace », située entre le nord du Canada et du Groenland (Fig. 1). Elle est donc considérée comme le dernier sanctuaire de glace de mer pluriannuelle de tout l'Océan Arctique et abrite des écosystèmes endémiques uniques dépendant fortement de cette glace. Outre la glace de mer, ces écosystèmes sont fragilisés par une exposition accrue à la fonte des glaciers continentaux qui encerclent cette zone et dont les apports d'eau de fonte et de matière menacent d'altérer la structure et le fonctionnement. À mesure que le cycle hydrologique de l'Arctique s'intensifie, l'augmentation des apports d'eau de fonte glaciaire et d'eau douce, en provenance des fjords notamment, modifie considérablement l'océan côtier.

Dans les fjords Groenlandais et Canadiens, il existe deux types de glaciers (i.e. à terminaison marine ou terrestre ; Fig. 1) qui ont des effets contrastés sur la production primaire (i.e. synthèse de carbone frais dans la matière vivante des végétaux ; PP) du phytoplancton et donc sur les écosystèmes marins côtiers. Les panaches croissants d'eau de fonte souterraine (fonte subglaciaire) provenant des glaciers à terminaison marine déclenchent une remontée d'eaux profondes riches en nutriments qui soutiennent une PP élevée du phytoplancton en été (Fig. 1).

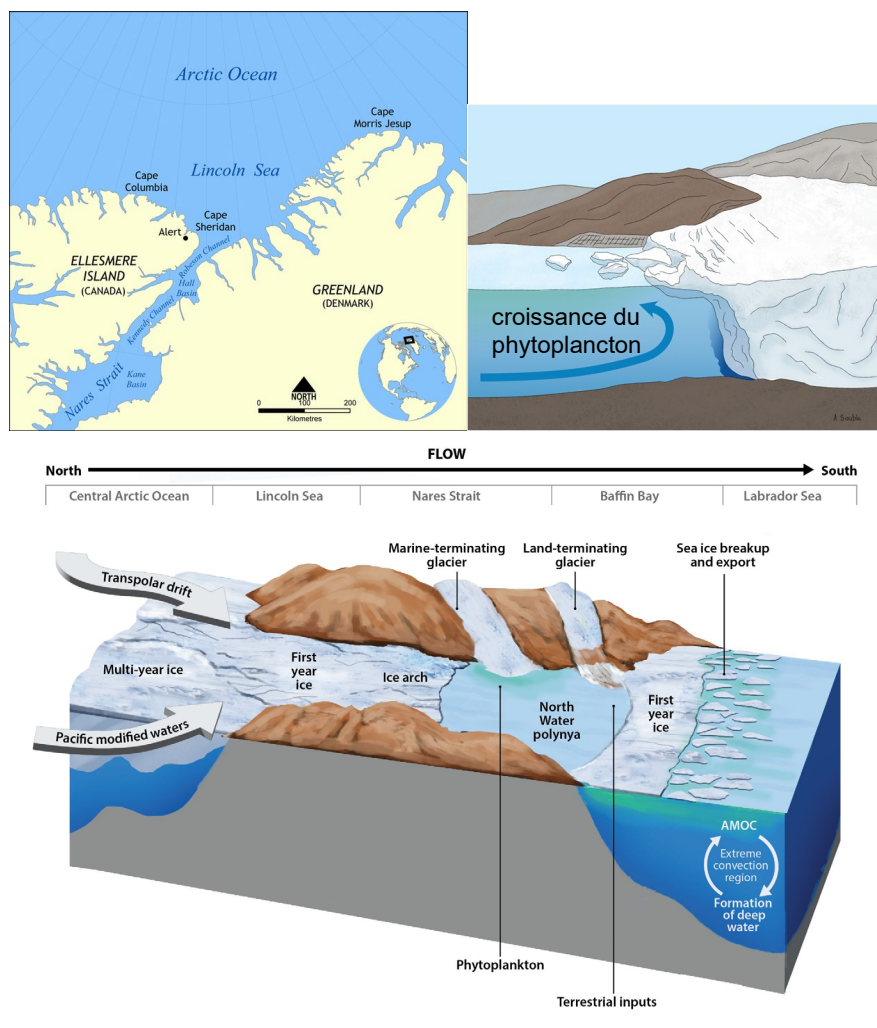


Figure 1. Panneau du haut à gauche : domaine géographique de la zone d'étude. Panneau du haut à droite : représentation schématique de l'écoulement du panache subglaciaire (flèche bleue) en marge d'un glacier à terminaison marine ; Panneau du bas : schéma synthétique des caractéristiques océanographiques côtières de la zone d'étude

On estime aujourd'hui que ces panaches subglaciaires apportent deux fois plus de nitrate dans les eaux de surface arctiques que l'ensemble des grands fleuves arctiques réunis. Leur contribution est donc majeure. A contrario, les glaciers à terminaison terrestre entraînent une stratification accrue réduisant la PP. Par conséquent, la transition future des glaciers marins vers des glaciers terrestres, et l'augmentation associée de l'intensité de la stratification, modifieront la PP locale avec des effets potentiellement en cascade sur tous les niveaux trophiques, dont les espèces marines exploitées par les populations locales.

Les fjords glaciaires, qui représentent l'interface cryosphère-océan autour d'une grande partie du Groenland et du Grand-Nord Canadien, sont donc des zones de transition clefs et changeantes où les échanges latéraux et verticaux contribuent fortement à la transformation des masses d'eau, de leur biogéochimie, de l'activité biologique et des échanges de gaz à effet de serre. Ces continuums terre-mer et leur impact ne sont actuellement pas pris en compte dans les modèles numériques couplés océan-glace-biogéochimie. De facto, l'ensemble des conséquences de la fonte des glaciers arctiques ne peut donc être évalué aujourd'hui, constituant un véritable verrou. **L'objectif général de la thèse sera donc d'incorporer une représentation de la fonte des glaciers à terminaison marine dans un modèle numérique de pointe et d'évaluer comment les apports de fonte modifient l'écosystème planctonique, l'export et le stockage de matière vers le sédiment, et les flux air/mer de CO₂.** Un accent tout particulier sera mis sur l'inclusion de la turbidité dans les panaches de fonte, paramètre clé de la réponse de l'écosystème mais qui fait défaut dans les modèles actuels. Ce sujet de thèse se veut donc novateur sous différents aspects.

Contexte partenarial *(cotutelle internationale, EU-CONEXUS, partenariat avec un autre laboratoire, une entreprise...)*

Ce projet s'inscrit dans le cadre du projet international REFUGE-ARCTIC (2023-2028), fort d'un consortium de 21 laboratoires français, et de nombreux partenaires canadiens, danois, et des Etats-Unis. Ce projet de thèse s'appuiera également sur les collaborations de longue date avec le LRI Takuvik (CNRS/U. Laval, Canada), et les laboratoires américains Caltech NASA-Jet Propulsion Laboratory (V. Le Fouest y est affilié de recherche), MIT, et Moss Landing Marine Laboratories (MLML). Deux des collaborateurs du MLML sont parmi les plus actifs et les plus reconnus pour leur expertise de pointe en modélisation numérique des glaciers dans les modèles océan. L'un d'entre eux, Dr. Dustin Carroll, assurera le rôle d'encadrant scientifique de la thèse.

Impacts *(scientifiques, technologiques, socio-économiques, environnementaux, sociétaux...)*

Les impacts du projet s'inscrivent à différents niveaux. Scientifique d'une part, car la thèse apportera des informations tout à fait nouvelles et essentielles sur le fonctionnement des zones de continuum glacier-océan dans une région reculée et rarement explorée auparavant. Dans cette région de l'Arctique, le nord-ouest du Groenland est celle pour laquelle le manque de données est le plus flagrant, en dépit d'une empreinte très forte du réchauffement climatique. D'un point de vue technologique, un système unique et innovant de modélisation numérique de glaciers dans les modèles d'océan côtier sera mis en place. Les développements réalisés pourront aisément être transférés à d'autres systèmes littoraux-côtiers, polaires ou non.

La fonte des glaciers est aussi et avant tout un enjeu majeur pour les populations et acteurs socio-économiques Groenlandais et Canadiens. L'approche intégrative et interdisciplinaire qui est proposée favorise un transfert de connaissances vers les acteurs régionaux et internationaux de la gestion et de la conservation de ces espaces. Ce transfert sera facilité par l'ancrage régional et local du consortium international REFUGE-ARCTIC et du MLML, et par leurs actions de co-construction avec les acteurs groenlandais et canadiens mises en place en amont du projet. Ce transfert de connaissances sera orienté vers les mécanismes en jeu et leurs conséquences sur l'écosystème côtier, notamment en vue de la mise en place de la future zone de protection marine de *Tuvaqjuittuq*.

Programme de travail du doctorant *(tâches confiées au doctorant)*

Durant les six premiers mois, la doctorante partagera ses activités centrées autour de deux tâches principales. La première consistera en la lecture d'articles scientifiques en dehors de son champ disciplinaire, et en l'analyse des jeux de données in-situ et satellitaires du projet REFUGE-ARCTIC dans la zone de déploiement du modèle numérique. La doctorante utilisera les algorithmes d'intelligence artificielle (IA) pour extraire les informations pertinentes des données in-situ, mais aussi satellitaires à très haute résolution spatiale (60m, 2016-actuel ; turbidité, chlorophylle). Le système glacier-fjord Newman, sur la côte nord-ouest groenlandaise, a été choisi pour la thèse car nous disposons des jeux de données d'observation (in-situ, satellitaires) issus des campagnes 2024 du projet REFUGE-ARCTIC menées sur la zone (Fig. 2).

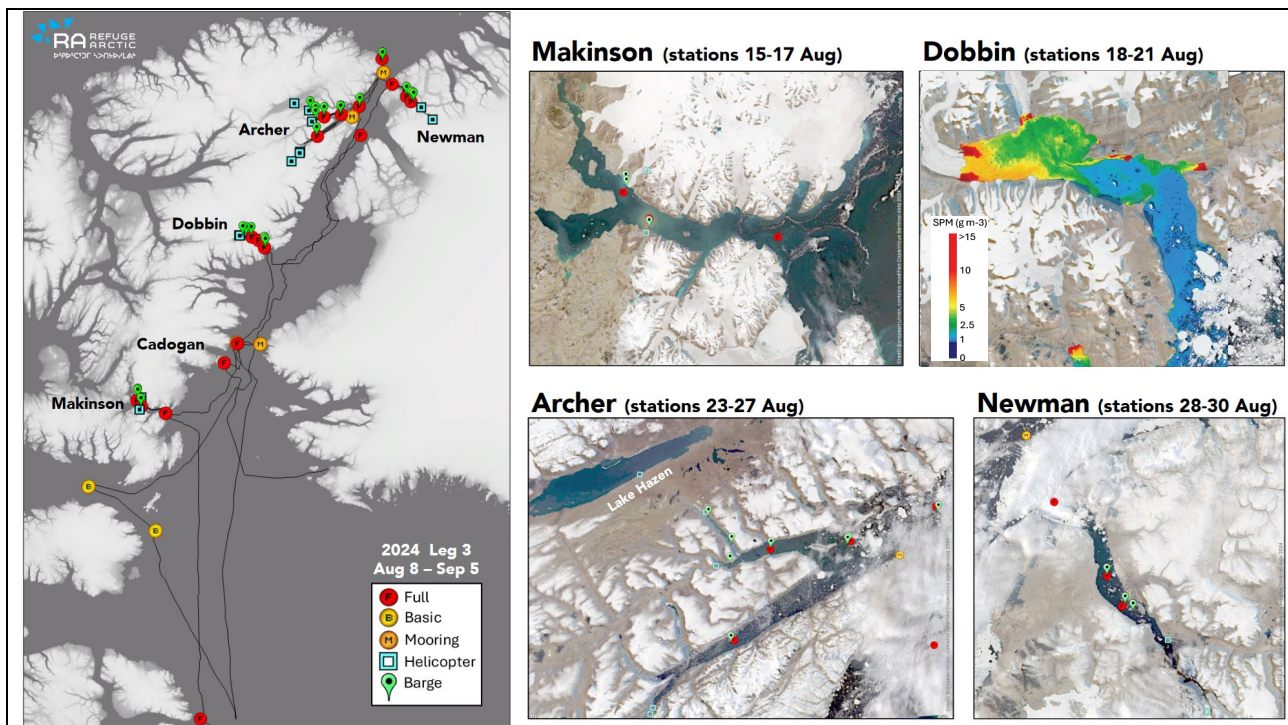


Figure 2. **Panneau de gauche :** carte des systèmes glacier-fjord échantillonnés durant le troisième leg de la campagne REFUGE-ARCTIC à l'été 2024 ; **panneaux de droite :** images satellitaires de couleur de l'eau en couleurs véritables pour les 4 principaux systèmes glacier-fjord échantillonnés, dont Newman, le site choisi pour la thèse. Un extrait du nouveau produit satellitaire de matières en suspension ("SPM", pers. comm. Mathieu Ardyna) utilisé pour la thèse est superposé sur la carte du glacier-fjord Dobbin (en haut à droite) à titre d'illustration (en rouge, apparaissent les apports subglaciaires).

L'objectif sera pour la doctorante de bien comprendre l'environnement du site d'étude préalable à la mise en place du modèle. La seconde tâche sera la prise en main du modèle numérique ECCO-Darwin (Carroll et al., 2020 ; Bertin et al., 2023) et son déploiement progressif sur la zone d'étude. Ce déploiement comportera 2 phases : 1) l'utilisation des sorties numériques du modèle global à 15 km de résolution latérale pour contraindre une configuration régionale de la mer de Lincoln et de Nares Strait à 3-4 km de résolution, qui inclut le système fjord-glacier d'intérêt, sur la période 1992-2021 ; 2) l'utilisation des sorties de cette configuration régionale pour contraindre une configuration sous-régionale à très haute résolution latérale (>500 m) sans inclure les mécanismes de fonte du glacier. La doctorante sera accompagnée sur cette tâche par l'équipe du MLML, qui a déjà réalisé un travail similaire. Les potentiels verrous et solutions associés sont donc déjà connus, ce qui limite fortement les risques. Le travail de rédaction d'articles/chapitres de thèse se fera idéalement au fil de l'eau dès la première année.

Durant la seconde année, la doctorante pourra concentrer ses efforts sur l'utilisation du module *iceplume* (Cowton et al. 2015) de fonte des glaciers à terminaison marine intégré dans le code numérique du modèle ECCO-Darwin et sa paramétrisation pour le site d'étude. Le module *iceplume* résout la circulation résultant de la décharge liquide subglaciaire et de la fonte paramétrée. Pour contraindre les conditions aux frontières numériques de l'interface glacier-fjord-océan, la méthodologie générale de Slater et al. (2022) sera utilisée pour estimer un flux de décharge subglaciaire réaliste et basé sur les observations actuellement disponibles. Nous utiliserons le ruissellement moyen mensuel du Regional Atmospheric Climate Model (RACMO ; Mankoff et al., 2020) et du modèle MAR v3.11 combiné aux estimations des limites des bassins versants des glaciers, aux caractéristiques de l'interface fjord/glacier dérivées de BedMachinev4 (Morlighem et al., 2021), et aux profils température/salinité des campagnes Ocean Melting Greenland (OMG) de la NASA. L'ensemble des outils de traitement et des données sont disponibles. La doctorante s'intéressera particulièrement à l'intégration d'un traceur passif de turbidité associée à l'écoulement subglaciaire. La turbidité des panaches glaciaires n'est pas prise en compte aujourd'hui, ce qui constitue une limite majeure à la compréhension et la prédiction réaliste de l'effet de la fonte glaciaire en Arctique (Hopwood et al., 2018). Pour ce faire, la doctorante s'appuiera sur de nouveaux produits satellitaires de turbidité et de chlorophylle à très haute résolution spatiale (60m, 2016-actuel) issus des campagnes REFUGE-ARCTIC 2024, qu'elle aura préalablement analysé en première année. La doctorante intégrera l'information contenue dans ces données satellitaires au module optique spectral du modèle ECCO-Darwin en s'inspirant des derniers développements de l'équipe encadrante sur ce sujet (Bertin et al., soumis). L'exploitation scientifique des développements et analyses réalisées débutera au début de cette deuxième année de thèse. Il s'agira d'analyser les sorties des variables physiques et biogéochimiques des modèles développés pour répondre à l'objectif général de la thèse.

Le premier semestre de la troisième année sera dédié à l'achèvement de l'exploitation scientifique des résultats des modèles développés durant les deux premières années. Le second et dernier semestre de la thèse sera axé sur le travail d'écriture et de rédaction du manuscrit de thèse.

Références

- Bertin, C., et al. (2023), Biogeochemical River Runoff Drives Intense Coastal Arctic Ocean CO₂ Outgassing, *Geophys. Res. Letters*, 50(8), doi: 10.1029/2022GL102377
- Carroll, D., et al. (2020), The ECCO-Darwin Data-Assimilative Global Ocean Biogeochemistry Model: Estimates of Seasonal to Multidecadal Surface Ocean pCO₂ and Air-Sea CO₂ Flux, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 12, e2019MS001888, <https://doi.org/10.1029/2019MS001888>
- Cowton, T., et al. (2015), Modeling the impact of glacial runoff on fjord circulation and submarine melt rate using a new subgrid-scale parameterization for glacial plumes, *J. Geophys. Res. Oceans*, 120, 796–812, 10.1002/2014JC010324
- Hopwood, M. J., et al. (2018), Non-linear response of summertime marine productivity to increased meltwater discharge around Greenland, *Nature comm.*, 9:3256, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05488-8>
- Mankoff, K. D., et al. (2020), Greenland liquid water runoff from 1979 through 2017, *Cryosphere – Glaciology*, <https://doi.org/10.5194/essd-2020-47>
- Morlighem, M. (2021), IceBridge BedMachine Greenland, version 4 [Dataset]. NASA National Snow and ice data center DAAC. <https://doi.org/10.5067/VLI5YXKCNGXO>
- Slater, D.A., et al. (2022), Characteristic depths, fluxes, and timescales for Greenland's tidewater glacier fjords from subglacial discharge-driven upwelling during summer, *Geophys. Res. Letters*, 49, e2021GL097081, <https://doi.org/10.1029/2021GL097081>.

Calendrier de réalisation

Première année :

Tâches : 1) revue de littérature, 2) analyse des données d'observation issues des campagnes REFUGE-ARCTIC, 3) déploiement des modèles régionaux et sous-régionaux, 4) début de l'analyse des sorties des variables physiques et biogéochimiques des deux modèles

Mobilités : 1 à 2 mobilités courtes de recherche envisagées au MLML (encadrement scientifique D. Carroll ; modélisation ; Etats-Unis) et/ou au LRI Takuvik (exploitation des données REFUGE-ARCTIC ; Canada)

Dissémination des résultats : un congrès national (e.g., Comité national français des recherches arctiques et antarctiques CNFRA, congrès de mathématiques appliquées)

Deuxième année :

Tâches : 1) intégration du processus de panache de fonte subglaciaire dans le modèle ECCO-Darwin à l'aide du module *iceplume*, 2) intégration de la turbidité dans le panache subglaciaire simulé dans le modèle, 3) analyse des sorties des variables physiques et biogéochimiques du modèle sous-régional avec et sans panache de fonte subglaciaire, 4) écriture d'un premier article scientifique

Mobilités : 1 mobilité courte de recherche envisagée au MLML (encadrement scientifique D. Carroll ; modélisation ; Etats-Unis)

Dissémination des résultats : un congrès international (e.g., AGU 2026 San Francisco, EGU 2027 Vienne)

Troisième année :

Tâches : 1) fin de l'analyse des sorties des variables physiques et biogéochimiques du modèle sous-régional avec et sans panache de fonte subglaciaire, 2) rédaction d'un second article scientifique, 3) rédaction du manuscrit de thèse

Dissémination des résultats : un congrès international (e.g., 10th European Congress of Mathematics)

Tout au long des 3 années de thèse, l'étudiante sera amenée à participer aux réunions scientifiques du consortium REFUGE-ARCTIC.

Accompagnement du doctorant / Fonctionnement de la thèse (*accompagnement humain, matériel, financier, en particulier pour la prise en charge du fonctionnement de la thèse et des dépenses associées*)

Vincent Le Fouest (LIENSs) est spécialiste en modélisation numérique couplée océan-glace-biogéochimie en milieu côtier. Il apportera au projet de thèse son expertise pluridisciplinaire en physique, biogéochimie, leur couplage, et comment ce couplage s'opère dans un modèle numérique complexe. Il contribuera également de par sa connaissance de l'Océan Arctique côtier et de son continuum terre-mer, mais aussi de son expertise en exploitation de données du spatial.

Catherine Choquet (MIA) est spécialiste des équations aux dérivées partielles (EDPs), des phénomènes multi-échelles, et de la mécanique des fluides. Ces compétences sont en exacte adéquation avec les outils numériques qui seront développés durant la thèse, en particulier le modèle numérique complexe aux EDPs couplé océan-glace-biogéochimie (ECCO-Darwin). De plus, elle apportera au projet de thèse son expertise mathématiques en modélisation numérique

des flux d'aquifères (nous traiterons de flux comparables, i.e. subglaciaires), et en réduction de complexité de modèles d'EDP complexes en modèles plus simples (e.g., étude de processus ciblés ; en lien avec le module *iceplume* et le modèle spectral optique du modèle ECCO-Darwin sur lesquels travaillera l'étudiante). Elle contribuera également aux aspects de traitement et d'analyse de données satellitaires via l'outil d'intelligence artificielle (IA).

La modélisation des flux subglaciaires sur une grille numérique 3D requiert un emboîtement d'outils mathématiques complexes pour bien représenter ce flux spatialisé aux frontières du modèle. La combinaison des expertises interdisciplinaires des deux encadrants est essentielle aux développements qui devront être réalisés par la doctorante. De plus, ce double encadrement assurera un transfert efficace de compétences et de connaissances interdisciplinaires en océanographie, modélisation, et mathématiques très profitable pour la doctorante et les encadrants.

Fonctionnement :

- Vincent Le Fouest (LIENSs) apportera environ 10 000 euros sur ses reliquats du projet européen Nunataryuk. L'équipe BIOFEEL pourra contribuer à hauteur d'une participation au financement du congrès international (1000-1500 euros).
- Catherine Choquet (MIA) apportera environ 10 000 euros sur son projet Hydraumath "Mathématiques pour les hydrosystèmes du littoral à l'aquifère" (PEPR MathViveS). Le laboratoire MIA apportera 2000 euros sur ses ressources propres.

Accompagnement scientifique :

- Dustin Carroll (MLML, Etats-Unis) apportera son expertise en modélisation numérique des glaciers
- Mathieu Ardyna (LRI Takuvik, Canada) procurera les données satellitaires et les mesures in-situ

Réseautage :

- Consortium REFUGE-ARCTIC
- IMPT (Institut Mathématiques pour la Planète Terre)
- RT CNRS Terre et Energies

Supercalculateurs et ressources informatiques :

- Ordinateur portable
- Supercalculateur NASA Pleiades