

Mémoire

Auteur : Moulin, Laura

Promoteur(s) : Delille, Bruno

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en océanographie, à finalité approfondie

Année académique : 2023-2024

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/20855>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Université de Liège

Faculté des Sciences

Département d'Astrophysique, Géophysique et Océanographie

Unité d'Océanographie Chimique

L'impact de la pluie sur la glace de mer, une revue de la portée



Mémoire de fin d'études rédigé par **Laura Moulin** en vue de l'obtention du titre de
Master en Océanographie, à finalité approfondie

Promoteur : Bruno Delille

Encadrante : Sofia Muller

Année académique 2023-2024

« Conformément aux règles imposées à la rédaction, ce mémoire ne doit pas dépasser 50 pages rédigées en Times 12 ou équivalent »

Source photographie : © Belga

Table des matières

Table des matières	iii
Liste des abréviations	v
Remerciements	vi
Résumé	vii
Abstract	viii
1 Introduction	1
1.1.1 Le changement climatique	1
1.1.2 Les précipitations	3
1.1.3 La glace de mer	5
1.1.4 Liens entre pluie et glace de mer	7
1.2 Objectifs et question de recherche	8
1.2.1 Objectifs	8
1.2.1.2 Méthode PRISMA	8
1.2.1.3 Utilisation de l'intelligence artificielle	9
2 Méthodologie	9
2.1 Protocole	9
2.2 Critères d'éligibilité	10
2.2.1 Critères d'inclusion	10
2.2.2 Critères d'exclusion.....	10
2.3 Sources de données	11
2.3.1 Bases de données bibliographiques et moteurs de recherche.....	11
2.3.2 Sites et applications d'intelligence artificielle	11
2.3.3 Communications personnelles	12
2.4 Stratégie de recherche	12
2.4.1 Bases de données bibliographiques et moteurs de recherche.....	13
2.4.2 Applications d'intelligence artificielle	14
2.4.3 Communications personnelles	15
2.5 Sélection des références	15
2.6 Extraction des données et définition des variables	16
3. Résultats	17
3.1 Sélection des études	17
3.2 Caractéristiques des études incluses	19
3.3 Synthèse des résultats	19
3.3.1 Synthèse des informations	19
3.3.2 Les similitudes	20
3.3.3 Les tendances	21
3.3.3.1 Tendances des précipitations et phénomènes météorologiques.....	21
3.3.3.2 Tendances des impacts de la pluie sur la glace de mer.....	26
4. Discussion	31
4.1 Interprétation des résultats	31
4.1.1 Caractéristiques générales	31
4.1.2 Les précipitations	32
4.1.3 Les impacts de la pluie sur la glace de mer	35

4.1.4 Difficultés	41
4.2 Biais et limites	42
4.2.1 Des études incluses	42
4.2.2 De ce travail	42
4.3 Utilisation de l'intelligence artificielle	43
5. Conclusions	44
5.1 Synthèse	44
5.2 Perspectives.....	45
<i>Bibliographie.....</i>	<i>xlvi</i>
<i>Annexes.....</i>	<i>lii</i>

Liste des abréviations

Cette liste regroupe les différentes abréviations rencontrées au sein de ce mémoire.

AA : Amplification Arctique

GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

IPCC : *Intergovernmental Panel on Climate Change*

VCM : Vagues de chaleurs marines (VCM)

PRISMA : Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses

IA : Intelligence artificielle

PRISMA-ScR : Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses – Scoping Review

BD : Bases de données

MR : Moteurs de recherche

PCC : Population-Concept-Context

SAtlantique : Secteur Atlantique

ACentral : Arctique Central

MBeaufort : Mer de Beaufort

ACanadien : Archipel Canadien

MBéring : Mer de Béring

Siberian S : Siberian Shelf

MRoss : Mer de Ross

MWeddell : Mer de Weddell

MBA : Mers de Bellingshausen et d'Amundsen

AEst : Antarctique Est

PAOuest : Péninsule Antarctique Ouest

ZNP : Zone non polaire

WAI : *Warm and moist Air Intrusions*

MOSAIC : Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement mon promoteur, Bruno Delille, pour m'avoir laissé la chance de réaliser un mémoire, mais surtout sur un sujet aussi intéressant. Mais surtout, je tiens à le remercier, pour son accompagnement, sa gentillesse permanente, sa grande disponibilité ses encouragements, et toutes les connaissances qu'il m'a transmises. Je n'aurais certainement pas pu avoir un meilleur promoteur pour mener à terme ce projet.

Je remercie également mon encadrante, et amie, Sofia Muller, pour tous ses précieux conseils et messages de motivation, qui m'a toujours poussé à faire le maximum.

Merci aussi à toutes les personnes que j'ai pu croiser au laboratoire pour avoir toujours été dans une ambiance positive et chaleureuse.

Je remercie aussi mes amis qui ont été importants dans ces moments qui se sont avérés parfois très compliqués. Anais, Angélique, Marion, John, Gabin, merci d'avoir toujours été présents avec de gentils et rigolos messages pour améliorer mon humeur. Une mention toute particulière à Camille, car malgré toute la distance qui peut nous séparer tu restes mon plus grand soutien. Loin des yeux mais près du cœur après tout.

Une petite mention tout de même pour les deux petits être qui partagent mon quotidien et sont toujours là pour des câlins et du réconfort : Arya et Rio.

Merci à ma famille, maman, Bruno, et plus que n'importe qui, papy, pour tout cet amour qui m'a toujours aidé dans les moments difficiles.

Je n'aurais jamais pu réaliser ce travail sans le soutien sans faille et la présence de mon conjoint, Alexis, que je remercie du plus profond de mon cœur pour tout. Principalement pour avoir cru en moi jusqu'au bout, même quand je n'en étais plus capable.

Enfin, merci à vous, mamie et papa, à qui je dédie ce travail, car malgré la douleur, sans les pensées qui vous accompagnent je ne sais pas si j'en serais là actuellement.

Résumé

Dans le cadre du réchauffement climatique, la phase de précipitations dans les zones polaires devrait majoritairement devenir de la pluie, notamment au printemps et en été. Il est déjà établi que le réchauffement climatique se produisant au niveau des régions polaires, notamment dans l'Océan Arctique, engendre une perte conséquente de l'étendue de la glace de mer accentuée en été.

Ce travail s'est donc intéressé aux différents impacts que la pluie peut engendrer sur la glace de mer. Pour se faire, une revue de la portée suivant le protocole PRISMA-ScR a été réalisé. L'inclusion des outils d'intelligence artificielle a également été choisi afin d'en évaluer la pertinence dans le cadre de revues de la littérature.

Les principaux résultats qui ressortent sont, pour l'Arctique, une augmentation globale des précipitations générales, une diminution des chutes de neige dans beaucoup de secteurs, et une augmentation indéniable de la pluie dans toute l'arctique. De plus, les phénomènes de pluie sur neige et les rivières atmosphériques tendent également à augmenter. Même si les événements automnaux peuvent accroître l'épaisseur de glace, les impacts sont, dans la majorité des études, une diminution de l'étendue et de l'épaisseur et de la glace de mer, au printemps et en été. Cette diminution est couplée durant les saisons chaudes à : une diminution du manteau neigeux, de l'épaisseur et de l'extension de la glace, de l'albédo, et une augmentation des échanges de chaleur, de la fonte, ainsi que des bassins de fonte. Des implications négatives sur la production primaire et la biologie en générale ont été rapportées.

Les impacts de la pluie sur la glace de mer sont majoritairement axés sur une perte de la glace de mer. Malgré des données encore imprécises, les études sur les scénarios futurs vont dans ce sens. Cependant, il y a un réel manque de données sur l'Océan Austral qui doit être comblé afin de pouvoir explorer l'ensemble des impacts dans les deux régions polaires du globe.

Nombre de mots : 321

Mots-clés : pluie, précipitation, glace de mer, arctique, antarctique, revue de la portée

Moulin, L. (Août 2024) : L'impact de la pluie sur la glace de mer, une revue de la portée (Mémoire).

Promoteur : Pr. Bruno Delille. Département d'Astrophysique, Géophysique et Océanographie, Unité d'Océanographie Chimique, Faculté des Sciences, Université de Liège.

Abstract

In the context of global warming, the precipitation phase in the polar zones is predicted to become predominantly rain, particularly in spring and summer. It has already been established that global warming in the polar regions, especially in the Arctic Ocean, leads to a significant loss of sea ice extent, enhanced in summer.

This work, therefore, examined the various impacts that rain can have on sea ice. To this end, a scoping review following the PRISMA-ScR protocol was conducted. Artificial intelligence tools were also included to assess their relevance in the context of literature reviews.

The main results for the Arctic are an overall increase in general precipitation, a decrease in snowfall in many areas, and an undeniable increase in rainfall throughout the Arctic. Rain-on-snow events and atmospheric rivers are also tending to increase. Although autumnal events can increase ice thickness, in most studies, the impact is a decrease in the extent and thickness of sea ice in spring and summer. During warmer seasons, this decrease is coupled with: a reduction in snow cover, ice thickness and extent, albedo, and, an increase in heat exchange, melting and melt ponds. Negative implications for primary producers and biology in general have been reported.

The impacts of rain on sea ice are mainly focused on the loss of sea ice. Despite still uncertain data, studies on future scenarios are moving in this direction. However, there is a real lack of data on the Southern Ocean, which needs to be addressed to explore the full range of impacts in both polar regions of the globe.

Number of words: 261

Key words : rain, precipitation, sea ice, arctic, antarctic, scoping review

Moulin, L. (2024): The impact of rain on sea ice, a scoping review (Dissertation).

Promotor: Pr. Bruno Delille. Department of Astrophysics, Geophysics and Oceanography, Chemical Oceanography Unit, Faculty of Sciences, University of Liège

1 Introduction

1.1 Revue de la littérature

1.1.1 Le changement climatique

Le réchauffement climatique est aujourd'hui une réalité indéniable. Ses effets sont particulièrement amplifiés dans les régions polaires, notamment dans l'Océan Arctique, là où les températures augmentent à un rythme alarmant (Ferguson, 2005). Ce phénomène, décrit comme une Amplification Arctique (AA), est une réponse thermodynamique directe à l'augmentation des gaz à effet de serre (Overland, 2022).

Bien que l'Antarctique présente une variabilité spatiale plus marquée, le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, ou *Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC, 2021), note un réchauffement très probable de la Péninsule Antarctique depuis les années 1950, tandis que, l'Antarctique Est ne montre aucune tendance générale. Cette polarisation des effets du réchauffement climatique est illustrée par le record de température, atteignant +4°C, soit près de 9°C au-dessus des moyennes saisonnières enregistrée le 2 juillet 2023, a été enregistré sur l'île du Roi-George (proche de la Péninsule Antarctique), où des pluies continues pendant plus de 12 heures d'affilées, mettent bien en évidence les perturbations climatiques extrêmes dans de telles régions.

En effet, l'Océan Arctique est actuellement l'une des régions les plus touchées par le changement climatique (He et Ling, 2023). Les températures atmosphériques augmentant beaucoup plus rapidement que celles des autres régions du monde en réponse au changement climatique, on va parler d'un processus appelé l'amplification polaire, ou plus précisément dans ce cas, amplification arctique (Landrum et Holland, 2020 ; Chang et al., 2020 ; Vihma et al., 2016 ; He et Ling, 2023). Il est vrai qu'au cours du temps, l'Arctique s'est réchauffé plus rapidement que toute autre région du globe (GIEC, 2021 ; Boisvert et al., 2023). Selon diverses études, le réchauffement dans cette région a été 2 fois plus rapide (Langlois et al., 2017 ; Stroeve et al., 2022 ; GIEC, 2019), alors que selon Kirbus et al. (2023) cela aurait été même de 4 fois plus vite que le reste du globe au cours des dernières décennies. Ce réchauffement, particulièrement marqué pendant la saison froide (GIEC, 2021) est accéléré et lié à une série de rétroactions positives. La plus connue étant la rétroaction glace-albédo. En plus de cette rétroaction, plusieurs autres paramètres contribuent à l'amplification arctique (Langlois et al., 2017).

Cela va donc conduire à un phénomène amplifié de perte de la glace de mer arctique, par ce que l'on appelle la rétroaction positive connue sous le nom de rétroaction glace-albédo. Il s'agit donc, d'une perturbation du bilan énergétique de surface qui entraîne une diminution de l'étendue de la glace de mer, pouvant s'amplifier en raison du réchauffement car la réduction de la couverture de glace augmente la quantité d'énergie solaire

absorbée par le système. Dans une forme plus simple, il s'agit d'une diminution de la couverture de glace qui expose les eaux libres (avec un albédo inférieur à celui de glace de mer) et augmente l'énergie solaire absorbée par le système couplé océan-glace-atmosphère (Lader, 2017). Cette rétroaction vient du fait qu'il y a un grand contraste entre l'albédo de la glace recouverte de neige (0,85), celui de la glace fondante (0,65) et celui des eaux libres (0,07). En effet, à mesure que la glace de mer fond, elle est remplacée par des eaux libres beaucoup plus sombres, ayant un pouvoir réfléchissant bien plus faible. Cette diminution de l'albédo permet davantage à l'océan d'absorber des rayonnements solaires, ce qui conduit au réchauffement des eaux de surface et à une fonte accrue de la glace de mer. Cela crée donc une boucle de rétroaction positive, puisque, plus la glace fond, plus l'océan se réchauffe, et plus la fonte s'accélère (Screen et Simmonds, 2012 ; Thomas, 2017).

Tout cela peut conduire à l'atlantification, ou boréalisation de l'Océan Arctique. Par exemple, cela est bien renseigné en mer de Barents, où il y a cette transition progressive des propriétés de l'océan vers celles des eaux atlantiques plus chaudes et plus salées, d'où le terme d'atlantification. Ce processus est caractérisé par une influence croissante des eaux atlantiques, ce qui entraîne un réchauffement des eaux de surface, ainsi qu'une diminution de la glace de mer en hiver, et même une absence presque complète de glace de mer en été. Cette disparition de la glace de mer en hiver empêche la reconstitution de la couche d'eau douce et froide qui se trouve habituellement en surface, et normalement alimentée par la fonte estivale de la glace de mer. Cela réduit donc la stratification des couches supérieures de l'océan, favorisant un mélange plus intense, avec les eaux atlantiques. La transition vers une atlantification complète de la mer de Barents est d'ailleurs presque terminée (Overland, 2022).

Comme mentionné, le réchauffement climatique va pouvoir entraîner une perte rapide et importante de la couverture de glace de mer dans l'Arctique (Pauling et Bitz, 2021). Depuis plusieurs décennies maintenant, l'étendue de la glace de mer arctique diminue de manière continue tout au long de l'année, avec des réductions particulièrement marquées en septembre. Lors de ce mois, la perte de glace atteint presque 13% par décennie entre les années 1979-2018. Un phénomène sans précédent depuis au moins 1000 ans (GIEC, 2019).

En plus de l'augmentation des températures atmosphériques due au réchauffement climatique, certains phénomènes, tels que les vagues de chaleurs marines (VCM) ou « *Marine Heat Waves* » en anglais, contribuent à l'apparition d'extrêmes climatiques. Contrairement à ce que l'on pourrait croire, ces extrêmes ne nécessitent pas forcément des écarts significatifs importants dans la circulation atmosphérique. Cela explique donc la grande diversité des impacts récents, ainsi que la variabilité géographique et interannuelle de ces événements extrêmes (Overland, 2022). Selon le rapport du GIEC de 2021, le changement climatique a non seulement entraîné une augmentation des extrêmes liés à la chaleur, mais il a aussi réduit les périodes de froid

et de gel dans les régions polaires. Bien qu'attention toutefois, cette tendance est plus marquée dans l'Arctique qu'en Antarctique. Les fréquences des VCM a presque doublé entre 1982 et 2016, avec une intensité et une durée accrue depuis les années 1980 (GIEC, 2021). Les projections indiquent que cette tendance devrait se poursuivre avec une augmentation significative des VCM d'ici la fin du 21^e siècle, notamment dans l'Océan Arctique. Il serait possible d'avoir des augmentations 2 à 9 fois plus fréquentes (à l'échelle mondiale), de tels évènements, d'ici 2081-2100, par rapport à la période 1995-2014, voire même, 4 à 18 fois plus fréquentes, selon les modèles employés. Dans un scénario d'émissions élevées (SSP5-8.5), des VCM quasi permanentes pourraient même se produire dans certaines régions telles que l'Arctique. Tout cela pourrait occasionner des conséquences potentiellement dévastatrices pour différentes choses, notamment les écosystèmes marins (GIEC, 2021).

1.1.2 Les précipitations

1.1.2.1 Changement de phase et généralités

Étant donné que le réchauffement climatique augmentera les taux d'évaporation avec une atmosphère plus chaude pouvant contenir davantage d'humidité (Dingman, 2015 ; Boisvert et al., 2023). Tout au long du 21^{ème} siècle, l'augmentation des températures engendrera une intensification du cycle hydrologique, notamment avec une évaporation intensifiée due à l'accroissement des zones d'eau libre ainsi qu'à l'augmentation des taux de précipitations (GIEC, 2021 ; McCrystall et al., 2021 ; Viham et al., 2016 ; Boisvert et al., 2023). Toutefois, bien qu'il soit encore compliqué de prédire précisément les changements dans le type de phase de précipitations. En effet, ce terme pouvant inclure une phase solide pour définir de la neige, ou une phase liquide, pour de la pluie, la répartition de l'une ou l'autre phase est encore difficile (Bintanja et Andry, 2017). Avec un environnement se réchauffant à une grande vitesse et des températures en constante augmentation, il est très probable que davantage de précipitations tombent à l'avenir sous forme de pluie (Boisvert et al., 2023). Le 26 juillet 2022, des pluies records (environ 3,60 cm) ont par exemple touchées Barrow, en Alaska, sur la rive de la mer des Tchouktches. Il s'agissait du record de précipitations liquides sur 24 heures jamais enregistrées (environ 3,35 cm auparavant en 1987, sur deux jours consécutifs).

1.1.2.2 Les rivières atmosphériques

De plus en plus de phénomènes extrêmes sont observés en Arctique à mesure que le climat se réchauffe et entraîne une augmentation dans la capacité en humidité atmosphérique. Ces extrêmes sont pour certains, liés à des phénomènes appelés rivières atmosphériques. Ces phénomènes météorologiques sont caractérisés par de longs (de plusieurs milliers de kilomètres), et étroits (de quelques centaines de kilomètres) couloirs transportant de la vapeur d'eau, concentrés dans la basse atmosphère et s'étendant sur de longues étendues d'océan (Chang et al., 2020 ; Dingman, 2015). Dans l'Océan Arctique, ces phénomènes sont plus documentés que dans l'Océan Austral. Cependant, même si elles tendent à augmenter dans les deux régions

polaires, la phase de précipitations est quant à elle différente selon le pôle concerné. En effet, il est clairement établi que dans l'Arctique, les rivières atmosphériques apportent plus de pluie. Au contraire, encore récemment (en 2022), d'après le rapport GIEC, (2021), de tels phénomènes ont engendrés d'intenses précipitations sous forme de neige, bien que, sur la Péninsule Antarctique des pluies commencent à arriver.

1.1.2.3 Les évènements de pluie sur neige

D'autres phénomènes, appelés des évènements de pluie sur neige, « *rain on snow* » en anglais, reçoivent beaucoup d'attention. Ces évènements de pluie dans les régions polaires, où il y a la présence de glace de mer correspondent à des chutes de pluie sur un manteau neigeux présent (Hansen et al., 2014). Cependant, tout comme pour les rivières atmosphériques, la variabilité et la tendance de tels évènements au-dessus de la glace de mer, ainsi que leur rôle dans la perte de glace de mer sont encore mal compris (Dou et al., 2019). Bien qu'une augmentation de ces évènements soit régulièrement mise en avant, le dernier rapport GIEC (2021), fait remarquer qu'à terme, il devrait y avoir plutôt une diminution pour ces évènements étant donné que les zones enneigées tendent à disparaître.

1.1.2.4 Pluie et animaux : problématique

Un des impacts iconiques de la perte de la glace de mer concerne les manchots empereurs (*Aptenodytes forsteri*) en Antarctique. En 2022 et 2023, la superficie minimale de la banquise, au pic de l'été austral est descendue en dessous de deux millions de kilomètres carrés, soit une première depuis le début des observations par satellite. Représentant un déclin d'environ 30% en comparaison à la moyenne 1981-2010. Le soucis étant que, si la glace fond trop tôt, les poussins manchots empereurs risquent de se noyer et de geler. Étant donné qu'ils ne développent des plumes imperméables qu'avant la fonte estivale, une fonte précoce en plus de diminuer leur habitat va les mettre en danger et donc impacter considérablement les colonies (Fretwell, 2023). De même, une augmentation des précipitations sous forme liquide, au-delà de ses impacts sur la glace de mer à proprement parler, pourra probablement impacter de façon négative les poussins n'étant pas préparés à survivre à des conditions environnantes froides et humides.

1.1.2.4.a Les mammifères et oiseaux marins

Dans l'écosystème marin, le réchauffement climatique avec l'augmentation des températures (de la mer et atmosphériques), ainsi que la réduction de la glace de mer, vont influencer l'ensemble du réseau trophique. En effet, ces changements vont particulièrement affecter l'habitat et la recherche de nourriture de la plupart des mammifères et oiseaux marins. Au contraire de certaines espèces des zones tempérées, qui vont voir leur aire de répartition s'élargir (Descamps et al., 2017). Une des espèces qui devrait être particulièrement impactée est le phoque annelé (*Phoca hispida*), car il s'agit d'une espèce clé dépendant de la glace de mer. Avec la réduction drastique attendue de l'étendue de la couverture de glace en Arctique, cette espèce devrait être parmi l'une des

premières à montrer des effets négatifs du réchauffement climatique (Ferguson, 2005). Ensuite, les effets en cascade dans la chaîne trophique continueront avec notamment, le déclin des prédateurs. Dans le cas du phoque annelé, son principal prédateur est l'ours polaire (*Ursus maritimus*), qui, avec le déclin des populations de phoques, ainsi que de son habitat, devrait voir à son tour le déclin de sa population.

1.1.2.4.b Les mammifères terrestres

Même si les espèces les plus intéressantes vis-à-vis du sujet sont celles se concentrant sur la glace de mer, les mammifères terrestres sont également impactés (indirectement) par la perte de la couverture de glace. La couverture de glace étant un système incluant indéniablement avec elle le manteau neigeux. Et, les populations de mammifères terrestres étant étroitement liées à ce manteau neigeux, alors des liens semblent plus évidents. En revanche, il y a aussi certaines espèces qui dépendent des deux zones (terrestres et marines). Il s'agit notamment du renne du Svalbard (*Rangifer tarandus platyrhynchus*) qui va pouvoir utiliser les voies marines afin d'élargir son aire de répartition terrestre. De même, le renard arctique (*Vulpes lagopus*), utilise, lui, au contraire bien les deux territoires en tant que zones alimentaires (Descamps et al., 2017). Au contraire, certaines populations, notamment des oiseaux migrateurs, vont bénéficier positivement d'une diminution d'un environnement froid. Il s'agit par exemple d'une espèce d'oie sauvage (*Anser brachyrhynchus*), qui va pouvoir se reproduire plus tôt tout en étant moins prédatée, avec une perte de la couverture neigeuse et de l'habitat marin, limitant les déplacements de certains de ses prédateurs (Descamps et al., 2017).

1.1.3 La glace de mer

Au début des années 2000, l'Arctique était une région bien plus résiliente face au changement climatique par rapport à aujourd'hui, étant donné la présence de la glace de mer plus étendue, et trois fois plus épaisse qu'aujourd'hui (Overland, 2022).

1.1.3.1 Formation de la glace de mer

La de la glace de mer joue un rôle crucial dans le climat global. Le processus de sa formation est cependant un procédé relativement complexe, car il doit prendre en compte tout un tas de facteur. Tout d'abord, l'eau de mer va devoir avoir une diminution de sa température à un point en dessous de son point de congélation, forcément modifié en fonction de la salinité, se trouvant généralement autour de $-1,8^{\circ}\text{C}$ pour une eau salée standard. Lorsque cette température est atteinte, de minuscules cristaux de glace vont commencer à se former à la surface. Ces cristaux, appelés frazil, vont s'agréger afin de former une couche de glace de mer appelée nilas, pouvant évoluer en une couverture plus épaisse et solide, au fur et à mesure que la température continue de baisser. La dynamique de la formation de la glace est cependant aussi influencée par des facteurs tels que la stratification des couches d'eau de l'océan, la circulation atmosphérique, ou encore, les interactions entre la glace de mer et l'océan. Par exemple, des conditions venteuses, et le refroidissement nocturne vont pouvoir

favoriser la dispersion des cristaux de frazil, et promouvoir ainsi l'augmentation de la couverture de glace (Thomas, 2017). À savoir que, la glace étant un isolant thermique, plus son épaisseur sera importante, plus son développement sera lent (Serreze et Fetterer, 2015). De la même façon, la neige a un pouvoir isolant également très élevé, sa présence sur le dessus de la glace de mer va alors pouvoir avoir des implications et des effets divergents selon les périodes annuelles concernées, et les conditions environnantes liées. Les différents effets de la pluie sur le manteau neigeux et la glace de mer ne sont pas encore très clairs, puisqu'elles peuvent à la fois, renforcer, et atténuer la croissance de la glace de mer, selon le moment et leur quantité (Boisvert et al., 2023).

Ajouter le paramètre des précipitations liquides à cette formation peut perturber de différentes manières le processus. Cela peut par exemple, venir augmenter la glace de mer par créations de couches de glace supplémentaires. Notamment avec de la *superimposed ice*, des croûtes et lentilles de glace de mer, de la glace de neige. À contrario, cela peut aussi retarder et/ou limiter la formation de la glace de mer en accélérant sa fonte, ou bien même, en augmentant les transferts de chaleur car la conductivité d'une neige humide sera notamment plus élevée, et sa densité, au contraire, plus faible (Thomas, 2017).

1.1.3.2 L'albédo

L'albédo, défini par la fraction du rayonnement incident à ondes courtes réfléchi par une surface selon Thomas (2017), est un paramètre important de la glace de mer et du manteau neigeux qui la recouvre généralement. En effet, ce sont deux matières possédant un albédo élevé. La neige a toutefois un albédo plus élevé (~ 0,7-0,9, selon son taux d'humidité) que la glace de mer. Limitant l'absorption de l'énergie solaire par la glace, ainsi que l'océan sous-jacent (Screen et Simmonds, 2012 ; Dou et al., 2019 ; Thomas, 2017). Durant la saison de fonte, une couche de neige épaisse va donc contribuer au maintien d'un albédo de surface important, permettant de réduire l'effet de fonte. Au contraire d'une fine couche de neige qui va fondre plus tôt au printemps et favoriser les échanges de chaleur ainsi que la formation de bassins de fonte (Dou et al., 2019).

1.1.3.3 Les échanges de chaleur

Les échanges de chaleur sont un paramètre important à prendre en compte dans le processus de formation et/ou de fonte de la glace de mer. En effet, la couverture neigeuse sur la glace de mer va jouer un rôle important dans le bilan thermique de la glace de mer qu'elle recouvre. La neige est un super isolant grâce à sa conductivité thermique faible (d'environ un ordre de grandeur par rapport à celle de la glace de mer), et déterminée par sa texture et sa densité de la neige (Thomas, 2017). Différents paramètres peuvent toutefois venir altérer cette propriété. Il s'agit notamment des précipitations liquides. En effet, la pluie tombant sur le manteau neigeux va aller s'infiltrer à travers la neige, ce qui va augmenter sa conductivité, et donc les échanges de chaleur possibles. Dans une phase de croissance de la glace de mer, cette augmentation des échanges de chaleur peut être bénéfique car cela permettra une croissance basale de la glace plus importante. En revanche,

durant la phase de fonte de la glace de mer, une augmentation des échanges de chaleur par altération/diminution du manteau neigeux sera plus embêtante, puisque cela n'isolera plus la glace de mer des échanges entre elle et l'atmosphère, amplifiant possiblement la fonte.

1.1.3.4 Les bassins de fonte

Suite à la fonte du manteau neigeux, la formation de structures appelées des bassins de fonte, « *melt pond* » en anglais, peut être favorisée. Ces bassins absorbent environ 1,7 fois plus de rayonnement solaire que la glace nue, et environ 5 fois plus que de la glace de mer froide recouverte de neige (Perovich et al., 2002 ; Perovich et Polashenski, 2012 ; Webster et al., 2014).

La formation, l'évolution et la disparition des bassins de fonte sont régulées par divers processus, plus ou moins complexes. Il s'agit notamment d'interactions avec la couche de neige présente sur le dessus de la glace de mer, du drainage des bassins à travers la glace de mer perméable, du gel irrégulier pouvant se produire, et de la topographie de la glace (Hunke et al., 2013 ; Polashenski et al., 2012). Déjà, la répartition et les propriétés de la neige lors de la période hivernale vont influencer la formation des bassins de fonte et leur superficie totale en été (Liston et al., 2020). En ce qui concerne la formation des bassins de fonte à proprement parler, 4 étapes distinctes sont définies. La première correspond à la formation initiale des bassins : cela débute lorsque l'eau de fonte (ou des précipitations) commencent à s'accumuler à la surface de la glace qui est relativement imperméable. Entraînant ensuite une augmentation rapide de la couverture des bassins. Le volume de ces structures est régi par la vitesse de fonte, mais également par la perte d'eau via le transport latéral et/ou les failles et fissures. La deuxième étape correspond à celle de l'abaissement des bassins. Au cours de cette étape, les bassins de fonte vont s'abaisser progressivement jusqu'à se stabiliser près du niveau de la mer en raison d'un écoulement important. La couverture des bassins diminue plus ou moins selon l'âge de la glace de mer. La troisième étape concerne l'expansion des bassins de fonte. En effet, ces structures restent proches du niveau de la mer, avec une perméabilité importante de la glace qui permet à l'eau d'être relâchée facilement dans l'océan. Les bassins continuent donc de s'étendre, jusqu'à atteindre généralement leur couverture maximale saisonnière, avec la création de nouvelles zones où la surface de glace est abaissée en dessous du franc-bord. Et enfin, la quatrième et dernière étape correspond à la reprise de la glace. C'est-à-dire qu'il va y avoir un regel pouvant se produire à tout moment de la saison (si les conditions atmosphériques le favorisent), stoppant donc l'afflux d'eau de fonte et formant une couche de glace sur les bassins existants (Polashenski et al., 2012).

1.1.4 Liens entre pluie et glace de mer

Différents liens existent entre la pluie et la glace de mer.

1.1.4.1 Glace de mer – pluie

Un nombre relativement important d'études expliquent le fait que, le retrait de la glace de mer dû au réchauffement climatique, va induire une augmentation des précipitations sous forme de pluie (Forbes et al., 2016 ; Lader et al., 2017 ; Byongjun Hwang et al., 2020 ; Landrum et Holland, 2020 ; Walsh, 2008 ; Chang et al., 2020 ; Ballinger et al., 2023).

1.1.4.2 Pluie – glace de mer

En revanche, même si de nombreuses études rapportent des impacts de la pluie sur la glace de mer, il n'y a pas, à l'heure actuelle, de revue exacte relatant ces impacts et leurs tendances. L'étude récente, de Boisvert et al. (2023) dénote bien ce fait en expliquant qu'à leur connaissance, dans l'Océan Arctique, les changements récents dans la durée et la période de la saison des pluies n'ont pas encore été évalués mais, qu'ils sont susceptibles d'avoir un impact significatif sur l'albédo, la fonte, la croissance du manteau neigeux et de la banquise. Pourtant, en sachant que la perte de la glace de mer devrait influencer les pluies, il serait quand même intéressant de comprendre comment, à leur tour, les pluies vont influencer la glace de mer.

1.2 Objectifs et question de recherche

1.2.1 Objectifs

1.2.1.1 Étude de l'impact de la pluie sur la glace de mer

L'objectif principal de ce mémoire est de répondre à la question de recherche suivante : « Quels sont les effets de la transition de phase des précipitations, de la neige vers la pluie, sur l'étendue de la glace de mer, ses propriétés physiques, biologiques ou biogéochimiques ? ».

Ne sachant pas quelles sont les connaissances disponibles au sujet de l'impact de la pluie sur la glace de mer, il a été décidé de recourir à une revue de la portée (ou *scoping review* en anglais). Ce type de revue permet de répondre de manière exhaustive et rigoureuse à une question. Grâce à cette approche méthodologique, il est possible d'examiner et synthétiser de manière systématique la littérature scientifique existante, en identifiant les tendances de recherche observées, mais aussi les lacunes.

1.2.1.2 Méthode PRISMA

Pour répondre à la question de recherche, le deuxième objectif de ce travail est de suivre un protocole bien précis. En effet, des recherches ont été effectuées afin d'en apprendre davantage sur la méthode PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses) (Tricco et al., 2018). Notamment pour son application à notre domaine de recherche. Le choix de cette méthode par rapport à d'autres protocoles est dû à la reconnaissance de son exhaustivité, de ses applications dans plusieurs disciplines académiques à travers le monde, au-delà des domaines médicaux, et de son potentiel à

augmenter la cohérence des revues de littérature parmi les chercheurs. L'utilisation de cette méthode vise à assurer la reproductibilité, précision et transparence de l'analyse de la littérature scientifique.

1.2.1.3 Utilisation de l'intelligence artificielle

Enfin, le troisième objectif est d'intégrer l'utilisation des outils d'intelligence artificielle (IA) à la recherche. L'utilisation de ces outils a été intégrée car, bien que ces technologies soient relativement récentes, elles se développent plutôt rapidement et offrent un potentiel qui semble important. L'IA peut, peut-être, accélérer le processus de collecte des données ou bien même fournir des références nouvelles et pertinentes qui ne sont pas fournies nécessairement ailleurs. Cette approche plutôt innovante ouvre potentiellement des possibilités pour améliorer l'efficacité et la recherche.

2 Méthodologie

Afin de répondre au mieux à la question de recherche, il a semblé judicieux de réaliser une revue de la littérature, et plus spécifiquement, une revue de la portée des études ciblant le sujet. En effet, une revue de la portée a pour objectif de répondre à des questions dites « larges » et peu étudiées. Elle est donc intéressante pour réaliser un état des connaissances permettant d'obtenir un aperçu global de la thématique de recherche avec des informations hétérogènes, tant en termes de sources, que de contenu.

Il a été choisi de suivre la ligne directrice PRISMA visant globalement à assurer la répliquabilité, la transparence et l'exhaustivité d'une revue systématique. Au départ, développée pour les revues systématiques, et initialement et principalement dans le domaine médical (pour permettre d'évaluer les avantages et inconvénients d'une démarche ou d'un traitement). En 2018, une extension PRISMA pour les revues de portée a été publiée : Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses – Scoping Review (PRISMA-ScR) (Tricco et al. 2018). C'est cette méthodologie qui a été suivie.

2.1 Protocole

Étant donné que le second objectif de ce mémoire est d'utiliser la méthode PRISMA, il semble important de rappeler que ce chapitre, ainsi que celui des résultats, suivront donc un développement précis, qui va de pair avec l'application du protocole PRISMA-ScR. Ceci a pu alourdir le style de rédaction du mémoire, mais nous nous sommes tenus strictement au protocole.

Toutefois, certaines adaptations ont été effectuées, étant donné qu'il s'agit d'un travail de mémoire. Aucun protocole personnel n'a été rédigé. Seul le protocole PRISMA-ScR a été suivi (<https://www.prisma-statement.org/scoping>). La liste de contrôle PRISMA-ScR est cependant disponible en *Annexe 1*. Aussi, une limitation dans le nombre maximal d'études à analyser pour le screening de départ (sur la sélection à partir du titre) a été choisie avec un nombre compris entre 500 et 1000. Enfin, le screening a été réalisé par une seule

personne, mais avec ponctuellement le support de l'équipe de recherche, et non par deux personnes indépendantes comme il est recommandé (Tricco et al., 2018).

2.2 Critères d'éligibilité

Afin d'aider au mieux à la sélection des études les plus pertinentes pour la revue de la portée, des critères d'éligibilité ont été définis. Ces critères ont alors permis d'inclure ou d'exclure les études analysées et sont visibles en *Annexe 2*.

2.2.1 Critères d'inclusion

Les critères d'inclusion suivants ont guidé la sélection des études.

Les études ont dû traiter d'un lien entre la pluie et la glace de mer afin d'être inclus. De même, les précipitations mentionnées devaient faire référence à de la pluie, des précipitations liquides, ou humides. Le lieu étudié devait forcément comprendre de la glace de mer. L'anglais et le français sont les deux langues pour lesquelles les études ont été incluses. En revanche, aucune restriction n'a été imposée concernant l'année de publication, et aucune méthode de recherche scientifique (qualitative, quantitative, mixte) précise n'a été sélectionnée, l'intention étant de récolter un maximum d'informations par rapport à notre recherche, au-delà donc de la méthode utilisée ou de l'année de publication.

2.2.2 Critères d'exclusion

En parallèle, les critères d'exclusion suivants ont été appliqués.

Pour commencer, les études rédigées dans une autre langue que l'anglais ou le français ont été rejetées. Ensuite, les critères d'exclusion principaux ont été les études ne mentionnant pas la pluie, et la glace de mer, ni ne mentionnant de liaison entre ces deux notions. En effet, lorsqu'il n'y avait pas assez d'informations permettant d'identifier les précipitations comme étant de la pluie, des précipitations liquides ou même humides, il a été décidé d'exclure l'étude. Ce choix a été fait puisqu'une description suffisamment détaillée était de nombreuses fois manquantes et qu'il était par la suite impossible d'affirmer le lien souhaité, à savoir la pluie impactant la glace de mer.

De plus, les études ont été exclues si elles portaient sur : des régions telles que l'Afrique du Sud ou l'Inde, l'*ice-sheet*, les rivières, les inondations (*flooding* et ses dérivés), la météorologie (prédictions météorologiques, nuages, éclairs, etc), la géologie, la paléontologie, les aérosols, les surfaces hydrophobes, l'agriculture. Les études ont également été rejetées si elles parlaient de l'influence de la glace de mer sur le climat, notamment son effet sur les moussons, mais aussi les précipitations et plus particulièrement la pluie. Mais aussi si elles concernaient les climats tempérés et/ou équatoriaux en téléconnexion avec la couverture de la glace de mer. Des rapports anciens, tels que ceux du GIEC, ont également été exclus afin de ne conserver

que le plus récent étant donné qu'il s'agit d'une mise à jour, et dans ce cas, la dernière version semble être la plus pertinente. Enfin, pour terminer, les études dont le texte intégral n'était pas disponible ont forcément été exclues.

2.3 Sources de données

Afin de ne pas manquer de références pertinentes dans le but de répondre à la question de recherche, il est judicieux d'effectuer des recherches à travers plusieurs bases de données (BD) et moteurs de recherche (MRoss). C'est pour cela qu'en lien avec le deuxième objectif, l'utilisation de l'intelligence artificielle (IA), des plateformes d'IA ont également été consultées. Toutes ces recherches ont été faites en mars 2024. Une liste reprenant les différentes sources de données, celles sélectionnées pour la revue de la portée, ainsi qu'un lien Internet pour chacune d'entre elles est disponible en *Annexe 3*.

2.3.1 Bases de données bibliographiques et moteurs de recherche

Les BD suivantes ont été utilisées : Scopus, PubMed, Embase, Science Open, MDPI et Scilit.

L'utilisation de Scopus, MDPI, Scilit et Science Open est pertinente puisque ces bases de données sont multidisciplinaires. En effet, afin de répondre à la question de recherche, couvrir un large éventail de domaines tels que l'océanographie, la biologie, la physique, la biogéochimie, la chimie, etc, a été important. Il a aussi semblé pertinent d'exploiter PubMed qui couvre plutôt le domaine des sciences de la vie, malgré sa plus grande concentration dans le domaine médical. Il a également été décidé d'ajouter un moteur de recherche (MRoss), Google Scholar car il était craint de ne pas avoir suffisamment de résultats en lien précis avec la question de recherche. Cela a semblé d'autant plus pertinent du fait qu'il englobe une grande variété de disciplines.

2.3.2 Sites et applications d'intelligence artificielle

Le troisième objectif du mémoire qui a été d'intégrer l'intelligence artificielle (IA) à la méthodologie, des recherches ont d'abord été menées afin de se renseigner sur les différents sites et applications existants et disponibles. Ensuite, une phase de test a été réalisée afin de choisir parmi toute une liste de ces plateformes d'IA afin d'avoir une idée de la facilité d'utilisation ainsi que de la quantité et pertinence des résultats obtenus. Après ces recherches, voici donc les différents sites et applications qui ont été retenus et utilisés : SciSpace, Dimension, Scite Assistant, Paper Digest, Copilot et Groq.

Les plateformes d'IA qui n'ont pas été sauvegardées l'ont été pour différentes raisons. À savoir, trop similaires, comme avec la plus connue ChatGPT, très proche de Copilot, en termes d'interface et d'utilisation, mais fournissant moins de références scientifiques. Un choix s'est donc imposé afin de ne pas augmenter la quantité de travail avec des résultats peu pertinents, mais également de garder un équilibre BD et MRoss, versus, sites et applications d'IA. Certaines IA comme Scinapse n'ont pas été assez précises et donnaient très peu de résultats. D'autres encore n'étaient pas adaptées à ce travail comme Consensus, fonctionnant plutôt

avec des questions dites fermées. Mais il y a aussi eu le cas de Gemini, retirée après son utilisation, car les deux tiers des références fournies n'étaient pas fonctionnels.

2.3.3 Communications personnelles

Grâce à la communication personnelle avec l'équipe de recherche, certains rapports et ouvrages ont été rajoutés (GIEC, 2019, 2021 ; Thomas, 2017). Références n'ayant été données par aucune BD traditionnelle.

2.4 Stratégie de recherche

La stratégie de recherche adoptée doit permettre une recherche exhaustive afin de rassembler un maximum d'études, en ayant toutefois une certaine pertinence dans les résultats. Cette stratégie a été élaborée, révisée et validée grâce à des discussions en équipe, entre le superviseur, Bruno Delille, l'encadrante, Sofia Muller et la mémorante, Laura Moulin. La première étape de la stratégie de recherche a été d'identifier les termes, les mots-clés, à utiliser pour la conception future des équations de recherche et des questions. Pour cela, en s'inspirant de la méthode PCC (*Population/Problem - Concept - Context*) beaucoup utilisée dans le domaine médical pour les revues de la portée (Archibald et al., 2016), il a fallu répondre à chaque composante afin d'en extraire une base pour ensuite, attribuer des mots-clés en lien avec ces composantes. En retranscrivant la méthode PCC (Population-Concept-Context) à la question de recherche du mémoire, cela a donné cela :

- *Population/Problem* : la transition des précipitations de neige vers de la pluie avec le réchauffement climatique
- *Concept* : l'impact de la pluie sur la glace de mer
- *Context* : partout sur Terre où de la glace de mer est présente.

Ensuite, des mots-clés liés donc à la pluie, la glace de mer et la localisation ont été recherchés, et cela en anglais, afin d'avoir un plus grand nombre de résultats possibles. Les mots-clés trouvés ont été repris en *Annexe 4*. Ces derniers ont ensuite été combinés entre eux à l'aide d'opérateurs booléens pour former une équation de recherche servant de « base ». Les mots-clés d'un même concept ont été liés par l'opérateur booléen « OR », et les concepts ont été combinés entre eux par l'opérateur booléen « AND », de la façon suivante : « (arctic OR okhotsk OR baltic OR bohai OR liaodong bay OR bothnia OR caspian OR azov OR baffin OR hudson bay OR aral OR (gulf AND (saint OR st) lawrence) OR white sea OR antarctic OR southern ocean OR polar ocean) AND (sea ice OR ice cover) AND (rain OR rainfall OR thunderstorm OR raindrop) ». Les BD et MRoss ont ensuite été répertoriés afin d'établir une sélection. Puis, l'équation de recherche a été éventuellement reformulée pour tenir compte du langage spécifique de chaque base de données bibliographique. Début mars 2024 une première phase dite de test a été lancée afin d'améliorer l'équation de recherche en enlevant/ajoutant des mots-clés notamment, et en ajustant également sa rédaction et sa recherche dans les études. Par exemple, *sea-ice* était au départ inclus dans l'équation, mais il est apparu que ce n'était pas nécessaire, *sea ice* suffisait.

Au contraire, *raindrop* et *thunderstorm* ont été rajoutés à la suite de cette phase de test. Parallèlement, les rubriques dans lesquelles l'équation de recherche devait faire sa sélection, telles que : *title*, *abstract*, *keywords* ou *all fields* ont été testées une à une afin de visualiser ce qui était le plus pertinent en termes de résultats, mais également réalisable en ce qui concerne le nombre d'études à analyser dans le cadre d'un travail de mémoire.

L'équation de recherche et les questions nécessaires pour l'utilisation des plateformes ont été calquées sur ce qui avait été fait pour les BD et MRoss. Il s'agissait en effet de garder une certaine cohérence avec une même ligne conductrice. Aussi, des ressources ont également été obtenues par des communications personnelles avec l'équipe de recherche lors de réunions. Étant donné qu'il s'agit d'une phase primordiale, la stratégie de recherche sera détaillée plus précisément dans les sous-parties suivantes, selon la source de données. Cela permettant plus aisément une reproductibilité de la méthode, et l'obtention notamment de résultats similaires.

2.4.1 Bases de données bibliographiques et moteurs de recherche

Les recherches dans Scopus, PubMed, Google Scholar, MDPI et Embase ont été réalisées le 11 mars 2024, tandis que les recherches dans Scilit et Science Open ont été réalisées le 13 mars 2024. Par soucis de concision il a été choisi de ne détailler la stratégie de recherche complète que pour Scopus, Google Scholar et Scilit. Il est possible de trouver le détail complet de toutes les stratégies en *Annexe 5*. La recherche avancée et les mêmes termes ont été utilisés dans les deux BD et MRoss. Les différences sont plutôt dans la façon/sélection d'indiquer où l'on souhaite que la recherche des mots soit effectuée dans l'étude (titre, résumé, mots-clés, article entier). À préciser que les filtres ont été choisis lors du processus de recherche.

Pour Scopus, utilisation de l'équation de recherche suivante : « TITLE-ABS-KEY ((arctic OR okhotsk OR baltic OR bohai OR "liaodong bay" OR bothnia OR caspian OR azov OR baffin OR "hudson bay" OR aral OR (gulf AND (saint OR st) AND lawrence) OR "white sea" OR antarctic OR "southern ocean" OR "polar ocean")) AND TITLE-ABS-KEY (rain OR rainfall OR thunderstorm OR raindrop) AND TITLE-ABS-KEY ("sea ice" OR "ice cover") ».

La recherche des mots a été faite dans le titre, le résumé et les mots-clés (utilisation de « TITLE-ABS-KEY ») et aucun filtre n'a été sélectionné.

La stratégie de recherche pour PubMed, Embase et Science Open est assez équivalente. Pour Embase l'indication « :ab,ti,kw » est utilisée suite à chat mot-clé. En revanche, pour PubMed la recherche dans les mots-clés n'a pas été faite, l'indication « [Title/Abstract] » a été utilisée de la même manière que « :ab,ti,kw ». Enfin, pour Science Open il a fallu effectuer la recherche en deux sélections distincte (une pour *title*, puis une pour *abstract*). Aucun filtre n'a été sélectionné pour toutes ces BD.

Pour Google Scholar il a été nécessaire de réaliser plusieurs équations de recherche pour obtenir quelque chose de complet correspondant à l'équation de « base », de la manière suivante : « allintitle: rainfall arctic OR okhotsk OR baltic OR bohai OR "liaodong bay" OR bothnia OR caspian OR azov OR baffin OR

"hudson bay" OR aral OR "gulf of st lawrence" OR "gulf of saint lawrence" OR "white sea" OR antarctic OR "southern ocean" OR "polar ocean" "sea ice" ».

Au total, huit recherches ont été lancées en alternant *rainfall*, *rain*, *thunderstorm* ou *raindrop* à la place de *rainfall* dans l'exemple avec *sea ice* ou *ice cover* à la place de *sea ice* dans l'exemple. Il n'y avait que la possibilité d'effectuer la recherche dans le titre ou le texte complet, donc le choix a été fait de se limiter au titre afin de ne pas se retrouver avec des milliers de résultats. Le filtre « ne pas inclure brevets et citations » a été sélectionné afin de ne pas avoir de résultats parasites.

Pour Scilit et MDPI le principe de combinaison est le même avec l'alternance des mots-clés des concepts de « pluie » et de « la glace de mer ». Pour Scilit la recherche des mots a pu se faire directement dans le titre, le résumé et les mots-clés, alors que pour MDPI il a fallu sélectionner *title*, puis *abstract* pour une même combinaison. Aucun filtre n'a été sélectionné pour ces deux BD.

2.4.2 Applications d'intelligence artificielle

Les recherches dans SciSpace et Dimension ont été réalisées le 11 mars 2024, tandis que les recherches dans Copilot, Groq, Scite et Assistant et Paper Digest ont été réalisées le 19 mars 2024. Par soucis de concision il a été choisi de ne détailler la stratégie de recherche complète que pour SciSpace et Dimension. Dimension est la seule application d'IA qui diverge par son utilisation de toutes les autres, son interface est similaire à celle d'une BD classique avec utilisation d'une équation de recherche. Pour toutes les autres applications d'IA, des questions de recherche assez larges et rédigées en langage naturel en anglais (afin d'accéder toujours à un maximum de résultats et couvrir au mieux le sujet) ont été utilisées en se basant toujours sur les mêmes mots-clés. Aucun filtre n'a été sélectionné pour toutes ces applications d'IA.

Pour Dimension, utilisation de l'équation de recherche suivante : « ("sea ice" OR "ice cover") AND (rain OR rainfall OR thunderstorm OR raindrop) AND (artic OR antarctic OR okhotsk OR baltic OR bohai OR "liadong bay" OR bothnia OR caspian OR azov OR baffin OR "hudson bay" OR aral OR "gulf of st lawrence" OR "gulf of saint lawrence" OR "white sea" OR "southern ocean" OR "polar ocean" »).

La recherche de mots-clés a été faite dans le titre et le résumé (à sélectionner) sur l'interface.

Pour SciSpace, utilisation de la question suivante : « what are the impacts of rain on sea ice ? ».
Il s'agit du même principe qu'avec les BD et MRoss nécessitant des combinaisons. Plusieurs questions, alternant entre les mots-clés pour le concept de pluie et ceux pour le concept de glace de mer ont été posées (huit au total).

Pour Copilot, Groq et Scite Assistant les questions incluait de mentionner le DOI des références. Toutefois, pour Scite Assistant, seulement 2 phrases ont été rédigées car elles incluait directement tous les mots-clés du concept de pluie, seul celui pour le concept de la glace de mer changeait. Pour Paper Digest en revanche il y a eu 2 étapes car l'application possède 2 fonctionnalités, « Question answering » et « Literature review ». Les huit questions vues précédemment ont été posées chacune à leur tour avec la fonctionnalité

« Question answering », tandis que pour « Literature review » il s'agissait de tourner les questions en phrase type « The impacts of rainfall on sea ice ».

2.4.3 Communications personnelles

Lors de communications personnelles avec l'équipe de recherche, diverses ressources que les membres connaissaient, savaient et/ou pensaient pertinentes, ont été ajoutées. Il s'agit notamment de rapports, tels que ceux du GIEC, qui n'avaient pas été ressortis des résultats à partir des BD, ni même des outils d'IA. Mais également de livres dont les accès sont très restreints.

2.5 Sélection des références

La sélection des références à inclure dans ce travail de revue de type revue de la portée a été effectuée en plusieurs phases.

Tout d'abord, après la réalisation des recherches dans les bases de données et applications d'intelligence artificielle entre le 11 et le 19 mars 2024, plusieurs bibliothèques ont été créées dans l'outil de gestion de références Zotero. Ces bibliothèques ont permis de séparer les références selon leur provenance (BD standards ou applications d'IA), permettant, pour la suite, une visualisation plus claire de la pertinence de l'utilisation de l'IA dans la recherche. Les résultats des recherches ont été exportés sous format RIS afin de pouvoir être importés dans Zotero. Ou alors, avec certaines applications d'IA, il a fallu copier puis coller les DOI un à un. À la suite de l'import, il a été possible de supprimer les doublons. Doublons présents au sein d'une même BD ou applications d'IA, mais également entre les différentes sources de données. À ce stade, les références dites « parasites » ont également été supprimées. Il s'agit de références sans DOI ni URL, ou introuvables sur internet.

La phase du screening a été effectuée en plusieurs étapes directement dans Zotero, à l'aide de marqueurs permettant d'indiquer « *keep* » pour conserver, « *discard* » pour rejeter et « ? » en cas de doute. Cette phase a été réalisée par seulement une personne. Cependant, pour les deux premières étapes, des réunions ont été organisées avec l'équipe de recherche afin de discuter des incertitudes. En cas de doute et/ou de désaccord sur l'inclusion d'une étude, et ce, à chaque étape, l'étude en question a été conservée pour l'étape suivante. Un premier screening a donc été réalisé sur base du titre. Une phase d'étalonnage avec l'équipe de recherche pour cette étape a été faite pour une trentaine d'études afin de s'accorder sur les choix à faire. Ces choix étaient basés selon les critères d'inclusion et d'exclusion précédemment retenus. Puis, un deuxième screening a été fait pour les études ayant été incluses sur base du résumé (si ce dernier était disponible). Ensuite, un troisième screening a été opéré sur base du texte intégral (si celui-ci était disponible en open access ou grâce à la bibliothèque de l'Uliège) à partir, premièrement, d'une recherche de mots-clés. Les mots-clés que les études devaient contenir pour être conservées étaient : *sea ice* et *rain*, *rainfall*, *liquid precipitation* ou *wet*

precipitation. La sélection finale a donc été basée sur la lecture complète des études restantes. Les raisons d'exclusions lors de cette dernière étape ont été indiquées.

2.6 Extraction des données et définition des variables

Les données des études éligibles à la suite de la sélection ont été sauvegardées à l'aide de Zotero, le logiciel de traitement de texte Word, et le logiciel tableur Excel. Le choix des données pertinentes à conserver, et donc l'élaboration du tableau Excel (première table d'extraction des données visible en *Annexe 5*) a été fait en réunion avec l'équipe de recherche. La phase d'extraction des données a été réalisée par une seule personne. Mais encore une fois, toute incertitude a pu être résolue par des discussions régulières en équipe.

Les premières données qui ont été extraites sont celles permettant d'identifier clairement l'étude analysée. À savoir donc, la référence (auteurs, année de publication, et titre) et sa provenance (BD, IA, communication personnelle). Ensuite, des données un peu plus précises telles que la région d'étude, la zone précise, le type de méthode, l'échelle d'années et la période d'étude, ont été choisies. Il a été décidé de catégoriser ces variables de la façon suivante afin de pouvoir plus facilement les comparer.

- Zone d'étude : *Arctic Ocean, Southern Ocean, Global* ou *Other seas*. Puisque la majorité de la glace de mer étant présente en Arctique et Antarctique.
- Régions précises : *Chukchi Sea, Bering Sea, Beaufort Sea, Barents Sea, Siberian Shelf, Central Arctic, Svalbard, Canadian Archipelago, Baffin Bay, Hudson Bay, Ross Sea, Weddell Sea, Amundsen Sea, Bellingshausen Sea, WAP : West Antarctica Peninsula, Pacific Ocean, Indian Ocean*. Soit, le détail des différentes localisations présentant de la glace de mer dans les études.
- Méthodologie : *Remote sensing, Model, Land/sea based instrument, Literature review* ou *Indigenous knowledge*.
- Temporalité : *before 2000, 2000-20210, 2010-2020, 2020-today, today-2050* ou *2050-2100*.
- Période d'étude : *fall, spring, summer, winter* ou *all year*.

Aussi, les données plus centrées par rapport à la question de recherche ont été extraites. Il s'agit des données concernant, le changement de précipitations (par rapport aux tendances générales, mais aussi selon le type de phase : neige ou pluie, ou concernant le changement de phase, les phénomènes de pluie sur neige ou de rivières atmosphériques). Puis il y a toutes les catégories que la pluie peut influencer, définis comme les impacts, avec : le volume de la glace de mer, l'épaisseur de la glace de mer l'étendue de la glace de mer, la couche de neige, la fonte, l'albédo, les échanges de chaleur, la *superimposed ice*, la biologie, la biogéochimie, la densité/conductivité, les bassins de fonte, la *flushing*, les biais en télédétection, la biologie terrestre, les mammifères et oiseaux marins.

Des modifications ont été apportées au cours de l'extraction des données. En effet, il y a eu l'ajout d'impacts qui n'avaient pas été pensés ni répertoriés lors de la phase de sélection comme, les croûtes/lentilles

de glace, le *flooding* avec la glace de neige, ou encore la *slush layer*. Les catégories « biologie » et « biogéochimie » ont été couplées afin de ne former qu'une unique catégorie, « producteurs primaires ». Enfin, il y a aussi eu l'ajout de localisations pour la « zone précise ».

Pour l'extraction des données il a donc été décidé que les études seraient, directement lues dans Zotero, en surlignant directement les phrases contenant des données pertinentes dans le texte. Puis, ces phrases seraient copiées et collées dans un document texte Word, mais également dans la table d'extraction.

Une seconde table d'extraction a été réalisée. Elle reprend le nombre d'études pour une même donnée jugée pertinente, à savoir : la date de publication (avant 2000, entre 2000 et 2010, entre 2010 et 2020, entre 2020 et aujourd'hui), la source (BD, IA, communication personnelle, BD et IA), la localité (Océan Arctique, Océan Austral, zones non polaires), le type de précipitations (précipitations générales, chutes de neige, pluie, événements de pluie sur neige, rivières atmosphériques), et les impacts (volume de la glace de mer et données non définies, épaisseur de la glace de mer, extension de la glace de mer, couche de neige, fonte, albédo, échanges de chaleur, superimposed ice, croûtes et lentilles de glace, densité/conductivité, bassins de fonte, flooding/glace de neige, flushing, slush layer, producteurs primaires, biologie terrestre, mammifères et oiseaux marins, biais en télédétection). Cette seconde table d'extraction est visible dans la partie résultats.

3. Résultats

La partie résultats de ce travail, sera présentée conformément aux directives du protocole PRISMA, de la même manière que la section Méthodologie.

3.1 Sélection des études

Les recherches ont porté d'un côté sur l'identification des études à partir de bases de données et de moteurs de recherche, et de l'autre, sur l'identification des études par d'autres méthodes (incluant notamment les outils d'intelligence artificielle). Les différentes étapes sont détaillées dans le diagramme de flux (*Figure 1*).

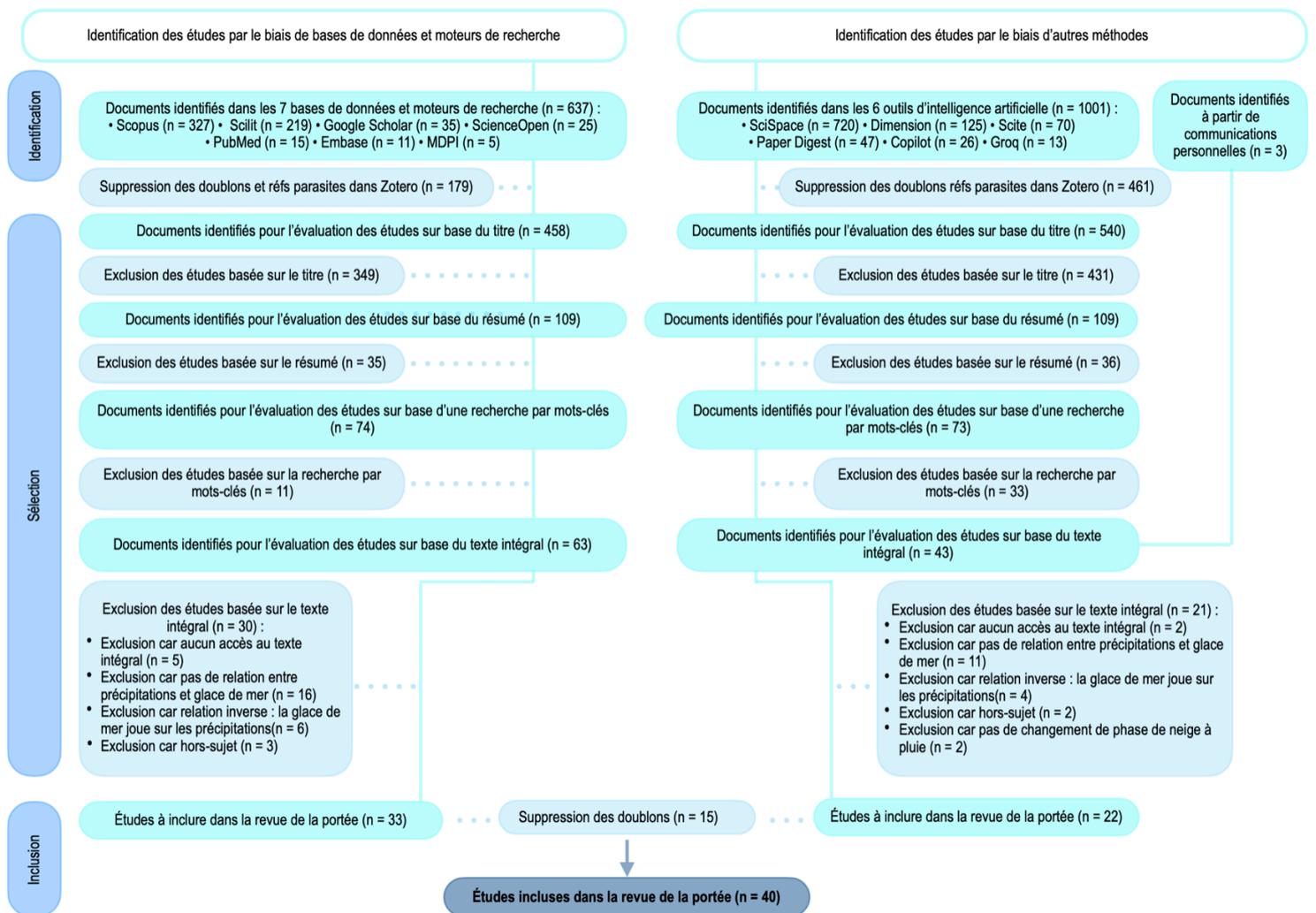


Figure 1. Diagramme de flux de la procédure de sélection des études dans le cadre de la revue de la portée

Les 7 BD et MRoss ont permis d'obtenir 637 résultats. Grâce à l'import des références dans le logiciel Zotero, 179 doublons, voire triplons ont pu être supprimés. Une première sélection des études a été effectuée sur base du titre (selon les critères d'inclusion et d'exclusion mentionnés dans la partie Méthodologie). Il n'est resté que 109 études retenues pour la seconde sélection sur base du résumé, car beaucoup de références non pertinentes sont finalement apparues dans les résultats obtenus. Ensuite, un troisième tri assez rapide a été effectué sur base d'une recherche par mots-clés. Il s'agissait d'une recherche sur les mots dans le texte intégral : *sea ice*, *wet precipitation*, *liquid precipitation*, *rain*, *rainfall*. Au total, 11 études ont été exclues si le mot-clé « sea ice » et un des trois autres portant sur les précipitations n'apparaissait pas. Puis la dernière étape de sélection a été réalisée avec la lecture du texte intégral pour 63 études. Parmi elles, 5 n'étaient pas disponibles en libre accès ou par l'intermédiaire de l'Uliège et ont donc été exclues. Les autres raisons d'exclusion ainsi que le nombre d'études concernées sont reprises dans l'organigramme (Figure 1). Finalement, 33 études étaient à inclure dans la revue de la portée.

L'identification des études par les outils d'IA a permis d'obtenir 1001 résultats. Après la suppression de 461 doublons et/ou triplons grâce au logiciel Zotero, 540 études ont été examinées sur base du titre. La deuxième sélection des 109 études sur base du résumé a ensuite permis de conserver 73 études pour la troisième étape. Cette étape de sélection sur base de la recherche par mots-clés a exclu 33 études, et en laissant 40 à évaluer sur base du texte intégral. Toutefois, 3 études provenant de communications personnelles avec l'équipe de recherche ont été rajoutées à cette étape. La dernière étape de sélection a donc été réalisée pour 43 études, et 21 ont dû être exclues (détail en *Figure 1*).

Suite au regroupement des références des différentes méthodes de recherche, 15 doublons ont été supprimés. Au total, 40 études ont finalement été incluses dans ce travail de revue de la portée.

3.2 Caractéristiques des études incluses

Les données pertinentes de chaque étude incluse dans la revue de la portée ont été placées en *Annexe 5* du fait du nombre élevé d'études incluses et des nombreuses caractéristiques mentionnées. Ces caractéristiques concernent notamment des informations générales comme la référence et sa provenance, des détails sur l'étude en elle-même (localité, zone précise, méthode employée, temporalité et période d'étude), mais aussi toutes les données se rapportant à la question de recherche.

3.3 Synthèse des résultats

3.3.1 Synthèse des informations

Dans un premier temps, plusieurs documents Excel ont été utilisés comme brouillon afin de collecter les informations et évaluer la qualité des différentes études. Les informations recueillies ont ensuite été triées, organisées, structurées et une synthèse des données obtenues a été effectuée, visibles en *Annexes 6 à 28*. Pour ces nouveaux tableaux, une nouvelle variable a été ajoutée : « secteurs ». En effet, pour des raisons de simplification et de synthétisation il a été plus simple de distinguer des secteurs dans chaque Océan (*Annexe 29* pour le détail). Pour la suite de la rédaction, et les futurs tableaux, des abréviations seront utilisés comme suit : pour l'Océan Arctique, il y a 6 secteurs : Secteur Atlantique (SAtlantique), Arctique Central (ACentral), Mer de Beaufort (MBeaufort), Archipel Canadien (ACanadien), Mer de Béring (MBéring) et *Siberian Shelf* (SiberianS)), pour l'Océan Austral il y a 5 secteurs : Mer de Ross (MRoss), Mer de Weddell (MWeddell), Mers de Bellingshausen et d'Amundsen (MBA), Antarctique Est (AEst) et Péninsule Antarctique Ouest (PAOuest) et enfin, pour les autres mers tout a été regroupé dans Zone non polaire (ZNP). Les *Figures 2 à 6* ont été réalisées sur base de ces tableaux pour avoir quelque chose de visuel et donc plus parlant. Ensuite, Le *Tableau 1* qui présente le nombre de référence pour différentes caractéristiques, regroupées selon plusieurs catégories afin de faciliter la mise en évidence des similarités entre les études a été réalisé à partir du Tableau de données intégrales en *Annexes 7*. Puis, les *Tableaux 2 à 6* ont été réalisés à partir des informations regroupées dans les Tableaux en *Annexes 30 à 34* afin de mettre en évidence la tendance des différents impacts.

3.3.2 Les similitudes

D'après le *Tableau 1*, qui rassemble les caractéristiques plus générales des études, sur l'ensemble des études incluses (n = 40), plus de la moitié (n = 21), soit 52,5% ont été publiées entre 2020 et aujourd'hui 12 études (30%) entre 2010 et 2020, 6 études (15%) entre 2000 et 2010, et enfin, une seule étude (2,5%) a été publiée avant les années 2000.

En ce qui concerne leur provenance, 45% (n = 18) sont ressorties des bases de données et moteurs de recherches, alors que seulement 10% (n = 4) proviennent des outils d'intelligence artificielle, et 3 (7,5%) de communications personnelles. Cependant, il y en a quand même 15 qui ont été données par les deux méthodes de recherche (BD et IA), soit 37,5%.

Enfin, concernant la localisation de chaque étude, 90% (n = 36) s'intéressent à l'Océan Arctique, alors que seulement 12,5% (n = 5) mentionnent l'Océan Austral, et 5% (n = 2) concernent une zone non polaire.

Pour ce qui est des caractéristiques plus spécifiques à la question de recherche, soit déjà les différentes précipitations il y a 42,5% des études (n = 17) traitant des précipitations

générales (sans distinction de phase) dont 2 (12%) se rapportent à l'Océan Austral, et 16 (94%) à l'Océan Arctique. 11 études (27,5%) rapportent des tendances pour les chutes de neige, dont 2 (18%) traitent de l'Océan Austral et 10 (91%) de l'Océan Arctique. Les pluies sont étudiées dans 50% des études (n = 20), 90% (n = 18) s'intéressant à l'Océan Arctique, 10% (n = 2) à l'Océan Austral, et 5% (n = 1) à une zone non polaire. 32,5% des études (n = 13) font référence aux événements de pluie sur neige, dont 8% (n = 1) concerne l'Océan Austral et 92% (n = 12) l'Océan Arctique. Les rivières atmosphériques sont évoquées dans 15% des études (n = 6), avec 50% (n = 3) au niveau de l'Océan Austral et 67% (n = 4) au niveau de l'Océan Arctique.

Caractéristique	Catégorie	Nombre d'études (n = 40)
Date de publication	Avant 2000	1
	2000-2010	6
	2010-2020	12
	2020-aujourd'hui	21
Source	Méthodes standards	18
	Intelligence artificielle	4
	Communication personnelle	3
	Méthodes standards et intelligence artificielle	15
Localité	Océan Arctique	36
	Océan Austral	5
	Zones non polaires	2
Précipitations	Précipitations générales	2 Océan Austral (n = 17) 16 Océan Arctique (n = 17)
	Chutes de neige	2 Océan Austral (n = 11) 10 Océan Arctique (n = 11)
	Pluie	1 Zone non polaire (n = 20) 2 Océan Austral (n = 20) 18 Océan Arctique (n = 20)
		1 Océan Austral (n = 13) 12 Océan Arctique (n = 13)
	Pluie sur neige	3 Océan Austral (n = 6) 4 Océan Arctique (n = 6)
	Rivières atmosphériques	17 Océan Arctique
Impacts	<i>Superimposed ice</i>	1 Océan Austral (n = 15) 14 Océan Arctique (n = 15)
	Couche de neige	1 Zone non polaire (n = 13) 2 Océan Austral (n = 13) 11 Océan Arctique (n = 13)
	Fonte	13 Océan Arctique
	Biologie terrestre	1 Zone non polaire (n = 12) 11 Océan Arctique (n = 12)
	Albédo	9 Océan Arctique
	Échanges de chaleur	1 Océan Austral (n = 9) 8 Océan Arctique (n = 9)
	Glace de mer : extension	1 Océan Austral (n = 8) 7 Océan Arctique (n = 8)
	Glace de mer : volume et non défini	5 Océan Arctique
	Croûtes et lentilles de glace	5 Océan Arctique
	Producteurs primaires	5 Océan Arctique
	Biais en télédétection	4 Océan Arctique
	Glace de mer : épaisseur	1 Zone non polaire (n = 4) 3 Océan Arctique (n = 4)
	Densité/conductivité	4 Océan Arctique
	Bassins de fonte	4 Océan Arctique
	Mammifères et oiseaux marins	1 Zone non polaire (n = 3) 2 Océan Arctique (n = 3)
	<i>Flooding</i> et glace de neige	2 Océan Arctique
<i>Flushing</i>	2 Océan Arctique	
<i>Slush layer</i>	1 Zone non polaire	

Tableau 1. Nombre d'étude pour chaque catégorie de caractéristiques étudiées dans la revue de la portée.

En ce qui concerne les impacts de la pluie sur la glace de mer, l'effet le plus fréquemment évoqué est la formation de *superimposed ice*, mentionné dans 42,5 % des études (n = 17). Cet effet est suivi par l'impact sur la couche de neige, rapporté dans 37,5 % des études (n = 15). Les effets sur la fonte et la biologie terrestre sont mentionnés dans 32,5 % des études (n = 13), tandis que les effets sur l'albédo sont rapportés dans 30 % des études (n = 12). Les impacts sur les échanges de chaleur et l'extension de la glace de mer sont étudiés dans 22,5 % des références (n = 9). Ensuite, 20 % des études (n = 8) font état du volume (et des imprécisions de la caractéristique modifiée) de la glace de mer. Les impacts sur les croûtes et lentilles de glace, les producteurs primaires et les biais en télédétection sont rapportés dans 12,5 % des études (n = 5). Les effets sur l'épaisseur de la glace de mer, la densité et la conductivité, les bassins de fonte, ainsi que sur les mammifères et oiseaux marins, sont mentionnés dans 10 % des études (n = 4). Les impacts de la pluie sur le *flooding* et la glace de neige sont relatés dans 7,5 % des études (n = 3). Et enfin, les impacts sur le *flushing* et la *slush layer* sont respectivement mentionnés dans 5 % (n = 2) et 2,5 % (n = 1) des études.

Tous ces impacts sont étudiés en plus grande proportion, voire exclusivement, dans l'Océan Arctique, à l'exception de l'impact sur la *slush layer*, qui concerne uniquement une zone non polaire. Une mention fait également référence à cette zone non polaire pour les impacts suivants : la fonte, l'albédo, la densité et la conductivité, ainsi que le *flooding*. En ce qui concerne l'Océan Austral, seuls 2 études mentionnent l'impact de la pluie sur la fonte, représentant 14 % des études sur cet impact. Par ailleurs, pour les impacts sur la couche de neige, l'extension de la glace de mer et le volume (ainsi que les imprécisions) de la glace de mer, une seule étude mentionne ces impacts dans cette région.

3.3.3 Les tendances

3.3.3.1 Tendances des précipitations et phénomènes météorologiques

Il n'y a pas de distinction précise par rapport aux tendances. Afin de faciliter la visualisation des résultats, les tendances ont été regroupées en deux catégories principales. La première correspondant à une augmentation des précipitations ou des phénomènes associés dans un sens large. C'est-à-dire que cela peut par exemple concerner aussi bien, l'intensité, la fréquence, l'amplification, que l'allongement du paramètre (nombre de jours annuels augmente, la date des premiers événements est plus précoce, ...), etc. La seconde catégorie, à l'inverse, correspond à une diminution des phénomènes observés.

Pour commencer, si l'on regarde à l'échelle annuelle les tendances qui ressortent du *Figure 2*, on peut constater différentes choses.

Pour les précipitations globales, il y a une augmentation dans l'Océan Arctique dans tous les secteurs. Le plus documenté étant le Secteur Atlantique (SAtlantique) avec 11 références. Suivi par l'Arctique Central (ACentral) (n = 9), la Mer de Beaufort (MBeaufort) et la *Siberian Shelf* (SiberianS) (n = 8), puis, la Mer de Béring (MBéring) avec une seule référence. La tendance est la même pour l'Océan Austral, avec une augmentation dans tous les secteurs : Mer de Ross (MRoss), Mer de Weddell (MWeddell), Antarctique Est (AEst), Péninsule

Antarctique Ouest (PAOuest) et Mers de Bellingshausen et d'Amundsen (MBA). La différence réside dans le nombre de références pour chaque secteur variant entre 1 et 2.

Pour les chutes de neige, les tendances sont mitigées. Dans l'Océan Arctique il y a bien une augmentation dans tous les secteurs, toutefois, des diminutions sont aussi prévues dans certaines zones particulières. Dans les secteurs SAtlantique, ACanadien, MBeaufort et SiberianS autant d'études mentionnent une augmentation et une diminution (n = 3), alors que dans les secteurs ACentral et MBéring, la diminution (n = 2) est plus représentée que l'augmentation (n = 1). Dans l'Océan Austral, les chutes de neige ne sont mentionnées que pour le secteur de la PAOuest, avec autant de diminution (n = 1) que d'augmentation (n = 1).

Pour les pluies, comme pour les précipitations, une augmentation est prévue partout dans l'Océan Arctique. Les secteurs SAtlantique et SiberianS sont les plus documentés (n = 8), suivi par ACentral et MBeaufort (n = 7), puis ACanadien (n = 5) et enfin MBéring (n = 3). Dans l'Océan Austral la tendance est similaire avec une augmentation globale. Tous les secteurs sont mentionnés par 2 références, excepté la PAOuest (n = 1).

Concernant les événements de pluie sur neige, il n'y en a mention que dans l'Océan Arctique, avec, comme pour les chutes de neige, des divergences. Une augmentation est prévue dans les secteurs SAtlantique et SiberianS (n = 5), alors qu'en MBéring, les diminutions (n = 2) valent les augmentations (n = 2).

Pour ce qui est des rivières atmosphériques, là encore il n'y en a mention que dans l'Océan Arctique avec des augmentations - prévues dans les secteurs suivants : SAtlantique (n = 2), MBéring, ACanadien, ACentral et SiberianS (n = 1).

Si l'on s'intéresse à chaque saison individuellement, et en commençant par l'automne (Figure 3), on peut voir : une augmentation des précipitations presque partout dans l'Océan Arctique (n = 1 ou 2), excepté en

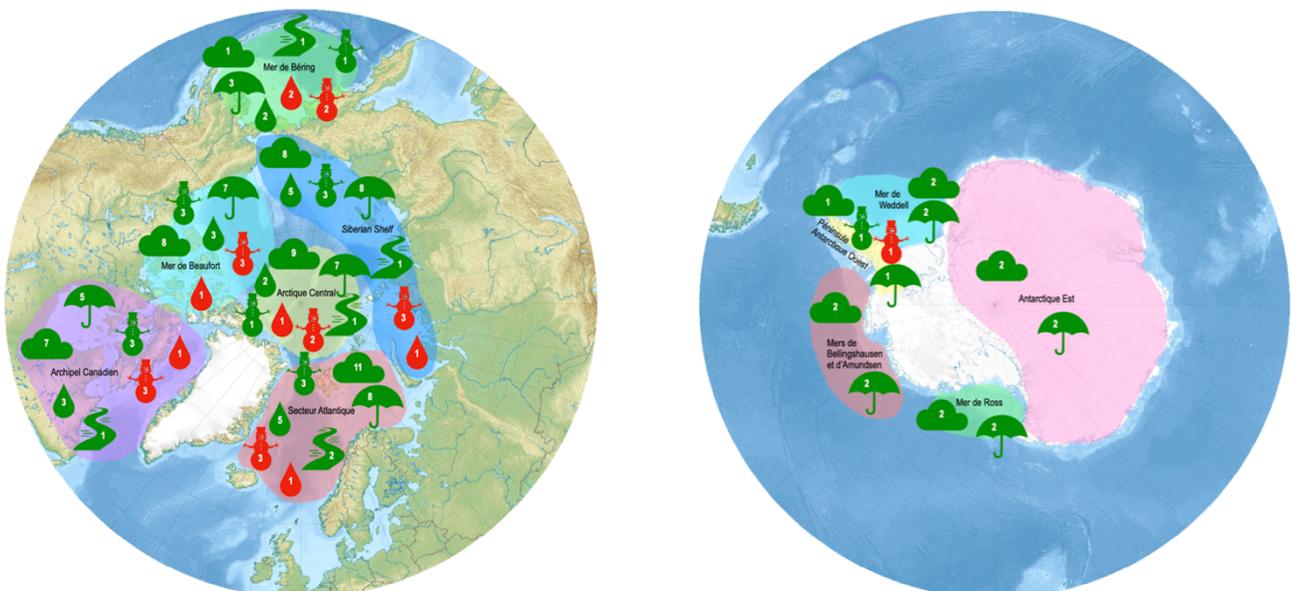


Figure 2. Schémas des deux régions polaires et leurs tendances annuelles en termes de précipitations et phénomènes météorologiques. À droite : l'Antarctique, à gauche : l'Arctique. Les différents types de précipitations sont représentés par des émojis. Les précipitations globales ☁️ ; les chutes de neige ❄️ ; les pluies 🌧️ ; les événements de pluie sur neige 🌨️ ; les rivières atmosphériques 🌫️. Si l'emoji est vert : tendance positive/augmentation ; si l'emoji est rouge : tendance négative/diminution.

MBéring. Pour l'Océan Austral, la seule donnée disponible à cette saison suit cette même tendance dans le secteur AEst (n = 1).

Pour les chutes de neige, il y a une diminution partout, mentionnée plus souvent en ACentral (n = 4), et SATlantique (n = 3), qu'en SiberianS et MBeaufort (n = 2), ou ACanadien et MBéring (n = 1).

En revanche, les pluies augmentent globalement : en MBeaufort et ACanadien (n = 7), SATlantique et SiberianS (n = 6), ACentral (n = 5) et en MBéring (n = 3).

Les évènements de pluie sur neige, eux, ont une tendance mitigée selon les secteurs. Il y a une augmentation (n = 1) et diminution (n = 1) en SATlantique ; une diminution en MBéring (n = 1) et une augmentation (n = 1) en ACanadien.

Pour suivre le cycle saisonnier, en hiver (*Figure 4*), les précipitations dans l'Océan Arctique vont augmenter dans tous les secteurs, excepté en MBéring. Les secteurs les plus mentionnés pour cette tendance sont l'ACentral et SiberianS (n = 4), le SATlantique et MBeaufort (n = 3) et enfin l'ACanadien (n = 1). Dans

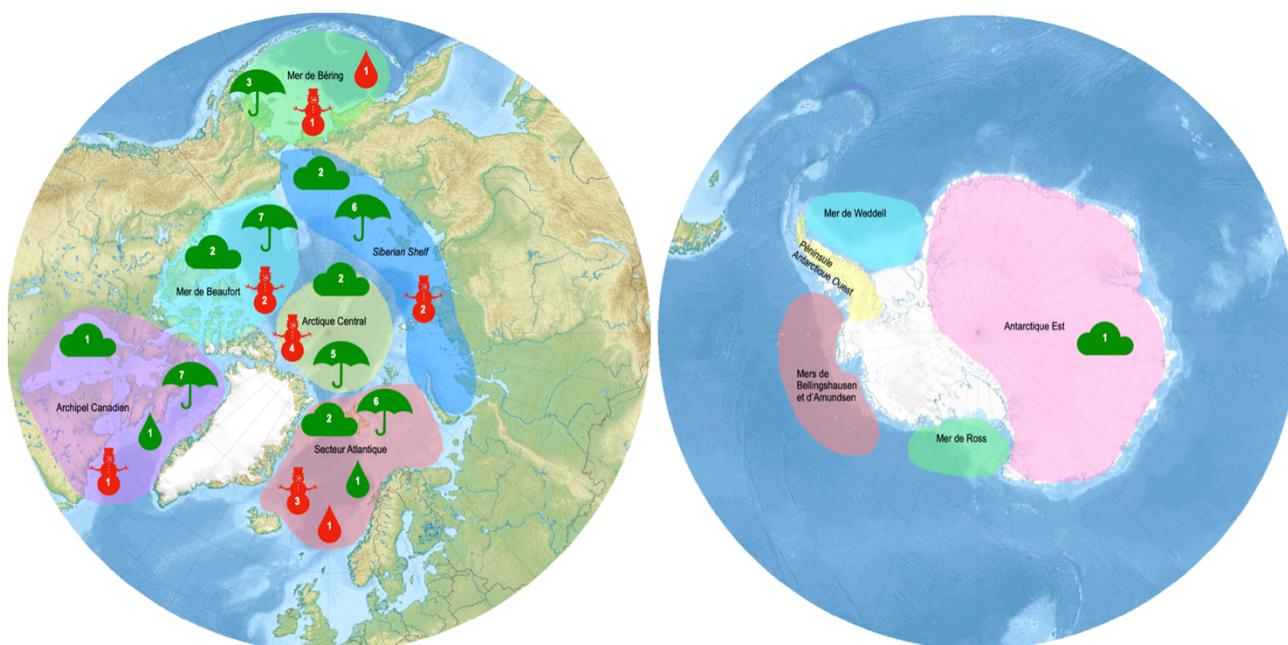


Figure 3. Schémas des deux régions polaires et leurs tendances automnales en termes de précipitations et phénomènes météorologiques. À droite : l'Antarctique, à gauche : l'Arctique. Les différents types de précipitations sont représentés par des emojis. Les précipitations globales ☁ ; les chutes de neige : ❄ ; les pluies : 🌧 ; les évènements de pluie sur neige : 🌧❄ ; les rivières atmosphériques : 🌩. Si l'emoji est vert : tendance positive/augmentation ; si l'emoji est rouge : tendance négative/diminution.

l'Océan Austral, comme en automne, la seule donnée disponible concerne l'augmentation des précipitations dans l'AEst (n = 1).

Les chutes de neige augmentent globalement dans l'Océan Arctique, notamment dans l'ACentral (n = 4). Les pluies connaissent la même tendance, particulièrement dans le SATlantique (n = 7), en SiberianS et ACentral (n = 5), suivi par MBeaufort (n = 4), l'ACanadien (n = 3) et la MBéring (n = 2).

En ce qui concerne les évènements de pluie sur neige, comme en automne, les tendances sont mitigées selon les secteurs. Il y a une diminution de ces évènements en MBéring (n = 1), une augmentation en SiberianS, MBeaufort et ACanadien (n = 1), et c'est mitigé en SATlantique car il y a augmentation (n = 2), et diminution (n = 1).

En revanche, pour les rivières atmosphériques, seule une augmentation est observée dans les secteurs SiberianS et ACentral (n = 1).

Au printemps (*Figure 5*), seul l'Océan Arctique fait état de tendances mentionnées. Pour les précipitations, il y a une augmentation en SiberianS, ACentral (n = 3), en MBeaufort (n = 2), et en ACanadien et SATlantique (n = 1).

Pour les chutes de neige, les deux seules tendances correspondent à une augmentation en ACentral

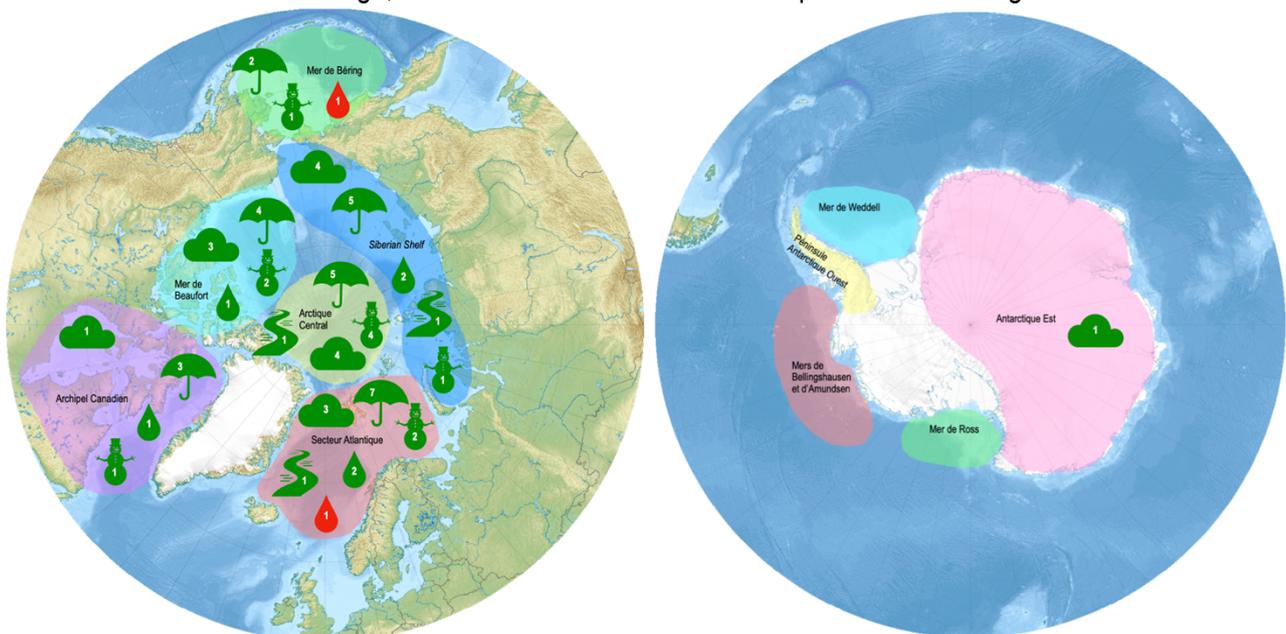


Figure 4. Schémas des deux régions polaires et leurs tendances hivernales en termes de précipitations et phénomènes météorologiques. À droite : l'Antarctique, à gauche : l'Arctique. Les différents types de précipitations sont représentés par des emojis. Les précipitations globales ☁ ; les chutes de neige : ❄️ ; les pluies : 🌧️ ; les évènements de pluie sur neige : 🌨️ ; les rivières atmosphériques : 🌊. Si l'emoji est vert : tendance positive/augmentation ; si l'emoji est rouge : tendance négative/diminution.

(n = 1), et au contraire, une diminution en SATlantique (n = 1).

Pour les pluies, il y a une augmentation générale dans tous les secteurs Arctiques, notamment en SiberianS (n = 5), puis en SAtlantique, ACanadien, MBeaufort (n = 4), et en MBéring (n = 1).

Les événements de pluie sur neige augmentent en SiberianS (n = 3), SAtlantique (n = 2), ACanadien, MBeaufort et ACentral (n = 1). Les rivières atmosphériques sont une fois de plus peu mentionnées, mais suivent la même tendance que les phénomènes de pluie sur neige avec une augmentation dans les secteurs SiberianS, ACentral et SAtlantique (n = 1).

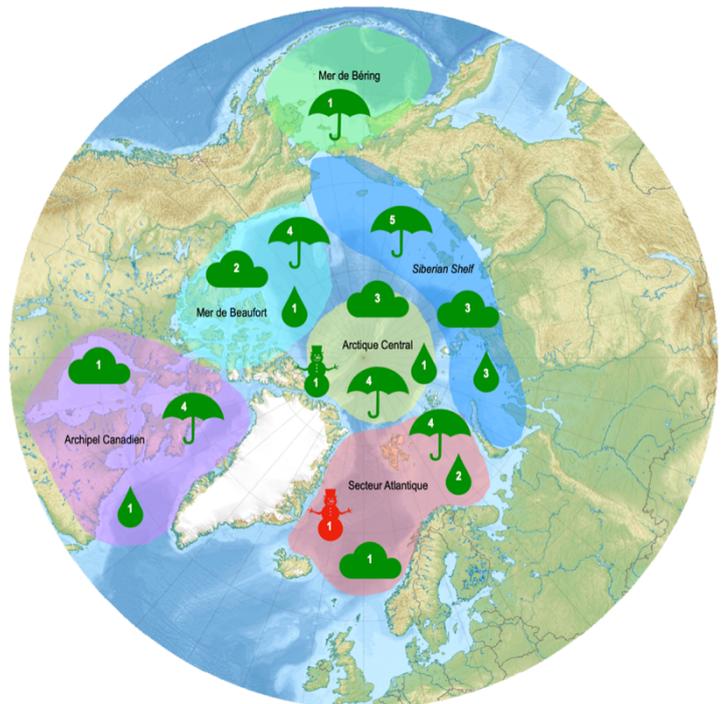


Figure 5. Schémas de la région Arctique et ses tendances printanières en termes de précipitations et phénomènes météorologiques. Les différents types de précipitations sont représentés par des emojis. Les précipitations globales ☁ ; les chutes de neige ❄ ; les pluies ☔ ; les événements de pluie sur neige 🌧 ; les rivières atmosphériques 🌊. Si l'emoji est vert : tendance positive/augmentation ; si l'emoji est rouge : tendance négative/diminution.

Pour terminer, en été, dans l'Océan Arctique (Figure 6) uniquement, il y a une augmentation des précipitations partout : ACentral (n = 3), SiberianS, MBeaufort, ACanadien, SAtlantique (n = 2) et MBéring (n = 1).

Les chutes de neige ont une tendance à la baisse générale en ACentral et SAtlantique (n = 5), MBeaufort et SiberianS (n = 3), ACanadien (n = 2) et MBéring (n = 1).

Au contraire des pluies qui augmentent partout, le secteur le plus renseigné étant MBeaufort (n = 7), vient ensuite SAtlantique, SiberianS et ACanadien (n = 6), ACentral (n = 4) et MBéring (n = 3) pour finir.

Enfin, les événements de pluie sur neige augmentent dans 4 secteurs : SAtlantique, SiberianS, MBeaufort et ACanadien (n = 1).

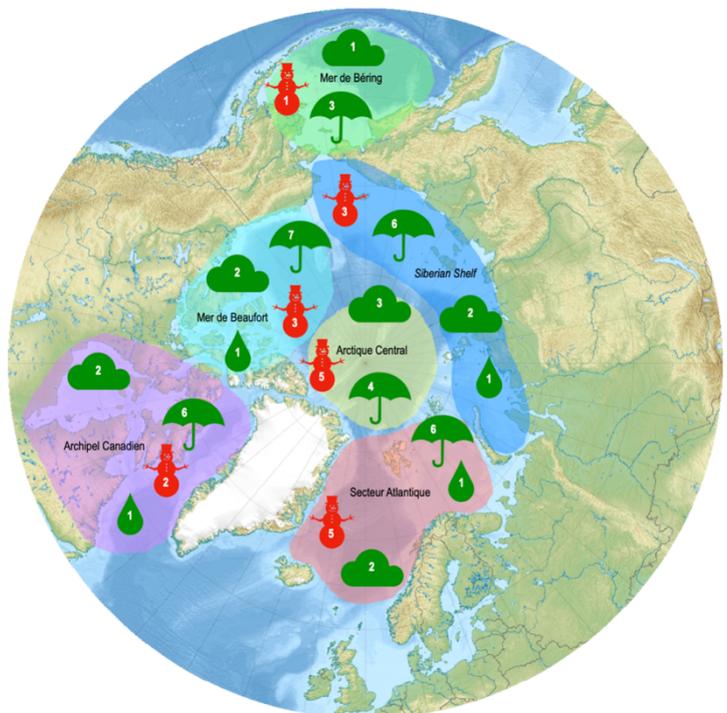


Figure 6. Schémas de la région Arctique et ses tendances estivales en termes de précipitations et phénomènes météorologiques. Les différents types de précipitations sont représentés par des emojis. Les précipitations globales ☁ ; les chutes de neige ❄ ; les pluies ☔ ; les événements de pluie sur neige 🌧 ; les rivières atmosphériques 🌊. Si l'emoji est vert : tendance positive/augmentation ; si l'emoji est rouge : tendance négative/diminution.

3.3.3.2 Tendances des impacts de la pluie sur la glace de mer

À l'instar des précipitations, aucune distinction précise n'a été établie concernant les tendances observées. Étant donné la diversité des paramètres considérés, il a été décidé de regrouper les tendances en deux catégories. La première catégorie correspond à une augmentation du paramètre et/ou à un effet positif de la pluie sur celui-ci. Cela inclut, par exemple, l'augmentation de l'épaisseur de la glace, la formation de couches de *superimposed ice*, l'augmentation de l'aire de répartition de certaines espèces, etc. La seconde catégorie, en revanche, regroupe les tendances de diminution du paramètre et/ou les effets négatifs de la pluie sur ce dernier, tels que, par exemple, la réduction de l'épaisseur de la glace, l'encapsulation des végétaux par de la glace, la diminution de certaines populations.

Pour commencer, si l'on regarde à l'échelle annuelle les tendances qui ressortent du *Tableau 2*, on peut constater différentes choses.

Déjà, il y a des variations au niveau des impacts que la pluie va avoir sur la glace de mer. Dans l'Océan Arctique, le volume (et les paramètres non définis clairement), vont suivre une tendance mitigée. Il y a en effet, autant d'augmentation (n = 1), que de diminution (n = 1) dans les secteurs SAtlantique, SiberianS, MBeaufort et ACentral. En revanche, dans ACanadien, il y a une augmentation (n = 1) du volume de la glace de mer, alors qu'en MBéring il y a une diminution (n = 1).

Concernant l'impact de la pluie sur l'extension de la glace de mer, tout tend à une diminution, que ce soit dans l'Océan Arctique (secteurs SiberianS, MBeaufort, ACanadien (n = 1) et SAtlantique, ACentral (n = 2)), que dans l'Océan Austral (secteurs MRoss, MWeddell, MBA et AEst (n = 1)).

En revanche, pour l'épaisseur de la glace de mer, la pluie a un impact différent qui amène à une augmentation du paramètre dans presque tous les secteurs de l'Océan Arctique (SAtlantique, SiberianS, ACanadien, ACentral, MBeaufort (n = 1)).

La pluie a aussi des effets d'augmentation sur la période annuelle, sur les paramètres suivants : la fonte, la *superimposed ice*, les croûtes et lentilles de glace, le *flooding* et la glace de neige, les échanges de chaleur, la densité/conductivité et le *flushing*.

L'impact sur la fonte est en augmentation dans tous les secteurs de l'Océan Arctique (SAtlantique, ACentral (n = 5), SiberianS, MBeaufort (n = 4), ACanadien (n = 3) et MBéring (n = 2)), et de l'Océan Austral (MWeddell, PAOuest, MBA, MRoss et AEst (n = 1)).

L'impact sur la *superimposed ice* est aussi en augmentation mais seulement dans les secteurs de l'Océan Arctique (SAtlantique, ACanadien (n = 6), SiberianS, MBeaufort, ACentral (n = 5) et MBéring (n = 2)) ; tout comme l'impact sur le *flooding* et la glace de neige (SAtlantique, SiberianS, MBeaufort, ACentral, ACanadien (n = 2) et MBéring (n = 1)). Les impacts sur les croûtes et les lentilles de glace, les échanges de chaleur ainsi que la densité et conductivité sont en augmentation presque partout dans l'Océan Arctique, excepté en MBéring, avec des mentions comprises entre 2 et 1 pour les croûtes et les lentilles de glace, entre 3 et 2 pour les échanges

de chaleur et 1 seule référence pour la densité et conductivité. Enfin, une augmentation est visible pour le flushing mais seulement dans les secteurs SAtlantique, SiberianS et ACentral (n = 1).

À contrario, les impacts de la pluie amenant vers une tendance négative sont : la couche de neige, la biologie terrestre, l'albédo, les biais en télédétection et les producteurs primaires. L'impact négatif sur la couche de neige est visible partout dans l'Océan Arctique (SAtlantique (n = 6), SiberianS, ACentral (n = 5), MBéring, MBeaufort (n = 4) et ACanadien (n = 3)), et aussi dans l'Océan Austral au niveau des secteurs MWeddell, PAOuest, MBA, MRoss et AEst (n = 1). La biologie terrestre est également impactée négativement partout par la pluie, au niveau de l'Océan Arctique (SAtlantique, SiberianS (n = 6), MBeaufort (n = 5), MBéring, ACentral (n = 4) et ACanadien (n = 3)). Les diminutions concernant l'albédo et les biais en télédétection sont localisés au niveau de l'Océan Arctique dans les secteurs SAtlantique, ACentral (n = 4 : albédo, n = 3 : biais), SiberianS (n = 3 : albédo, n = 2 : biais), MBeaufort, ACanadien (n = 3 : albédo, n = 3 : biais). Enfin, pour les producteurs primaires, la tendance négative se produire au niveau des secteurs SAtlantique (n = 2) et SiberianS (n = 1).

Impact / Localisation	Océan Arctique						Océan Austral					Autres mers ZNP
	SAtlantique	SiberianS	MBéring	MBeaufort	ACanadien	ACentral	MWeddell	PAOuest	MBA	MRoss	AEst	
Glace de mer : volume et non défini	↑ (1) ↓ (1)	↑ (1) ↓ (1)	↓ (1)	↑ (1) ↓ (1)	↑ (1)	↑ (1) ↓ (1)	-	-	-	-	-	-
Glace de mer : extension	↓ (2)	↓ (1)	↓ (1)	-	↓ (1)	↓ (2)	↓ (1)	-	↓ (1)	↓ (1)	↓ (1)	-
Glace de mer : épaisseur	↑ (1)	↑ (1)	-	↑ (1)	↑ (1)	↑ (1)	-	-	-	-	-	-
Fonte	↑ (5)	↑ (4)	↑ (2)	↑ (4)	↑ (3)	↑ (5)	↑ (1)	↑ (1)	↑ (1)	↑ (1)	↑ (1)	-
Superimposed ice	↑ (6)	↑ (5)	↑ (2)	↑ (5)	↑ (6)	↑ (5)	-	-	-	-	-	-
Croutes et lentilles de glace	↑ (2)	↑ (2)	-	↑ (1)	↑ (1)	↑ (2)	-	-	-	-	-	-
Flooding et glace de neige	↑ (2)	↑ (2)	↑ (1)	↑ (2)	↑ (2)	↑ (2)	-	-	-	-	-	-
Couche de neige	↓ (6)	↓ (5)	↓ (4)	↓ (4)	↓ (3)	↓ (5)	↓ (1)	-	↓ (1)	↓ (1)	↓ (1)	-
Échanges de chaleur	↑ (3)	↑ (2)	-	↑ (2)	↑ (2)	↑ (2)	-	-	-	-	-	-
Densité/conductivité	↑ (1)	↑ (1)	-	↑ (1)	↑ (1)	↑ (1)	-	-	-	-	-	-
Albédo	↓ (4)	↓ (3)	-	↓ (3)	↓ (3)	↓ (4)	-	-	-	-	-	-
Flushing	↑ (1)	↑ (1)	-	-	-	↑ (1)	-	-	-	-	-	-
Producteurs primaires	↓ (2)	↓ (1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biologie terrestre	↓ (6)	↓ (6)	↓ (4)	↓ (5)	↓ (3)	↓ (4)	-	-	-	-	-	-
Biais en télédétection	↓ (3)	↓ (3)	-	↓ (2)	↓ (2)	↓ (3)	-	-	-	-	-	-

Tableau 2. Résumé des tendances annuelles dans les différentes régions polaires, et non polaire. ↑ : augmentation/positive ou ↓ : diminution/négative de l'impact de la pluie sur chaque impacts, avec mention du nombre de références entre parenthèses

Si comme pour les précipitations, on s'intéresse à chaque saison, en commençant toujours par l'automne (Tableau 3), on peut voir qu'il n'y a que 5 impacts qui ressortent lors de cette saison, et tous, sont mentionnés dans chaque secteur par une seule référence.

Le volume de la glace de mer est un peu particulier comme impact puisqu'il a sa tendance qui augmente dans l'Océan Arctique (SAtlantique, SiberianS, ACanadien, ACentral), alors qu'il diminue dans l'Océan Austral (MWeddell, MBA, MRoss et AEst). L'extension de la glace de mer suit la même tendance que le volume de cette dernière dans l'Océan Arctique (SAtlantique, SiberianS, MBeaufort, ACanadien et ACentral).

Il y a également une mention d'augmentation des échanges de chaleur et de la superimposed ice en ACanadien. Tandis qu'en ACentral, il y a l'augmentation des bassins de fonte.

En hiver (*Tableau 4*), il y a 15 impacts mentionnés, ce qui en fait la saison avec la plus grande variété

Impact / Localisation	Océan Arctique						Océan Austral					Autres mers ZNP
	SAtlantique	SiberianS	MBéring	MBeaufort	ACanadien	ACentral	MWeddell	PAOuest	MBA	MRoss	AEst	
Glace de mer : volume et non défini	↑ (1)	↑ (1)	-	-	↑ (1)	↑ (1)	↓ (1)	-	↓ (1)	↓ (1)	↓ (1)	-
Glace de mer : extension	↑ (1)	↑ (1)	-	↑ (1)	↑ (1)	↑ (1)	-	-	-	-	-	-
Superimposed ice	-	-	-	-	↑ (1)	-	-	-	-	-	-	-
Échanges de chaleur	-	-	-	-	↑ (1)	-	-	-	-	-	-	-
Bassins de fonte	-	-	-	-	-	↑ (1)	-	-	-	-	-	-

Tableau 3. Résumé des tendances automnales dans les différentes régions polaires, et non polaire. ↑ : augmentation/positive ou ↓ : diminution/négative de l'impact de la pluie sur chaque impacts, avec mention du nombre de références entre parenthèses

de paramètres influencés par la pluie, au même titre que la période annuelle.

Concernant le volume de la glace de mer, il y a une seule augmentation en SAtlantique (n = 1). La tendance générale pour cet impact tend vers une baisse globale dans l'Océan Arctique : SAtlantique, SiberianS, MBéring, ACanadien, Acentral (n = 1), mais aussi dans l'Océan Austral : MWeddell, MBA, MRoss et AEst (n = 1). Pour l'extension de la glace de mer, il y a une diminution en SiberianS et MBeaufort (n = 1), ainsi qu'une tendance mitigée en SAtlantique (augmentation et diminution présentes (n = 1)). Pour l'épaisseur de la glace de mer en revanche, il y a une hausse presque partout : SAtlantique (n = 2), SiberianS, MBeaufort, ACentral et ACanadien (n = 1).

Les autres impacts tendant vers une augmentation sont : la fonte, la *superimposed ice*, les croûtes et lentilles de glace, le *flooding* et la glace de neige, la *slush layer*, les échanges de chaleur ainsi que les bassins de fonte.

La *superimposed ice* connaît une augmentation partout dans l'Océan Arctique : SAtlantique (n = 6), SiberianS (n = 5), MBéring, MBeaufort, ACentral (n = 2) et ACanadien (n = 1), ainsi que dans une zone non polaire (n = 1). Les échanges de chaleur sont eux aussi en augmentation dans presque tout l'Océan Arctique (SAtlantique, SiberianS (n = 2), ACentral, ACanadien, MBeaufort (n = 1)). Les croûtes et les lentilles de glace augmentent dans une zone non polaire d'une autre mer, mais aussi dans les secteurs SAtlantique, SiberianS et MBeaufort (n = 1) de l'Océan Arctique. Les bassins de fonte sont en augmentation en SiberianS (n = 1), de même que la fonte (n = 1), qui elle augmente également dans une zone non polaire (n = 1). Il y a cette fois-ci des impacts qui augmentent exclusivement en zone non polaire comme le *flooding* (n = 1) et la *slush layer* (n = 1).

Pour les impacts de la pluie qui vont tendre à diminuer en hiver, on retrouve : la couche de neige, l'albédo, les producteurs primaires, les mammifères et oiseaux marins et, la biologie terrestre. En effet, il y a une diminution de la couche de neige dans une zone non polaire (n = 1). L'albédo diminue également mais dans l'Océan Arctique, en SiberianS (n = 1), et il y a aussi une tendance à la baisse pour les producteurs primaires en SAtlantique (n = 1).

Les mammifères et oiseaux marins tendent à diminuer presque partout dans l'Océan Arctique (SAtlantique, SiberianS, MBeaufort, ACentral, ACanadien (n = 1)), toutefois, en ACanadien, la tendance reste mitigée avec une augmentation (n = 1). Enfin, la biologie terrestre tend elle aussi à diminuer partout dans l'Océan Arctique : SAtlantique (n = 5), SiberianS, MBeaufort, ACanadien (n = 2), MBéring et ACentral (n = 1), malgré le fait qu'une augmentation soit mentionnée en SiberianS (n = 1).

Le printemps (*Tableau 5*) est la deuxième saison, avec la période annuelle, durant laquelle le plus

Impact / Localisation	Océan Arctique						Océan Austral					Autres mers ZNP
	SAtlantique	SiberianS	MBéring	MBeaufort	ACanadien	ACentral	MWeddell	PAOuest	MBA	MRoss	AEst	
Glace de mer : volume et non défini	↑ (1) ↓ (1)	↓ (1)	↓ (1)	-	↓ (1)	↓ (1)	↓ (1)	-	↓ (1)	↓ (1)	↓ (1)	-
Glace de mer : extension	↑ (1) ↓ (1)	↓ (1)	-	↓ (1)	-	-	-	-	-	-	-	-
Glace de mer : épaisseur	↑ (2)	↑ (1)	-	↑ (1)	↑ (1)	↑ (1)	-	-	-	-	-	-
Fonte	-	↑ (1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	↑ (1)
Superimposed ice	↑ (6)	↑ (5)	↑ (2)	↑ (2)	↑ (1)	↑ (2)	-	-	-	-	-	↑ (1)
Croûtes et lentilles de glace	↑ (1)	↑ (1)	-	↑ (1)	-	-	-	-	-	-	-	↑ (1)
Flooding et glace de neige	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	↑ (1)
Slush layer	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	↑ (1)
Couche de neige	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	↓ (1)
Échanges de chaleur	↑ (2)	↑ (2)	-	↑ (1)	↑ (1)	↑ (1)	-	-	-	-	-	-
Albédo	-	↓ (1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bassins de fonte	-	↑ (1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Producteurs primaires	↓ (1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mammifères et oiseaux marins	↓ (1)	↓ (1)	-	↓ (1)	↑ (1) ↓ (3)	↓ (1)	-	-	-	-	-	-
Biologie terrestre	↓ (5)	↑ (1) ↓ (2)	↓ (1)	↓ (2)	↓ (2)	↓ (1)	-	-	-	-	-	-

Tableau 4. Résumé des tendances hivernales dans les différentes régions polaires, et non polaire. ↑ : augmentation/positive ou ↓ : diminution/négative de l'impact de la pluie sur chaque impacts, avec mention du nombre de références entre parenthèses

d'impacts différents sont mentionnés avec un total de 14 paramètres.

Pour le volume de la glace de mer, la tendance est à la hausse uniquement en SAtlantique (n = 1). De même, l'épaisseur suit la même tendance mais dans presque tous les secteurs : SAtlantique (n = 2), SiberianS, MBeaufort, ACanadien, ACentral (n = 1). En revanche, pour l'extension de la glace de mer, il y a une diminution en SiberianS et SAtlantique (n = 1), avec toutefois une tendance mitigée en SAtlantique, du fait d'une augmentation également présente (n = 1).

Les différents impacts connaissant une augmentation sont : la fonte, la *superimposed ice*, les croûtes et lentilles de glace, les échanges de chaleur et les bassins de fonte.

La fonte connaît une augmentation dans tout l'Océan Arctique : SiberianS, MBeaufort (n = 3), SiberianS, ACanadien (n = 2), MBéring, ACentral (n = 1), ainsi que dans une zone non polaire (n = 1). Les bassins de fonte suivent la même tendance dans tous les secteurs de l'Océan Arctique également : SiberianS (n = 3), SAtlantique, MBeaufort, ACanadien (n = 2), MBéring et ACentral (n = 1). Les échanges de chaleur sont presque en augmentation partout dans l'Océan Arctique (exception faite du secteur MBéring), avec les secteurs : SiberianS (n = 3), SAtlantique, MBeaufort, ACanadien (n = 2), et ACentral (n = 1). En revanche, la *superimposed*

ice ne connaît une tendance à la hausse au printemps qu'en SiberianS et ACanadien (n = 1). Un peu de la même manière, les croûtes et lentilles de glace ainsi que le *flushing* ne connaissent une augmentation qu'en ACanadien (n=1).

Les producteurs primaires ont une tendance mitigée avec autant d'augmentation (n = 1), que de diminution (n = 1).

Et pour les impacts connaissant une diminution, il y a : la couche de neige, l'albédo, les mammifères et oiseaux marins, ainsi que les biais en télédétection.

En effet, l'albédo va connaître une diminution presque partout en Océan Arctique : ACanadien (n = 3), MBeaufort, SiberianS (n = 2), SAtlantique, ACentral (n = 1), ainsi que dans une zone non polaire (n = 1). Les mammifères et oiseaux marins eux, connaissent aussi une diminution mais seulement en Océan Arctique avec : ACanadien (n = 3), SiberianS, SAtlantique, MBeaufort, ACentral (n = 2). Tandis que la couche de neige connaît le même sort mais dans les secteurs suivants : ACanadien (n = 3), SiberianS (n = 2), SAtlantique, ACentral (n = 1). Pour ce qui est des biais en télédétection, ils sont présents dans les secteurs MBeaufort et ACanadien (n = 1).

Pour terminer, en été (*Tableau 6*), 9 impacts sont mentionnés avec chacun un nombre de référence

Impact / Localisation	Océan Arctique						Océan Austral					Autres mers ZNP
	SAtlantique	SiberianS	MBéring	MBeaufort	ACanadien	ACentral	MWeddell	PAOuest	MBA	MRoss	AEst	
Glace de mer : volume et non défini	↑ (1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Glace de mer : extension	↑ (1) ↓ (1)	↓ (1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Glace de mer : épaisseur	↑ (2)	↑ (1)	-	↑ (1)	↑ (1)	↑ (1)	-	-	-	-	-	-
Fonte	↑ (2)	↑ (3)	↑ (1)	↑ (3)	↑ (2)	↑ (1)	-	-	-	-	-	↑ (1)
<i>Superimposed ice</i>	-	↑ (1)	-	-	↑ (1)	-	-	-	-	-	-	-
Croûtes et lentilles de glace	-	-	-	-	↑ (1)	-	-	-	-	-	-	-
Couche de neige	↓ (1)	↓ (2)	-	-	↓ (3)	↓ (1)	-	-	-	-	-	-
Échanges de chaleur	↑ (2)	↑ (3)	-	↑ (2)	↑ (2)	↑ (1)	-	-	-	-	-	-
Albédo	↓ (1)	↓ (2)	-	↓ (2)	↓ (3)	↓ (1)	-	-	-	-	-	↓ (1)
Bassins de fonte	↑ (2)	↑ (3)	↑ (1)	↑ (2)	↑ (2)	↑ (1)	-	-	-	-	-	-
<i>Flushing</i>	-	-	-	-	↑ (1)	-	-	-	-	-	-	-
Producteurs primaires	-	-	-	-	↑ (1) ↓ (1)	-	-	-	-	-	-	-
Mammifères et oiseaux marins	↓ (2)	↓ (2)	-	↓ (2)	↓ (3)	↓ (2)	-	-	-	-	-	-
Biais en télédétection	-	-	-	↓ (1)	↓ (1)	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 5. Résumé des tendances printanières dans les différentes régions polaires, et non polaire. ↑ : augmentation/positive ou ↓ : diminution/négative de l'impact de la pluie sur chaque impacts, avec mention du nombre de références entre parenthèses

allant de 1 à 2.

On retrouve pour cette saison, les paramètres liés à la glace de mer (volume, extension et épaisseur) suivant la même tendance : une diminution. En effet, tout est similaire dans les secteurs SAtlantique, SiberianS, MBeaufort, ACanadien et ACentral de l'Océan Arctique.

Toujours avec la même tendance à la baisse et dans les mêmes secteurs, on retrouve l'albédo. Mais il y a aussi la couche de neige qui tend à une diminution lors de l'été en ACentral. Et enfin, en MBeaufort il y a la présence de biais en télédétection.

Les bassins de fonte vont au contraire augmenter dans tous les secteurs de l'Océan Arctique. Et pour finir, la fonte et les échanges de chaleur vont augmenter tous deux dans les secteurs suivants de l'Océan Arctique : SAtlantique, SiberianS, MBeaufort, ACanadien.

Impact / Localisation	Océan Arctique						Océan Austral					Autres mers ZNP
	SAtlantique	SiberianS	MBéring	MBeaufort	ACanadien	ACentral	MWeddell	PAOuest	MBA	MRoss	AEst	
Glace de mer : volume et non défini	↓ (2)	↓ (2)	-	↓ (2)	↓ (2)	↓ (2)	-	-	-	-	-	-
Glace de mer : extension	↓ (3)	↓ (2)	-	↓ (1)	↓ (1)	↓ (1)	-	-	-	-	-	-
Glace de mer : épaisseur	↓ (1)	↓ (1)	-	↓ (1)	↓ (1)	↓ (1)	-	-	-	-	-	-
Fonte	↑ (1)	↑ (1)	-	↑ (2)	↑ (1)	-	-	-	-	-	-	-
Couche de neige	-	-	-	-	-	↓ (1)	-	-	-	-	-	-
Échanges de chaleur	↑ (2)	↑ (2)	-	↑ (2)	↑ (2)	-	-	-	-	-	-	-
Albédo	↓ (1)	↓ (1)	-	↓ (2)	↓ (1)	↓ (1)	-	-	-	-	-	-
Bassins de fonte	↑ (2)	↑ (2)	↑ (1)	↑ (2)	↑ (2)	↑ (1)	-	-	-	-	-	-
Biais en télédétection	-	-	-	↓ (1)	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 6. Résumé des tendances estivales dans les différentes régions polaires, et non polaire. ↑ : augmentation/positive ou ↓ : diminution/négative de l'impact de la pluie sur chaque impacts, avec mention du nombre de références entre parenthèses

4. Discussion

4.1 Interprétation des résultats

4.1.1 Caractéristiques générales

40 études publiées entre 1993 et 2023 ont été recensées dans le cadre de cette revue de la portée. Avant les années 2000, une seule étude avait été publiée. Cependant, le nombre de publications a progressivement augmenté. Entre 2000 et 2010, 6 études ont été publiées, avec un doublement entre 2010 et 2020. Et cette tendance s'est encore accélérée davantage après 2020, avec plus de la moitié des études, soit 21, publiées au cours des trois dernières années seulement. L'importance sur le fait de comprendre les dynamiques de la glace de mer face au réchauffement climatique en intégrant l'impact des précipitations sur cet environnement, semble donc réellement augmenter.

Les résultats mettent en évidence un déséquilibre flagrant dans l'attention portée aux différents environnements polaires. En effet, 90% des études incluses se concentrent sur l'Océan Arctique, alors que seulement 12,5% des études s'intéressent à l'Océan Austral. Ce déséquilibre montre un manque d'attention envers cette zone polaire pourtant cruciale dans les systèmes climatiques mondiaux. Cependant, les impacts

de la pluie sur la glace de mer sont encore moins explorés dans des contextes non polaires, puisque seulement 5% des études se focalisent sur des zones non polaires, alors que ce sont les régions touchées en premier et qu'elles pourraient donner des indications pour les changements à venir en Arctique et dans l'Océan Austral. Cela peut toutefois signifier, que c'est une au contraire une thématique en émergence et qu'il s'agit du début des investigations.

4.1.2 Les précipitations

Les recherches sur les précipitations dans l'Océan Arctique montrent une évolution marquée du climat (Descamps et al., 2017), avec une augmentation majeure des précipitations moyennes entre 1970 et 2019, estimées à un taux annuel de 9% (Drinkwater et al., 2021). Cette augmentation est principalement attribuée à une plus grande teneur en humidité de l'air transporté dans l'Arctique, ainsi qu'à l'évaporation accrue due à des températures plus élevées et à l'expansion des zones d'eau libres de glace (Bintanja et Andry, 2017). Toutefois, la variabilité spatiale demeure importante dans cette région, comme le souligne notamment Descamps et al. (2017), illustrant la complexité du changement climatique dans l'Arctique.

En effet, les secteurs les plus étudiés sont ceux de l'Arctique Central, le Secteur Atlantique, la *Siberian Shelf* et la Mer de Beaufort, ensuite, pour les précipitations générales, il y a beaucoup moins d'informations disponibles. Un grand nombre d'informations est disponible pour les tendances annuelles, et hivernales notamment, car, les augmentations prévues des précipitations au cours du 21^e siècle se produisent particulièrement pendant la saison froide (septembre – janvier) (GIEC, 2021 ; Blunden et al., 2023 ; Pauling et Bitz, 2021). Différents paramètres voyant une augmentation de leur tendance sont à prendre en compte. Il s'agit notamment de l'augmentation d'environ 10% des précipitations annuelles totales de l'augmentation de la fréquence des précipitations, de l'augmentation de leur intensité quotidienne, du nombre de jours de fortes précipitations sur l'année notamment (Blunden et al., 2023 ; Walsh et al., 2020). Il est d'ailleurs important de noter que l'augmentation simulée des précipitations dans l'Arctique varie fortement, d'un facteur trois à quatre, selon les modèles. Cela souligne donc l'incertitude et la complexité des projections climatiques pour cette région. Donc, conformément aux prévisions du CMIP6, projetant un réchauffement plus élevé par rapport au CMIP5, l'augmentation des précipitations attendues est également plus importante.

En contraste, l'Océan Austral reçoit beaucoup moins d'attention, avec seulement deux études consacrées aux précipitations dans cette région. Cette disparité s'explique certainement par l'incertitude quant à l'impact du réchauffement climatique en dehors de la Péninsule Antarctique, là où, les effets sont plus nets. Car en effet, dans les autres secteurs, et il y a de ça encore quelques années seulement, la glace de mer augmentait encore légèrement, rendant donc le changement climatique moins évident et les recherches liées moins essentielles. À long terme cependant, cela va pourtant bien augmenter car par exemple, d'après le rapport

GIEC de 2021, une augmentation significative des précipitations est attendue d'ici la fin du 21^e siècle dans tous les scénarios d'émissions utilisés dans CMIP5 et CMIP6. Mais ce n'est donc pas choquant de n'avoir que peu d'informations et modifications sur la période 2000 – 2020. Les augmentations projetées voient la plus forte augmentation relative des précipitations au niveau de la côte de l'Antarctique Ouest et de la Péninsule Antarctique occidentale. En revanche, une diminution des précipitations est attendue dans les Océans Pacifique et Indien en hiver (Boisvert et al., 2020).

Avec le réchauffement climatique et l'augmentation des précipitations générales, des phénomènes comme les rivières atmosphériques devraient devenir plus fréquents. En effet, étant des phénomènes météorologiques dépendants de la température ambiante et de la région, pour la phase des précipitations qu'ils contiennent. Une augmentation des précipitations semble donc bien corrélées. Ces dernières années, une augmentation de la fréquence de ces phénomènes a d'ailleurs été observée en Arctique (Overland, 2022 ; Shang et al., 2023). De même, en Antarctique, un record de précipitations (sous forme majeure de neige) a eu lieu en 2022, et lié à des rivières atmosphériques (GIEC, 2021). Comme pour les précipitations générales, les périodes au cours desquelles ces phénomènes sont le plus mentionnés sont l'hiver et à l'année.

Le réchauffement climatique dans l'Océan Arctique montre une tendance vers un réchauffement de la surface qui est plus prononcé que la moyenne mondiale et qui continuera de s'intensifier au cours de ce siècle (GIEC, 2021). Ce réchauffement est accompagné d'une intensification du cycle de l'eau, engendrant une augmentation des précipitations moyennes, mais avec un changement notable dans la nature de ces précipitations (Pauling et Bitz, 2021 ; Theresa et al., 2004).

Les tendances pour les chutes de neige sont les plus variées. En effet, elles montrent des augmentations dans certains secteurs durant certaines saisons, tandis que, des diminutions sont observées dans d'autres endroits, à d'autres moments. En effet, au cours des dernières décennies il y a eu une diminution de la fréquence des chutes de neige (GIEC, 2021). Cependant, d'après les résultats obtenus, annuellement, les tendances sont assez mitigées dans certains secteurs. Il y a bien une augmentation durant l'hiver dans des secteurs comme l'Arctique Central car l'environnement est encore assez froid pour permettre ce type de précipitations. Mais une diminution des chutes de neige est visible et attendue durant l'été et l'automne, (notamment en Secteur Atlantique). En effet, il y a une diminution de la fréquence des chutes de neige extrêmes pour les climats les plus chauds étant donné que de températures négatives sont retrouvées moins fréquemment (Walsh et al., 2020). Dans l'Océan Austral en revanche, l'augmentation des chutes de neige est prévue dans tous les scénarios d'émissions, à l'exception toutefois de la partie nord et centrale de la Péninsule Antarctique Ouest (GIEC, 2021).

Il est quand même de plus en plus probable que les précipitations se présentent sous forme de pluie plutôt que de neige. Screen et Simmonds (2012) ont d'ailleurs observé une baisse des chutes de neige presque entièrement due à ce changement de phase. Plus de 99% de la diminution des chutes de neige estivales est d'ailleurs liée au réchauffement de l'Arctique au cours des deux dernières décennies. L'intensification du cycle hydrologique dans cette région se traduit donc par moins de neige et davantage de pluie (Drinkwater et al., 2021). D'après les observations et les modélisations, il y a un changement de phase attendu de la neige pour de la pluie à des altitudes plus élevées (GIEC, 2021). Depuis les années 1970 il y a déjà une arrivée plus précoce des premières pluies printanières, une tendance encore plus prononcée depuis le début des années 2000 (avec presque 27 jours/décennies⁻¹ entre 2000 et 2015) (Dou et al., 2019 et 2022). Il y a donc l'augmentation de la période de pluies printanières avec cette transition neige-pluie plus précoce, mais aussi, une transition pluie-neige plus tardive en automne (Vihma et al., 2016). Les pluies sont donc prévues, d'ici la fin du siècle pour être la forme dominante de précipitations dans l'Arctique (GIEC, 2021). En effet, tout est corrélé, une augmentation des précipitations générales avec une diminution des chutes de neige, laisse forcément place à l'augmentation des précipitations sous forme de pluie. Les deux dernières intercomparaisons de modèles CMIP (CMIP5 et CMIP6), montrent d'ailleurs bien cette tendance pour la fin du siècle (2100), avec une augmentation de 422% des pluies pour CMIP6 en hiver, par rapport à l'année 2000. Les valeurs pour les autres saisons sont les suivantes : 261 % au printemps, 71 % en été et 268 % en automne (McCrystall et al., 2021). Mais l'augmentation de ces précipitations liquides peut se faire de différentes façons. Il peut s'agir de l'augmentation de la quantité de pluie (notamment au cours de la dernières décennies), de la durée, de la fréquence, ou encore de l'intensité des épisodes de pluie (Bintanja et Andry, 2017 ; Dou et al., 2019 et 2022 ; Theresa et al., 2004 ; Serreze et al., 2021). Il y a aussi une augmentation plus importante des jours de pluie (allant jusqu'à 12 jours/mois durant les saisons froides, d'octobre à mai), d'ici la fin du siècle, par rapport à la période 2006-2015 (Dou et al., 2022).

Le renforcement du cycle de l'eau a lieu dans les deux régions polaires, alors même si l'Océan Austral est moins étudié, entre 2000 et 2016, il a également connu une augmentation de l'ampleur des événements pluvieux. Des augmentations des pluies sont donc aussi attendues à l'avenir dans cette région. Dans tous les scénarios d'émissions, l'augmentation la plus marquée se situe au niveau des zones côtières de la partie Nord et Centrale de la Péninsule Antarctique Ouest (Boisvert et al., 2020).

Avec cette augmentation globale des précipitations liquides dans les deux régions polaires, les événements de pluie sur neige devraient devenir plus fréquents. En effet, à haute altitude ces événements augmentent car les chutes de neige sont remplacées par de la pluie. En revanche, à basse altitude, ce phénomène tend à diminuer en raison de la réduction de la couverture neigeuse (nécessaire à sa définition)

(GIEC, 2021). Les secteurs avec le plus d'informations concernant ces événements sont le Secteur Atlantique et la *Siberian Shelf*, et plus particulièrement au cours de l'année complète, l'hiver et le printemps.

4.1.3 Les impacts de la pluie sur la glace de mer

Les impacts de la pluie sur la glace de mer, à l'instar des précipitations, varient également selon les périodes et les secteurs. Toutefois, dans un souci de simplicité et de concision, ce sont les principales tendances qui vont être analysées.

Le volume, l'épaisseur et l'extension de la glace de mer sont 3 paramètres bien distincts qui sont impactés différemment par la pluie. En effet, le volume de la glace de mer tend globalement à diminuer, notamment en été, où la fonte de la neige provoquée par la pluie va exposer la glace à des conditions plus chaudes, réduisant sa protection, mais aussi, ralentir le processus de croissance ou de reconstruction saisonnier de la glace (Shang et al., 2023). En automne cependant, le volume peut augmenter en partie grâce à l'inondation et au regel de la couche de neige (Pauling et Bitz., 2021). Concernant l'épaisseur, on observe majoritairement une augmentation, notamment durant les saisons froides, due au gel de la pluie dans une atmosphère encore froide, ce qui épaissit la glace de mer (Pauling et Bitz., 2021). À l'inverse, en été, la fonte de la neige entraîne sa diminution. Enfin, pour l'extension de la glace de mer, la tendance est à une diminution par la pluie. Les précipitations liquides vont en fait réduire l'albédo de surface de la neige et/ou de la glace, amplifiant ainsi le réchauffement de surface (Bintanja et Andry, 2017). Toutefois, durant l'automne, les pluies peuvent favoriser l'extension de la glace en augmentant sa superficie (Pauling et Bitz., 2021).

Au niveau de l'Océan Arctique, les précipitations (pluies, chutes de neige), vont contribuer de manière significative à l'apport d'eau douce dans les océans. En plus de la fonte et des chutes de neige, les pluies (au niveau des fjords principalement) vont avoir un impact important sur la formation de la glace de mer si celles-ci tombent sur le continent et sont rejetés, via les rivières et ruisseaux, dans l'océan. En effet, de cette façon cela crée un panache d'eau douce, et donc une colonne d'eau plus stratifiée près des exutoires des rivières, cela va inhiber le transport vertical de chaleur des profondeurs, vers la surface, et favoriser la formation de la glace. Aussi, les chutes de neige vont participer à la formation de la glace en refroidissant la surface et permettant la formation en l'ensemencant, mais quand il y a une fine couche de glace, la neige va ralentir la formation de la glace en l'isolant par le haut, et aussi, permettre une fonte plus importante par le bas. Le processus dominant dans le déclenchement le plus efficace de la formation de la glace n'est pas encore très clair et établi (neige directement à la surface, ou les pluies tombant sur le continent et s'écoulant par la suite dans l'océan) (O'Sadnick et al., 2020 ; Haid et al., 2017). Pour l'Océan Austral, les apports d'eau douce des précipitations entraînent également le rafraichissement de la surface de l'océan, engendrant une plus forte stratification de la colonne d'eau, une réduction du transfert vertical de chaleur océanique, un refroidissement de la surface, et donc, une

augmentation de la couverture de glace (Boisvert et al., 2020). Cette augmentation d'apport d'eau douce par la pluie peut résulter en une rétroaction négative avec l'accroissement de la stratification des couches supérieures des océans (Stendel et al., 2008).

La pluie pouvant favoriser la croissance de la glace de mer, il est intéressant de commencer par la période de croissance de cette glace, à savoir, durant la saison froide. À cette période, les précipitations liquides vont donc favoriser l'augmentation de l'épaisseur de la glace de mer. Ce processus vient notamment de la création de nouvelles couches de glace.

En effet, les événements de pluie sur neige hivernaux peuvent générer des couches de glace à la surface, ou, dans, le manteau neigeux. À la suite de ces événements, de l'eau va s'écouler plus ou moins profondément dans le manteau neigeux, ce qui fait fondre la neige avec les conditions chaudes et humides des pluies, mais cette dernière pourra regeler par la suite et former ces nouvelles couches de glaces, appelées *superimposed ice* (Dou et al., 2019 ; Bintanja et Andry, 2017 ; Lannuzel et al., 2020 ; Serreze et al., 2021 ; Langlois et al., 2017 ; Stroeve et al., 2022 ; Vihma et al., 2016). D'autres sortes de glace pouvant se former sont les croûtes et les lentilles de glace. Toujours après des pluies suivies de basses températures, ou des pluies verglaçantes sur un manteau neigeux, ces structures de glace vont pouvoir se former à la surface ou dans le manteau neigeux (Serreze et al., 2021). Ces couches de glace se trouvent dans la neige en toutes saisons, aussi bien en Arctique, qu'en Antarctique, mais elles sont plus fréquentes dans l'Océan Austral (Thomas, 2017).

Cette saison froide semble donc idéale pour une conservation de la glace de mer si de la pluie peut permettre de l'accroître, notamment dans le contexte du réchauffement climatique actuel. Il semblerait intéressant que le phénomène de *flooding* se produise. C'est-à-dire, que la glace de mer soit abaissée, à un point, où, l'eau de l'océan viendrait la submerger de façon à « l'inonder » et permettre ensuite un regel de cette grande quantité d'eau infiltrant le manteau neigeux, en glace (appelée glace de neige) (Thomas, 2017 ; Saloranta, 2000). Ce processus est donc appelé *flooding*. Cela reste un phénomène relativement peu étudié ici. Il est assez complexe du fait que selon la période, les conséquences sur la glace de mer ne seront pas les mêmes. Mais avec l'augmentation des pluies et la diminution des chutes de neige, la réduction du manteau neigeux (notamment au début de l'hiver) entrainera une diminution de la surface sur laquelle la neige peut s'accumuler, ce qui augmente la conductivité thermique effective dans la couche de neige et de glace, et augmente la croissance basale. En revanche, en été, une diminution de l'albédo de surface serait créée, ce qui augmenterait la fonte estivale (Pauling et Bitz, 2021). Cependant, les chutes de neige sont plus à même de conduire à du *flooding* (leur poids plus important abaisse la couche de glace et la fait descendre au niveau de la mer), alors, avec plus de pluie, le *flooding* devrait diminuer, à moins que la pluie ne remplace l'eau de l'océan.

La pénétration de l'eau de pluie, de fonte et/ou des « inondations », sont les principaux processus de formation des couches de neige fondantes appelée plutôt *slush layer*. L'eau s'infiltré dans le manteau neigeux et contribue à la formation de ce type de neige. La formation de cette neige fondante ayant pour origine la pluie se produit notamment en avril (Saloranta, 2000). La nature de la neige va vraiment être modifiée. Principalement par le sel qui remonte de la glace de mer vers la neige, donnant une neige qui sera salée. Cet impact de la pluie n'a cependant pas été mentionné pour l'Océan Arctique ou Austral, une seule mention en a fait été en hiver, dans une zone non polaire, où la pluie a augmenté cette *slush layer*.

Alors, même si les pluies peuvent augmenter l'épaisseur de la glace de mer, elles semblent pour autant majoritairement impacter négativement son état, et donc conduire potentiellement à sa fonte. Annuellement, la pluie augmente la fonte de la glace de mers globalement, que ce soit dans l'Océan Arctique, ou dans Océan Austral. En effet, les pluies vont déclencher, la fonte de la glace de mer (Dou et al., 2019, 2021, 2022 ; Kwok et al., 2003). Comme les premières pluies se produisent plus tôt, la fonte sera également plus précoce (Dou et al., 2022). Il y a également une amplification et un renforcement de l'effet de fonte engendré par les pluies (Bintajn et Andry., 2017 ; Shang et al., 2022, Vihma et al., 2016), mais aussi une accélération et un prolongement de la fonte de la glace puisque la pluie va retarder le gel (Dou et al., 2022 ; Galindo et al., 2014 ; Theresa et al., 2004 ; Schreiber et Serreze, 2020).

Cela amène donc maintenant à s'intéresser à la période de décroissance de la glace de mer se situant principalement durant les saisons chaudes (avril – septembre). À ces périodes, le volume va plutôt avoir tendance à augmenter, tandis que l'extension connaît une diminution, et l'épaisseur continue d'augmenter au printemps, mais diminue bel et bien en été.

Il est toutefois observé que les effets de la pluie sur la glace de mer partent d'abord du manteau neigeux. Avec ses propriétés et interactions physiques, la neige est un élément primordial du système glace de mer (Thomas, 2017). La pluie, couplée à un réchauffement extrême va favoriser le manque de couverture neigeuse en toutes saisons, mais il y a une tout de même une grande variabilité régionale (GIEC, 2019 ; Walsh et al., 2020 ; Webster et al., 2022 ; Bintanja et Andry, 2017 ; McCrystall et al., 2021). Cependant, les effets sont tout à fait différents selon la période à laquelle sa disparition se produit. Au début de la saison de croissance, l'amincissement du manteau neigeux va diminuer l'effet isolant de la glace de mer et augmenter sa croissance en augmentant la conductivité thermique effective (Pauling et Bitz., 2021). Parallèlement, la présence du manteau neigeux permet de préserver la glace de mer en limitant justement sa fonte, s'il s'agit de la période de décroissance (période de fonte) (Screen et Simmonds, 2012). Au contraire, au printemps ou en été, si elle a fondu, la couverture neigeuse va laisser la glace exposée aux rayons du soleil et donc être vulnérable à la fonte. Cela est dû notamment à l'albédo élevé de la neige, qui fait d'elle un super isolant thermique par unité

d'épaisseur, mais aussi, grâce à ses capacités de chaleur spécifique et latente très élevées lui permettant d'amortir la température de la glace (Thomas, 2017 ; Dingman, 2015).

Les échanges de chaleur sont donc fondamentaux dans tous ce processus entourant la glace de mer et la pluie. Plusieurs choses modulent les flux de chaleur. Le manteau neigeux, étant très poreux c'est un très bon isolant. La glace, en revanche n'a pas une conductance thermique optimale. Enfin, la pluie elle, va apporter de la chaleur seule dans un premier temps, et altérer le manteau neigeux. Annuellement, la pluie va donc favoriser les échanges de chaleur. En fait, la pluie peut influencer le bilan thermique du manteau neigeux en s'infiltrant à travers la neige et en regelant, elle va donc libérer de la chaleur latente vers la neige. Ce qui modifie alors le bilan énergétique et conduit à la phase de réchauffement du manteau neigeux. L'énergie restante est utilisée pour faire fondre davantage la neige, allant jusqu'à la phase dite de « *ripening* », ou ce que l'on appellerait la « gadoue » (Hansen et al., 2014 ; Grenfell et Putkonen, 2008 ; Schreiber et Serreze, 2020 ; Dou et al., 2019, 2021).

Des paramètres influencés par les échanges de chaleur mais qui sont peu étudiés sont la conductivité et la densité. Annuellement, la pluie augmente ces paramètres pour presque tous les secteurs de l'Océan Arctique, mais aucune autre mention pour les autres saisons et/ou secteurs. En fait, lorsque de la pluie tombe sur la neige froide et va se geler à l'intérieur, la densité va augmenter dans les couches proches de la surface (Liston et al., 2020), de même que la conductivité.

Un impact de la pluie primordial et lié également aux échanges de chaleur est l'albédo. En effet, l'albédo permet de réduire l'absorption d'énergie et donc diminuer la fonte des glaces, son effet est primordial en été, lorsque l'insolation est la plus élevée (Screen et Simmonds, 2012). Que ce soit l'albédo de la glace de mer ou du manteau neigeux, tous deux permettent de réfléchir la plus grande partie du rayonnement solaire incident en été grâce à leur albédo élevé (Landrum et Holland, 2020). Cependant, avec la pluie, il y a irrémédiablement une modification de l'albédo de la couverture neigeuse. De plus, il s'agit d'une diminution irréversible en raison des métamorphoses du manteau neigeux (Schreiber et Serreze, 2020 ; Ehn et al., 2006 ; Vihma et al., 2016 ; Bintanja et Andry, 2017 ; Dou et al., 2021 ; Zayvalov, 2020). La pluie peut diminuer l'albédo de surface de 0,1 environ en quelques heures, ce qui est bien plus rapide que lors d'un processus de réchauffement ou de fusion progressive de la glace (Dou et al., 2019).

Les précipitations liquides, des températures au-dessus du point de congélation, la fonte du manteau neigeux et la diminution de l'albédo vont pouvoir conduire à la formation de bassins de fonte (Lannuzel et al., 2020 ; Dou et al., 2022). Le manteau neigeux, en diminuant avec les pluies va permettre dans certaines conditions la formation de ces bassins, Cependant, une fois qu'ils sont formés, les conditions pluvieuses vont

également favoriser le drainage de ces bassins (par des failles ou des canaux de saumure) en réduisant la neige et « ouvrant » les bassins au fil du temps, avec la fonte de la glace (Webster et al., 2022). La formation plus précoce de ces bassins de fonte qui sont courants dans l'Océan Arctique a même été observée (Webster et al., 2022 ; Dou et al., 2019). La présence de ces bassins va d'ailleurs modifier la répartition du rayonnement solaire avec, une diminution de la réflexion ainsi qu'une augmentation de l'absorption et de la transmission à la glace de mer (Webster et al., 2022). Ces formations tendent à augmenter dans l'Océan Arctique avec l'augmentation de la pluie, que ce soit en automne, en hiver, ou en été.

À contrario, un phénomène plus répandu dans l'Océan Austral est la fonte par le bas de la glace de mer. Étant donné que les principaux flux de chaleur viennent directement des mélanges des courants océaniques, la fonte dans cette zone polaire a plutôt tendance à se produire par le dessous. Avec la force hydrostatique, pendant un processus de fonte par le bas, la glace de mer va monter. La pression hydrostatique va donc passer par canaux de saumure, ce que l'on nomme « *flushing* ». Ces canaux de saumure proviennent du sel des océans, qui, lors de la formation de la glace de mer, s'est accumulé dans des sortes de poches, ou canaux remplis d'eau très salée ne pouvant donc pas geler. Plus ces pores sont gros, plus l'eau va s'écouler rapidement. En revanche, s'ils sont petits, et que l'eau douce descend dans une glace encore froide alors ça va se geler (Polashenski et al., 2012). Toutefois, ce phénomène se produit également dans l'Océan Arctique puisque c'est notamment là-bas qu'il est mentionné annuellement dans plusieurs secteurs (Secteur Atlantique, *Siberian Shelf* et Arctique Central).

Quand de l'eau douce, provenant par exemple des précipitations liquides se trouvent à la surface, cela pousse les canaux de saumure dans lesquelles se trouvent la chlorophylle A qui flotte, ce qui va entraîner son expulsion. La pluie favorise donc une diminution des producteurs primaires. Il faut en effet savoir qu'un des premiers prédictors de la production primaire dans la glace est la faiblesse de la couche de neige. Cependant, Galindo et al. (2014) sont arrivés à la conclusion inverse. En effet, c'est contre intuitif car il serait attendu d'avoir une diminution de la biomasse avec une diminution de la couverture de neige à la suite de pluie. Cependant, il y a l'effet de *flushing* rentrant en jeu, et comme il s'agit ici d'un résultat correspond à une seule observation, il faut être prudent et ne pas nécessairement prendre cela pour une généralité.

Concernant d'autres producteurs primaires, les événements de pluie sur neige sont couramment réputés pour créer du stress sur la végétation à cause de leur emprisonnement dans des couches de glace (Serreze et al., 2021 ; Descamps et al., 2017 ; Hansen et al., 2014).

En allant à quelques niveaux trophiques supérieurs, il y a des observations qui tendent globalement à une diminution des mammifères et des oiseaux marins en hiver et au printemps, même si quelques données montrent une augmentation. En effet, il est facile d'imaginer qu'avec tous les impacts négatifs qu'engendrent la pluie sur la glace de mer, des espèces telles que le phoque annelé (*Phoca hispida*) puissent voir leur habitat se

réduire. Selon Hezel et al. (2012), d'après les modèles du CMIP5, la superficie moyenne de l'aire de reproduction de cette espèce de phoque au nord de 70°N devrait diminuer de près de 70% au total au cours de ce siècle. D'autres effets négatifs pèsent sur les populations de grands mammifères (l'ours polaire – *Ursus maritimus* inclus) avec une augmentation des pluies. Il s'agit notamment de l'effondrement des tanières, pouvant tuer les petits, les exposer aux prédateurs (pour les phoques), ou simplement l'hypothermie par exposition aux conditions météorologiques auxquelles ils ne sont pas encore préparés (Serreze et al., 2021 ; Ferguson, 2005 ; Stirling et Derocher, 1993). Les prédateurs comme l'ours polaire ou le renard arctique (*Alopex lagopus*) bénéficieraient cependant durant un certain temps d'une source d'alimentation plus abondante et disponible, mais cela ne durerait qu'un temps et deviendrait une boucle négative pour toutes les populations (Stirling et Derocher, 1993).

Toutefois, même si l'intérêt de départ est la glace de mer, les populations d'animaux terrestres sont également très impactées par les pluies car elles dépendent pour beaucoup du manteau neigeux. Annuellement, ce sont donc des impacts négatifs sur les populations qui sont visibles. En revanche, il peut y avoir quelques exceptions de tendances positives.

Les nombreuses tendances négatives concernent majoritairement les populations de grands herbivores (rennes – *Rangifer tarandus*, bœufs musqués – *Ovibos moschatus*, etc). Les événements de pluie sur neige vont créer des couches de *superimposed ice* au sol qui vont encapsuler la végétation et donc créer principalement des famines catastrophiques avec la limitation de capacité à se nourrir à cause de cette barrière de glace. L'exemple le plus connu étant celui de 2003 lors duquel un événement de pluie sur neige intense a provoqué la mort de plus de 20000 bœufs musqués (GIEC, 2021 ; Grenfell et Putkonen, 2008 ; Serreze et al., 2021 ; Descamps et al., 2017 ; Berger et al., 2018 ; Langlois et al., 2017 ; Walsh et al., 2020 ; McCrystall et al., 2021 ; Bintanja et Andry, 2017 ; Hansen et al., 2014 ; Bartsch et al., 2023). Des modifications de comportement sont toutefois possibles, par exemples, certaines espèces très mobiles peuvent modifier leur aire de répartition pour un accès à des zones dégagées de glace (Walsh et al., 2020). Tandis que d'autres vont aller chercher une nourriture disponible différente avec par exemple des algues échouées sur la glace de mer (Hansen et Aanes, 2012). Contre-intuitivement, les précipitations liquides hivernales peuvent en revanche réduire le manteau neigeux, facilitant ainsi l'accès et les coûts métaboliques pour la recherche de nourriture (Berger et al., 2018).

Cependant, la transition vers un Arctique plus chaud et humide a parfois quelques gagnants. Certaines populations d'oiseaux migrateurs ont pu augmenter grâce à l'étendue de leur aire de répartition avec la diminution de la couverture de neige, et un allongement de la période favorable à la reproduction et nidification (McCrystall et al., 2021 ; Descamps et al., 2017).

Pour terminer, les biais en télédétection sont des impacts que la pluie engendre un peu particuliers, car, leur présence signifie forcément une tendance négative. Un biais est par définition quelque chose que l'on ne recherche pas. Les biais sont principalement documentés au printemps et en été. Il s'agit notamment de la perturbation des procédures de détection liées à l'humidité, la fonte de la surface, à la vapeur d'eau, l'eau liquide des nuages, etc. Les différents signaux peuvent être retardés à cause de cette « eau » sur l'émissivité de la surface aux longueurs d'onde micro-ondes passives, pouvant ensuite affecter les calculs. Tout comme les effets météorologiques peuvent aussi influencer les récupérations (Kwok et al., 2003 ; Schreiber et Serreze, 2020 ; Stroeve et al., 2022). Mais il s'agit aussi du fait qu'il y a de nombreuses lacunes dans les impacts de la pluie sur la neige, notamment à propos de la détection de l'eau liquide, des différents événements, etc (Serreze et al., 2021).

4.1.4 Difficultés

Différentes difficultés ont été rencontrés concernant l'analyse des études. Il s'agit notamment de celles mentionnant des changements sur les précipitations totales en associant cela à une augmentation de la température et de l'humidité, mais sans pour autant détailler quoi que ce soit, et donc identifié probablement comme de la pluie (exemple de Kirbus et al., 2023). En effet, un tas de processus vont avec une augmentation de la température ambiante et de l'humidité, et donc avec une augmentation des précipitations, et vraisemblablement, de la pluie. Comme par exemple, les rivières atmosphériques, *les Warm and moist Air Intrusions* (WAI), etc. Toutefois, comme aucune distinction claire et précise n'est faite concernant la phase (solide ou liquide) de précipitation, il n'est pas possible de connaître les effets propres à chacune (neige ou pluie), et ce même si des mesures sont disponibles.

Pour les rivières atmosphériques il faut tenir compte du fait de la grande dépendance régionale et vis-à-vis de la température ambiante. Car, même si de l'air est défini comme chaud et humide, et que l'on s'attend à de la pluie, des précisions sont nécessaires pour ne commettre aucune erreur avec une mauvaise interprétation.

Une autre difficulté à prendre en compte réside également dans le changement de phase, puisque cela se produit à un moment « brutal », en lien avec l'augmentation de la température. Ce n'est pas quelque chose de linéaire et donc facilement anticipable.

Et enfin, le plus perturbant correspond à l'ensemble des effets à prendre en compte. Le fait qu'il y ait plusieurs paramètres en parallèles, dépendants de différents facteurs, mais aussi parfois des processus un peu inattendus comme avec l'apport d'eau douce en provenance des continents pouvant jouer un rôle plus important qu'avec un apport direct en surface.

4.2 Biais et limites

4.2.1 Des études incluses

À propos des limites des études incluses, la principale limitation concerne les difficultés de captation des mesures. Les données sur les précipitations sont encore rares (Stendel et al., 2008). Mais principalement, elles ne sont pas vraiment fiables dans des environnements polaires car il est compliqué de mesurer précisément la proportion des précipitations solides par rapport à celles sous forme liquide (Descamps et al., 2017).

De ce fait, et par les biais également engendré par la pluie sur les moyens de télédétection, certains phénomènes sont peu renseignés et mal compris (exemple des évènements de pluie sur neige avec leur fréquence et répartition, les rivières atmosphériques et leur proportion de neige et/ou pluie). Le manque de stations météorologiques et la difficulté à la captation et différenciation du type de précipitations conduisent à ces manquements (Grenfell et Putkonen, 2018 ; Serreze et al., 2021).

Il n'y a pas eu d'études mentionnant à proprement parler d'effets sur la biogéochimie en lien direct avec la pluie. Pourtant, le retrait de la glace de mer va conduire à une boucle positive. En effet, son retrait va libérer des gaz à effet de serre, renforçant le cercle d'impacts négatifs déjà en place, et influençant la biogéochimie (Stendel et al., 2008).

De plus, les modèles et paramètres utilisés dans certaines études ne sont pas nécessairement optimaux. Des réanalyses plus modernes avec des paramétrisations plus poussées sont nécessaires pour des données comme celles recherchées, notamment avec des phénomènes aussi vagues mais précis à étudier (Boisvert et al., 2023).

Enfin, peu d'études sont ressorties en portant sur comment la pluie va affecter les constantes mécaniques de la glace de mer. On peut par exemple s'attendre à un impact notamment sur la débâcle car la pluie va durcir la glace de mer différemment par rapport à de la glace de mer pure en étant moins poreuse.

4.2.2 De ce travail

La revue de la portée rédigée ici présente certaines limites.

Dès le départ, une limitation a été faite concernant la sélection des références à inclure, et ce, afin de ne conserver que les études mentionnant l'impact de la pluie sur la glace de mer, et non l'effet inverse (l'impact de la glace de mer sur les précipitations). Quand bien même, c'est une certitude que tout est lié.

Ensuite, malgré une recherche relativement approfondie des études, certaines ne sont pas ressorties et il y avait donc un manque d'informations. Il s'agit notamment des rapports GIEC (2019 et 2021) et d'un livre sur la glace de mer (Thomas, 2017 ?). Pour le livre, cela vient probablement du fait d'un accès très restreint. En revanche, pour les rapports, et après vérification des procédures de recherche, un seul (GIEC, 2021) a pu être trouvé sur une seule base de données (ScienceOpen), le référencement en lien avec les questions et méthodes de recherche ne devait donc pas être adéquat et permettre de les faire ressortir. Notamment avec la limitation à une recherche dans les titres et résumés, étant donné qu'il s'agit de rapports sur plusieurs sujets assez larges.

Maintenant, par manque de temps, une partie qui semble importante dans une revue de la portée et qui n'a pu être réalisée est la recherche dans les références des études incluses. Par exemples, Blunden et al. (2022), reprennent différentes informations du rapports GIEC (2021). De même, le rapport GIEC de 2019 mentionne certaines références incluses.

Pour cela, et par connaissance des manquements possibles dans les recherches effectuées, une première étape avait été faite. Lors du screening du texte intégral des études, les passages intéressants ont été conservés afin de pouvoir consulter plus tard les références mentionnées. Par la suite et à partir de ces références, le screening sur base du titre de 130 études avait été fait mais il n'était pas possible de poursuivre. Seules les références des rapports GIEC n'avaient pas encore été consultées.

Au-delà du manque de temps, il y a également un manque de place pour une revue de la portée afin de pouvoir apporter toutes les nuances et spécificités rencontrées.

4.3 Utilisation de l'intelligence artificielle

Concernant l'utilisation des outils d'intelligence artificielle, il serait intéressant déjà de voir rien que maintenant (août 2024), la différence dans les résultats obtenus seulement 5 mois après les recherches.

Au-delà de ça, une reproductibilité à l'identique avec des outils de ce genre semble compliquée pour un travail suivant une méthodologie précise telle que PRISMA, et ce, du fait des possibles changements des logiciels.

En ce qui concerne la provenance des articles inclus, seulement 10% (4 études) proviennent de ces outils d'IA. Ce qui est relativement peu. Même si toutefois, 15 études incluses ont été trouvées par les outils d'IA ainsi que les méthodes de recherches standards. Cependant, il restait des manquements dans les références à obtenir que même des outils de ce genre n'ont pas fournis.

5. Conclusions

5.1 Synthèse

Il s'agit de la première étude qui s'intéresse spécifiquement à l'impact de la pluie sur la glace de mer, à travers une revue de la portée. Cette revue de la portée se distingue de travaux similaires antérieurs car elle intègre les nouveaux outils venant avec l'intelligence artificielle dans le cadre de la recherche. L'opportunité a donc été saisie afin d'évaluer la pertinence de ces outils. Ces outils n'ont pas apporté un grand nombre d'études incluses aux méthodes de recherches traditionnelles, seulement 4, et de nombreuses références importantes était absente. Dans l'état actuel de leurs performances, ils ne peuvent donc pas se substituer aux moteurs de recherche classiques. Il faut quand même noter la facilité d'utilisation de ces outils par rapport à la plupart des moteurs de recherche, demandant pour la majorité un minimum de connaissances (équation de recherche complète, opérateurs booléens, filtres, etc) afin d'obtenir des résultats pertinents. Il semble cependant toutefois naturel d'intégrer ces nouveaux outils à ce genre de travaux au vu de la place et de leur développement dans la société numérique actuelle.

Cette revue de la portée a permis de mettre en avant les différents impacts de la pluie sur la glace de mer. Ces derniers se font majoritairement à travers l'altération du manteau neigeux. Les changements sont bien visibles et irrévocables, mais c'est un sujet un peu compliqué car beaucoup de choses restent encore floues dans les études, probablement parce qu'il est difficile d'avoir les mesures pour les précipitations sur la glace de mer et que peu de données sont disponibles.

Au moment de la croissance de la glace de mer, la contribution des précipitations liquides va conduire à la formation de glace supplémentaire, assimilée à de la *superimposed ice*, du fait du regel de l'eau de pluie au contact de la surface de la glace de mer. Mais au printemps, le processus prédominant due à la pluie est la dégradation le manteau neigeux. En Arctique, la pluie va d'une part initier ou accroître la fonte du manteau neigeux avec comme conséquence la réduction de l'effet d'isolation thermique, alors que dans cette région, la chaleur provient vient de l'atmosphère, et la fonte de la glace se fait donc par le haut. De plus, la pluie, initie la formation des bassins de fonte, et donc, in fine, la fonte de la glace elle-même.

Il y a un donc un consensus fort sur le fait qu'il y aura une diminution de l'épaisseur et de l'étendue de la glace de mer en Arctique, principalement du fait de la réduction du couvert neigeux. C'est un phénomène particulièrement dominant en Arctique puisque les flux de chaleur viennent principalement de l'atmosphère, la fonte s'effectue alors majoritairement par le dessus, à contrario du schéma en Antarctique, ce qui pose la question de l'importance de ce processus dans cette région, où il y a peu d'études et qui est sous échantillonnée. Finalement, la pluie accroît l'albédo, ainsi que les flux de chaleur entre l'atmosphère et l'océan.

5.2 Perspectives

Il serait intéressant d'aller plus loin sur certains sujets qui sont un peu moins documentés. En particulier à propos de l'importance des pluies tombant sur le continent et qui vont, par le biais des flux d'eau douce, aller modifier l'eau de mer, la colonne d'eau, sa stratification, et donc, la formation de la glace de mer.

Les informations sur les données biologiques sont aussi assez limitées. Malgré une tendance vers des impacts négatifs pour les espèces endémiques, cela reste mitigé. Même si certaines adaptations sont possibles, avec les changements rapides et quasi unidirectionnels, cela reste très rare. En revanche, certaines espèces migratrices et des latitudes plus basses vont pouvoir venir étendre leur aire de répartition avec une adaptation relativement aisée.

Les informations sur l'impact sur la biologie et la biogéochimie sont encore plus restreintes et pourtant intéressantes à approfondir.

Les différents biais en télédétection mentionnés permettent de souligner l'importance d'améliorer notre compréhension au niveau des processus, mais aussi d'obtenir des données de terrains, comme celles collectées lors de l'expédition MOSAiC (Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate).

Pour aller encore plus loin, il peut être important de prendre en compte les différents modèles avec une attention à leurs limites, efficacité, problèmes, etc. Il pourrait être intéressant que la précipitation sous forme de pluie soit étudiée plus finalement plus étudiée, lors notamment d'exercices d'intercomparaison à venir comme CMIP7 par exemple.

Enfin, il apparaît nécessaire d'élargir ce champ de recherches à l'Océan Austral afin d'avoir une vision plus complète des impacts de la pluie dans les environnements polaires. Malgré le fait que les précipitations soient difficiles à étudier dans cette région, en raison du manque d'observations directes, et de la petite échelle des processus impliqués qui échappe souvent aux grands modèles. Les prévisions sont donc d'autant plus incertaines mais pour autant primordiales à long terme. Il y a 5 études concernant l'Antarctique, donc 3 couvraient l'Océan Arctique et l'Océan Austral, qui ont été exclus car elles ne mentionnaient pas de relation entre la pluie et la glace de mer. On pourrait d'ailleurs s'interroger sur le rôle d'une diminution de l'épaisseur de la neige dans un processus où le réchauffement se fait majoritairement par le bas. Car avec le manteau neigeux isolant qui diminue, l'impact de la pluie pourrait être plus faible, voire inverse, avec une possibilité d'une croissance dans certaines conditions, au contraire de l'Océan Arctique.

Bibliographie

Les références précédées d'un * correspondent aux références des études incluses dans la revue de la portée pour la méthode PRISMA.

- Archibald D, Patterson R, Haraldsdottir E, Hazelwood M, Fife S, Murray SA. Mapping the progress and impacts of public health approaches to palliative care: a scoping review protocol. *BMJ Open*. 2016 Jul 14;6(7):e012058. doi: 10.1136/bmjopen-2016-012058. PMID: 27417201; PMCID: PMC4947716.
- Ballinger, T. J., U. S. Bhatt, P. A. Bieniek, B. Brettschneider, R. T. Lader, J. S. Littell, R. L. Thoman, C. F. Waigl, J. E. Walsh, et M. A. Webster. 2023. « Alaska Terrestrial and Marine Climate Trends, 1957–2021 ». *Journal of Climate* 36(13):4375-91. doi: 10.1175/JCLI-D-22-0434.1.
- * Bartsch, Annett, Helena Bergstedt, Georg Pointner, Xaver Muri, Kimmo Rautiainen, Leena Leppänen, Kyle Joly, Aleksandr Sokolov, Pavel Orekhov, Dorothee Ehrich, et Eeva Mariatta Soininen. 2023. « Towards Long-Term Records of Rain-on-Snow Events across the Arctic from Satellite Data ». *The Cryosphere* 17(2):889-915. doi: 10.5194/tc-17-889-2023.
- * Berger, J., C. Hartway, A. Gruzdev, et M. Johnson. 2018. « Climate Degradation and Extreme Icing Events Constrain Life in Cold-Adapted Mammals ». *Scientific Reports* 8(1):1156. doi: 10.1038/s41598-018-19416-9.
- * Bintanja, R., et O. Andry. 2017. « Towards a Rain-Dominated Arctic ». *Nature Climate Change* 7(4):263-67. doi: 10.1038/nclimate3240.
- * Blunden, J., T. Boyer, et E. Bartow-Gillies. 2023. « State of the Climate in 2022 ». *Bulletin of the American Meteorological Society* 104(9):1-516. doi: 10.1175/2023BAMSStateoftheClimate.1.
- * Boisvert, L. N., M. A. Webster, C. L. Parker, et R. M. Forbes. 2023. « Rainy Days in the Arctic ». *Journal of Climate* 36(19):6855-78. doi: 10.1175/JCLI-D-22-0428.1.
- Boisvert, L. N., M. A. Webster, A. A. Petty, T. Markus, R. I. Cullather, et D. H. Bromwich. 2020. « Intercomparison of Precipitation Estimates over the Southern Ocean from Atmospheric Reanalyses ». *Journal of Climate* 33(24):10627-51. doi: 10.1175/JCLI-D-20-0044.1.
- Byongjun Hwang, Yevgeny Aksenov, Michel Tsamados, T. Brown, David P. Stevens, Jack C. Landy, et Jeremy Wilkinson. 2020. « Impacts of climate change on Arctic sea ice ». 2020:208-27. doi: 10.14465/2020.ARC10.ICE.
- Chang, Ping, Shaoqing Zhang, Gokhan Danabasoglu, Stephen G. Yeager, Haohuan Fu, Hong Wang, Frederic S. Castruccio, Yuhu Chen, James Edwards, Dan Fu, Yinglai Jia, Lucas C. Laurindo, Xue Liu, Nan Rosenbloom, R. Justin Small, Gaopeng Xu, Yunhui Zeng, Qiuying Zhang, Julio Bacmeister, David A. Bailey, Xiaohui Duan, Alice K. DuVivier, Dapeng Li, Yuxuan Li, Richard Neale, Achim Stössel, Li Wang, Yuan Zhuang, Allison Baker, Susan Bates, John Dennis, Xiliang Diao, Bolan Gan, Abishek Gopal, Dongning Jia, Zhao Jing, Xiaohui Ma, R. Saravanan, Warren G. Strand, Jian Tao, Haiyuan Yang, Xiaoqi Wang, Zhiqiang Wei, et Lixin Wu. 2020. « An Unprecedented Set of High-

Resolution Earth System Simulations for Understanding Multiscale Interactions in Climate Variability and Change ». *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 12(12). doi: 10.1029/2020ms002298.

- * Descamps, S., J. Aars, E. Fuglei, K. M. Kovacs, C. Lydersen, O. Pavlova, Å. Ø. Pedersen, V. Ravolainen, et H. Strøm. 2017. « Climate Change Impacts on Wildlife in a High Arctic Archipelago – Svalbard, Norway ». *Global Change Biology* 23(2):490-502. doi: 10.1111/gcb.13381.
- Dingman, S. Lawrence. 2015. *Physical Hydrology*. Third edition. Long Grove, Illinois: Waveland Press, Inc.
- * Dou, T. F., S. F. Pan, R. Bintanja, et C. D. Xiao. 2022. « More Frequent, Intense, and Extensive Rainfall Events in a Strongly Warming Arctic ». *Earth's Future* 10(10):e2021EF002378. doi: 10.1029/2021EF002378.
- * Dou, T., C. Xiao, J. Liu, Q. Wang, S. Pan, J. Su, X. Yuan, M. Ding, F. Zhang, K. Xue, P. A. Bieniek, et H. Eicken. 2021. « Trends and Spatial Variation in Rain-on-Snow Events over the Arctic Ocean during the Early Melt Season ». *Cryosphere* 15(2):883-95. doi: 10.5194/tc-15-883-2021.
- * Dou, Tingfeng, Cunde Xiao, Jiping Liu, Wei Han, Zhiheng Du, Andrew R. Mahoney, Joshua Jones, et Hajo Eicken. 2019. « A Key Factor Initiating Surface Ablation of Arctic Sea Ice: Earlier and Increasing Liquid Precipitation ». *The Cryosphere* 13(4):1233-46. doi: 10.5194/tc-13-1233-2019.
- Drinkwater, K. F., N. Harada, S. Nishino, M. Chierici, S. L. Danielson, R. B. Ingvaldsen, T. Kristiansen, G. L. Hunt, F. Mueter, et J. E. Stiansen. 2021. « Possible Future Scenarios for Two Major Arctic Gateways Connecting Subarctic and Arctic Marine Systems: I. Climate and Physical-Chemical Oceanography ». *ICES Journal of Marine Science* 78(9):3046-65. doi: 10.1093/icesjms/fsab182.
- * Ehn, J. K., M. A. Granskog, T. Papakyriakou, R. Galley, et D. G. Barber. 2006. « Surface Albedo Observations of Hudson Bay (Canada) Landfast Sea Ice during the Spring Melt ». P. 23-29 in *Ann. Glaciol.* Vol. 44.
- * Ferguson, S. H., I. Stirling, et P. McLoughlin. 2005. « Climate Change and Ringed Seal (*Phoca hispida*) Recruitment in Western Hudson Bay ». *Marine Mammal Science* 21(1):121-35. doi: 10.1111/j.1748-7692.2005.tb01212.x.
- Forbes, B. C., T. Kumpula, N. Meschtyb, R. Laptander, M. Maclas-Fauria, P. Zetterberg, M. Verdonen, A. Skarin, K. Y. Kim, L. N. Boisvert, J. C. Stroeve, et A. Bartsch. 2016. « Sea Ice, Rain-on-Snow and Tundra Reindeer Nomadism in Arctic Russia ». *Biology Letters* 12(11). doi: 10.1098/rsbl.2016.0466.
- * Galindo, V., M. Levasseur, C. J. Mundy, M. Gosselin, J. É. Tremblay, M. Scarratt, Y. Gratton, T. Papakiriakou, M. Poulin, et M. Lizotte. 2014. « Biological and Physical Processes Influencing Sea Ice, under-Ice Algae, and Dimethylsulfoniopropionate during Spring in the Canadian Arctic Archipelago ». *Journal of Geophysical Research: Oceans* 119(6):3746-66. doi: 10.1002/2013JC009497.
- * Grenfell, T. C., et J. Putkonen. 2008. « A Method for the Detection of the Severe Rain-on-Snow Event on Banks Island, October 2003, Using Passive Microwave Remote Sensing ». *Water Resources Research* 44(3). doi: 10.1029/2007WR005929.
- Haid, Verena, Doroteaciro Iovino, et Simona Masina. 2017. « Impacts of Freshwater Changes on Antarctic Sea Ice in an Eddy-Permitting Sea-Ice–Ocean Model ». *The Cryosphere* 11(3):1387-1402. doi: 10.5194/tc-11-1387-2017.

- * Hansen, B. B., et R. Aanes. 2012. « Kelp and Seaweed Feeding by High-Arctic Wild Reindeer under Extreme Winter Conditions ». *Polar Research* 31(SUPPL.). doi: 10.3402/polar.v31i0.17258.
- * Hansen, B. B., K. Isaksen, R. E. Benestad, J. Kohler, Å. Ø. Pedersen, L. E. Loe, S. J. Coulson, J. O. Larsen, et Ø. Varpe. 2014. « Warmer and Wetter Winters: Characteristics and Implications of an Extreme Weather Event in the High Arctic ». *Environmental Research Letters* 9(11). doi: 10.1088/1748-9326/9/11/114021.
- * Hezel, P. J., X. Zhang, C. M. Bitz, B. P. Kelly, et F. Massonnet. 2012. « Projected Decline in Spring Snow Depth on Arctic Sea Ice Caused by Progressively Later Autumn Open Ocean Freeze-up This Century ». *Geophysical Research Letters* 39(17). doi: 10.1029/2012GL052794.
- He, Yue, et Zijun Ling. 2023. « Impact of Climate Change on Environment and Marine Species of the Arctic Ocean ». *Highlights in Science, Engineering and Technology* 69:274-79. doi: 10.54097/hset.v69i.11914.
- Hunke, E. C., D. A. Hebert, et O. Lecomte. 2013. « Level-Ice Melt Ponds in the Los Alamos Sea Ice Model, CICE ». *Ocean Modelling* 71:26-42. doi: 10.1016/j.ocemod.2012.11.008.
- * Intergovernmental Panel On Climate Change (Ippc). s. d. *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Kirbus, Benjamin, Sofie Tiedeck, Andrea Camplani, Jan Chylik, Susanne Crewell, Sandro Dahlke, Kerstin Ebell, Irina Gorodetskaya, Hannes Griesche, Dörthe Handorf, Ines Höschel, Melanie Lauer, Roel Neggers, Janna Rückert, Matthew D. Shupe, Gunnar Spreen, Andreas Walbröl, Manfred Wendisch, et Annette Rinke. 2023. « Surface impacts and associated mechanisms of a moisture intrusion into the Arctic observed in mid-April 2020 during MOSAiC ». *Frontiers in Earth Science* 11:1147848. doi: 10.3389/feart.2023.1147848.
- * Kwok, R., G. F. Cunningham, et S. V. Nghiem. 2003. « A Study of the Onset of Melt over the Arctic Ocean in RADARSAT Synthetic Aperture Radar Data ». *Journal of Geophysical Research: Oceans* 108(11):27-1. doi: 10.1029/2002jc001363.
- Lader, R., J. E. Walsh, U. S. Bhatt, et P. A. Bieniek. 2017. « Projections of Twenty-First-Century Climate Extremes for Alaska via Dynamical Downscaling and Quantile Mapping ». *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 56(9):2393-2409. doi: 10.1175/JAMC-D-16-0415.1.
- Landrum, L., et M. M. Holland. 2020. « Extremes Become Routine in an Emerging New Arctic ». *Nature Climate Change* 10(12):1108-15. doi: 10.1038/s41558-020-0892-z.
- * Langlois, A., C. A. Johnson, B. Montpetit, A. Royer, E. A. Blukacz-Richards, E. Neave, C. Dolant, A. Roy, G. Arhonditsis, D. K. Kim, S. Kaluskar, et L. Brucker. 2017. « Detection of Rain-on-Snow (ROS) Events and Ice Layer Formation Using Passive Microwave Radiometry: A Context for Peary Caribou Habitat in the Canadian Arctic ». *Remote Sensing of Environment* 189:84-95. doi: 10.1016/j.rse.2016.11.006.
- * Lannuzel, Delphine, Letizia Tedesco, Maria Van Leeuwe, Karley Campbell, Hauke Flores, Bruno Delille, Lisa Miller, Jacqueline Stefels, Philipp Assmy, Jeff Bowman, Kristina Brown, Giulia Castellani, Melissa Chierici, Odile Crabeck, Ellen Damm, Brent Else, Agneta Fransson, François Fripiat, Nicolas-

- Xavier Geilfus, Caroline Jacques, Elizabeth Jones, Hermann Kaartokallio, Marie Kotovitch, Klaus Meiners, Sébastien Moreau, Daiki Nomura, Ilka Peeken, Janne-Markus Rintala, Nadja Steiner, Jean-Louis Tison, Martin Vancoppenolle, Fanny Van Der Linden, Marcello Vichi, et Pat Wongpan. 2020. « The Future of Arctic Sea-Ice Biogeochemistry and Ice-Associated Ecosystems ». *Nature Climate Change* 10(11):983-92. doi: 10.1038/s41558-020-00940-4.
- * Liang, Kaixin, Jinfei Wang, Hao Luo, et Qinghua Yang. 2023. « The Role of Atmospheric Rivers in Antarctic Sea Ice Variations ». *Geophysical Research Letters* 50(8). doi: 10.1029/2022gl102588.
 - * Liston, G. E., P. Itkin, J. Stroeve, M. Tschudi, J. S. Stewart, S. H. Pedersen, A. K. Reinking, et K. Elder. 2020. « A Lagrangian Snow-Evolution System for Sea-Ice Applications (SnowModel-LG): Part I—Model Description ». *Journal of Geophysical Research: Oceans* 125(10). doi: 10.1029/2019JC015913.
 - * McCrystall, M. R., J. Stroeve, M. Serreze, B. C. Forbes, et J. A. Screen. 2021. « New Climate Models Reveal Faster and Larger Increases in Arctic Precipitation than Previously Projected ». *Nature Communications* 12(1). doi: 10.1038/s41467-021-27031-y.
 - * Nichols, Theresa, Fikret Berkes, Dyanna Jolly, Norman B. Snow, et The Community Of Sachs Harbour (N.W.T.). 2004. « Climate Change and Sea Ice: Local Observations from the Canadian Western Arctic ». *ARCTIC* 57(1):68-79. doi: 10.14430/arctic484.
 - * O'Sadnick, M., C. Petrich, C. Brekke, et J. Skarðhamar. 2020. « Ice Extent in Sub-Arctic Fjords and Coastal Areas from 2001 to 2019 Analyzed from MODIS Imagery ». *Annals of Glaciology* 61(82):210-26. doi: 10.1017/aog.2020.34.
 - * Overland, J. E. 2022. « Arctic Climate Extremes ». *Atmosphere* 13(10). doi: 10.3390/atmos13101670.
 - * Pauling, A. G., et C. M. Bitz. 2021. « Arctic Sea Ice Response to Flooding of the Snow Layer in Future Warming Scenarios ». *Earth's Future* 9(10). doi: 10.1029/2021EF002136.
 - Polashenski, Chris, Donald Perovich, et Zoe Courville. 2012. « The Mechanisms of Sea Ice Melt Pond Formation and Evolution ». *Journal of Geophysical Research: Oceans* 117(C1):2011JC007231. doi: 10.1029/2011JC007231.
 - * Pörtner, H. O., D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, et N. M. Weyer. 2019. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.
 - * Saloranta, T. M. 2000. « Modeling the Evolution of Snow, Snow Ice and Ice in the Baltic Sea ». *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 52(1):93-108. doi: 10.3402/tellusa.v52i1.12255.
 - * Schreiber, Erika A. P., et Mark C. Serreze. 2020. « Impacts of Synoptic-Scale Cyclones on Arctic Sea-Ice Concentration: A Systematic Analysis ». *Annals of Glaciology* 61(82):139-53. doi: 10.1017/aog.2020.23.
 - Screen, J. A., et I. Simmonds. 2012. « Declining Summer Snowfall in the Arctic: Causes, Impacts and

Feedbacks ». *Climate Dynamics* 38(11-12):2243-56. doi: 10.1007/s00382-011-1105-2.

- * Serreze, M. C., F. Fetterer, et W. F. Weeks (Retired). 2015. « CRYOSPHERE | Sea Ice ». P. 217-26 in *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. Elsevier.
- Stendel, M., J. H. Christensen, et D. Petersen. 2008. « Arctic Climate and Climate Change with a Focus on Greenland » édité par Meltofte H., Christensen T.R., Elberling B., et Forchhammerand Morten Rasch M.C. *Advances in Ecological Research* 40:13-43. doi: 10.1016/S0065-2504(07)00002-5.
- * Stirling, I., et A. E. Derocher. 1993. « Possible Impacts of Climatic Warming on Polar Bears ». *Arctic* 46(3):240-45. doi: 10.14430/arctic1348.
- * Stroeve, J., V. Nandan, R. Willatt, R. Dadic, P. Rostosky, M. Gallagher, R. Mallett, A. Barrett, S. Hendricks, R. Tonboe, M. Mccrystal, M. Serreze, L. Thielke, G. Spreen, T. Newman, J. Yackel, R. Ricker, M. Tsamados, A. Macfarlane, H. R. Hannula, et M. Schneebeli. 2022. « Rain on Snow (ROS) Understudied in Sea Ice Remote Sensing: A Multi-Sensor Analysis of ROS during MOSAiC (Multidisciplinary Drifting Observatory for the Study of Arctic Climate) ». *Cryosphere* 16(10):4223-50. doi: 10.5194/tc-16-4223-2022.
- Thomas, David N., éd. 2017. *Sea ice*. Third edition. Chichester, UK ; Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Tricco, Andrea C., Erin Lillie, Wasifa Zarin, Kelly K. O'Brien, Heather Colquhoun, Danielle Levac, David Moher, Micah D. J. Peters, Tanya Horsley, Laura Weeks, Susanne Hempel, Elie A. Akl, Christine Chang, Jessie McGowan, Lesley Stewart, Lisa Hartling, Adrian Aldcroft, Michael G. Wilson, Chantelle Garritty, Simon Lewin, Christina M. Godfrey, Marilyn T. Macdonald, Etienne V. Langlois, Karla Soares-Weiser, Jo Moriarty, Tammy Clifford, Özge Tunçalp, et Sharon E. Straus. 2018. « PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation ». *Annals of Internal Medicine* 169(7):467-73. doi: 10.7326/M18-0850.
- * Viceto, C., I. V. Gorodetskaya, A. Rinke, M. Maturilli, A. Rocha, et S. Crewell. 2022. « Atmospheric Rivers and Associated Precipitation Patterns during the ALOUD and PASCAL Campaigns near Svalbard (May-June 2017): Case Studies Using Observations, Reanalyses, and a Regional Climate Model ». *Atmospheric Chemistry and Physics* 22(1):441-63. doi: 10.5194/acp-22-441-2022.
- * Vihma, T., J. Screen, M. Tjernström, B. Newton, X. Zhang, V. Popova, C. Deser, M. Holland, et T. Prowse. 2016. « The Atmospheric Role in the Arctic Water Cycle: A Review on Processes, Past and Future Changes, and Their Impacts ». *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 121(3):586-620. doi: 10.1002/2015JG003132.
- Walsh, J. E. 2008. « Climate of the Arctic Marine Environment ». *Ecological Applications* 18(SUPPL.2):S3-22. doi: 10.1890/06-0503.1.
- * Walsh, J. E., T. J. Ballinger, E. S. Euskirchen, E. Hanna, J. Mård, J. E. Overland, H. Tangen, et T. Vihma. 2020. « Extreme Weather and Climate Events in Northern Areas: A Review ». *Earth-Science Reviews* 209. doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103324.
- * Wang, C., R. M. Graham, K. Wang, S. Gerland, et M. A. Granskog. 2019. « Comparison of ERA5 and ERA-Interim near-Surface Air Temperature, Snowfall and Precipitation over

Arctic Sea Ice: Effects on Sea Ice Thermodynamics and Evolution ». *Cryosphere* 13(6):1661-79. doi: 10.5194/tc-13-1661-2019.

- * Webster, Melinda A., Ignatius G. Rigor, Son V. Nghiem, Nathan T. Kurtz, Sinead L. Farrell, Donald K. Perovich, et Matthew Sturm. 2014. « Interdecadal Changes in Snow Depth on Arctic Sea Ice ». *Journal of Geophysical Research: Oceans* 119(8):5395-5406. doi: 10.1002/2014JC009985.
- * Zavyalov, D. D. et Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Science, Sevastopol, Russia. 2020. « Influence of the Atmospheric Precipitation Phase Composition on Seasonal Evolution of Snow-Ice Cover in the Taganrog Bay Apex ». *Physical Oceanography* 27(2). doi: 10.22449/1573-160X-2020-2-126-141.
- * Zhang, P., G. Chen, M. Ting, L. Ruby Leung, B. Guan, et L. Li. 2023. « More Frequent Atmospheric Rivers Slow the Seasonal Recovery of Arctic Sea Ice ». *Nature Climate Change* 13(3):266-73. doi: 10.1038/s41558-023-01599-3.

Annexes

SECTION	ITEM	PRISMA-ScR CHECKLIST ITEM	REPORTED ON PAGE #
TITLE			
Title	1	Identify the report as a scoping review.	
ABSTRACT			
Structured summary	2	Provide a structured summary that includes (as applicable): background, objectives, eligibility criteria, sources of evidence, charting methods, results, and conclusions that relate to the review questions and objectives.	
INTRODUCTION			
Rationale	3	Describe the rationale for the review in the context of what is already known. Explain why the review questions/objectives lend themselves to a scoping review approach.	
Objectives	4	Provide an explicit statement of the questions and objectives being addressed with reference to their key elements (e.g., population or participants, concepts, and context) or other relevant key elements used to conceptualize the review questions and/or objectives.	
METHODS			
Protocol and registration	5	Indicate whether a review protocol exists; state if and where it can be accessed (e.g., a Web address); and if available, provide registration information, including the registration number.	
Eligibility criteria	6	Specify characteristics of the sources of evidence used as eligibility criteria (e.g., years considered, language, and publication status), and provide a rationale.	
Information sources*	7	Describe all information sources in the search (e.g., databases with dates of coverage and contact with authors to identify additional sources), as well as the date the most recent search was executed.	
Search	8	Present the full electronic search strategy for at least 1 database, including any limits used, such that it could be repeated.	
Selection of sources of evidence†	9	State the process for selecting sources of evidence (i.e., screening and eligibility) included in the scoping review.	
Data charting process‡	10	Describe the methods of charting data from the included sources of evidence (e.g., calibrated forms or forms that have been tested by the team before their use, and whether data charting was done independently or in duplicate) and any processes for obtaining and confirming data from investigators.	
Data items	11	List and define all variables for which data were sought and any assumptions and simplifications made.	
Critical appraisal of individual sources of evidence§	12	If done, provide a rationale for conducting a critical appraisal of included sources of evidence; describe the methods used and how this information was used in any data synthesis (if appropriate).	
Synthesis of results	13	Describe the methods of handling and summarizing the data that were charted.	

Annexe 1. Checklist des points du protocole Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR) (partie 1)

SECTION	ITEM	PRISMA-ScR CHECKLIST ITEM	REPORTED ON PAGE #
RESULTS			
Selection of sources of evidence	14	Give numbers of sources of evidence screened, assessed for eligibility, and included in the review, with reasons for exclusions at each stage, ideally using a flow diagram.	
Characteristics of sources of evidence	15	For each source of evidence, present characteristics for which data were charted and provide the citations.	
Critical appraisal within sources of evidence	16	If done, present data on critical appraisal of included sources of evidence (see item 12).	
Results of individual sources of evidence	17	For each included source of evidence, present the relevant data that were charted that relate to the review questions and objectives.	
Synthesis of results	18	Summarize and/or present the charting results as they relate to the review questions and objectives.	
DISCUSSION			
Summary of evidence	19	Summarize the main results (including an overview of concepts, themes, and types of evidence available), link to the review questions and objectives, and consider the relevance to key groups.	
Limitations	20	Discuss the limitations of the scoping review process.	
Conclusions	21	Provide a general interpretation of the results with respect to the review questions and objectives, as well as potential implications and/or next steps.	
FUNDING			
Funding	22	Describe sources of funding for the included sources of evidence, as well as sources of funding for the scoping review. Describe the role of the funders of the scoping review.	

Annexe 1. Checklist des points du protocole Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR) (partie 2)

Critères d'éligibilité	
Critères d'inclusion	Critères d'exclusion
<ul style="list-style-type: none"> • Lien entre la pluie et la glace de mer • • Précipitations : référence à la pluie, précipitations liquides ou humides • • Lieu étudié comprend de la glace de mer • • Anglais et français retenus • • Aucune restriction pour l'année de publication • • Aucune restriction sur le design d'étude / méthode de recherche (qualitative, quantitative, mixte) 	<ul style="list-style-type: none"> • Autres langues que anglais et français • Pas de mention de la pluie • Pas de mention de la glace de mer • Pas de liaison entre la pluie et la glace de mer • Pas assez d'informations pour distinguer la pluie (précipitations = précipitations liquides ou solides) • Régions comme Afrique du Sud ou l'Inde • Porte sur l'ice-sheet • Porte sur les rivières • Porte sur les inondations • Porte sur la météorologie, les prédictions météorologiques, les nuages, les éclairs, etc • Porte sur la géologie, la paléontologie • Porte sur les aérosols • Porte sur les surfaces hydrophobes • Porte sur l'agriculture • Porte sur l'influence de la glace de mer sur le climat • Porte sur l'influence de la glace de mer sur les moussons • Porte sur l'influence de la glace de mer sur les précipitations et/ou la pluie • Porte sur les climats tempérés/équatoriaux en téléconnexion avec la couverture de la glace de mer • Rapports similaires mais pas le plus récent • Texte intégral non disponible

Annexe 2. Critères d'éligibilité des études pour la revue de la portée

Bases de données et moteurs de recherche			
Nom	Sélection	Type	Site internet
Scopus	Oui	Standard	https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic#basic
PubMed	Oui	Standard	https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/
Embase	Oui	Standard	https://www.embase.com/search/quick?phase=continueToApp
Science Open	Oui	Standard	https://www.scienceopen.com/
MDPI	Oui	Standard	https://www.mdpi.com/
Scilit	Oui	Standard	https://www.scilit.net/
Google Scholar	Oui	Standard	https://scholar.google.com/
BASE	Non	Standard	https://www.base-search.net/
Science Direct	Non	Standard	https://www.sciencedirect.com/
CORE	Non	Standard	https://core.ac.uk/
Semantic Scholar	Non	Standard	https://www.semanticscholar.org/
ResearchGate	Non	Standard	https://www.researchgate.net/
DOAJ	Non	Standard	https://doaj.org/
WorldWideScience	Non	Standard	https://worldwidescience.org/wws/desktop/en/search.html
science.gov	Non	Standard	https://www.science.gov/
Dimension	Oui	IA	https://www.dimensions.ai/
SciSpace	Oui	IA	https://typeset.io/
Scite Assistant	Oui	IA	https://scite.ai/assistant
Paper Digest	Oui	IA	https://www.paperdigest.org/
Copilot	Oui	IA	https://copilot.microsoft.com/
Groq	Oui	IA	https://groq.com/
Consensus	Non	IA	https://consensus.app/
Elicit	Non	IA	https://elicit.com/
Research Rabbit	Non	IA	https://www.researchrabbit.ai/
Bing	Non	IA	https://www.bing.com/
Gemini	Non	IA	https://gemini.google.com/u/1/app
ChatGPT	Non	IA	https://chatgpt.com/
Perplexity	Non	IA	https://www.perplexity.ai/
Semantic Scholar	Non	IA	https://www.semanticscholar.org/
OpenAlex	Non	IA	https://openalex.org/

Annexe 3. Liste des différentes bases de données et outils d'intelligence artificielle. Leur sélection dans la revue de la portée est indiquée, ainsi que leur provenance (bases de données et moteurs de recherche : « standard », ou outils d'intelligence artificielle : « IA »), avec un lien vers leur site internet.

Stratégie de recherche	
Concepts	Mots-clés
Pluie	« rain », « rainfall », « raindrop », « thunderstorm »
Glace de mer	« sea ice », « ice cover »
Localisation	« arctic », « antarctic », « okhotsk », « baltic », « bohai », « liaodong bay », « bothnia », « caspian », « azov », « baffin », « hudson bay », « aral », « gulf saint lawrence », « gulf st lawrence », « white sea », « southern ocean », « polar ocean »

Annexe 4. Les différents concepts et mots-clés liés lors de la stratégie de recherche.

Reference	Source	Area	Area refined	Method	Year	Period
Bartsch et al., 2023 : Towards long-term records of rain-on-snow events across the Arctic from satellite data	IA	Arctic Ocean	Finland + Norway + Russia + Alaska	Model + Remote sensing + Land/sea based instrument	2010-2020 + 2020-today	Winter
Berger et al., 2018 : Climate Degradation and Extreme Icing Events Constrain Life in Cold-Adapted Mammals	Standard	Arctic Ocean	Alaska + Chukchi Sea	Land/sea based instrument	2000-2010 + 2010-2020	All year
Bintanja et Andry, 2017 : Towards a rain-dominated Arctic	IA + Standard	Arctic Ocean	Barents Sea + Central Arctic	Literature review + Model	2000-2010 + 2010-2020 + 2020-today + today-2050 + 2050-2100	All year
Blunden et al., 2023 : State of the Climate in 2022	IA + Standard	Global	-	Literature review + Model	Before 2000 + 2000-2010 + 2010-2020 + 2020-today	All year
Boisvert et al., 2020 : Intercomparison of Precipitation Estimates over the Southern Ocean from Atmospheric Reanalyses	IA + Standard	Southern Ocean	Weddell Sea + Bellingshausen Sea + Amundsen Sea + Ross Sea + Pacific Ocean + Indian Ocean	Model + Remote sensing + Land/sea based instrument	2000-2010 + 2010-2020	All year
Descamps et al., 2017 : Climate change impacts on wildlife in a High Arctic archipelago – Svalbard, Norway	IA + Standard	Arctic Ocean	Barents Sea + Svalbard	Literature review + Model	Before 2000 + 2000-2010 + 2010-2020 + 2020-today + today-2050 + 2050-2100	All year
Dou et al., 2019 : A key factor initiating surface ablation of Arctic sea ice: earlier and increasing liquid precipitation	IA + Standard	Arctic Ocean	Chukchi Sea	Model + Land/sea based instrument	Before 2000 + 2000-2010 + 2010-2020	Winter + Spring
Dou et al., 2021 : Trends and spatial variation in rain-on-snow events over the Arctic Ocean during the early melt season	IA + Standard	Arctic Ocean	Canadian Archipelago + Kara Sea + Barents Sea + Alaska + Chukchi Sea + Beaufort Sea + Laptev Sea + Siberian Sea + Hudson Bay + Greenland	Model + Remote sensing + Land/sea based instrument	Before 2000 + 2000-2010 + 2010-2020	Spring + Summer
Dou et al., 2022 : More Frequent, Intense, and Extensive Rainfall Events in a Strongly Warming Arctic	IA + Standard	Arctic Ocean	Chukchi Sea + Barents Sea + Greenland Sea + central Arctic + Alaska + Siberia + Northern Europe + Pacific sector + Atlantic sector	Model	2000-2010 + 2010-2020 + 2020-today + today-2050 + 2050-2100	All year
Ehn et al., 2006 : Surface albedo observations of Hudson Bay (Canada) landfast sea ice during the spring melt	IA + Standard	Arctic Ocean	Hudson Bay	Remote sensing + Land/sea based instrument	2000-2010 (2005)	Spring
Ferguson, 2005 : CLIMATE CHANGE AND RINGED SEAL (PHOCA HISPIDA) RECRUITMENT IN WESTERN HUDSON BAY	IA + Standard	Arctic Ocean	Hudson Bay	Land/sea based instrument	Before 2000 + 2000-2010	Spring
Galindo et al., 2014 : Biological and physical processes influencing sea ice, under-ice algae, and dimethylsulfoniopropionate during spring in the Canadian Arctic Archipelago	Standard	Arctic Ocean	Canadian Arctic Archipelago	Land/sea based instrument	2010-2020	Spring
Grenfell et Putkonen, 2008 : A method for the detection of the severe rain-on-snow event on Banks Island, October 2003, using passive microwave remote sensing	Standard	Arctic Ocean	Canadian Arctic Archipelago	Model + Remote sensing	2000-2010	Fall
Hansen et Aanes, 2012 : Kelp and seaweed feeding by High-Arctic wild reindeer under extreme winter conditions	Standard	Arctic Ocean	Svalbard	Land/sea based instrument	2000-2010 (2010)	(Late) Winter
Hansen et al., 2014 : Warmer and wetter winters: characteristics and implications of an extreme weather event in the High Arctic	Standard	Arctic Ocean	Svalbard	Literature review + Model + Land/sea based instrument	2010-2020 (2012)	Winter

Annexe 5-1. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : la source (*source*), la localisation (*area*), la localisation précise (*area refined*), la méthode (*method*), l'année (*year*) et la saison (*period*).
(Partie 1)

Reference	Source	Area	Area refined	Method	Year	Period
Hansen et al., 2014 : Warmer and wetter winters: characteristics and implications of an extreme weather event in the High Arctic	Standard	Arctic Ocean	Svalbard	Literature review + Model + Land/sea based instrument	2010-2020 (2012)	Winter
Hezel et al., 2012 : Projected decline in spring snow depth on Arctic sea ice caused by progressively later autumn open ocean freeze-up this century	IA + Standard	Arctic Ocean	Central Arctic	Model + Remote sensing + Land/sea based instrument	Before 2000 + 2000-2010 + 2010-2020 + 2020-today + today-2050 + 2050-2100	Winter + Spring
IPCC, 2019 : IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate	Personal communication	Arctic Ocean + Southern Ocean	-	Literature review + Model + Remote sensing + Land/sea based instrument	Before 2000 + 2000-2010 + 2010-2020 + 2020-today + today-2050 + 2050-2100	All year
IPCC, 2021 : Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change	Personal communication	Arctic Ocean + Southern Ocean	-	Literature review + Model + Remote sensing + Land/sea based instrument	Before 2000 + 2000-2010 + 2010-2020 + 2020-today + today-2050 + 2050-2100	All year
Kwok et al., 2003 : A study of the onset of melt over the Arctic Ocean in RADARSAT synthetic aperture radar data	Standard	Arctic Ocean	Beaufort Sea (SHEBA Camp)	Remote sensing	Before 2000	Spring + Summer
Langlois et al., 2017 : Detection of rain-on-snow (ROS) events and ice layer formation using passive microwave radiometry: A context for Peary caribou habitat in the Canadian Arctic	IA + Standard	Arctic Ocean	Canadian Arctic Archipelago	Model + Remote sensing + Land/sea based instrument + Indigenous knowledge	Before 2000 + 2000-2010 + 2010-2020	All year
Lannuzel et al., 2020 : The future of Arctic sea-ice biogeochemistry and ice-associated ecosystems	Personal communication	Arctic Ocean	Canadian Arctic Archipelago, Okhotsk Sea, Chukchi Sea, East Siberian Sea, Laptev Sea, Kara Sea, Barents Sea, Norwegian Sea, Greenland Sea, Bering Sea, Fram Strait, Labrador Sea, Baffin Bay, Hudson Bay, Beaufort Sea, Bering Strait	Literature review + Model	Before 2000 + 2000-2010 + 2010-2020 + 2020-today + today-2050 + 2050-2100	All year
Liang et al., 2023 : The Role of Atmospheric Rivers in Antarctic Sea Ice Variations	IA	Southern Ocean	Amundsen Sea + Bellingshausen Sea + Ross Sea + Weddell Sea + Western Pacific Ocean + Indian Ocean	Model + Remote sensing	Before 2000 + 2000-2010 + 2010-2020	All year
Liston et al., 2020 : A Lagrangian Snow-Evolution System for Sea-Ice Applications (SnowModel-LG): Part I—Model Description	Standard	Arctic Ocean	-	Model + Remote sensing	Before 2000 + 2000-2010 + 2010-2020	All year
McCrystall et al., 2021 : New climate models reveal faster and larger increases in Arctic precipitation than previously projected	IA + Standard	Arctic Ocean	Beaufort Sea + Chukchi Sea + Bering Sea + Laptev Sea + Siberian Sea + Siberia + Greenland Sea + Greenland + Norwegian Sea + Russia + Europe + North America + Barents Sea + Kara Sea + Central Arctic	Model + Remote sensing + Land/sea based instrument	Before 2000 + 2000-2010 + 2010-2020 + 2020-today + today-2050 + 2050-2100	All year
O'Sadnick et al., 2020 : Ice extent in sub-arctic fjords and coastal areas from 2001 to 2019 analyzed from MODIS imagery	Standard	Arctic Ocean	Norwegian Sea	Remote sensing	2000-2010 + 2010-2020	Winter + Spring
Overland, 2022 : Arctic Climate Extremes	Standard	Arctic Ocean	Barents Sea + Svalbard + Kara Sea + Laptev Sea + Chukchi Sea + Siberian Sea (East) + Beaufort Sea + Baffin Bay + Norwegian Sea + Greenland Sea + Alaska	Land/sea based instrument + Indigenous knowledge	Before 2000 + 2000-2010 + 2010-2020 + 2020-today	-
Pauling et Bitz, 2021 : Arctic Sea Ice Response to Flooding of the Snow Layer in Future Warming Scenarios	IA + Standard	Arctic Ocean	-	Model	Before 2000 + 2000-2010 + 2010-2020 + 2020-today + today-2050 + 2050 - 2100 (2100)	All year
Saloranta, 2000 : Modeling the evolution of snow, snow ice and ice in the Baltic Sea	IA + Standard	Other Seas	Baltic Sea (Bay of Bothnia)	Model	Before 2000	Winter

Annexe 5-2. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : la source (*source*), la localisation (*area*), la localisation précise (*area refined*), la méthode (*method*), l'année (*year*) et la saison (*period*). (Partie 2)

Reference	Source	Area	Area refined	Method	Year	Period
Pauling et Bitz, 2021 : Arctic Sea Ice Response to Flooding of the Snow Layer in Future Warming Scenarios	IA + Standard	Arctic Ocean	-	Model	Before 2000 + 2000-2010 + 2010-2020 + 2020-today + today-2050 + 2050 - 2100 (2100)	All year
Saloranta, 2000 : Modeling the evolution of snow, snow ice and ice in the Baltic Sea	IA + Standard	Other Seas	Baltic Sea (Bay of Bothnia)	Model	Before 2000	Winter
Schreiber et Serreze, 2020.: Impacts of synoptic-scale cyclones on Arctic sea-ice concentration: a systematic analysis	IA	Arctic Ocean	Central Arctic Ocean + Barents Sea + Kara Sea + Laptev Sea + East Siberian Sea + Chukchi Sea + Beaufort Sea + Canadian Arctic Archipelago	Literature review + Model + Remote Sensing + Land/sea based instruments	Before 2000 + 2000-2010 + 2010-2020	All year
Serreze et al., 2021 : Arctic rain on snow events: bridging observations to understand environmental and livelihood impacts	IA	Arctic Ocean	-	Literature review	2000-2010 + 2010-2020	-
Shang et al., 2023 : More frequent atmospheric rivers slow the seasonal recovery of Arctic sea ice	Standard	Arctic Ocean	Central Arctic + Barents Sea + Kara Sea + Labrador Sea + Baffin Bay + Chukchi Sea + Bering Sea	Model + Remote sensing	Before 2000 + 2000-2010 + 2010-2020 + 2020-today	All year
Stirling et Derocher, 1993 : Possible Impacts of Climatic Warming on Polar Bears	Standard	Arctic Ocean	Hudson Bay + James Bay + Canadian Arctic Archipelago + Baffin Sea	Literature review + Land/sea based instrument	Before 2000	All year
Stroeve et al., 2022 : Rain on snow (ROS) understudied in sea ice remote sensing: a multi-sensor analysis of ROS during MOSAiC (Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate)	IA + Standard	Arctic Ocean	Barents Sea + Central Arctic + Laptev Sea + Fram Strait	Model + Remote sensing + Land/sea based instrument	Before 2000 + 2000-2010 + 2010-2020	All year
Theresa et al., 2004 : Climate Change and Sea Ice: Local Observations from the Canadian Western Arctic	Standard	Arctic Ocean	Beaufort Sea	Indigenous knowledge	Before 2000 + 2000-2010	All year
Viceto et al., 2022 : Atmospheric rivers and associated precipitation patterns during the A-CLOUD and PASCAL campaigns near Svalbard (May–June 2017): case studies using observations, reanalyses, and a regional climate model	Standard	Arctic Ocean	Svalbard + Barents Sea + Norwegian Sea + Greenland Sea + Kara Sea	Model + Remote sensing + Land/sea based instrument	2010-2020 (2017)	Spring + Summer
Vihma et al., 2016 : The atmospheric role in the Arctic water cycle: A review on processes, past and future changes, and their impacts	Standard	Arctic Ocean	Central Arctic + Greenland Sea + Barents Sea + Siberian Sea + Kara Sea + Canada + Baffin Bay + Beaufort Sea + Fram Strait	Literature review + Model + Remote sensing + Land/sea based instrument	Before 2000 + 2000-2010 + 2010-2020	All year
Walsh et al., 2020 : Extreme weather and climate events in northern areas: A review	Standard	Arctic Ocean	Alaska + Finland + Norway + Svalbard + Europe + Siberia + Japan + Canada + Sweden + Russia, Greenland Sea + Beaufort Sea + Chukchi Sea + Siberian Sea + Bering Sea	Literature review + Model + Land/sea based instrument	Before 2000 + 2000-2010 + 2010-2020	All year
Wang et al., 2019 : Comparison of ERA5 and ERA-Interim near-surface air temperature, snowfall and precipitation over Arctic sea ice: effects on sea ice thermodynamics and evolution	Standard	Arctic Ocean	Central Arctic + Beaufort Sea + Chukchi Sea + Laptev Sea + North Pole, Canadian Arctic Archipelago + Svalbard	Model + Land/sea based instrument	2010-2020	All year
Webster et al., 2022 : Spatiotemporal evolution of melt ponds on Arctic sea ice	Standard	Arctic Ocean	Central Arctic	Model + Remote sensing	2010-2020 (2020)	Spring + Summer + Fall
Zayvalov, 2020 : Influence of the Atmospheric Precipitation Phase Composition on Seasonal Evolution of Snow-Ice Cover in the Taganrog Bay Apex	Standard	Other Seas	Azov Sea (Taganrog Bay)	Model + Land/sea based instrument	2000-2010 + 2010-2020	Winter + Spring

Annexe 5-3. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : la source (*source*), la localisation (*area*), la localisation précise (*area refined*), la méthode (*method*), l'année (*year*) et la saison (*period*). (Partie 3)

Reference	Change in precipitation
Bartsch et al., 2023 : Towards long-term records of rain-on-snow events across the Arctic from satellite data	Rain-on-snow (ROS) events occur across many regions of the terrestrial Arctic in mid-winter. Reindeer herders reported that the catastrophic ROS event began on 8-9 November 2013 with about 24 h of rain, after which temperatures dropped and remained below freezing for the remainder of the autumn and throughout the winter. ROS events in this region are rare but have a severe impact especially as they occur in the first part of the winter All events occurred over a period of several days, progressing spatially. The pattern was different between 2013 and 2020. The direction was west to east in 2013 and partially north to south in 2020.
Berger et al., 2018 : Climate Degradation and Extreme Long Events Constrain Life in Cold-Adapted Mammals	A changing climate now brings new challenges for arctic species: warming temperatures are altering air velocity and the extent and duration of sea ice, all of which conflate to modify ocean currents and the timing and intensity of precipitation. As a result, once rare phenomena such as ROS, drought, and tidal surges are increasing in frequency. In the arctic regions of Beringia, extreme ROS events are rare, yet the frequency of minor events (<10 mm) is increasing. In the East Asian sector of Beringia on Wrangel Island, minor ROS events were more than 2x more frequent, temperatures colder and growing seasons shorter than at Alaskan sites. Thirteen years before (2002), a major winter rain-on-snow (ROS) event.
Bintanja et Andry, 2017 : Towards a rain-dominated Arctic	However, little is known about future changes in the distributions of rainfall and snowfall in the Arctic. Rain is projected to become the dominant form of precipitation in the Arctic region (2091–2100), as atmospheric warming causes a greater fraction of snowfall to melt before it reaches the surface, in particular over the North Atlantic and the Barents Sea. The reduction in Arctic snowfall is most pronounced during summer and autumn when temperatures are close to the melting point, but also winter rainfall is found to intensify considerably. All current climate models depict an increase in Arctic precipitation (albeit at different magnitude), which can thus be regarded as a robust feature of projected climate change. In the current climate (2006–2015), snowfall governs precipitation in the frigid central Arctic and in the high-elevation expanses of Greenland with 70 to 100% of the annual precipitation falling as snow. The annual snowfall fraction, defined as the ratio of snowfall and total precipitation, drops to 40% in the milder peripheral regions of the Arctic. Towards the end of the twenty-first century (2091–2100), however, with Arctic precipitation rates increasing by 50 to 60%, the simulated snowfall fraction reduces dramatically with only Greenland continuing to experience snowfall fractions over 80%. In the central Arctic, the snowfall fraction barely remains larger than 50%, and precipitation will be dominated by rainfall in much of the Arctic. The most dramatic reductions in snowfall fraction will occur over the North Atlantic and especially the Barents Sea. Changes in total Arctic snowfall are generally small. Models simulating comparatively strong warming even project a decrease in snowfall (despite the substantial increase in precipitation) owing to the considerable reduction in snowfall fraction in these relatively 'warm' models. In fact, twenty-first-century changes in annual snowfall are projected to be much smaller than those in rainfall throughout the entire Arctic except central Greenland. A reduction in snowfall fraction of only 0.17 leads to the total precipitation change being entirely due to rainfall changes, which occurs at a warming of about 7 °C. Since most models exhibit an annual Arctic warming of more than 7 °C, all but a few models project Arctic snowfall to decrease. The decrease in snowfall fraction indeed peaks in early autumn, when moderately strong warming regularly leads to above-zero Arctic temperatures; winter warming, albeit more vigorous, results in the end of the twenty-first-century Arctic winters still being cold enough to enhance snowfall. However, winter rain also becomes more abundant, with its projected increase even matching that in solid precipitation. This may have drastic consequences. In the present-day climate, the mean annual precipitation in the Arctic (70–90° N) is dominated by snowfall, with 65 ± 5% of precipitation currently falling in solid form. According to the climate models, however, the rain/snow subdivision will change drastically over the course of the twenty-first century. While total Arctic precipitation will increase by about 40%, snowfall will actually diminish. Climate models project that, at the end of the twenty-first century under strong forcing (RCP6.3), about 60% of Arctic precipitation will consist of rain, hence, rainfall will become the dominant form of Arctic precipitation. The 'regime' shift towards a rainy Arctic is due primarily to Arctic warming and the associated strong reduction in snowfall fraction, and, more specifically, to the warming of the near-surface boundary layer (where Arctic warming is maximum) so that snowfall melts into rain before it reaches the surface. The average of the 'best' five climate models also projects a future with strongly reduced Arctic snowfall and rain dominating future Arctic precipitation. Even under a more moderate climate forcing (RCP4.5), Arctic rainfall will dominate precipitation changes. Interestingly, snowfall actually increases over continental regions in the Arctic, in contrast with the Arctic average, but consistent with the relatively minor decrease in snowfall forcing over land. Separating latitude regions to assess the importance of the initial climate on trends reveals that even over the centre of the Arctic Ocean (80–90°) rainfall will increase considerably (compared with changes in snowfall). Hence, warming-induced Arctic rainfall changes will occur throughout the entire Arctic region. Climate models are extremely consistent in simulating a twenty-first-century increase in Arctic precipitation as a by-product of amplified Arctic warming. Intuitively, most of this extra precipitation might be expected to fall as snow because the Arctic climate still is quite cold, especially in winter. However, it is found that models are equally consistent in projecting strong increases in rainfall throughout the entire Arctic. Climate models also simulate a moderate decrease in snowfall, especially models that exhibit relatively strong Arctic warming. This is because near-surface atmospheric warming considerably diminishes the snowfall fraction. Hence, the Arctic is projected to become rain-dominated, a robust yet unexpected feature of future climate change that will impact the Arctic region in many ways. All taken together, the projected twenty-first-century transition towards a rain-dominated Arctic will have widespread, long lasting and possibly even irreversible consequences.
Blunden et al., 2023 : State of the Climate in 2022	The second unusual event was the extraordinary amount of precipitation over Antarctica in 2022, which led to a record-high annual surface mass balance (since 1980) and the first net positive annual ice-sheet mass balance on the continent since satellite measurements began in 1993. The heavy precipitation was closely tied to an unusually high number of atmospheric rivers over the continent, which carry moisture over Antarctica that mainly falls as snow. March precipitation totals in the Wilkes and Adelie regions were particularly high, estimated to exceed 300% of the 1991–2020 climatological mean. In Antarctica, an unusually large amount of snow and ice fell over the continent in 2022 due to several landfalling atmospheric rivers, which contributed to the highest annual surface mass balance, 15% to 16% above the 1991–2020 normal, since the start of two reanalyses records dating to 1980 Arctic precipitation in 2022 was characterized by wetter-than-normal conditions in many areas, with record-breaking heavy precipitation events at various locations. Overall, 2022 pan-Arctic (north of 60°N) precipitation was the third highest since 1950, trailing only 2020 and 2017, according to ERA5 reanalysis. Winter (January–March), summer (July–September), and autumn (October–December) were all among the 10 wettest for their respective seasons Overall, summer 2022 was the Arctic's third-wettest summer since 1950 but some areas were dry. Southeastern and southern Alaska were exceptionally wet, with some locations reporting their wettest summer on record. Western Alaska experienced heavy rain and coastal flooding from ex-Typhoon Merbok in September. New monthly records for July rainfall were set at various locations in northern Norway. However, dry conditions prevailed over parts of northern Canada and north-eastern Europe In Arctic 2022 : Trends in extreme daily precipitation amounts may be explained by increases in the number of days with precipitation (a dynamic effect) or increases in the mean precipitation intensity (a thermodynamic effect). It is also possible that daily precipitation has become more concentrated into smaller and more intense wet spots over Earth's surface over the recent decades (Benestad et al. 2022). Arctic warming has been accompanied by an increase in precipitation. Since 1950, every season has shown an average increase in Arctic precipitation, in line with climate model projections (IPCC 2021). In some regions, the increase in precipitation is experienced through heavier precipitation events (e.g., Arctic Atlantic sector), while for others there has been an increase in the number of consecutive wet days (e.g., Svalbard eastward to the Chukchi Sea) Globally, precipitation over land has likely increased since 1950, consistent with increases in total atmospheric moisture (IPCC 2021). However, previous assessments of observed Arctic precipitation have not shown coherent trends (Walsh et al. 2020); results depend on the time period, region, and data product. Climate models project increased Arctic precipitation and more frequent heavy precipitation (e.g., Silmann et al. 2013; Kusunoki et al. 2015; McCrystal et al. 2021). Arctic precipitation in 2022 was characterized by wetter-than-normal conditions in many areas, with record-breaking heavy precipitation events at various locations. Overall, 2022 pan-Arctic (north of 60°N) precipitation was the third highest since 1950, trailing only 2020 and 2017, according to ERA5 reanalysis. Winter (January–March), summer (July–September), and autumn (October–December) were all among the 10 wettest for their respective seasons. In winter 2022, there were positive precipitation anomalies in the North Atlantic subarctic, the Gulf of Alaska, and much of southern Alaska. The wet anomalies over Alaska link to anomalously high pressure over western Canada and low-pressure anomalies offshore. The positive precipitation departures from Greenland to Norway are typical of those during La Niña conditions (NOAA 2022), which prevailed during 2022. Autumn in the Arctic was the ninth wettest since 1950. Precipitation departures were generally positive in the Pacific subarctic, but mixed in the North Atlantic. In contrast to winter and summer, negative anomalies extended from the Labrador Sea northeastward across Iceland and into the Nordic seas, consistent with positive sea-level pressure anomalies in the region. However, parts of northern Greenland were wetter than normal, especially in December. The southeastern Alaska Panhandle was also anomalously wet in autumn. Although south-central Alaska was seasonally dry, December was anomalously wet While there is considerable interannual variability in Arctic-wide average precipitation from 1950 to 2022, it is generally consistent across ERA5 and Global Precipitation Climatology Center (GPCC). Both the reanalysis and gridded data show increases of about 10% in yearly total precipitation over this period, with more substantial increases in winter than summer. The consistency across seasons and datasets indicates that Arctic-wide precipitation is increasing, as expected from climate model simulations. Lastly, there were two exceptional warming events in 2022 due to strong atmospheric rivers: one in early February on the Antarctic Peninsula (not shown; Gorodetskaya et al. 2023) and one in March on the East Antarctic plateau. Atmospheric rivers are rare events that represent the transport of subtropical/midlatitude heat and moisture toward the polar regions. According to the polar-specific atmospheric river detection algorithm from Wille et al. (2021), a prolonged and intense atmospheric river was detected over East Antarctica during 14–18 March. The low-level moisture associated with the atmospheric river was transported by a warm conveyor belt into the upper troposphere leading to strong upper-level latent heat release from cloud formation. This ultimately led to strong diabatic modification of potential vorticity which further reinforced and entrenched the downstream atmospheric ridge creating blocking conditions (Wernli and Davies 1997). The net impact of this intense atmospheric river primarily increased surface mass balance with enhanced snowfall. However, in future climate scenarios, higher temperatures may enhance the relative mass loss during atmospheric river events, as surface melt contributions to both runoff (reducing surface mass balance directly) and to the increased fragility of buttressing ice shelves. Increases in precipitation, combined with warming, are linked to altered seasonal patterns. Although April 2022 snow accumulation was higher than the 1991–2020 average for both the Eurasian and North American Arctic, snow-cover extent by June 2022 dipped to the second lowest for the North American Arctic and third lowest for the Eurasian Arctic in the 56-year record. The Antarctica heatwave of March 2022 : « The impacts on the surface of the ice sheet included an increase in both rain and snowfall as well as a short period of intense surface melt. This event was associated with an intense atmospheric river, which reached deep into the Antarctic interior, and was shortly followed by the collapse of the critically-unstable Conger Ice Shelf. While short-lived and unprecedented, these intense phenomena are more probable in future climate scenarios, with impacts including both enhanced precipitation and surface melt (Wille et al. 2023). It was an extraordinary year in Antarctica and the surrounding Southern Ocean in 2022, marked by new records in temperature, surface mass balance, ice-sheet mass balance, surface melt, and sea ice. Many of these records can be linked to two strong and persistent atmospheric circulation anomalies: a deep Amundsen Sea Low that occupied the Bellinghousen, Amundsen, and Ross Seas for most of the year and a strong blocking high in the far southwest Pacific northeast of Wilkes Land, East Antarctica. These features directed warm, moist northerly flow to the Antarctic Peninsula/West Antarctica and East Antarctica, respectively, which was accompanied by an anomalously high number of landfalling atmospheric rivers (long and narrow regions of extreme poleward moisture transport), heavy snowfall, and well above-average surface mass balance in these two regions The mid-March event was associated with an atmospheric river that caused record-breaking high-temperature anomalies high onto the East Antarctic plateau. This event, with a peak extent of 28,100 km ² on 17 March 2022, broke the observational record during the month of March in Wilkes and Adelie land by 164% (17,100 km ²), and is thus far the most significant late-season melt event recorded in this region later than 4 February in any recorded melt year of the satellite observational record. Most of the remainder of the Antarctic continent saw near-to-below-average melt compared to the reference period, with the Ross Embayment registering nearly no melt for the second consecutive year. - There are also compound extremes, such as rain-on-snow and freezing rain.

Annexe 5-4. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : le changement de précipitation (*change in precipitation*). (Partie 1)

Reference	Change in precipitation
Boisvert et al., 2020 : Intercomparison of Precipitation Estimates over the Southern Ocean from Atmospheric Reanalyses	Spatially, all reanalyses show precipitation generally increasing northward (lower latitudes) from the Antarctic continent. The only area where this does not occur is off of the coast of Terre Adélie and Wilkes Land in the South Pacific Ocean sector, where no clear latitudinal gradient occurs. This could be because the sea ice edge is much closer to the continent in these areas, whereas in the other areas the sea ice coverage is much larger and extends to lower latitudes, especially during the winter months. All reanalyses produce the least amount of precipitation in the Weddell and Ross Seas. The regional analysis highlights the differing monthly cycles in precipitation. For example, the Weddell Sea has the highest precipitation in March, with its minimum in November across all products, similar to the Southern Ocean. The Indian Ocean has its peak in precipitation in May, and the Pacific Ocean has its peak in March, with the Pacific Ocean having slightly more precipitation between March–September compared to the Indian Ocean. Both regions have a decrease in precipitation between October–December, with the Pacific (Indian) Ocean region reaching its minimum in November (December). The Ross Sea has a secondary peak in precipitation in September, although this is approximately 15 mm month ⁻¹ smaller than April. This secondary peak is consistent across the products. The Bellingshausen/Amundsen Seas show a peak in April and then a decrease in precipitation to a nearly constant amount in June–October before finally decreasing again. Similar to total precipitation, the least amount of snowfall occurs in the Weddell and Ross Seas, closest to the Antarctic continent, and increases toward lower (more northerly) latitudes. Unlike total precipitation, snowfall decreases in magnitude northward (lower latitudes) from the continent until about 65S, where it drops off rapidly to zero as it encounters warmer atmospheric temperatures at the lower latitudes. The largest amount of snowfall occurs just off the East Antarctic coast, from Terre Adélie to Princess Elizabeth Land, and slightly farther west between Kemp Land and Enderby Land. These same spatial patterns are seen across the five reanalyses, but the magnitude of the snowfall varies. The least variable snowfall occurs in the Weddell and Ross Seas closest to the continent. The most variable snowfall between the products occurs between 55S and 65S, where most of the precipitation occurs and is likely a result of the variability in the snow to rain transition location across products. CloudSat shows the least amount of snowfall in the Weddell and Ross Seas near the ice shelves. Higher amounts of precipitation occur in the Bellingshausen/Amundsen Seas near the Antarctic coast and Antarctic Peninsula and also in the Indian and Pacific Ocean sectors. ... All of the reanalyses except ERA-Interim produce similar patterns of snowfall differences when compared to CloudSat, with CloudSat detecting much less snowfall at higher latitudes and more snowfall at lower latitudes (60S). All reanalyses agree that the least amount of rainfall occurs closest to the Antarctic continent and this increases toward lower (more northern) latitudes. However, the area with the least amount of rainfall varies between them. Thus, the largest deviations between the reanalyses occur in the 30S latitudinal band where the strong rainfall (and snowfall) transition occurs. The largest rainfall amounts are seen in the Bellingshausen/Amundsen Seas, with the lowest in the Weddell Sea. It is important to consider, however, that the majority of the rainfall in all of the regions is occurring at lower latitudes and not necessarily over the sea ice pack. Similar to total precipitation, snowfall is indicated nearly every day of the year over areas closest to the Antarctic continent. At latitudes around 60S, the snowfall frequency decreases rapidly where temperatures are warmer. The number of days that each reanalysis produces rainfall is opposite to the snowfall, where the most frequent rainfall occurs at lower latitudes, and decreases slightly to finally almost no days with rainfall closest to the Antarctic continent. There is no significant change in the total number of snowfall (not shown) and rainfall days between 2000 and 2016. Thus, the magnitude of the rainfall events is increasing since the number of days remains constant in these particular reanalyses. ... The Bellingshausen/Amundsen Seas have the most frequent rainfall occurrences, and the Pacific Ocean has the least frequent rainfall occurrences compared to the other regions. All reanalyses produce the least amount of precipitation in the southern Ross and Weddell Seas in embayments near the ice shelves. In these areas, persistent cold dry katabatic winds blow from the continent, across the ice shelves and out over the sea ice (Parish and Bromwich 2007). These cold dry winds are not conducive for the formation of precipitation, and thus less precipitation occurs in these regions. These areas are also shielded from eastward-traversing synoptic systems by topography. All reanalyses also produce the highest precipitation off the coasts of East Antarctica in the Indian and Pacific Ocean regions. Reanalyses and CloudSat also indicate more precipitation amounts west of the Antarctic Peninsula and less precipitation on the eastern side. This is likely caused by more persistent storms and weather generally moving eastward from the Bellingshausen/Amundsen Seas into the Weddell Sea, resulting in orographic forcing along the windward side of the peninsula (Parish 1983; Turner et al. 1995). Large precipitation amounts occur where the largest number of cyclones occur (Joulla et al. 2011; Papritz et al. 2014). These tend to be located off the coasts of eastern Antarctica (in the eastern Ross Sea region, and off the coasts in the Pacific and Indian Ocean regions, where the largest spread between the reanalysis precipitation occurs.
Descamps et al., 2017 : Climate change impacts on wildlife in a High Arctic archipelago – Svalbard, Norway	Projections for precipitation indicate a continued increase up to the year 2100 (Ferland et al., 2012). However, data on precipitation are not very reliable due to the difficulties in measuring solid forms of precipitation (Ferland & Hanssen-Bauer, 2000) During summer (June to August), air temperatures have increased since the 1990s in Svalbard, but similar to winter conditions, there has been no clear trend in precipitation (Ferland et al., 2012; Ims et al., 2014). In the terrestrial ecosystem, increased winter air temperatures and concomitant increases in the frequency of “rain-on-snow” events are one of the most important facets of climate change with respect to impacts on flora and fauna. “Rain on snow” events (hereafter ROS events) have always occurred in Svalbard due to the strong oceanic influence on the weather systems within the archipelago (Svendsen et al., 2002), but such events are increasing in frequency due to winter warming (Ferland et al. 2012). ROS events have a significant impact on the entire terrestrial ecosystem by changing snowpack properties and sub-snowpack soil temperatures (Puikonen & Roe, 2003; Rennert et al., 2009). Climate warming is associated with changes in many biotic (e.g. predator-prey relations) and abiotic environmental parameters and interactions simultaneously (e.g., timing of ice break up, warming of the sea, increased frequency of ROS events) at various periods of the year.
Dou et al., 2019 : A key factor initiating surface ablation of Arctic sea ice: earlier and increasing liquid precipitation	First spring rainfall in Utqiagvik has been observed to shift to earlier dates since the 1970s, in particular after the mid-1990s. Early melt season rainfall and its fraction of total annual precipitation also exhibit an increasing trend. This trend towards earlier spring rainfall has been more pronounced since the early 2000s (26.9 days decade ⁻¹ during 2000–2015, $P < 0.01$), which is consistent with the accelerated decline of Arctic sea ice since the early 2000s Prior to the mid-1990s there was almost no rainfall in May (Fig. 8). Since then, the amount of rainfall has increased, especially in the past 10 years. Rainfall amount in May has been increasing significantly over the past 60 years (Fig. 9), with a linear trend of 0.43 mm decade ⁻¹ during 1952–2015 ($p < 0.01$) and 1.4 mm decade ⁻¹ since the mid-1990s ($p < 0.01$). By contrast, the total precipitation did not change significantly before and after the mid-1990s but has increased substantially over the past few years (Fig. 8). The trend towards higher ratios of rain : total precipitation (R : P ratio) in May has been significant over the past 60 years (0.04 per decade; $p < 0.01$; Fig. 8), especially after the mid-1990s (0.09 per decade; $p < 0.01$) Onset of spring rainfall over sea ice has shifted to earlier dates since the 1970s, in particular since the mid-1990s - variability and potential trends of rain-on snow events over Arctic sea ice and their role in sea-ice losses are poorly understood. Rain-on-snow events over Arctic sea ice are likely to have profound impacts, particularly in late spring when the snowpack has warmed the first rain-on-snow events of the year have been shifted to earlier dates over the past 60 years (2.8 days decade ⁻¹ , $P < 0.01$).
Dou et al., 2021 : Trends and spatial variation in rain-on-snow events over the Arctic Ocean during the early melt season	There has been a clear transition from solid to liquid precipitation, leading to more ROS events in spring The larger the ratio, the greater the proportion of rainfall in the total precipitation : RPR in the four products exhibits consistently increasing trends in each month over past decades, especially in May and June. The most significant trend occurs in June for all the reanalysis datasets (Fig. 4). Averaged over the whole Arctic sea ice area, the RPR trend in June in ERA-I, JRA, MERRA, and ERA5 amounts to 2.6 %, 2.7 %, 2.4 %, and 2.1 % per decade, respectively. The RPR trends in May from ERA-I, JRA, MERRA, and ERA5 are 1.7 %, 1.1 %, 0.8 %, and 1.3 % per decade, respectively. Overall, the RPR trends are predominantly positive over the Arctic Ocean in May and June, although there are large spatial differences among the products in both months. There is also an increasing trend close to the ice edge in the Atlantic sector, especially in the Nordic arctic region. A recent study based on station observations in Svalbard demonstrated that the solid precipitation has decreased at a rate of 2.3 %–6.5 % per decade in this region during the past decades, while the liquid precipitation has increased at a rate of 0.6 %–9.4 % per decade during the same period (Ferland et al., 2020). This is generally consistent with our results in the Atlantic sector. The ROS shows a significant increasing trend toward higher rainfall amounts in the marginal seas and CAA area except for the southern part of the Chukchi Sea and the western part of the East Siberian Sea. In the same period, the total precipitation amounts significantly increased in the northern Barents Sea and parts of the Kara Sea. They significantly declined along eastern Greenland, and the change in other areas of the Arctic Ocean is relatively small. The trend of RPR is generally consistent with the trend of ROS The rain-precipitation ratio (RPR) averaged over the Arctic Ocean shows a significant increasing trend in May and June in all reanalysis datasets - All reanalyses indicate that ROS event timing has shifted to earlier dates in recent decades (with maximum trends up to -4 to -6 d per decade in some regions in ERA-Interim) the ROS shows a significant increasing trend toward higher rainfall amounts in the marginal seas and CAA area except for the southern part of the Chukchi Sea and the western part of the East Siberian Sea The multiple reanalysis products consistently indicate that trends towards earlier spring ROS events exist throughout much of the Arctic Ocean over the past decades, with the most pronounced negative trends in the marginal seas.

Annexe 5-5. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : le changement de précipitation (*change in precipitation*). (Partie 2)

Reference	Change in precipitation
Dou et al., 2022 : More Frequent, Intense, and Extensive Rainfall Events in a Strongly Warming Arctic	<p>The multi-model mean shows that rainfall will occur more frequently in the Arctic at the end of this century (2091–2100), with larger increase in the rainy days over the Pacific and Atlantic sectors (up to 12 days/month) during the cold seasons (October–May) and over the Arctic Ocean (up to 14 days/month) during the warm seasons (June–September) as compared with the present day (2006–2015) Moreover, at the end of this century, the rainfall in spring will occur much earlier than the present day by more than 1 month, and the extent of rainfall will further expand toward the center of the Arctic Ocean and the inland Greenland in the future. The changes of rainfall intensity on the Arctic land area to the climate warming are more sensitive than that on the Arctic Ocean in warm seasons (May–September). The rainfall will be further strengthened in most of the Arctic continents in summer, with the largest increase in the intensity of ~2 mm/day along the southwest coast of Greenland. This study reveals that the increase in rainfall in the Arctic is reflected not only in frequency but also in intensity and range The rainfall will further advance toward the center of the Arctic Ocean and the inland area of Greenland at the end of this century, leading to more and more rainfall events in these areas. Meanwhile, the timing of rainfall in spring will be significantly advanced, taking the Chukchi Sea and the Northern Barents Sea as an example, the first spring rainfall in these areas at the end of this century will occur 3 months earlier than the present-day. We further found that local warming is the main reason for more rainfall days in the Arctic. Actually, it determines almost all the increases on rainy days in the areas where precipitation phase change is highly sensitive to the temperature rise. Various reanalysis data sets consistently show that the number of days with total precipitation is largest in August–September and smallest throughout the spring, and the number of days with rainfall is largest in July–September and smallest throughout the cold season (November–May). The projected number of days with rainfall shows an overall increasing trend, indicating that rainfall will occur more frequently in the Arctic. Meanwhile, the extent of rainfall shows a trend of northward expansion, and this trend is observed throughout Arctic Ocean during the warm season (June–October) and most evident in the Atlantic sector during the cold season (November–May). In November–April, the rainfall days will increase by up to 12 days/month in the Barents Sea, Greenland Sea, Northern Europe, and Pacific sector by the end of this century as compared with the reference period (2006–2015). During the warm season (June–September), the largest increase in rainfall days will occur over the Arctic Ocean, which can be up to 14 days/month in the central Arctic Ocean in September. During the transition period of spring–summer (May), the increase mainly occurs over the Arctic land area. To sum up, the multi-model mean of rainy days has larger uncertainty in the Norwegian Sea in cold seasons, and that of total precipitation days has larger uncertainty in the Barents Sea in winter. During other seasons, the intermodel variability is relatively small in the Arctic. The more frequent rainfall events in the future are not mainly caused by the increase of total precipitation We quantitatively estimated the contributions of solid-to-liquid precipitation transition due to local warming and precipitation increases to the increase of rainy days, and the results showed that the local warming contributes more than 90% to the increase in rainy days in March. Even in June when the local warming plays a relatively weak role, it still contributes ~67% of the increase in the number of days with rainfall. On an annual average, the local warming contributes ~83% to the increase in rainy days by the end of this century. In the summer period, the contribution of local warming is smaller than those in other seasons and is mainly observed over the Arctic Ocean (50%–80%), and the remaining part is contributed by the increase in the number of days with total precipitation. In the cold months (October–April), the local warming contributes to almost all the increases in the number of days with rainfall in the areas where rainfall occurs. The areas where rainy days increase in the Arctic Ocean are highly consistent with the areas where sea ice retreats. From the above analysis, we know that the increase in rainfall days in the Arctic Ocean is mainly caused by the transition of the precipitation phase due to local warming, manifested in the northward movement of the zero-degree isotherm as the sea ice retreat. In the areas at a temperature close to the melting point, the changes in the precipitation phase are particularly sensitive to local warming. With climate warming, rainfall events are observed in these areas by the end of this century, and the frequency of rainfall events has an increasing trend. This phenomenon is particularly evident in the Arctic Ocean in August and September. In contrast, the local warming is not enough to raise the temperature above the melting point in parts of Siberia during the cold seasons. Therefore, even under the highest emission scenario, there is no significant change in the number of days with rainfall in this region by the end of this century The projections further show that the largest increase in the number of days with rainfall is observed in August/October, corresponding to the period with the largest increase in the RPR (the ratio of rainfall day to total precipitation day), while the largest increase in the number of days with total precipitation is found in the cold seasons (October–May). This further confirms that the increase in rainy days is dominated by the increasing RPR (i.e., solid-to-liquid precipitation transition). Air temperature in September is slightly lower than the melting point during the reference period. Thus, the precipitation phase in this period is extremely sensitive to the temperature rise. The projections show that the RPR increases by ~40% due to the strong local warming with the rapid sea ice retreat in September by the end of this century. As a result, the rainy days increase by 11 days/month during the same period. The number of days with total precipitation is highest in August under the present-day climate; however, starting in the middle of this century, September has become the month with the most frequent precipitation events, the Arctic Ocean becomes ice-free during August and September at the end of this century under the strong emission scenario, which provides abundant water vapor, making September the month with the most frequent precipitation from the middle of this century. Meanwhile, severe local warming occurs during the ice-free period, leading to a great increase in the RPR in the Arctic. Consequently, August will replace July as the month with the highest RPR in the second half of this century (89% by the end of this century), resulting in the most frequent rainfall events in August. The projections show that the timing of the first rainfall event in spring will be earlier than the present day by ~38 days on average across the Arctic by the end of this century. The shift in the early melt season rainfall is most evident in the Pacific and North Atlantic sectors, especially in the Chukchi Sea and the Northern Barents Sea, where the onset date of rainfall event in spring occurs ~3 months (one season) earlier than that of the present day. This means that spring rainfall will occur much earlier in most parts of the Arctic at the end of this century The intensity of rainfall also shows an overall increasing trend in the future. By the end of this century, the intensity of the warm season (June–September) rainfall can reach greater than 6 mm/day over the Arctic continent, which is stronger than the intensity of rainfall (~4 mm/day in average) in the Arctic Ocean during the same period. In the winter part of the year (October–April), rainfall events only occur in the Pacific and Atlantic sectors with intensities greater than 3 mm/day. From June to September, the projected increase in rainfall intensity can be up to ~2 mm/day over parts of the Arctic land area, including western and southern Greenland, which is larger than the increase over the Arctic Ocean (~0.5 mm/day), indicating that the response of rainfall intensity to the climate change is more sensitive over the Arctic land area in the warm season. The earlier studies based on CMIP5 projections suggested that the warm season moisture inflow from the lower latitudes will increase significantly at the end of this century under high-emission scenarios (Bintanja & Selten, 2014), leading to a larger increase in the intensity of rainfall events on the land area since the frequencies of rainfall events will not increase during the same period. Moreover, the increase in rainfall intensity is mainly observed over the lower latitudes of the Pacific and Atlantic sectors during the winter part of the year because it is still too cold to form rainfall during this period in other regions by the end of this century We further analyzed the projections of the maximum intensity of rainfall, and the results indicate that the maximum intensity of rainfall in summer (June–September) is significantly higher than those in other seasons over the Arctic continent. The strongest rainfall events are likely to be observed over northwest Alaska, eastern Siberia, northern Europe, and the marginal area of Greenland in the future, and the intensity of these rainfall events can reach 32 mm/day. In large parts of eastern Siberia, the increase of the maximum intensity of rainfall events in summer will be larger than 10 mm/day relative to the present day, demonstrating that the Arctic region may suffer more heavy rainfall events during the warm season with global warming. In the cold months (November–April), the maximum intensity of rainfall events will not change significantly in the Arctic except for a slight increase over the Pacific sector. The increasing trend of the number of days with rainfall is mainly observed in the Atlantic and Pacific sectors in the cold seasons, while it is mainly observed over the Arctic Ocean in the warm seasons, especially in September. In the cold seasons, the local warming in the Atlantic sector contributes most to the increase in rainfall days (~90% over the Arctic Ocean). In summer, the contribution of local warming is relatively small (~70%) and mainly reflected over the Arctic Ocean, and the remaining part was contributed by the increase in total precipitation. In addition to the increase in the frequency and intensity of rainfall, we found that the first rainfall at the end of this century occurred earlier than the present day by ~38 days on average over the Arctic, and the largest changes are observed over the Pacific and Atlantic sectors The increase of rainfall intensity is mainly manifested in the Pacific and Atlantic sectors during the cold seasons (November–April), while it is observed in most parts of the Arctic during the warm seasons (May–September), and the largest increase up to 2 mm/day is observed in large part of the Arctic continent. ... The largest increase in the maximum intensity of rainfall occurs over eastern Siberia, western Alaska and the southwestern edge of Greenland from July to September, which can reach ~12 mm/day. This means that there will be more heavy rainfall events in the warm season in a large part of the Arctic land area with global warming. Additionally, the projections show the rainfall events tend to advance toward the center of the Arctic Ocean and inland area of the Greenland Ice Sheet in August in the future</p>
Ehn et al., 2006 : Surface albedo observations of Hudson Bay (Canada) landfast sea ice during the spring melt	
Ferguson, 2005 : CLIMATE CHANGE AND RINGED SEAL (PHOCA HISPIDA) RECRUITMENT IN WESTERN HUDSON BAY	Although rainfall was not significant for northwestern Hudson Bay weather stations, spring rainfall recorded at Churchill, just south of the study area, increased from 1962-2000.
Galindo et al., 2014 : Biological and physical processes influencing sea ice, under-ice algae, and dimethylsulfoniopropionate during spring in the Canadian Arctic Archipelago	In 2010, daily averaged air temperature increased progressively from -7Cto4C, with temperature exceeding 0C after 6 June. The sampling period was marked by a single small rain event on 10 June. In 2011, air temperature increased from -14Cto4C during the entire sampling period and began to exceed 0C on 8 June. Two prominent and closely spaced rain events of 1 and 0.8 mm occurred on 10 and 12 June, respectively.
Grenfell et Puitkonen, 2008 : A method for the detection of the severe rain-on-snow event on Banks Island, October 2003, using passive microwave remote sensing	yet little is known of the actual frequency and distribution of such events ROS events may be increasingly frequent under the present climate trend. These events (ROS) occur when a substantial amount of rain falls on an existing snowpack. If sufficient in volume, the rain penetrates well into the snow and often percolates down to the soil surface In early October 2003, a period of rain lasting several days occurred after the onset of fall freezeup in September on Banks Island, the westernmost island in the Canadian Arctic Archipelago producing a severe ROS event.
Hansen et Aanes, 2012 : Kelp and seaweed feeding by High-Arctic wild reindeer under extreme winter conditions	Winter 2010 was the fourth mildest (8.9C) and the fourth wettest ever recorded (326 mm precipitation), with several heavy ROS events occurring during November-January.

Annexe 5-6. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : le changement de précipitation (*change in precipitation*). (Partie 3)

Reference	Change in precipitation
Hansen et al., 2014 : Warmer and wetter winters: characteristics and implications of an extreme weather event in the High Arctic	One predicted consequence of global warming is an increased frequency of extreme weather events, such as heat waves, droughts, or heavy rainfalls. In this normally cold semi-desert environment, we recorded above-zero temperatures (up to 7 °C) across the entire archipelago and record-breaking precipitation, with up to 98 mm rainfall in one day (return period of >500 years prior to this event) and 272 mm over the two-week long warm spell. These precipitation amounts are equivalent to 25 and 70% respectively of the mean annual total precipitation. Mid-winter 2011–12 was associated with a strong positive temperature anomaly across most of the Barents Sea and surrounding waters. In late January–early February, a long-lasting high pressure over northern Scandinavia directed low pressure systems with mild and humid air northward to Svalbard. These lows, with their associated frontal passages, had large-scale horizontal convergence, resulting in two weeks (i.e. approximately 26 January–9 February) of extreme warm periods with prolonged rainfall across most of the archipelago. Above-zero temperatures were recorded at all weather stations on the archipelago during this period, yet the warm spell was most profound in western parts of Svalbard. At Svalbard Airport, the average temperature on 30 January was 4.0 °C, almost 20 °C higher than the daily normal, and in fact, higher than at any weather station in mainland Norway on that day. On 8 February, the maximum temperature Tmax at Akseleya reached 7.8 °C, i.e. the highest temperature ever recorded in Svalbard in February. Across Svalbard, the warm spell was immediately followed by a cold period, with Tmax typically –10 °C or lower. At all three weather stations, several heavy rainfalls were associated with the two-week warm spell. The most striking event was recorded in Ny-Ålesund on January 30th when 98 mm rain fell (Tmax = 4.3 °C), which had (prior to this event) a return period of >500 years following the Norwegian manual for calculation of probable extreme daily precipitation values (Farland 1992), and which corresponds to 25% of the mean annual total precipitation. Both in Longyearbyen and Ny-Ålesund, average winter temperature has increased by –4.5 °C since the mid 1990's, with an associated increased probability for above-zero temperatures and winter precipitation falling as rain. Winter rain is hereafter referred to as ROS, since with very few exceptions (such as immediately after heavy rainfalls), there is continuous snow cover during November–April. Because of the extreme event in January–February 2012, the winter of 2011–2012 had the largest (Ny-Ålesund) and third largest ROS amount (Longyearbyen) ever recorded. Because the rapid winter warming observed in Svalbard and many other Arctic areas can be projected to accelerate throughout the century, the frequency of extreme warm spells and ROS events will likely increase as well. In parts of the Arctic, extreme warm spells and heavy rain-on-snow (ROS) events in winter are already more frequent. We predict strong future warming with average mid-winter temperatures even approaching 0 °C, suggesting increased frequency of ROS. The predicted warming implies more frequent episodes with above zero winter temperatures, and if the projections hold, we can even expect to see some winters with mid-winter mean temperatures above 0 °C after about 2050. Accordingly, the frequency of ROS events and annual ROS amount will likely increase dramatically as the probability of crossing the near-zero °C threshold for precipitation falling as rain rather than snow increases (Remert et al 2009, Hansen et al 2011).
Hezel et al., 2012 : Projected decline in spring snow depth on Arctic sea ice caused by progressively later autumn open ocean freeze-up this century	Precipitation increases as expected in a warmer climate, but much of this increase in the Arctic occurs as rainfall. The seasonality of snowfall rate grows, with increasing rates in winter and decreasing rates in summer and autumn, but the cumulative snowfall from September to April does not change. The total precipitation (rain plus snow) in winter months increases through the 21st century because moisture convergence into the Arctic increases roughly according to the temperature dependence of the Clausius-Clapeyron equation. For the months of November to March, the multi-model mean snowfall rate increases in all models from 1981–2000 to 2081–2100, with a mean increase of 27 +/- 16%, and a range from 5% to 51%. In the same months the multi-model mean increase in total precipitation is 69 +/- 21%, and so a substantial fraction of the increase in precipitation occurs as rain. The time series of multi-model mean monthly rainfall averaged over April and May shows an increase through the end of the 21st century in RCP8.5. The fraction of precipitation that falls as rain in April and May increases from 19 +/- 7% to 44 +/- 7% in the multi-model mean over these two periods. Snowfall is roughly constant in the multi-model mean for April and May, and therefore almost all of the increase in precipitation in these months is in the form of rain. By the end of the 21st century, the multi-model mean snowfall rates averaged north of 70N have a larger seasonal variation, with a higher peak in winter and lower trough in summer compared to the end of the 20th century. In addition, the timing of the snowfall peak shifts from October to December, as more of the precipitation falls as rain in autumn months
IPCC, 2019 : IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate	Atmospheric reanalyses show increases in Arctic precipitation in recent decades (Lique et al., 2016; Vihma et al., 2016) Increases in precipitation extremes are also projected over northern watersheds (Kharin et al., 2013; Sillmann et al., 2013), while rain on snow events are expected to increase (Hansen et al., 2014). There is no evidence of trends in rain-on-snow events (Cohen et al., 2015; Dolant et al., 2017).
IPCC, 2021 : Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change	Rain-on-snow melt events reduce at lower altitudes due to declining snow cover but increase at higher altitudes where snow tends to be replaced by rain based on observations and modelling (Musseiman et al., 2018; Pall et al., 2019) Heavy snowfalls have decreased in frequency in the past decades and this is expected to continue in the future climate (low confidence) (Beniston et al., 2018). Rain-on-snow events, are decreasing in northern regions (Pall et al., 2019) and by 48% on average in southern Scandinavia (Posch et al., 2020) due to decreases in snowfall. Atlas.11.2 indicated medium confidence in observed increases in Arctic precipitation, with the largest rises in the cold season. Antarctic precipitation showed no significant overall trend since the 1970s, with a positive trend over the 20th century (Sections 9.4.2.1 and Atlas.11.1). Increases in Arctic and Antarctic precipitation during the 21st century are very likely, with projected percentage increases that are much higher than most subtropical regions of the world (Figure Atlas.29). Future increases in rain-on-snow event days, amounts, and runoff, which are more significant in the Arctic than in mid-latitudes (where seasonal snow cover is often further reduced; AMAP, 2017; Jeong and Sushama, 2018b). Recent decades have seen a general decrease in Arctic aridity, with projections indicating a continuing trend towards reduced aridity (high confidence) as increased moisture transport leads to higher precipitation, humidity and streamflow (Meredith et al., 2019) and a corresponding decrease in dry days (Khebnikova et al., 2019a). Higher temperatures result in a higher percentage of Arctic precipitation falling as rain (particularly in autumn and spring) (high confidence), with most land regions (outside of Greenland and Antarctica) becoming dominated by rainfall (more than 50% of total precipitation) by RCP8.5 2100 (Bintanja and Andry, 2017; Irannejad et al., 2017). There is limited evidence of changes in heavy snowfall due to competing influences of shortened snowfall seasonality with more intense (and larger overall) precipitation in the Arctic. Episodic heavy snowfall trends in Antarctica are difficult to separate from large interannual variability (limited evidence) (Gorodetskaya et al., 2014; Turner et al., 2020). Groisman et al. (2016) used 40 years of observations to identify an increase of freezing rain events in Norway, North America, and eastern and western Russia. The water cycle is projected to intensify in polar regions, leading to more rainfall, higher river flood potential and more intense precipitation (high confidence). Even as some of the coldest regions will see higher total snowfall given increased precipitation (medium confidence). It is virtually certain that surface warming in the Arctic will continue to be more pronounced than the global average warming over the 21st century. An intensification of the polar water cycle will increase mean precipitation, with precipitation intensity becoming stronger and more likely to be rainfall rather than snowfall (high confidence). Recent decades have seen a general decrease in Arctic aridity (high confidence), with increased moisture transport leading to higher precipitation, humidity and streamflow and a corresponding decrease in dry days. Antarctic precipitation showed a positive trend during the 20th century. The water cycle is projected to intensify in both polar regions, leading to higher precipitation totals (and a shift to more heavy precipitation) and higher fraction of precipitation falling as rain. It is very likely that the Arctic has warmed at more than twice the global rate over the past 50 years and likely that annual precipitation has increased with the highest increases during the cold season. The frequency of rainfall increased over the Arctic by 2.7–5.4% over the 2000–2016 period with more frequent rainfall events being reported for northern Europe and Svalbard (medium confidence). It is very likely that the Arctic annual mean temperature and precipitation will continue to increase, reaching around 11.5°C ± 3.4°C and 49 ± 19% over the 2081–2100 period (with respect to a 1995–2014 baseline) under the SSP5-8.5 scenario or 4.0°C ± 2.5°C and 17 ± 11% under the SSP1-2.6 scenario. The Antarctic region is very likely to experience a significant increase in annual mean temperature and precipitation by the end of this century under all emissions scenarios used in CMIP5 and CMIP6 (Figure Atlas.29; Bracegirdle et al., 2015, 2020b; Frieler et al., 2015; Lenaerts et al., 2016; Previdi and Polvani, 2016; Palermi et al., 2017). CMIP6 models show a similar or larger but more constrained increase in precipitation (more models agreeing with larger precipitation increase) for the same GWLs compared to CMIP5. For example, over WAN during JJA for 3°C GWL, CMIP6 and CMIP5 models project a median 15% increase in precipitation with a 10th–90th percentile range of 7–25% in CMIP6 models and of 3–24% in CMIP5. Average precipitation changes relative to 1995–2014 over WAN and EAN are largely similar, they show projected increases for SSP2-4.5 (SSP5-8.5) of around 5% (5%) for 2021–2040, 7% (10%) for 2041–2060, and 12% (25%) for 2081–2100 with smaller increases projected for SSP1-2.6 emissions, reaching around 5% in 2081–2100. Regionally, the largest relative precipitation increase is projected (under all scenarios) for the eastern part of WAN, the western AP, large parts of the EAN plateau and over coastal EAN within 0°E–90°E longitudinal sector (Interactive Atlas). The largest increase in absolute precipitation amount is projected along the coastal regions, with the largest increase over coastal WAN and the western AP, and is projected to be largely driven by the increase in maximum five-day precipitation (Interactive Atlas), which is in line with the dominant contribution of extreme snowfall events to the total annual precipitation in the present Antarctic climate (Boening et al., 2012; Gorodetskaya et al., 2014; Turner et al., 2020). Under all emissions scenarios, the coastal precipitation increase corresponds to the snowfall increase, except for the northern and central part of the western AP, where snowfall is projected to decrease and rainfall to increase (similarly to the tendency towards increased precipitation, decreased snowfall and increase in rainfall over the Southern Ocean; Interactive Atlas) Precipitation in the Arctic is dominated by snowfall, with rainfall present mostly during the summer period. The high latitudes are likely to experience an increase in annual mean precipitation under RCP8.5 (IPCC, 2013c). Further, changes in precipitation will not be uniform. AMAP reported Arctic precipitation increases of 1.5–2.0% per decade, with the strongest increase in the cold season (October–May) (medium confidence) (AMAP, 2019). Estimated trends for precipitation and snowfall fraction are mixed for the Arctic, with increases and decreases for different regions and seasons (Vihma et al., 2016). However, annual precipitation trends derived from different reanalyses do not agree, differ in sign and have low significance (Lindsay et al., 2014; Boisvert et al., 2018). An average of five reanalyses for 2000–2010 suggests around 40% of Arctic Ocean precipitation falls as snow, though there is large uncertainty in this estimate (Boisvert et al., 2018). Rainfall frequency is estimated to have increased over the Arctic by 2.7–5.4% over 2000–2016 (Boisvert et al., 2018) with more frequent rainfall events reported for NEU and ARO (Svalbard; Maturilli et al., 2015; AMAP, 2019), and winter rain totals and frequency have increased in Svalbard since 2000 (medium confidence) (Lupikasza et al., 2019). Rain-free winters have rarely occurred since 1998 (Peeters et al., 2019). Observational records (1966–2010) for the RAR region show changing precipitation characteristics (Ye et al., 2016), with higher precipitation intensity but lower frequency and little change in annual precipitation total. Precipitation intensity is reported to have increased in all seasons, strongest in winter and spring, weakest in summer, and at a rate of about 1–3% per degree Celsius of air temperature increase. Mean precipitation in ARO, GIG and RAR is projected to rise in a warming climate (Figure Atlas.29), with different rates for the different seasons and scenarios. The CMIP5 multi-model mean projected precipitation increase in the Arctic is likely of the order of 50% under RCP8.5 by the end of the 21st century, which is among the highest globally (Bintanja and Selten, 2014). Over 70°N–90°N, the precipitation increase is likely 62 ± 20% and 56 ± 13% for RCP4.5 and RCP8.5 respectively. For ARO (Svalbard), the increase in annual precipitation by 2100 is estimated to be about 45% for RCP4.5 and 65% for RCP8.5 (CMIP5 ensemble median; Van der Bill et al., 2019). However, importantly the simulated Arctic precipitation increase varies by a factor of three to four between models (Bintanja and Selten, 2014). The projected increase is strongest in late autumn and winter (Vihma et al., 2016). The interannual variability of Arctic precipitation will likely increase markedly (up to 40% over the 21st century), especially in summer (medium confidence) (Bintanja et al., 2020). The CMIP6 projections confirm precipitation will likely increase almost everywhere in the Arctic (Interactive Atlas). The largest increase is simulated over the Barents Sea, Kara Sea and East Siberian Sea regions, and over north-east Greenland. A pronounced uncertainty in the projection exists over the Arctic North Atlantic and south Greenland. There, the precipitation signal is not significant even by the end of the 21st century and under high-emissions scenarios (RCP8.5, SSP5-8.5). Consistent with the generally higher warming in CMIP6, compared to CMIP5, the projected precipitation increase is also higher (high confidence). Rain is projected to become the dominant form of precipitation in the Arctic region by the end of the 21st century (Bintanja, 2018). The CMIP5 models show a decrease in annual Arctic snowfall under both RCP4.5 and RCP8.5 (high confidence) (Kasting et al., 2013; Bintanja and Andry, 2017). In the central Arctic, the snowfall fraction barely remains larger than 50%, with only Greenland still having snowfall fractions larger than 80% (Bintanja and Andry, 2017). The most dramatic reductions in snowfall fraction are projected to occur over the North Atlantic and, especially, the Barents Sea. Annual precipitation has increased with the highest increases during the cold season. The frequency of rainfall increased over the Arctic by 2.7–5.4% over the 2000–2016 period with more frequent rainfall events being reported for northern Europe and Svalbard (medium confidence). It is very likely that the Arctic annual mean temperature and precipitation will continue to increase, reaching around 11.5°C ± 3.4°C and 49 ± 19% over the 2081–2100 period (with respect to a 1995–2014 baseline) under the SSP5-8.5 scenario or 4.0°C ± 2.5°C and 17 ± 11% under the SSP1-2.6 scenario.

Annexe 5-7. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : le changement de précipitation (change in precipitation). (Partie 4)

Reference	Change in precipitation
Kwok et al., 2003 : A study of the onset of melt over the Arctic Ocean in RADARSAT synthetic aperture radar data	
Langlois et al., 2017 : Detection of rain-on-snow (ROS) events and ice layer formation using passive microwave radiometry. A context for Peary caribou habitat in the Canadian Arctic	Several studies have suggested that another response to the current arctic warming could be an increase in rain-on-snow (ROS) events - Results show that both icing and ROS event occurrence tripled between the periods of 1979-1995 and 1996-2011, with very active years in winters 1993-1994, 1996-1999 and 2002-2003. The areas with the most combined occurrences are the Boothia Peninsula and Axel Heberg, Cornwallis, Banks and Victoria Islands. Although simulations suggest that ROS and icing events will increase in future, there have been very few studies that have quantified whether there is evidence showing that events have increased at present compared to historical data. In Table 3, one can clearly see an increase in ROS events between the periods 79-80/94-95 compared to the period 95-96/10-11. The cumulative observed ROS in the first period is 102 (26% of all observed ROS) and 284 (74% of all observed ROS) in the latter. This suggests a significant increase in ROS occurrence, with the most active years being 0203, 08-09, 98-99 and 93-94. Of particular relevance, we can see that AH, BMI, CI and PW are the islands with the highest ROS occurrence since 1979. Our results suggest the islands with the most substantial increase in ROS are Axel Heberg (+61 events between 79 and 95 compared to 9511), Emerald (+21), Byam Martin (+19), Eglington and Prince of Wales (both at +16) over the 16-years examined. Only 3 islands had fewer occurrences in the second period: Central Ellesmere (-8), Southern Ellesmere (-3) and Helena Island (-2). For IDI, the most important increase in occurrence was observed for Victoria (+27), Byam Martin (+26), Loughheed (+20), Cornwallis (+16) and Axel Heberg (+15). Interestingly, six islands had a lower occurrence of IDI and most are located in the northern part of the CAA, in agreement with the ROS results. It was shown that for both ROS and IDI, a similar acceleration in event occurrences was observed when comparing 1979-1994 to 1995-2011 with about 75% of the events occurring in the latter period. Our analyses also suggest that the regions located in the southern part of the CAA are more prone to increasing event occurrence. Thus, with a sustained arctic warming amplification, along with the increased occurrence of winter storms, it is anticipated that ROS and icing events that affect winter foraging conditions for Peary caribou will continue to increase in the near future.
Lannuzel et al., 2020 : The future of Arctic sea-ice biogeochemistry and ice-associated ecosystems	Rain, rather than snow, may become the dominant form of precipitation by the end of the century ¹⁷
Liang et al., 2023 : The Role of Atmospheric Rivers in Antarctic Sea Ice Variations	AR frequency on sea ice is higher in austral winter (JJA) and spring (SON) compared with other seasons, with averages of 0.33% and 0.30% respectively. The winter AR frequency exceeds 0.4% in Amundsen-Bellinghousen Sea (ABS), eastern Indian Ocean (IO) and eastern west Pacific Ocean (WPO) sectors. The maxima up to 0.6% is located in Weddell Sea (WS) sector. The spatial pattern of AR frequency in spring resembles that in winter, but the frequency in the Pacific sector decreases. In summer (DJF) and autumn (MAM), ARs mainly influence the WS and ABS and the AR frequency is only 0.12% and 0.17% respectively. Note that, ARs seldom intersect with sea ice in RS and WS during MAM and DJF since sea ice almost completely melted in these months AR frequency varies greatly from year to year, with higher variability in high-AR-frequency winter and spring, and lower variability in summer.
Liston et al., 2020 : A Lagrangian Snow-Evolution System for Sea-Ice Applications (SnowModel-LG): Part I—Model Description	
McCrystall et al., 2021 : New climate models reveal faster and larger increases in Arctic precipitation than previously projected	The transition from a snow- to rain-dominated Arctic in the summer and autumn is projected to occur decades earlier and at a lower level of global warming, potentially under 1.5 °C, with profound climatic, ecosystem and socio-economic impacts. The multi-model ensemble mean of Arctic precipitation increases in all seasons throughout the twenty-first century, especially in autumn. This total precipitation increase is largely dominated by an increase in rainfall for all seasons in both CMIP ensembles. In summer and autumn, the rainfall increase is accompanied by decreased snowfall. In winter, however, snowfall continues to increase and remains the dominant precipitation type at the end of the century across most of the Arctic. In spring, there is little change in snowfall throughout the century. Overall, CMIP6 projects larger increases in precipitation than in CMIP5, dominated by increased rainfall. At the end of the century (2100) relative to the year 2000, there is a 422% increase in CMIP6 rainfall compared to 260% in CMIP5 in winter; corresponding values are 261% and 141% in spring, 71% and 51% in summer, and 268% and 192% in autumn. This results in -0.3 mm day ⁻¹ or 27.3 mm per season, difference in rainfall by 2100 between the two CMIPs in autumn and around a 0.2 mm day ⁻¹ (18.2 mm per season) difference in spring and winter. Trends are also larger in CMIP6—in autumn, rainfall increases by 0.9 mm day ⁻¹ (81.9 mm per season) from 2020 to 2100 compared to 0.7 mm day ⁻¹ (53.7 mm per season) in CMIP5, resulting in a 24% larger rainfall increase. Larger rainfall increases are also simulated in other seasons—winter has a 36% greater increase in CMIP6, whereas spring and summer have 36% and 14% greater increases, respectively. There is a greater reduction of snowfall in summer (16%) and autumn (38%) at the end of the century in CMIP6, consistent with a shorter snow cover season than previously simulated. By 2100, large increases in autumn rainfall are simulated across the Arctic in both CMIP ensembles but are more pronounced in CMIP6, with statistically significant increases of up to 0.6 mm day ⁻¹ around the Greenland and Barents Seas. This is coupled with a larger statistically significant decrease in autumn snowfall of around 0.4 mm day ⁻¹ compared to CMIP5, except in East Greenland. Although differences between CMIP6 and CMIP5 are spatially more limited in winter relative to autumn, larger increases in rainfall are apparent in CMIP6 across the Arctic Ocean and peripheral seas, especially the Greenland and Barents Seas. Significant snowfall increases are projected by 2100 in winter consistent with findings from Krasting et al. ³¹ in their assessment of CMIP5 simulations. However, these snowfall increases are again greater in CMIP6, especially in Siberia and the Canadian Arctic Archipelago. Although differences between CMIP6 and CMIP5 in spring and summer are less pronounced, CMIP6 simulates a larger increase in rainfall coinciding with a larger snowfall reduction relative to CMIP5, throughout the Arctic and in both seasons. As with temperature increase, the magnitude of the increase in open water area at the end of the century across the models in both CMIPs is significantly correlated with the magnitude of the increase in rainfall (in all seasons) and with the magnitude of the snowfall decrease in summer and autumn As a result of the above-mentioned differences, the transition from a snow- to rain-dominated precipitation regime occurs earlier in CMIP6, particularly in autumn, with most of the Arctic Ocean, Siberia and the Canadian Archipelago becoming rainfall dominated one or two decades earlier. By contrast, and despite large reductions in the snowfall-to-precipitation ratio, most of the Arctic remains largely snow dominated in winter and spring throughout the century. Regionally, however, a transition to a rainfall regime in both winter and spring occurs ~10 years earlier in the Barents Sea in CMIP6, but transitions later than CMIP5 in parts of North America and Europe in spring. ... In summer, the Arctic is largely rainfall dominated in both modelling experiments, except for north of 80°N. Assessing across different regions annually, the Beaufort, Chukchi, Bering, Laptev and East Siberian Seas remain snowfall dominated in both a 1.5 °C and 2 °C warmed world, whereas transition to a rainfall dominated precipitation regime will likely occur in the Greenland and Norwegian Seas regardless of a 1.5 °C or 2 °C limit, particularly in CMIP6. In western Russia and Europe, the transition to rainfall is more likely to require a 2 °C global warming, with more CMIP6 models showing this shift than CMIP5. At 3 °C warming, most regions, except those on the Pacific side of the Arctic have transitioned to a rainfall dominated regime. However, seasonally, winter remains snowfall dominated by the end of the century and at 3 °C global warming most regions in the Arctic remain snow dominated in winter and spring. Our analysis points to larger increases in Arctic precipitation in the CMIP6 projections compared to CMIP5, with the shift to an annually rain-dominated precipitation regime occurring approximately one or two decades earlier, with the greatest changes expected in autumn. - The transition to more rainfall will also impact the frequency of rain-on-snow (ROS) events
O'Sadnick et al., 2020 : Ice extent in sub-arctic fjords and coastal areas from 2001 to 2019 analyzed from MODIS imagery	
Overland, 2022 : Arctic Climate Extremes	Greenland 2021 : On 14 August 2021, rainfall was witnessed for the first time at Summit station near the highest point of the Greenland ice sheet [12,13] The frequency of moist Ars reaching Greenland is increasing, likely driven by high-amplitude wavy jet-stream patterns [15]. Alaska 2022 : Total wildfire for Alaska reached 1 million acres as of 18 June 2022, the earliest date in the past 32 years of observation [16]. ... However, drought conditions ended, with record rainfall. On 26 July Utqiagvik had 1.42 inches rain, the highest 24-h precipitation on record (previous 1.32 inches 21–22 July 1987). Anchorage rainfall, at 7.24 inches from mid-July to mid-August, was the highest on record, at three times the normal level [16]. Svalbard 2022 : Extreme Svalbard temperatures from joint sea-ice loss and strong wind location is an example of applying the combination of AA (Arctic Amplification) and weather systems. Northeastly atmospheric wind circulation contributes most to extreme warming. Meteorological conditions leads to rain-on-snow events in Svalbard.
Pauling et Bitz, 2021 : Arctic Sea Ice Response to Flooding of the Snow Layer in Future Warming Scenarios	The projected decline in Arctic sea ice extent as the Earth warms in response to increased greenhouse gas concentrations will occur in conjunction with increased precipitation in the Arctic, and more of that precipitation is projected to fall as rain, especially in autumn and early winter. As the Earth warms, the amount of sea ice in the Arctic will decline, more precipitation will fall over the Arctic, and a larger fraction of that precipitation will fall as rain The change in phase of precipitation falling on sea ice will result in very different physical impacts. Over the 21st century, the total amount of precipitation falling over the Arctic (defined here as the area north of 30° E) increases year-round, with the largest increases in the autumn and winter (September–January). The amount of that precipitation falling as snow decreases in summer and fall (May/October), and the amount falling as rain increases most in that same time period. In September and October, the months of interest in our geoenvironmental experiments, the increase in rainfall is equivalent to about 5 cm [21] yr E of flooding. These mechanisms will also be important in the future as the precipitation type over the Arctic shifts from snow to rain in early winter In light of these competing effects, we have shown that flooding the snow layer in September and October gives the greatest increase in sea ice volume and area. Coincidentally, this is when models project the greatest shift from frozen to liquid precipitation in the Arctic during the 21st century (Figure 1 in this study, Bintanja & Andry, 2017). Thus, we can expect the physical mechanisms driving the additional ice growth shown in our experiments to play a role in the future evolution of Arctic sea ice, possibly reducing the rate of sea ice loss that would occur without the shift from frozen to liquid precipitation.
Saloranta, 2000 : Modeling the evolution of snow, snow ice and ice in the Baltic Sea	
Schreiber et Serreze, 2020 : Impacts of synoptic-scale cyclones on Arctic sea-ice concentration: a systematic analysis	Precipitation, as represented in ERA-Interim, is primarily snow in spring, autumn and winter. While precipitation falls primarily as rain in summer, snowfall is still common in this season, especially in the higher latitudes of the Arctic Ocean

Annexe 5-8. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : le changement de précipitation (*change in precipitation*). (Partie 5)

Reference	Change in precipitation
Serreze et al., 2021 : Arctic rain on snow events: bridging observations to understand environmental and livelihood impacts	Svalbard, January 2012 : On 30 January, record breaking precipitation was recorded at the Ny Ålesund meteorological station, with 98 mm of rain (Serreze et al 2015). Canada, October 2003 : Banks Island, in the western Canadian Arctic Archipelago, has a cold and very dry environment, classified as polar desert. ROS events from November through February appear to be uncommon. The weather system initially brought approximately 8 inches of new snow, but from 3 to 8 October, the precipitation fell as drizzly, intermittent rains. - Climate models project a shift toward more Arctic rain events (Bintanja and Andry 2017), with total Arctic precipitation expected to increase by 30%–60% (Bintanja and Selten 2014, Bintanja and Andry 2017). - There is increasing recognition that Arctic rain on snow (ROS) events, which are projected to become more frequent as the Arctic warms (Rennert et al 2009, Bintanja and Andry 2017) ROS events are generally associated with short-lived (hours to days) warm spells in autumn and winter, linked to extratropical cyclones that generate rain, followed by a rapid drop in temperature (Hansen et al 2014). ROS events are most frequent over northern Europe and southern Alaska (Bieniak et al 2018, Crawford et al 2020). They occasionally occur over western Siberia, southern Greenland, and parts of Canada but are rare in the cold Canadian Arctic Archipelago (figure 3). Events that do occur in the Canadian Arctic Archipelago (a region classified as a polar desert), have tended to take place in early autumn when it is warmer. In early November 2013, an ROS event affected most of the southern Yamal Peninsula (Forbes et al 2016), as well as coastal portions of neighboring regions (Sokolov et al 2016, Staalesen 2016). Following 24 h of rain, air temperatures rapidly dropped and remained below freezing throughout autumn and winter. While analysis of radar backscatter data suggests that this region tends to see approximately one ROS event per year, as noted earlier, the satellite record is short (ends 2010) and reliable detection is limited to midwinter. A higher frequency can be expected considering the shoulder seasons. Indeed, several Yamal events have been recorded by local observers in recent years. During the 5 year period following 2013, several additional significant ROS events occurred on the Yamal Peninsula (Laptander 2020) Wilson et al (2013) analyzed event sizes for the first time and found differences with respect to distance from coast for Alaska. Events in proximity to the coast tend to be comparably small and frequent compared to further inland where they are larger and less frequent As the Arctic warms, ROS and winter thaw events are likely to become more frequent and there is growing evidence that changes are already happening (Hansen et al 2011, Liston and Hiemstra 2011, Ruostenoja et al 2016, Vikhamer-Schuler et al 2016, Luomaranta et al 2019).
Shang et al., 2023 : More frequent atmospheric rivers slow the seasonal recovery of Arctic sea ice	The moisture carried by more frequent ARs has intensified surface downward longwave radiation and rainfall A series of model ensemble experiments suggests that, in addition to a uniform AR increase in response to anthropogenic warming, tropical Pacific variability also contributes to the observed Arctic AR changes. In the past few decades, the Arctic has seen a significant increase in AR frequency in the early winter over ABK. = Barents–Kara Seas and the neighbouring central Arctic (ABK). In contrast, fewer ARs reach inland Eurasia (60–90° E) to the south of ABK. The cumulated AR rainfall, especially along the ice edge where the new ice forms, is greatly strengthened, while the AR-induced snowfall changes are relatively small. The observed variability from the tropical Pacific increases the AR frequency in the eastern Arctic, especially north of the ABK region, while significantly fewer ARs are found in inland Eurasia. These results suggest that tropical Pacific variability is crucial to the observed spatial pattern of AR changes around the Eurasian Arctic. » This suggests that the observed AR change cannot be fully explained by either external forcing or tropical Pacific variability alone, but instead reflects the combined effect of anthropogenic forcing and internal climate variability. In observations, the AR increase in the ABK is dominated by the thermodynamic effect, while the lower number of ARs in west Eurasia is explained by the dynamic effect. The thermodynamic AR increases in the Arctic are consistent with the increase in the atmosphere's water holding capacity due to fast Arctic warming, which supports increased AR frequency observed in the Arctic in recent decades In this study, we show a robust frequency increase in ARs that penetrate into the Arctic in the ice-growing season for 1979–2021, especially over the ABK. ARs, which dominate the Arctic moisture import The increased frequency of Arctic ARs, in turn, is mainly driven by thermodynamics (warming).
Stirling et Derocher, 1993 : Possible Impacts of Climatic Warming on Polar Bears	The increased precipitation expected to accompany climatic warming (Elkin, 1990)
Stroev et al., 2022 : Rain on snow (ROS) understudied in sea ice remote sensing: a multi-sensor analysis of ROS during MOSAIC (Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate)	While there is considerable year-to-year variability, a statistically significant positive trend (at 95 % confidence interval) towards more rainfall during the winter season (October through April) is seen for the Arctic Ocean and its marginal seas. This is dominated by statistically significant trends as averaged over the central Arctic and the Laptev Sea. Trends are less steep for the December to February period, reflecting a larger increase in wet precipitation during autumn freeze-up and melt-onset periods (e.g., October–November and March–April). While the amount of rainfall is still relatively small in magnitude, we may expect winter rainfall events to become increasingly important as the Arctic continues to warm under atmospheric greenhouse gas forcing and starts to transition to more rainfall earlier than previously predicted (e.g., McCrystal et al., 2021). In that study, atmospheric reanalysis products were used to track changes in spring ROS events over sea ice, concluding that they are occurring earlier than they did 4 decades ago. Looking forward, as the Arctic continues to warm, it is reasonable to expect an increase in the frequency and possibly intensity of ROS and winter warming events.
Theresa et al., 2004 : Climate Change and Sea Ice: Local Observations from the Canadian Western Arctic	During the fall, several residents told us that Sachs Harbour had traditionally been known for its dryness; however, in recent years, the amount of rain had increased significantly. Change in the form of precipitation was reported by many residents to be most dramatic during the fall, when expected snowfalls were being replaced with rain (thus delaying freeze-up) This summer we had rain. But long ago, you would go all summer—just dry. Last five years, more rain. Used to get rain, and it would be an hour or so. Now, all day. [It was] really dry here—hardly any rain. Especially in July month, [it] used to be really warm, hardly any rain, hardly any wind. Now we have so much wind and rain, [it's] really changed.
Viceto et al., 2022 : Atmospheric rivers and associated precipitation patterns during the ACLOUD and PASCAL campaigns near Svalbard (May–June 2017): case studies using observations, reanalyses, and a regional climate model	The second event, 1 week later, had a similar trajectory, and most precipitation occurred as rain, although mixed-phase precipitation or only snowfall occurred in some areas, mainly over the coast of north-eastern Greenland and the north-east of Iceland, and no differences were noted in the sea-ice edge The third event showed a different pathway extending from the north-eastern Atlantic towards Greenland before turning south-eastward and reaching Svalbard. This last AR caused high precipitation amounts on the east coast of Greenland in the form of rain and snow and showed no precipitation in the Svalbard region. ARs are usually associated with intense precipitation events, which might occur in the form of rain or snow in the Arctic During this AR event, mixed-phase precipitation occurred, showing both snow and rain within the AR during a short period of time (less than 2 weeks), three intense and short-duration AR events affecting Svalbard were identified. Despite being consecutive, they had different moisture amounts and transport, vertical structure, precipitation amounts and phase, and moisture sources.
Vihma et al., 2016 : The atmospheric role in the Arctic water cycle: A review on processes, past and future changes, and their impacts	During recent decades, specific humidity and precipitation have generally increased in the Arctic Climate model experiments suggest that increases in precipitation are related to global warming. Over sea ice in summer, projected increase in rain and decrease in snowfall The results suggest a general increase in the annual mean precipitation and evaporation in the Arctic but with large spatial differences. ... Annual precipitation in circumpolar midlatitude and high-latitude regions has increased over the latest decades ; however, considerable spatial and temporal variability exists (McBean et al., 2005; Min et al., 2006; Hartmann et al., 2013). In the Arctic, recent annual precipitation generally exceeds the mean of the 1950s by about 5% (Walsh et al., 2011a, 2011b). Further, summer snowfall has strongly decreased (40% between 1969 and 2009) over the Arctic Ocean (Screen and Simmonds, 2012), mostly due to a change from snowfall to rain in a warming climate robust increase in precipitation with scattered results for trends in cloudiness and seasonally and regionally varying trends for relative humidity is an interesting combination. It can probably be explained by the fact that if the clouds contain more water, precipitation may increase even in regions where relative humidity and cloud coverage decrease, i.e., precipitation intensity increases. In the winter half-year (October–March), Arctic mean P is projected to increase by 35% and 60%, under medium and high greenhouse gas representative concentration pathways (RCP), respectively (RCP4.5 and 8.5), relative to the period 1986–2005 [Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013]. The projected P changes in the warmer months (April–September) are weaker: 15% and 30%. Spatially, the largest relative changes are projected over the Arctic Ocean (IPCC, 2013; Laine et al., 2014). An annual mean decrease in snowfall is projected over North America, Northern Europe, and midlatitude Asia (Krasting et al., 2013). These decreases are driven by reductions in the snowfall-to-precipitation ratio (i.e., a shift from snow to rain), which is temperature dependent (Wrona et al. [2016], on ecological impacts). Seasonally, the changes are largest in spring and autumn, associated with an earlier snow-rain transition in spring and later rain-snow transition in autumn (Krasting et al., 2013). In high latitudes (e.g., northern Siberia) and at high altitudes (e.g., central Greenland), where air temperatures remain sufficiently cold, snowfall is projected to increase, especially in winter. In addition to projected increases in mean P, there is increasing evidence that P extremes will also increase in frequency and/or intensity. According to Kharin et al. [2013], relative changes in the intensity of precipitation extremes generally exceed relative changes in annual mean precipitation. On the basis of eight CMIP5 models, Toreti et al. [2013] found out that the 1 in 50 year return level of daily precipitation is projected to increase in all seasons over the middle and high latitudes, being reliable and consistent between models particularly over northern Eurasia in winter and the North Pacific and northwestern Atlantic/Arctic Ocean in summer. Due to the Arctic amplification (section 2.1), in consistency with the Clausius-Clapeyron constraint, the largest increases are projected poleward of 60°N. The 20 year return level of daily precipitation is also projected to increase over the Arctic and Arctic River catchments, by around 2–6% per degree of local warming (Kharin et al., 2013). Other indices of extreme P—namely total wet day precipitation, very wet day precipitation, maximum 5 day precipitation, and heavy precipitation days—are all projected to increase over the midlatitude to high-latitude northern landmasses, especially north of 60°N (Silimann et al., 2013). Increases of 20–30% in the maximum 5 day precipitation are projected for Alaska, northern and eastern Canada, Greenland, and northern Eurasia. The increases are less pronounced in summer than in winter with the strongest increases in northern Asia of about 40% in winter and 20% in summer (Silimann et al., 2013). In northern Europe, a CMIP5 ensemble shows a consistent increase only for winter. In Alaska, northern and eastern Canada, Greenland, and northern Asia these increases in precipitation are accompanied by a decrease in the number of consecutive dry days, whereas in northern Europe no consistent change is projected for dry days (Silimann et al., 2013). The latest state-of-the-art climate model projections suggest a robust future intensification of the Arctic hydrological cycle. Mean precipitation and daily precipitation extremes are projected to increase over midlatitude and high latitude, largely in response to warming-driven increases in the moisture holding capacity of the air. The relative increases precipitation extremes are expected to exceed relative increases in mean values. This increased moisture comes from increased evaporation (itself largely due to the loss of sea ice cover) and enhanced poleward moisture transport.

Annexe 5-9. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : le changement de précipitation (*change in precipitation*). (Partie 6)

Reference	Change in precipitation
Walsh et al., 2020 : Extreme weather and climate events in northern areas: A review	<p>In an early evaluation of changes in intense precipitation, Groisman et al. (2005) showed that the northern land areas were among the regions in which there had been disproportionate changes in heavy precipitation relative to changes in annual and seasonal mean precipitation. On the other hand, station data show no significant trends in annual daily maximum 1-day and 5-day precipitation amounts over northern land areas during the second half of the 20th century (Min et al., 2011), their Fig. 1. For the 2000-2016 period, Boisvert et al. (2018) surveyed total precipitation in the Central Arctic in eight atmospheric reanalyses and noted significant increasing trends (1.4 8.2 mm yr⁻¹) in just three of the products. The most recent IPCC report (AR5) presented global land surface maps of trends of heavy precipitation. The number of days when precipitation exceeded the 95th percentile (R95p) showed significant increases over Finland and northwestern Russia, but inadequacies in the station data precluded assessments in other high-latitude regions (Hartmann et al., 2013). Increases in daily precipitation intensity were statistically significant over a much larger area of the subarctic, including northeastern Canada and much of northern Russia as well as Finland and northern Sweden. On a regional basis, the number of days with heavy precipitation has shown significant increasing trends in large parts of the northern land area (Alexander et al., 2006; Borzenkova & Shmakin, 2012; Donat et al., 2013; Vincent & Mekis, 2006) but decreasing trends in western Canada (Alexander et al., 2006). Daily precipitation intensity has increased in northern Canada (Donat et al., 2013; Peterson et al., 2008; Vincent & Mekis, 2006) and Eurasia (Donat et al., 2013) but decreased in southern Canada (Donat et al., 2013; Peterson et al., 2008; Vincent & Mekis, 2006) and coastal northern Russia (Donat et al., 2013). Extreme precipitation events were found to show no systematic temporal trend at Svalbard from 1979 through the early 2000s (Serreze et al., 2015), and there is similarly no trend in heavy precipitation events in Alaskan station data over 1949-2012 (Bielniak & Walsh, 2017). Lader et al. (2017) also evaluated the frequency of extreme precipitation days in Alaska using both station data and five different atmospheric reanalyses; no notable trends were found over the 1979-2009 period (Lader et al., 2017), their Fig. 10. On the other hand, the most recent U.S. National Climate Assessment shows that the percentage of precipitation falling in the heaviest percentile of precipitation events over Alaska increased by 11% during the 1958-2012 period, although the trend is not statistically significant (USGCRP, 2014), their Fig. 2.17. The regional trends reported above are very sensitive to the study period. In contrast to the general lack of observational evidence for spatially coherent trends in extreme precipitation over northern high latitudes, projections of high-latitude precipitation point to increased intensities and/or shorter return periods for heavy precipitation events. The CMIP5 models project increases of 20-30% for the maximum 5-day precipitation amounts within a year over most northern land areas by 2081-2100 under the RCP 8.5 scenario (Collins et al., 2013), p. 1083-1086. As far back as the CMIP3 era, regional climate models projected more frequent and more intense precipitation events in the Eurasian subarctic under climate warming (Saha et al., 2006). Bennett and Walsh (2015) found an increase in the heaviest monthly and seasonal precipitation occurring over Alaska in CMIP5 global model projections through 2100. More recently, Kusunoki et al. (2015) examined changes in precipitation intensity projected for the Arctic by a high-resolution (60 km) global climate model. Monotonic increases in the late 21st century were found in the Arctic's (67.5-90°N) annual mean precipitation, a daily precipitation intensity index, and maximum 5-day precipitation totals (R5d) averaged over the Arctic. However, a precipitation efficiency metric (conversion of water vapor to precipitation per °C of warming) changed less for extreme precipitation (R5d) than for average precipitation, in contrast to mid-latitude and tropical regions. An aggregation of results from eight selected CMIP5 models suggests that the 50-year return level of daily precipitation will increase in high latitudes (Toreli et al., 2013). The regions with consistent results from the eight models include northern Eurasia in winter and the Arctic Ocean in summer. Based on the CMIP5 results, increases are also projected for the 20-year return level of daily precipitation in northern high latitudes, particularly in winter (Kharin et al., 2013). Very-wet-day precipitation, maximum 5-day precipitation, and the number of days with heavy precipitation are also projected to increase (Sillmann et al., 2013b). More generally, changes associated with the transition from snow to rain in a warming climate can shorten the snow season to the extent that snow season lengths previously considered extremely short may become the norm in the future. Landrum and Holland (2020) show that, while a statistically significant signal of this change from snow to rain has not yet emerged in the Arctic, it is likely to emerge in the mid-to-late 21st Century and impact the hydrologic regime of the Arctic. The general decreases of snow extent and duration are projected to continue through the remainder of the 21st century across much of the northern land areas (Brown et al., 2017; Landrum & Holland, 2020), consistent with larger fractions of winter precipitation falling as rain as climate warms. However, increases of snowfall are projected for the northernmost areas, where subfreezing conditions predominate during winter even under warming scenarios (Krasting et al., 2013). Similarly, the annual maximum snow water equivalent is projected to increase over much of northeastern Asia and northern Canada (Brown et al., 2017), Fig. 3.18, even under the RCP 8.5 scenario, pointing to a likely increase of heavy snow events during the shortened cold season. The increase in heavy snowfalls near the Arctic Ocean should be enhanced by the increased fluxes of latent and sensible heat resulting from the reduction of the sea ice cover (Liu et al., 2012). The combination of a shorter snow season but greater water equivalents is consistent with O'Gorman's (2014) conclusion that, for the coldest climates, the occurrence of extreme snowfalls should increase with warming due to increasing atmospheric water vapor, while for warmer climates it should decrease because subfreezing temperatures will be less frequent. Focusing on Svalbard, Peeters et al. (2019) found that, in Ny Ålesund (data since 1969) and Svalbard Airport (data since 1957), every third to fourth winter during the earlier decades was essentially rain-free, but in 1998 the climatic regime shifted so that some rain occurred in virtually every winter. Signatures of atmospheric river events are apparent in regional Large Daily Sea Ice Loss (LDSL) events from the Greenland Sea through the Russian subarctic to the Beaufort/Chukchi/East Siberian Seas. Pan-Arctic LDSL events show no such signature - A type of extreme event with major impacts in northern areas is freezing rain, often referred to as rain-on-snow events. In one of the few systematic evaluations of freezing rain occurrences, Groisman et al. (2016) show that freezing rain frequencies in northern North America increased by about one day per year in the 2005-2014 decade relative to the three previous decades. Substantial increases were detected over northern Norway, while somewhat less coherent patterns of increase were found over Siberia and European Russia. A similar hemispheric-scale analysis by Cohen et al. (2015) based on two atmospheric reanalysis products (MERRA and ERA-Interim) showed little coherence in winter trends of rain-on-snow events on the continental scale, although the MERRA reanalysis showed decreases in frequency during autumn and winter over western Scandinavia and southwestern Alaska. With regard to future changes, Hansen et al. (2014) examined the temperature-dependence of historical freezing rain events in Svalbard and concluded that the frequency of rain-on-snow events is likely to increase in northern regions. On the basis of output from 37 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project, phase 5) climate models, Bintanja and Andry (2017) calculated that during this century in the Arctic (70-90°N), the average annual snowfall will decrease but rain will increase. The increase of rain will be strongest in summer and autumn but will also occur in winter, which will result in increasing occurrence of rain on snow events. On the basis of regional climate model simulations, Bieliak et al. (2018) showed that rain-on-snow events are projected to increase in frequency over much of Alaska but are expected to decline over southwestern/southern Alaska. The increases in frequency are the result of more frequent winter rainfall, while the decrease of freezing rain in southwestern Alaska is attributable to the rise of temperatures above the freezing threshold. Based on associations derived from remote sensing products over a shorter period (2003-2016), Pan et al. (2018) also concluded that rain-on-snow events will increase in frequency and extent over much of Alaska in the future. This increase is consistent with a broader projected increase of 40% in the total hemispheric rain-on-snow area by 2080-2089 (Renner et al., 2008).</p>
Wang et al., 2019 : Comparison of ERA5 and ERA-Interim near-surface air temperature, snowfall and precipitation over Arctic sea ice: effects on sea ice thermodynamics and evolution	<p>The largest increase in annual TP (40-100 mm) and SF (100-200 mm) in ERA5 occurs in the Atlantic sector. The increase in SF / TP ratio in ERA5 is more significant in autumn (-0.2) and summer (-0.3-0.4) along the buoy trajectories, and relatively small in winter (-0.1) and spring (-0.1-0.2). This indicates more precipitation falls as snow in ERA5 not only in autumn but also in summer. The low SF / TP ratio and thus larger fraction of rainfall in ERA-1 is known to be anomalous, and is likely due to the cloud physics scheme used (e.g. Dutra et al., 2011; Leeuw et al., 2015). Our findings indicate that ERA5 has significantly less Arctic rainfall than ERA-1, particularly in autumn and summer.</p>
Webster et al., 2022 : Spatiotemporal evolution of melt ponds on Arctic sea ice	<p>In mid-September, a cyclone caused a rain-on-snow event.</p>
Zayvatov, 2020 : Influence of the Atmospheric Precipitation Phase Composition on Seasonal Evolution of Snow-Ice Cover in the Taganrog Bay Apex	<p>Precipitation is one of the most variable in time and space meteorological phenomena, and information on their phase composition is an important synoptic characteristic of the region. A considerable amount of mixed precipitation falls on the Sea of Azov surface even in the cold season, and the number of days with rain in winter can exceed the number of days with snow [1]. In the Sea of Azov region, where a significant amount of mixed precipitation falls during the cold season</p>

Annexe 5-10. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : le changement de précipitation (*change in precipitation*). (Partie 7)

Reference	On sea ice volume and other	On sea ice extent	On sea ice thickness
Bartsch et al., 2023 : Towards long-term records of rain-on-snow events across the Arctic from satellite data	-	Sea ice extent declined during the events, and the ice boundary retreated beyond the long-term median extent for December. Below-average regional sea ice concentration at the time of events can be observed for all examples (Yamal and Alaska events), but the number of studied events is too low to infer any linkage.	-
Berger et al., 2018 : Climate Degradation and Extreme Ice Events Constrain Life in Cold-Adapted Mammals	-	-	-
Bintanja et Andry, 2017 : Towards a rain-dominated Arctic	-	Enhanced rainfall rates will considerably lower the surface albedo of snow and sea ice when insolation is relatively high, thereby reinforcing surface warming and snow/ice retreat Rainfall also diminishes snow cover extent and considerably lowers the surface albedo of seasonal snow, ice sheets and sea ice, reinforcing surface warming and amplifying the retreat of ice and snow	-
Blunden et al., 2023 : State of the Climate in 2022	-	-	-
Boisvert et al., 2020 : Intercomparison of Precipitation Estimates over the Southern Ocean from Atmospheric Reanalyses	-	-	-
Descamps et al., 2017 : Climate change impacts on wildlife in a High Arctic archipelago – Svalbard, Norway	-	-	-
Dou et al., 2019 : A key factor initiating surface ablation of Arctic sea ice: earlier and increasing liquid precipitation	-	-	-
Dou et al., 2021 : Trends and spatial variation in rain-on-snow events over the Arctic Ocean during the early melt season	-	-	-
Dou et al., 2022 : More Frequent, Intense, and Extensive Rainfall Events in a Strongly Warming Arctic	-	-	rainfall will become an important factor in accelerating the mass loss of snow cover, sea ice and ice sheet in a rapid warming Arctic under the background of global warming.
Ehn et al., 2006 : Surface albedo observations of Hudson Bay (Canada) landfast sea ice during the spring melt	-	-	-
Ferguson, 2005 : CLIMATE CHANGE AND RINGED SEAL (PHOCA HISPIDA) RECRUITMENT IN WESTERN HUDSON BAY	-	-	-
Galindo et al., 2014 : Biological and physical processes influencing sea ice, under-ice algae, and dimethylsulfoniopropionate during spring in the Canadian Arctic Archipelago	-	-	In 2010 : Site-averaged sea ice thickness was constant at ca. 140 cm for the whole sampling period. In 2011 : Site-averaged sea ice thickness was constant at ca. 140 cm for most of the sampling period, but a significant loss of ice was observed toward the end of the sampling period (decreasing from 154 to 107 cm between 8 and 24 June). In 2011, air temperature first exceeded 0C on 8 June, 2 days later than in 2010, but snow melting was accelerated by two rainfall events that occurred on 10 and 12 June.
Grenfell et Putkonen, 2008 : A method for the detection of the severe rain-on-snow event on Banks Island, October 2003, using passive microwave remote sensing	-	-	-
Hansen et Aanes, 2012 : Kelp and seaweed feeding by High-Arctic wild reindeer under extreme winter conditions	-	-	-
Hansen et al., 2014 : Warmer and wetter winters: characteristics and implications of an extreme weather event in the High Arctic	-	-	-
Hezel et al., 2012 : Projected decline in spring snow depth on Arctic sea ice caused by progressively later autumn open ocean freeze-up this century	-	-	-
IPCC, 2019 : IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate	-	-	-
IPCC, 2021 : Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change	-	-	-

Annexe 5-11. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : le volume de la glace de mer et les paramètres non définis (*on sea ice volume and other*), sur l'étendue de la glace de mer (*on sea ice extent*) et sur l'épaisseur de la glace de mer (*on sea ice thickness*). (Partie 1)

Reference	On sea ice volume and other	On sea ice extent	On sea ice thickness
Kwok et al., 2003 : A study of the onset of melt over the Arctic Ocean in RADARSAT synthetic aperture radar data	-	-	-
Langlois et al., 2017 : Detection of rain-on-snow (ROS) events and ice layer formation using passive microwave radiometry: A context for Peary caribou habitat in the Canadian Arctic	-	-	-
Lannuzel et al., 2020 : The future of Arctic sea-ice biogeochemistry and ice-associated ecosystems	-	-	-
Liang et al., 2023 : The Role of Atmospheric Rivers in Antarctic Sea Ice Variations	Hence, the adverse daily tendency in contrast to non-AR may have profound implications for reducing the sea ice growth in autumn and winter	The Antarctic sea ice zone is at a relatively low latitude where liquid precipitation is not rare during ARs, therefore the energy injected by the rain heat flux should be considered. We speculate that AR-related precipitation exceeding 3 SDs climatology may offset the negative surface heat flux anomalies in summer, resulting in a slightly larger daily summer sea ice reduction than non-AR scenarios.	-
Liston et al., 2020 : A Lagrangian Snow-Evolution System for Sea-Ice Applications (SnowModel-LG): Part I—Model Description	-	-	-
McCrystal et al., 2021 : New climate models reveal faster and larger increases in Arctic precipitation than previously projected	-	-	Changes in precipitation over sea-ice areas will alter thermodynamic ice growth and snow depth
O'Sadnick et al., 2020 : Ice extent in sub-arctic fjords and coastal areas from 2001 to 2019 analyzed from MODIS imagery	Snowfall and rainfall plus snowmelt have similarities in their potential impact on ice formation through supplying fresh water to a fjord's surface. Rainfall plus snowmelt may not contribute substantially to creating a freshwater layer when applied directly to the surface of a fjord. What likely has a larger impact is the accumulation of rain and snowmelt in rivers and streams leading into a fjord, which can create a freshwater plume and a stratified water column closer to river outlets (Ingram and others, 1996; Granskog and others, 2005). Snowfall while not leading to a thick layer of fresh water may assist in ice formation through further cooling the surface and enabling ice formation through seeding the ice. ... In addition, once a thin ice layer is created, it allows for accumulation of more snow on top, thickening and strengthening the ice to better withstand fluctuations in weather conditions. If snowfall occurs after a cohesive ice cover has formed however, this snow may alternatively slow ice formation, insulating the ice from the top and allowing more melt from below. Deeper investigation is required to assess which of the two processes, snowfall on the fjord surface versus rainfall plus snowmelt flowing into the fjord, triggers ice formation more efficiently. The mechanism for ice formation, potentially different in southern versus northern fjords, may also lead to differences in ice properties, a topic discussed more below. The timing of both snowfall and rainfall plus snowmelt events to colder weather likely explains much of the variance in ice extent observed between years and fjords. While a thin ice layer may be able to form a number of times throughout the season, it is vulnerable to break-up given waves, tides or variations in air and water temperature. For ice to stay in place depends on the thickness, or primarily its ability to withstand changing conditions. Through examining differences in ice extent from year to year between fjords located near to each other, our understanding of how certain factors combine to allow for ice formation can be improved. Fjords displaying similar patterns in ice extent can also be of interest however as the factors contributing may not be the same. For example, both a cold, calm year with little precipitation to form a brackish layer may display the same ice extent as a year with more precipitation but with strong winds in the days directly following. Each fjord may have a different combination of factors leading to variations in ice conditions. For each fjord or region, the questions become: (1) What factors initiate ice formation? (2) What factors support an increase in ice extent? (3) What factors lead to break-up of the initial ice cover, both thin or of substantial thickness? Understanding historically where ice is present and how it has changed between years in relation to weather and oceanic conditions, as well as its own geometry and bathymetry, helps to identify these factors.		
Overland, 2022 : Arctic Climate Extremes	-	-	Greenland : On 14 August 2021, rainfall was ... and was accompanied by high surface melt spatial extent.
Pauling et Bitz, 2021 : Arctic Sea Ice Response to Flooding of the Snow Layer in Future Warming Scenarios	In light of these competing effects, we have shown that flooding the snow layer in September and October gives the greatest increase in sea ice volume and area.	In light of these competing effects, we have shown that flooding the snow layer in September and October gives the greatest increase in sea ice volume and area.	We use a hierarchy of models to show that flooding snow on sea ice is most effective at thickening Arctic sea ice when flooding begins early in the sea ice growth season. This rain can flood the snow layer on top of the sea ice, where it freezes in winter due to the cold atmosphere above, thickening the ice that flooding the snow in winter freezes it more solid, directly increasing sea ice thickness. In addition, reducing the snow depth lowers insulation, driving an indirect thickening process. If rain falls on sea ice when there is a snow layer present, the rain floods the snow layer, creating a liquid water-snow mixture that can then freeze and thicken the sea ice while reducing the snow cover. A flooded snow layer in winter conditions would eventually freeze more solid (into ice with brine inclusions, as in sea ice), causing a direct increase in ice thickness and an associated thinning of the snow layer. This effect is somewhat analogous to that of naturally-occurring rain falling on snow overlying sea ice in a warmer Arctic As a result of simulating artificial flooding of the sea ice surface, we have found that thinning the snow layer on sea ice early in the growth season produces substantially thicker sea ice due to the higher effective thermal conductivity, while thinning the snow layer in summer drives sea ice loss due to the reduced surface albedo.
Saloranta, 2000 : Modeling the evolution of snow, snow ice and ice in the Baltic Sea	-	-	-
Schreiber et Serreze, 2020.: Impacts of synoptic-scale cyclones on Arctic sea-ice concentration: a systematic analysis	Additionally, greater amounts of both liquid and solid precipitation under cyclone influence will freshen the ocean surface, and may be promoting ice growth	« While precipitation falls primarily as rain in summer, snowfall is still common in this season, especially in the higher latitudes of the Arctic Ocean » : These results indicate that: (a) in summer, while SIC is generally decreasing (more strongly over the marginal seas than over the central Arctic Ocean), the overall effect of cyclones is to slow the rate of decline in ice concentration, i.e., to work against the seasonal cycle	-
Serreze et al., 2021 : Arctic rain on snow events: bridging observations to understand environmental and livelihood impacts	-	-	-

Annexe 5-12. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : le volume de la glace de mer et les paramètres non définis (*on sea ice volume and other*), sur l'étendue de la glace de mer (*on sea ice extent*) et sur l'épaisseur de la glace de mer (*on sea ice thickness*). (Partie 2)

Reference	On sea ice volume and other	On sea ice extent	On sea ice thickness
Shang et al., 2023 : More frequent atmospheric rivers slow the seasonal recovery of Arctic sea ice	-	Although the heat carried by rainfall is minor 28,40,41, the higher correlation between SIC and rainfall with trends (-0.61) in the marginal ice zone of ABK compared with DLW (-0.47) during ARs suggests an increasing contribution of AR rainfall to sea-ice retreat. the melting effect of ARs on the shrinkage of Arctic sea-ice cover is manifested by DLW and rainfall	The moisture carried by more frequent ARs has intensified surface downward longwave radiation and rainfall, caused stronger melting of thin, fragile ice cover and slowed the seasonal recovery of sea ice, accounting for 34% of the sea-ice cover decline in the Barents-Kara Seas and central Arctic. Given the melting effect of ARs, we hypothesize that more frequent Arctic ARs contribute to winter sea-ice decline. The negative sea-ice concentration (SIC) anomalies associated with ARs indicate that they significantly slow ice growth throughout all marginal seas, including the Barents-Kara Seas, the Labrador Sea, Baffin Bay and the Chukchi-Bering Seas. (Melting effect of Arctic ARs during the ice recovery season (Nov-Dec-Janu) for 1979-2021 period). The observed early winter SIC (sea ice concentration) trend for 1979-2021 features a pronounced decline in the marginal seas, including the ABK, the Greenland Sea, the Labrador Sea and the Chukchi Sea, where ARs exert the melting effect. more frequent ARs result in a stronger melting effect on sea ice in ice-growing season, slowing down the seasonal sea-ice recovery in recent decades and accounting for 34 ± 2% of the observed SIA decline in early winter in the ABK.
Stirling et Derocher, 1993 : Possible Impacts of Climatic Warming on Polar Bears	-	-	-
Stroeve et al., 2022 : Rain on snow (ROS) understudied in sea ice remote sensing: a multi-sensor analysis of ROS during MOSAIC (Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate)	-	-	-
Theresa et al., 2004 : Climate Change and Sea Ice: Local Observations from the Canadian Western Arctic	-	-	-
Viceto et al., 2022 : Atmospheric rivers and associated precipitation patterns during the ACLOUD and PASCAL campaigns near Svalbard (May-June 2017): case studies using observations, reanalyses, and a regional climate model	-	The first event extended from western Siberia to Svalbard, caused mixed-phase precipitation, and was associated with a retreat of the sea-ice edge	-
Vihma et al., 2016 : The atmospheric role in the Arctic water cycle: A review on processes, past and future changes, and their impacts	Accordingly, the decrease in summer snowfall and increase in rain have probably had a large contribution to the Arctic sea ice decline.	-	Although rain strongly favors sea ice melt, it may also provide a source for superimposed ice formation, temporally favoring sea ice growth.
Walsh et al., 2020 : Extreme weather and climate events in northern areas: A review	-	-	-
Wang et al., 2019 : Comparison of ERA5 and ERA-Interim near-surface air temperature, snowfall and precipitation over Arctic sea ice: effects on sea ice thermodynamics and evolution	-	-	-
Webster et al., 2022 : Spatiotemporal evolution of melt ponds on Arctic sea ice	-	-	-
Zayvalov, 2020 : Influence of the Atmospheric Precipitation Phase Composition on Seasonal Evolution of Snow-Ice Cover in the Taganrog Bay Apex	-	-	-

Annexe 5-13. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : le volume de la glace de mer et les paramètres non définis (*on sea ice volume and other*), sur l'étendue de la glace de mer (*on sea ice extent*) et sur l'épaisseur de la glace de mer (*on sea ice thickness*). (Partie 3)

Reference	On sea ice volume and other	On sea ice extent	On sea ice thickness
Shang et al., 2023 : More frequent atmospheric rivers slow the seasonal recovery of Arctic sea ice	-	Although the heat carried by rainfall is minor 28,40,41, the higher correlation between SIC and rainfall with trends (-0.61) in the marginal ice zone of ABK compared with DLW (-0.47) during ARs suggests an increasing contribution of AR rainfall to sea-ice retreat. the melting effect of ARs on the shrinkage of Arctic sea-ice cover is manifested by DLW and rainfall	The moisture carried by more frequent ARs has intensified surface downward longwave radiation and rainfall, caused stronger melting of thin, fragile ice cover and slowed the seasonal recovery of sea ice, accounting for 34% of the sea-ice cover decline in the Barents–Kara Seas and central Arctic. Given the melting effect of ARs, we hypothesize that more frequent Arctic ARs contribute to winter sea-ice decline. he negative sea-ice concentration (SIC) anomalies associated with ARs indicate that they significantly slow ice growth throughout all marginal seas, including the Barents–Kara Seas, the Labrador Sea, Baffin Bay and the Chukchi–Bering Seas. (Melting effect of Arctic ARs during the ice recovery season (Nov-Dec-Janu) for 1979-2021 period). The observed early winter SIC (sea ice concentration) trend for 1979–2021 features a pronounced decline in the marginal seas, including the ABK, the Greenland Sea, the Labrador Sea and the Chukchi Sea, where ARs exert the melting effect. more frequent ARs result in a stronger melting effect on sea ice in ice-growing season, slowing down the seasonal sea-ice recovery in recent decades and accounting for 34 ± 2% of the observed SIA decline in early winter in the ABK.
Stirling et Derocher, 1993 : Possible Impacts of Climatic Warming on Polar Bears	-	-	-
Stroeve et al., 2022 : Rain on snow (ROS) understudied in sea ice remote sensing: a multi-sensor analysis of ROS during MOSAIC (Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate)	-	-	-
Theresa et al., 2004 : Climate Change and Sea Ice: Local Observations from the Canadian Western Arctic	-	-	-
Viceto et al., 2022 : Atmospheric rivers and associated precipitation patterns during the ALOUD and PASCAL campaigns near Svalbard (May–June 2017): case studies using observations, reanalyses, and a regional climate model	-	The first event extended from western Siberia to Svalbard, caused mixed-phase precipitation, and was associated with a retreat of the sea-ice edge	-
Vihma et al., 2016 : The atmospheric role in the Arctic water cycle: A review on processes, past and future changes, and their impacts	Accordingly, the decrease in summer snowfall and increase in rain have probably had a large contribution to the Arctic sea ice decline.	-	Although rain strongly favors sea ice melt, it may also provide a source for superimposed ice formation, temporally favoring sea ice growth.
Walsh et al., 2020 : Extreme weather and climate events in northern areas: A review	-	-	-
Wang et al., 2019 : Comparison of ERA5 and ERA-Interim near-surface air temperature, snowfall and precipitation over Arctic sea ice: effects on sea ice thermodynamics and evolution	-	-	-
Webster et al., 2022 : Spatiotemporal evolution of melt ponds on Arctic sea ice	-	-	-
Zayvalov, 2020 : Influence of the Atmospheric Precipitation Phase Composition on Seasonal Evolution of Snow-Ice Cover in the Taganrog Bay Apex	-	-	-

Annexe 5-13. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : le volume de la glace de mer et les paramètres non définis (*on sea ice volume and other*), sur l'étendue de la glace de mer (*on sea ice extent*) et sur l'épaisseur de la glace de mer (*on sea ice thickness*). (Partie 3)

Reference	On melting	On superimposed ice	On hard crust/ice-lenses
Bartsch et al., 2023 : Towards long-term records of rain-on-snow events across the Arctic from satellite data	-	-	ROS events captured on the Yamal and Seward peninsulas have had severe impacts on reindeer and caribou, respectively, due to ice crust formation. Rain-on-snow (ROS) events modify snow properties and can lead to the formation of ice crusts which impact wildlife (including musk ox, reindeer, fox, crows).
Berger et al., 2018 : Climate Degradation and Extreme Icing Events Constrain Life in Cold-Adapted Mammals	-	A major winter rain-on-snow (ROS) event encased the ground in ice preventing the Arctic's largest land mammal from accessing food. Smaller events may still lead to partial or complete ground icing and less access to food. Warmer winter temperatures coupled with precipitation can have indirect negative effects on herbivores by increasing the probability of ROS ground-icing events which limit access to food resources 11,14.	-
Bintanja et al., 2017 : Towards a rain-dominated Arctic	rain will reduce the albedo by increasing the snow grain size 19, and reinforce snowmelt	observations suggest that Arctic winter rainfall is already currently increasing, with refreezing and icing posing considerable problems for foraging reindeer precipitation falling as rain instead of snow strongly impacts Arctic ecosystems, with more frequent episodes of relatively mild weather, rainfall and icing (especially in winter) affecting faunal food availability 10,28	-
Blunden et al., 2023 : State of the Climate in 2022	-	Rain-on-snow may result in extreme transformations in the snow cover such as formations of ice layers.	-
Boisvert et al., 2020 : Intercomparison of Precipitation Estimates over the Southern Ocean from Atmospheric Reanalyses	-	-	-
Descombes et al., 2017 : Climate change impacts on wildlife in a High Arctic archipelago – Svalbard, Norway	-	Winter rain creates ice that blocks access to food for herbivores	-
Dou et al., 2019 : A key factor initiating surface ablation of Arctic sea ice earlier and increasing liquid precipitation	Liquid precipitation is key in preconditioning and triggering snow ablation Rainfall was found to accelerate warming and reopening of the snowpack, with even small amounts (such as 0.3 mm recorded on 24 May 2017) triggering the transition from the warming phase into the reopening phase direct heat input drives snowmelt, with water content of the snowpack increasing until meltwater output occurs Rainfall during the reopening phase can further raise water content in the snow layer, prompting onset of the meltwater output phase in the snowpack. These changes of precipitation over sea ice may have profound impacts on ice melt through feedbacks involving earlier onset of surface melt. The observed snow morphology (Fig. 4) and water content (Table 1) indicated significant melt of the snowpack after rainfall for these 3 days, corresponding to a decrease in snow depth. The model results shown above demonstrate that liquid precipitation can lead to completion of the warming phase within several hours, subsequently initiating the melt season this study demonstrated that rain-on-snow events are a critical factor in initiating the onset of surface melt over Arctic sea ice the occurrence of liquid precipitation can induce a quick transition of the snow temperature from diurnally varying to an isothermal state. The observations at Ulqia' gvik and in the offshore Chukchi Sea ice pack suggest that at least in some years rain-on-snow events act as an effective, mostly irreversible trigger for the transition into the surface ablation season.	such rain events may exceed the storage capacity of water in the snowpack since the snow temperature was still low at this time. As a result, water drains downward, forming ice layers in the lower part of the snowpack and releasing latent heat (contributing in total 50.5 kJ m ⁻²), (rainfall is believed to be the main factor in rapidly warming the snow layer to an isothermal state in this case)	-
Dou et al., 2021 : Trends and spatial variation in rain-on-snow events over the Arctic Ocean during the early melt season	Rain-on-snow (ROS) events can accelerate the surface ablation of sea ice All reanalyses indicate that ROS event timing has shifted to earlier dates in recent decades (with maximum trends up to -4 to -6 d per decade in some regions in ERA-Interim) and that sea ice melt onset in the Pacific sector and most of the Eurasian marginal seas is correlated with this shift during early stages of sea ice ablation (March to June) is lacking. In this period ROS events play a key role in initiating snow and sea ice melt In addition, ROS events may also occur alongside warm and moist air invasions (Beniek et al., 2018) and influence the snow and ice ablation. We suggest that springtime ROS events are also a factor influencing sea ice melt onset, although their impact is more pronounced on regional scales. In particular, the timing of the first ROS events of the melt season is a key factor influencing the surface melt onset. Results further demonstrate that sea ice melt onset is sensitive to the timing of the first melt season ROS events in the Pacific sector of the Arctic Ocean and the Eurasian marginal seas, especially over the Chukchi Plateau, in the Kara, Laptev, and East Siberian seas.	-	-
Dou et al., 2022 : More Frequent, Intense, and Extensive Rainfall Events in a Strongly Warming Arctic	All these trends will make rainfall a new force, accelerating the melting of snow and ice in the Arctic in the future. The occurrence of rainfall events in spring is an important indicator of the onset of the Arctic ablation period in addition to the increase in the frequency and intensity of rainfall, we found that the first rainfall at the end of this century occurred earlier than the present day by ~38 days on average over the Arctic, and the largest changes are observed over the Pacific and Atlantic sectors, which means that the ice ablation period will be further prolonged in the Arctic under the high-emission scenario.	-	-
Ehn et al., 2006 : Surface albedo observations of Hudson Bay (Canada) landfast sea ice during the spring melt	-	After rain events and extensive melting, the snowpack was transformed throughout into melt/freeze metamorphosed snow and superimposed ice.	The next low-pressure event occurred 2 days later on YD 92. This time, air temperatures rose above 08C and with significant rainfall to the surface (28 mm of total precipitation observed at Churchill meteorological station, Environment Canada). Also the surface skin temperature rose above 08C for the first time in the year. Subsequently, ice lenses formed at various levels in the snowpack.
Ferguson, 2005 : CLIMATE CHANGE AND RINGED SEAL (PHOCA HISPIDA) RECRUITMENT IN WESTERN HUDSON BAY	-	-	-
Galmido et al., 2014 : Biological and physical processes influencing sea ice, under-ice algae, and dimethylsulfoniopropionate during spring in the Canadian Arctic Archipelago	The acceleration of snow melting by the two rain events in 2011 enhanced ice warming and consequently ice melt that caused bottom ice CH ₂ a to slough from the ice cover. rain accelerated snow melting in 2011 and resulted in a snow-free, nearly algae-free, and highly transparent ice cover.	-	-

Annexe 5-14. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : la fonte (on melting), la superimposed ice (on superimposed ice), les croûtes et lentilles de glace (on hard crust/ice lenses). (Partie 1)

Reference	On melting	On superimposed ice	On hard crust/ice lenses
Grenfell et Pulkonen, 2008 : A method for the detection of the severe rain-on-snow event on Banks Island, October 2003, using passive microwave remote sensing	-	In addition to delivering heat directly to the soil surface, one or more impermeable ice barrier layers are created. The rainwater froze at the base of the preexisting snowpack and formed an ice layer An ice layer could alternatively form at a level where the rain reaches the depth of subfreezing temperature, but for a strong ROS and a snowpack of moderate depth (<30 cm) we expect the water to accumulate at the base of the snow and freeze there.	-
Hansen et Aanes, 2012 : Kelp and seaweed feeding by High-Arctic wild reindeer under extreme winter conditions	-	Here, we document how ice-locked pastures following substantial amounts of ROS forced coastal Svalbard reindeer (Rangifer tarandus platyrhynchus) to use marine habitat in late winter 2010. A thick coat of ground ice covered 88% of the lowland ranges, almost completely blocking access to terrestrial forage. poor foraging conditions due to heavy ROS and extensive ground-icing. Our results confirm that heavy ROS and icing can block access to winter forage	-
Hansen et al., 2014 : Warmer and wetter winters: characteristics and implications of an extreme weather event in the High Arctic	-	Ice can form in the snow-pack or on the ground following thawfreezing, rain on frozen ground (i.e. 'black icing') or ROS (Pulkonen and Roe 2003, Grenfell and Pulkonen 2008, Pulkonen et al 2009). The water freezes and releases latent heat to the snow and the frozen soil, and a coat of solid ground-ice can build up and cover the underlying vegetation (Woo and Heron 1981; Hansen et al 2010), which in Svalbard consists mainly of mosses, lichens, dwarf shrubs, forbs and graminoids (Jónsdóttir 2005) and rarely exceeds ~10 cm height. This study thus adds strong empirical support to the overall consensus that on the High Arctic tundra with its deeply frozen ground, melting of the snow-pack due to warm spells and associated heavy ROS events is likely to cause extensive ground-icing (Pulkonen and Roe 2003, Kohler and Aanes 2004, Grenfell and Pulkonen 2008, Rennett et al 2009; Hansen et al 2011) In the High Arctic, vegetation is low-growing, and thus may be completely covered by ground-ice resulting from ROS. The extreme event caused significant increase in permafrost temperatures down to at least 5 m depth, induced slush avalanches with resultant damage to infrastructure, and left a significant ground-ice cover (~5-20 cm thick basal ice). Several studies have suggested that icing following warm spells and heavy ROS events can seriously reduce the availability of food for herbivores (Ims et al 2008, Kautrud et al 2008, Gilg et al 2009, Hansen et al 2011, 2013, Sien et al 2012) Thus, even though the 2012 extreme ROS events occurred relatively late in the winter, the resulting ice layer and 'locked pastures' - The water freezes and releases latent heat to the snow and the frozen soil, and a coat of solid ground-ice can build up and cover the underlying vegetation (Woo and Heron 1981; Hansen et al 2010), which in Svalbard consists mainly of mosses, lichens, dwarf shrubs, forbs and graminoids (Jónsdóttir 2005) and rarely exceeds ~10 cm height. This study thus adds strong empirical support to the overall consensus that on the High Arctic tundra with its deeply frozen ground, melting of the snow-pack due to warm spells and associated heavy ROS events is likely to cause extensive ground-icing (Pulkonen and Roe 2003, Kohler and Aanes 2004, Grenfell and Pulkonen 2008, Rennett et al 2009; Hansen et al 2011)	-
Hezel et al., 2012 : Projected decline in spring snow depth on Arctic sea ice caused by progressively later autumn open ocean freeze-up this century	-	-	-
IPCC, 2019 : IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate	-	-	-
IPCC, 2021 : Climate Change 2021 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change	-	-	-
Kwok et al., 2003 : A study of the onset of melt over the Arctic Ocean in RADARSAT synthetic aperture radar data	Rain on 29 May (day 149) marked the beginning of the melt season and a transition from dry snow to wet, melting snow.	-	-
Langlois et al., 2017 : Detection of rain-on-snow (ROS) events and ice layer formation using passive microwave radiometry: A context for Peary caribou habitat in the Canadian Arctic	-	rain-on-snow (ROS) events followed by subsequent freezing and the creation of ice layers	-
Larmuzel et al., 2020 : The future of Arctic sea-ice biogeochemistry and ice-associated ecosystems	-	However, with warmer and more rainy conditions, snow will tend to melt and refreeze (superimposed ice formation)	-
Liang et al., 2023 : The Role of Atmospheric Rivers in Antarctic Sea Ice Variations	Warm, humid and cloudy weather during ARs is vital to the sea ice melting in cold months, but is not that important in summer from the long-term perspective. The heavy rain may also contribute to substantial melting, notably in summer	-	-
Liston et al., 2020 : A Lagrangian Snow-Evolution System for Sea-Ice Applications (SnowModel-LG): Part I—Model Description	-	-	-
McCrystall et al., 2021 : New climate models reveal faster and larger increases in Arctic precipitation than previously projected	-	-	-
O'Sadnick et al., 2020 : Ice extent in sub-arctic fjords and coastal areas from 2001 to 2019 analyzed from MODIS imagery	-	-	-
Overland, 2022 : Arctic Climate Extremes	-	-	-

Annexe 5-15. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : la fonte (*on melting*), la superimposed ice (*on superimposed ice*), les croûtes et lentilles de glace (*on hard crust/ice lenses*). (Partie 2)

Reference	On melting	On superimposed ice	On hard crust/ice lenses
Overland, 2022 : Arctic Climate Extremes	-	-	-
Pauling et Bitz, 2021 : Arctic Sea Ice Response to Flooding of the Snow Layer in Future Warming Scenarios	-	-	-
Saloranta, 2020 : Modeling the evolution of snow, snow ice and ice in the Baltic Sea	-	The percolating water in the snowpack can refreeze deeper in the snow forming ice lenses and other relatively impermeable layers in the snow pack, or contribute to a slush layer on ice	The percolating water in the snowpack can refreeze deeper in the snow forming ice lenses and other relatively impermeable layers in the snow pack, or contribute to a slush layer on ice
Schreiber et Serreze, 2020 : Impacts of synoptic-scale cyclones on Arctic sea-ice concentration: a systematic analysis	When falling as rain on the sea ice, precipitation will result in a decrease in albedo of the surface. In this case, it can accelerate melt.	-	-
Serreze et al., 2021 : Arctic rain on snow events: bridging observations to understand environmental and livelihood impacts	-	After refreezing, ice crusts can variously form on the snow surface, as layers within the snow, or at the base of the snowpack.	When rain falls on an existing cover of snow, followed by low temperatures, or falls as freezing rain, it can leave a hard crust After refreezing, ice crusts can variously form on the snow surface, as layers within the snow, or at the base of the snowpack.
Shang et al., 2023 : More frequent atmospheric rivers slow the seasonal recovery of Arctic sea ice	The moisture carried by more frequent ARs has intensified surface downward longwave radiation and rainfall, caused stronger melting of thin, fragile ice cover In polar regions, contrary to AR-induced snow accumulation in East Antarctica, the intense moisture and heat that are rapidly transported by ARs can exert a strong melting effect on the cryosphere The physical processes relevant to AR-induced ice melt or impeded ice growth include (1) enhanced downward longwave radiation (DLW) due to the greenhouse effect of water vapour, the cloud radiative effect (CRE) and condensational heating release, (2) reduction or even sign change in turbulent heat fluxes from the ice surface, (3) the insulating capacity of snow and (4) melt energy carried by rainfall (for example, refs. 22,25–31) In the Atlantic sector where the newly formed ice cover is thin(0.1), ARs cause up to 60% of the sea-ice melting The melting effect of ARs on sea ice is dominated by extensive downward longwave radiation DLW (partly contributed by clouds within ARs) from the water vapour carried by ARs, as well as AR-induced rainfall. These results suggest that the increased AR frequency could have enhanced the melting effect of ARs ARs, which dominate the Arctic moisture import, induce a strong melting effect, especially on the newly formed thin and fragile sea ice, through enhanced DLW from the AR-transported water vapour and the associated rainfall. more frequent ARs result in a stronger melting effect on sea ice in ice-growing season Melting effect of Arctic ARs during the ice recovery season (Nov-Dec-Jan) for 1979-2021 period	-	-
Stirling et Derocher, 1993 : Possible Impacts of Climatic Warming on Polar Bears	-	-	-
Stroeve et al., 2022 : Rain on snow (ROS) understudied in sea ice remote sensing: a multi-sensor analysis of ROS during MOSAIC (Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate)	-	Upon refreezing, ice layers may form within the snowpack. over sea ice can generate ice layers at the surface or within the snowpack	winter ROS events Arctic rain on snow (ROS) deposits liquid water onto existing snowpacks. Upon refreezing, this can form icy crusts at the surface or within the snowpack.
Theresa et al., 2004 : Climate Change and Sea Ice: Local Observations from the Canadian Western Arctic	Rain delaying freeze-up	-	-
Vicito et al., 2022 : Atmospheric rivers and associated precipitation patterns during the ACLOUD and PASCAL campaigns near Svalbard (May–June 2017): case studies using observations, reanalyses, and a regional climate model	-	-	-
Vihma et al., 2016 : The atmospheric role in the Arctic water cycle: A review on processes, past and future changes, and their impacts	Over sea ice in summer, projected increase in rain and decrease in snowfall decrease the surface albedo and, hence, further amplify snow/ice surface melt. If precipitation falls as rain instead of snow, it has a dramatic effect on surface albedo and sea ice melt Although rain strongly favors sea ice melt	Although rain strongly favors sea ice melt, it may also provide a source for superimposed ice formation	-
Walsh et al., 2020 : Extreme weather and climate events in northern areas: A review	-	Rain-on-snow events that cause ice layer formation, winter warm spells, and extreme snowfall may lead to winter food shortages for arctic herbivores (Loe et al., 2016; Hansen et al., 2011) or arriving spring migratory birds in years when extreme snow cover extends late in the season (Krause et al., 2016).	-
Wang et al., 2019 : Comparison of ERA5 and ERA-Interim near-surface air temperature, snowfall and precipitation over Arctic sea ice: effects on sea ice thermodynamics and evolution	-	-	-
Webster et al., 2022 : Spatiotemporal evolution of melt ponds on Arctic sea ice	-	-	-
Zayvalov, 2020 : Influence of the Atmospheric Precipitation Phase Composition on Seasonal Evolution of Snow-Ice Cover in the Taganrog Bay Apex	Liquid precipitation enhances the melting of snow and ice even in those cases when the rain temperature is just slightly higher than 0 °C	-	-

Annexe 5-16. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : la fonte (on melting), la superimposed ice (on superimposed ice), les croûtes et lentilles de glace (on hard crust/ice lenses). (Partie 3)

Reference	On flooding/snow ice	On slush	On density/conductivity
Bartsch et al., 2023 : Towards long-term records of rain-on-snow events across the Arctic from satellite data	-	-	-
Berger et al., 2018 : Climate Degradation and Extreme Icing Events Constrain Life in Cold-Adapted Mammals	-	-	-
Bintanja et Andry, 2017 : Towards a rain-dominated Arctic	-	-	-
Blunden et al., 2023 : State of the Climate in 2022	-	-	-
Boisvert et al., 2020 : Intercomparison of Precipitation Estimates over the Southern Ocean from Atmospheric Reanalyses	-	-	-
Descamps et al., 2017 : Climate change impacts on wildlife in a High Arctic archipelago – Svalbard, Norway	-	-	-
Dou et al., 2019 : A key factor initiating surface ablation of Arctic sea ice: earlier and increasing liquid precipitation	-	-	-
Dou et al., 2021 : Trends and spatial variation in rain-on-snow events over the Arctic Ocean during the early melt season	-	-	-
Dou et al., 2022 : More Frequent, Intense, and Extensive Rainfall Events in a Strongly Warming Arctic	-	-	-
Ehn et al., 2006 : Surface albedo observations of Hudson Bay (Canada) landfast sea ice during the spring melt	-	-	-
Ferguson, 2005 : CLIMATE CHANGE AND RINGED SEAL (PHOCA HISPIDA) RECRUITMENT IN WESTERN HUDSON BAY	-	-	-
Galindo et al., 2014 : Biological and physical processes influencing sea ice, under-ice algae, and dimethylsulfoniopropionate during spring in the Canadian Arctic Archipelago	-	-	-
Grenfell et Fulkerson, 2008 : A method for the detection of the severe rain-on-snow event on Banks Island, October 2003, using passive microwave remote sensing	-	-	-
Hansen et Aanes, 2012 : Kelp and seaweed feeding by High-Arctic wild reindeer under extreme winter conditions	-	-	-
Hansen et al., 2014 : Warmer and wetter winters: characteristics and implications of an extreme weather event in the High Arctic	-	-	-
Hezel et al., 2012 : Projected decline in spring snow depth on Arctic sea ice caused by progressively later autumn open ocean freeze-up this century	-	-	To the best of our knowledge, the sea ice in CMIP5 models is generally unaffected by rainfall since rainfall is deposited directly into the ocean in the models, with no interaction with snow or sea ice. In reality rain falling during the ice growth season would likely affect snow aging, density, and thermodynamic processes associated with ice growth.
IPCC, 2019 : IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate	-	-	-

Annexe 5-17. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : le *flooding* et la glace de neige (*on flooding/snow ice*), la slush layer (*on slush*), la densité/conductivité (*on density/conductivity*). (Partie 1)

Reference	On flooding/snow ice	On slush	On density/conductivity
IPCC, 2021 : Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change	Higher flood magnitudes are also driven by future increases in rain-on-snow event days, amounts, and runoff, which are more significant in the Arctic than in mid-latitudes (where seasonal snow cover is often further reduced; AMAP, 2017; Jeong and Sushama, 2018b). In the Arctic, this will result in higher river flood potential and earlier meltwater flooding, altering seasonal characteristics of flooding (high confidence).	-	-
Kwok et al., 2003 : A study of the onset of melt over the Arctic Ocean in RADARSAT synthetic aperture radar data	-	-	-
Langlois et al., 2017 : Detection of rain-on-snow (ROS) events and ice layer formation using passive microwave radiometry: A context for Peary caribou habitat in the Canadian Arctic	-	-	-
Lamuzel et al., 2020 : The future of Arctic sea-ice biogeochemistry and ice-associated ecosystems	-	-	-
Liang et al., 2023 : The Role of Atmospheric Rivers in Antarctic Sea Ice Variations	-	-	-
Liston et al., 2020 : A Lagrangian Snow-Evolution System for Sea-Ice Applications (SnowModel-LG): Part I—Model Description	-	-	Rain falling on cold snow freezes in the snowpack and increases the snow density of the near-surface snow layers.
McCrytall et al., 2021 : New climate models reveal faster and larger increases in Arctic precipitation than previously projected	-	-	-
O'Sadnick et al., 2020 : Ice extent in sub-arctic fjords and coastal areas from 2001 to 2019 analyzed from MODIS imagery	-	-	-
Overland, 2022 : Arctic Climate Extremes	-	-	-
Pauling et Blitz, 2021 : Arctic Sea Ice Response to Flooding of the Snow Layer in Future Warming Scenarios	This rain can flood the snow layer on top of the sea ice	-	-
Saloranta, 2000 : Modeling the evolution of snow, snow ice and ice in the Baltic Sea	a mild period with rainfall cause wetting of snow, both which lead to slush layer formation. The possible freezing of this slush, the so-called snow ice formation, must be then taken into account in ice growth calculations. The modeled rain- and meltwater contribution to snow ice formation, however, agree well with the observed rise in early melt season snow ice thickness.	Flooding, together with percolation of melt-and rainwater are probably the main processes in slush layer formation, but brine expulsion and capillary suction of seawater through cracks in the ice may also contribute, as discussed in Adolphs (1998) The percolating water in the snowpack can refreeze deeper in the snow forming ice lenses and other relatively impermeable layers in the snow pack, or contribute to a slush layer on ice. a mild period with rainfall cause wetting of snow, both which lead to slush layer formation. The possible freezing of this slush, the so-called snow ice formation, must be then taken into account in ice growth calculations. mild period with rainfall cause wetting of snow, which lead to slush layer formation. The maximum amount of slush is present in the beginning of February when the snow cover has become heavy enough to trigger flooding, and in April when meltwater and rain contribute greatly to the slush layer. Consequently, 2 slush formation periods, different in their characteristics can be distinguished in model results, the "cold-flooding-period" and the "snowmelt-rain-period".	-
Schreiber et Serreze, 2020 : Impacts of synoptic-scale cyclones on Arctic sea-ice concentration: a systematic analysis	-	-	-
Serreze et al., 2021 : Arctic rain on snow events: bridging observations to understand environmental and livelihood impacts	-	-	ROS events influence snow structure, albedo, density and conductivity, and hence the ground thermal regime (e.g. Mazurkiewicz et al 2008, Romanovsky et al 2010, Westermann et al 2011, Freudiger et al 2014, Guan et al 2016).

Annexe 5-18. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : le *flooding* et la glace de neige (*on flooding/snow ice*), la slush layer (*on slush*), la densité/conductivité (*on density/conductivity*). (Partie 2)

Reference	On flooding/snow ice	On slush	On density/conductivity
Shang et al., 2023 : More frequent atmospheric rivers slow the seasonal recovery of Arctic sea ice	-	-	-
Sirling et Derocher, 1993 : Possible Impacts of Climatic Warming on Polar Bears	-	-	-
Stroeve et al., 2022 : Rain on snow (ROS) understudied in sea ice remote sensing: a multi-sensor analysis of ROS during MOSAIC (Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate)	-	-	-
Theresa et al., 2004 : Climate Change and Sea Ice: Local Observations from the Canadian Western Arctic	-	-	-
Vicoto et al., 2022 : Atmospheric rivers and associated precipitation patterns during the ACLLOUD and PASCAL campaigns near Svalbard (May–June 2017): case studies using observations, reanalyses, and a regional climate model	-	-	-
Vihma et al., 2016 : The atmospheric role in the Arctic water cycle: A review on processes, past and future changes, and their impacts	-	-	-
Walsh et al., 2020 : Extreme weather and climate events in northern areas: A review	-	-	-
Wang et al., 2019 : Comparison of ERA5 and ERA-Interim near-surface air temperature, snowfall and precipitation over Arctic sea ice: effects on sea ice thermodynamics and evolution	-	-	-
Webster et al., 2022 : Spatiotemporal evolution of melt ponds on Arctic sea ice	-	-	-
Zayvitov, 2020 : Influence of the Atmospheric Precipitation Phase Composition on Seasonal Evolution of Snow-Ice Cover in the Taganrog Bay Apex	-	-	Snow accumulates on the ice surface, and precipitation in the form of rain falling on the snow is absorbed by it, changing the snow cover density and albedo.

Annexe 5-19. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : le *flooding* et la glace de neige (*on flooding/snow ice*), la slush layer (*on slush*), la densité/conductivité (*on density/conductivity*). (Partie 3)

Reference	On snow cover	On heat exchange
Bartsch et al., 2023 : Towards long-term records of rain-on-snow events across the Arctic from satellite data	-	-
Berger et al., 2018 : Climate Degradation and Extreme Icing Events Constrain Life in Cold-Adapted Mammals	Likewise winter precipitation falling as rain can reduce snowpack.	-
Bintanja et Andry, 2017 : Towards a rain-dominated Arctic	Rainfall also diminishes snow cover extent Rainfall also diminishes snow cover extent and considerably lowers the surface albedo of seasonal snow, ice sheets and sea ice ⁹ , reinforcing surface warming and amplifying the retreat of ice and snow	Rainfall also diminishes snow cover extent and considerably lowers the surface albedo of seasonal snow, ice sheets and sea ice ⁹ , reinforcing surface warming
Blunden et al., 2023 : State of the Climate in 2022	Early December brought extreme warmth to northwest Alaska, and some Bering Strait communities experienced a complete loss of snowpack due to rain and sustained above-freezing temperatures.	-
Boisvert et al., 2020 : Intercomparison of Precipitation Estimates over the Southern Ocean from Atmospheric Reanalyses	Snow depth was reduced in the following summer due to melt and melt associated with rain events,	-
Descamps et al., 2017 : Climate change impacts on wildlife in a High Arctic archipelago – Svalbard, Norway	-	-
Dou et al., 2019 : A key factor initiating surface ablation of Arctic sea ice: earlier and increasing liquid precipitation	rapid reduction in snow depth linked to late-spring rain-on-snow events with an associated rapid decrease in snow depth Spring snow depth on sea ice is very sensitive to the phase of precipitation. Solid precipitation increases snow depth, protecting sea ice from melt. Conversely, liquid precipitation heats the snowpack, changes snow grain morphology and lowers albedo, decreasing snow depth. Field measurements at a mass balance site (MB site) on landfast sea ice near Utqiagvik, Alaska, in April–June from 2013 to 2015 revealed rapid declines in snow depth once nonfreezing rain fell on the snow Rather, the first non-freezing rain events of the year that were immediately followed by the rapid decrease in snow depth might be responsible for such a phenomenon. The observed snow morphology (Fig. 4) and water content (Table 1) indicated significant melt of the snowpack after rainfall for these 3 days, corresponding to a decrease in snow depth In the absence of rainfall, warming is mostly sluggish, and the snow depth reduction is much more gradual as snowmelt proceeds By pushing the snowpack into the isothermal, ripening and meltwater output phase, liquid precipitation can sharply reduce snow depth and initiate the onset of rapid surface ablation	as well as latent heat release determined by rainfall amount the rain can directly bring heat into the snow layer and heat the snowpack interior through the release of latent heat during refreezing of rainwater in the early stages of snow warming. rain changed the energy balance, initiating the warming phase of snowmelt in two ways: ... and (2) transferring heat into the snowpack. Most of the rain-induced energy transfer was used to warm the snowpack; once the snowpack reached the warming phase, the remaining energy was used to melt the snow further, pushing the snowpack into ripening phase. The rainfall contributed... and contributed 318 KJ m ⁻² by bringing heat directly into the snowpack and releasing latent heat (the latter accounted for the main contribution). Once the warming phase is reached, the remaining energy is used to further melt the snow, producing significant meltwater flow and contributing to snowpack ripening, together with the subsequent absorption of solar radiation (some of which was also contributed by rain-on-snow) this study demonstrated that rain-on-snow events are a critical factor in initiating the onset of surface melt over Arctic sea ice, primarily through reduction in surface albedo as well as latent heat release such rain events may exceed the storage capacity of water in the snowpack since the snow temperature was still low at this time. As a result, water drains downward, forming ice layers in the lower part of the snowpack and releasing latent heat (contributing in total 50.5 KJ m ⁻²). (rainfall is believed to be the main factor in rapidly warming the snow layer to an isothermal state in this case)
Dou et al., 2021 : Trends and spatial variation in rain-on-snow events over the Arctic Ocean during the early melt season	In ERA5, the shift from solid to liquid precipitation phase during the early melt season has directly contributed to a reduction in spring snow depth on sea ice by more than -0.5 cm per decade averaged over the Arctic Ocean since 1980, with the largest contribution (about -2.0 cm per decade) in the Kara-Barents seas and Canadian Arctic Archipelago Snow depth on sea ice is very sensitive to changes in precipitation phase. Solid precipitation increases snow depth while liquid precipitation does not. Here, we estimated the contribution of changes in precipitation phases to trends in spring snow depth on sea ice over the period 1980–2017 based on ERA5. We only consider the direct contribution from the mass of precipitation (less snowfall, lower snow thickness) while the indirect contribution from the latent heat of rainfall is beyond the scope of this study. Our analysis indicates that the impact on snow depth by precipitation phase changes has significant spatial variations. The phase change leads to declines in snow depth in most of the Arctic marginal seas. In some small areas (including the central Canada Basin and part of the East Siberian Sea) increases in snow depth are induced. The Kara-Barents seas and Canadian Arctic Archipelago exhibit the largest decreasing trend (more than -2.0 cm per decade). Averaged over the Arctic Ocean, the reduction rate in snow thickness associated with precipitation phase transition is -0.5 cm per decade over the past decades. This study suggests that the interdecadal decrease in snow depth on sea ice in spring is enhanced by the change in precipitation phase (solid to liquid) during the initial ablation period This study suggests that the solid-to-liquid precipitation phase transition (i.e., increased ROS events) contributed to a substantial reduction in snow depth on sea ice during the early melt season.	during early stages of sea ice ablation (March to June) is lacking. In this period ROS events play a key role in initiating snow and sea ice melt, because the occurrence, timing, and quantity of rainfall can greatly affect reductions in snow albedo, enhance heat transfer into the snowpack
Dou et al., 2022 : More Frequent, Intense, and Extensive Rainfall Events in a Strongly Warming Arctic	-	-
Ehn et al., 2006 : Surface albedo observations of Hudson Bay (Canada) landfast sea ice during the spring melt	After rain events and extensive melting, the snowpack was transformed throughout into melt/freeze metamorphosed snow and superimposed ice.	-

Annexe 5-20. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : la couche de neige (*on snow cover*), les échanges de chaleur (*on heat exchange*). (Partie 1)

Reference	On snow cover	On heat exchange
Ferguson, 2005 : CLIMATE CHANGE AND RINGED SEAL (PHOCA HISPIDA) RECRUITMENT IN WESTERN HUDSON BAY	-	-
Galindo et al., 2014 : Biological and physical processes influencing sea ice, under-ice algae, and dimethylsulfoniopropionate during spring in the Canadian Arctic Archipelago	a rapid loss of the snow cover in 2011 coinciding with rain events In 2010 : Site-averaged snow depth remained relatively stable at 15 cm up to 6 June, then declined progressively to reach zero on 18 June. In 2011 : Site-averaged snow depth was stable at around 15 cm until 8 June and decreased abruptly to reach 3 cm on 12 June during the rainy period. In 2011, air temperature first exceeded 0C on 8 June, 2 days later than in 2010, but snow melting was accelerated by two rainfall events that occurred on 10 and 12 June. rain accelerated snow melting in 2011 and resulted in a snow-free, nearly algae-free, and highly transparent ice cover.	-
Grenfell et Putkonen, 2008 : A method for the detection of the severe rain-on-snow event on Banks Island, October 2003, using passive microwave remote sensing	-	This is followed (rain penetrate and percolates down) by freezing of the liquid and resultant release of latent heat.
Hansen et Aanes, 2012 : Kelp and seaweed feeding by High-Arctic wild reindeer under extreme winter conditions	-	-
Hansen et al., 2014 : Warmer and wetter winters: characteristics and implications of an extreme weather event in the High Arctic	-	In particular, ROS can strongly influence the heat budget of the snow-pack as well as the soil by percolating through the snow (Putkonen and Roe 2003) The water freezes and releases latent heat to the snow and the frozen soil
Hezel et al., 2012 : Projected decline in spring snow depth on Arctic sea ice caused by progressively later autumn open ocean freeze-up this century	-	-
IPCC, 2019 : IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate	Multi-source time series provide evidence of declining snow depth on Arctic sea ice (Webster et al., 2014) consistent with estimates of higher fractions of liquid precipitation since 2000 (Boisvert et al., 2018) but there is low confidence because surface measurements for validation are extremely limited and suggest a high degree of regional variability (Haas et al., 2017; Rösel et al., 2018).	-
IPCC, 2021 : Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change	-	-
Kwok et al., 2003 : A study of the onset of melt over the Arctic Ocean in RADARSAT synthetic aperture radar data	-	-
Langlois et al., 2017 : Detection of rain-on-snow (ROS) events and ice layer formation using passive microwave radiometry: A context for Peary caribou habitat in the Canadian Arctic	-	-
Lannuzel et al., 2020 : The future of Arctic sea-ice biogeochemistry and ice-associated ecosystems	-	-
Liang et al., 2023 : The Role of Atmospheric Rivers in Antarctic Sea Ice Variations	-	-
Liston et al., 2020 : A Lagrangian Snow-Evolution System for Sea-Ice Applications (SnowModel-LG): Part I—Model Description	-	-
McCrystall et al., 2021 : New climate models reveal faster and larger increases in Arctic precipitation than previously projected	The earlier shift towards a rain dominated regime in CMIP6 has implications for the stability of social-ecological systems in the Arctic and the rate at which system changes will occur. This includes a further reduction in snow cover duration ⁸ Changes in precipitation over sea-ice areas will alter thermodynamic ice growth and snow depth	-
O'Sadnick et al., 2020 : Ice extent in sub-arctic fjords and coastal areas from 2001 to 2019 analyzed from MODIS imagery	-	-

Annexe 5-21. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : la couche de neige (*on snow cover*), les échanges de chaleur (*on heat exchange*). (Partie 2)

Reference	On snow cover	On heat exchange
Overland, 2022 : Arctic Climate Extremes	-	Greenland 2021 : Exceptional heating of the ice sheet occurred due to the heat transfer from condensation and the elevated air temperature during the August episode of warm air and rainfall arriving in what is termed an atmospheric river (AR)
Pauling et Bitz, 2021 : Arctic Sea Ice Response to Flooding of the Snow Layer in Future Warming Scenarios	-	There are additional effects as well (to rain reducing the snow cover) : the insulating effect (less snow reduces insulation in spring and winter), driving faster sea ice basal growth Early winter snow removal increases effective thermal conductivity in the combined sea ice and snow layer and increases basal growth. As a result of simulating artificial flooding of the sea ice surface, we have found that thinning the snow layer on sea ice early in the growth season produces substantially thicker sea ice due to the higher effective thermal conductivity
Saloranta, 2000 : Modeling the evolution of snow, snow ice and ice in the Baltic Sea	Snowpack can deform very rapidly especially during the snow melt season and due to rainfall. « Counteracting capillarity is the compaction of snow cover due to the presence of high concentrations of liquid water, which can reduce the thickness as well as the water content of the slush. » "snowmelt-rain-period". The latter process does not need snow overload or waterways to occur and it can also reduce snow thickness more drastically than flooding does.	-
Schreiber et Serreze, 2020 : Impacts of synoptic-scale cyclones on Arctic sea-ice concentration: a systematic analysis	-	However, this explanation does not work for autumn, when air temperatures within and outside of cyclone influence are not much different, and there is more longwave radiation to the surface (Table 1) outweighing the decrease in downward shortwave and turbulent fluxes. Snowfall onto the ice will increase the albedo and may prevent some of this energy from being absorbed – though rainfall will have the opposite effect.
Serreze et al., 2021 : Arctic rain on snow events: bridging observations to understand environmental and livelihood impacts	-	ROS events influence snow structure, albedo, density and conductivity, and hence the ground thermal regime (e.g. Mazurkiewicz et al 2008, Romanovsky et al 2010, Westermann et al 2011, Freudiger et al 2014, Guan et al 2016). Severe rain events can remove the insulating ability of the snowpack (Putkonen and Roe 2003, Renner et al 2009).
Shang et al., 2023 : More frequent atmospheric rivers slow the seasonal recovery of Arctic sea ice	-	-
Stirling et Derocher, 1993 : Possible Impacts of Climatic Warming on Polar Bears	-	-
Stroeve et al., 2022 : Rain on snow (ROS) understudied in sea ice remote sensing: a multi-sensor analysis of ROS during MOSAIC (Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate)	-	-

Annexe 5-22. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : la couche de neige (*on snow cover*), les échanges de chaleur (*on heat exchange*). (Partie 3)

Reference	On snow cover	On heat exchange
Theresa et al., 2004 : Climate Change and Sea Ice: Local Observations from the Canadian Western Arctic	-	-
Viceto et al., 2022 : Atmospheric rivers and associated precipitation patterns during the ALOUD and PASCAL campaigns near Svalbard (May–June 2017): case studies using observations, reanalyses, and a regional climate model	-	-
Vihma et al., 2016 : The atmospheric role in the Arctic water cycle: A review on processes, past and future changes, and their impacts	-	-
Walsh et al., 2020 : Extreme weather and climate events in northern areas: A review	Alternatively, extreme warming that results in a lack of snow cover, possibly combined with winter rainfall, causes a loss of ground insulation or icing, with plant population dieback (Bjerke et al., 2017; Bokhorst et al., 2011)	-
Wang et al., 2019 : Comparison of ERA5 and ERA-Interim near-surface air temperature, snowfall and precipitation over Arctic sea ice: effects on sea ice thermodynamics and evolution	Sea ice was marginally thinner (0.006–0.02 m) in TP5_T2M5 compared with TPI_T2MI for all the buoys. The major differences we see between these simulations is in the snow depth (Fig. 9). TPI_T2MI has a thinner snowpack than TP5_T2M5 for all four buoys, by 0.02–0.06 m. This is due to the higher total precipitation in ERA5, compared with ERA-I (see Sect. 3.2). In contrast, when HIGHTSI is forced with the reanalysis' snowfall product (SFL_ERA-I and SF5_ERA5) the differences in snow depth are comparable with the simulations forced by the total precipitation (TPI_T2MI and TP5_T2M5). The SFL_T2MI runs typically have a thinner snowpack (0.01–0.06 m) and a greater ice thickness (0.040.09 m) than SF5_T2M5. The snow depth in SFL_T2MI is thinner (by 0.01–0.04 m) and ice thickness is greater (0.010.06 m) than the TPI_T2MI runs (Fig. 9). This is because there is substantial rain at sub-zero temperatures in the SFL_T2MI runs that is classified as snow in the TPI_T2MI runs. There are no large differences between the snow depth and sea ice thickness at the end of the growth season for the SF5_T2M5 and TP5_T2M5 runs because, unlike in ERA-I, there is little rain at sub-zero temperatures for SF5_T2M5. ... Finally, we look at the effect of precipitation by comparing the TP5_T2MI and TPI_T2MI runs. The snowpack in TP5_T2MI is thicker (0.006–0.02 m), while the ice thickness is thinner (0.003–0.02 m) than in the TPI_T2MI runs (Fig. 10). The thicker snowpack is due to the higher precipitation in ERA5 compared with ERA-I. This thicker snowpack allows less heat loss to the atmosphere, which results in less ice growth.	-
Webster et al., 2022 : Spatiotemporal evolution of melt ponds on Arctic sea ice	During the observed freeze-up, weather events, including rain on snow, caused high-frequency variability in snow depth, while pond coverage and depth remained relatively constant until continuous freezing ensued. Shortly after May 25, a multi-day period of above-freezing temperatures and rainfall occurred, which reduced the snowpack In mid-September, a cyclone caused a rain-on-snow event. The cyclone had wind speeds of approximately 17 m s ⁻¹ , high (0C) maximum air temperatures, and approximately 15 mm (liquid equivalent) of snowfall and rainfall, all of which thinned the snowpack from 8 ± 5cm to 4 ± 3cm.	-
Zayvalov, 2020 : Influence of the Atmospheric Precipitation Phase Composition on Seasonal Evolution of Snow-Ice Cover in the Taganrog Bay Apex	-	-

Annexe 5-23. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : la couche de neige (*on snow cover*), les échanges de chaleur (*on heat exchange*). (Partie 4)

Reference	On albedo	On melt ponds	On flushing
Bartsch et al., 2023 : Towards long-term records of rain-on-snow events across the Arctic from satellite data	-	-	-
Berger et al., 2018 : Climate Degradation and Extreme Icing Events Constrain Life in Cold-Adapted Mammals	-	-	-
Bintanja et Andry, 2017 : Towards a rain-dominated Arctic	Enhanced rainfall rates will considerably lower the surface albedo of snow and sea ice when insolation is relatively high rain will reduce the albedo by increasing the snow grain size Rainfall also diminishes snow cover extent and considerably lowers the surface albedo of seasonal snow, ice sheets and sea ice In fact, enhanced rainfall will most likely accelerate sea-ice retreat by lowering its albedo (compared with that of fresh snowfall).	-	-
Blunden et al., 2023 : State of the Climate in 2022	-	-	-
Boisvert et al., 2020 : Intercomparison of Precipitation Estimates over the Southern Ocean from Atmospheric Reanalyses	-	-	-
Descamps et al., 2017 : Climate change impacts on wildlife in a High Arctic archipelago – Svalbard, Norway	-	-	-
Dou et al., 2019 : A key factor initiating surface ablation of Arctic sea ice: earlier and increasing liquid precipitation	through reduction in surface albedo liquid precipitation heats the snowpack, changes snow grain morphology and lowers albedo As observed in this study and previous studies, such as Perovich et al. (2002, 2017) and Perovich and Polashenski (2012), rain can decrease the surface albedo by ~ 0.1 within a few hours. This impact on albedo is quite different from that of a gradual warming or melting process. The latter needs ~ 10 days to reduce the albedo by the same amount (Perovich et al., 2002, 2017). A primary mechanism for the acceleration of surface melt and ablation is the rain-induced rapid lowering of surface albedo. Observations showed that surface albedo decreased sharply on 24, 25 and 27 May by 0.12, 0.10 and 0.13, respectively, coinciding with the occurrence of rain-on-snow events the warming events alone did not result in such a rapid decrease in albedo but that liquid precipitation plays a key role - The rainfall contributed 390 KJ m ⁻² to the energy balance by reducing the surface albedo this study demonstrated that rain-on-snow events are a critical factor in initiating the onset of surface melt over Arctic sea ice, primarily through reduction in surface albedo	Based on the observational evidence and model results, we speculate that earlier and increasing liquid precipitation leads to earlier and more rapid melt of snowpack over sea ice, allowing for earlier formation of melt ponds.	-
Dou et al., 2021 : Trends and spatial variation in rain-on-snow events over the Arctic Ocean during the early melt season	Rain-on-snow (ROS) events can accelerate the surface ablation of sea ice, thus greatly influencing the ice albedo feedback. during early stages of sea ice ablation (March to June) is lacking. In this period ROS events play a key role in initiating snow and sea ice melt, because the occurrence, timing, and quantity of rainfall can greatly affect reductions in snow albedo	during early stages of sea ice ablation (March to June) is lacking. In this period ROS events play a key role in initiating snow and sea ice melt, because the occurrence, timing, and quantity of rainfall can greatly affect reductions in snow albedo, enhance heat transfer into the snowpack, and promote the formation and development of melt ponds.	-
Dou et al., 2022 : More Frequent, Intense, and Extensive Rainfall Events in a Strongly Warming Arctic	-	-	-
Ehn et al., 2006 : Surface albedo observations of Hudson Bay (Canada) landfast sea ice during the spring melt	Rapid changes in the albedo were found to relate to typical subarctic climate conditions, i.e. frequent incursions of southerly air, resulting snow and rain events and the generally high maximum solar insolation levels. Variability on the order of 10% in the white-ice broadband albedo resulted from the diurnal freeze-thaw cycle, but also synoptic weather events, such as snowfall and rain events, could rapidly change the surface conditions. The main environmental conditions with effects on the surface albedo were identified as (a) advection of warm air masses, (b) cloud cover, (c) precipitation in solid phase and (d) precipitation in liquid phase Following these synoptic-scale weather events (including rainfall), the broadband albedo dropped from a high of 0.74 (YD 89) to 0.71 (YD 92) and to 0.64 (YD 95) in 6 days. Minimum albedos that occurred as a result of warm days and rain events show considerably more wavelength dependence. Rain events caused a rapid change in the snowcover properties and caused a non-recoverable decrease in the surface albedo due to metamorphoses in the snowpack Rainfall occurred on five occasions. The most significant of these took place around YD 100–101 and was accompanied by thunderstorms. All rain events were marked by increased levels of Ld associated with the cloud cover, increased humidity and warmer air. Recorded values ranged from 310 to 332 W m ⁻² . During snowfall events, Ld was generally below 310 W m ⁻² For the duration of the experiment, the net radiative energy balance was positive, i.e. the surface received more radiative energy than it emitted/reflected. Prior to the thunderstorm on YD 100–101, Q averaged 21.5 W m ⁻² , and afterwards 50.5 W m ⁻² , an indication of the physical changes that occurred in the snow due to the rain. The albedo at infrared wavelengths is very sensitive to liquid-water content which greatly increases absorption and reduces scattering	-	-
Ferguson, 2005 : CLIMATE CHANGE AND RINGED SEAL (PHOCA HISPIDA) RECRUITMENT IN WESTERN HUDSON BAY	-	-	-

Annexe 5-24. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : l'albédo (*on albedo*), les bassins de fonte (*on melt ponds*), le flushing (*on flushing*). (Partie 1)

Reference	On albedo	On melt ponds	On flushing
Galindo et al., 2014 : Biological and physical processes influencing sea ice, under-ice algae, and dimethylsulfoniopropionate during spring in the Canadian Arctic Archipelago	In 2010 : Surface albedo remained relatively constant around 0.8 until 6 June, decreased slowly to 0.7 on 13 June due to snowmelt, and dropped down to 0.3 as a melt pond formed in the area. In 2011 : Surface albedo remained relatively constant around 0.8 until 6 June, and then decreased rapidly to 0.2 on 15 June due to the rain events and the formation of melt ponds. Thereafter, the albedo increased to 0.6 due to the drainage of melt ponds and stayed relatively constant at this level until the end of the sampling period.	-	In 2011, the loss of ice algae and DMSPp was rapid (8 days) and coincided with two successive rain events and the rapid loss of the snow cover which resulted in the warming and melting of bottom ice and increase in brine drainage due to higher light transmittance.
Grenfell et Pulkkinen, 2008 : A method for the detection of the severe rain-on-snow event on Banks Island, October 2003, using passive microwave remote sensing	-	-	-
Hansen et Aanes, 2012 : Kelp and seaweed feeding by High-Arctic wild reindeer under extreme winter conditions	-	-	-
Hansen et al., 2014 : Warmer and wetter winters: characteristics and implications of an extreme weather event in the High Arctic	-	-	-
Hezel et al., 2012 : Projected decline in spring snow depth on Arctic sea ice caused by progressively later autumn open ocean freeze-up this century	To the best of our knowledge, the sea ice in CMIP5 models is generally unaffected by rainfall since rainfall is deposited directly into the ocean in the models, with no interaction with snow or sea ice. In reality rain falling during the ice growth season would likely affect snow aging, density, and thermodynamic processes associated with ice growth. Rain falling on sea ice during the melt season would affect snow morphology and albedo, accelerate snow loss during the beginning of the melt season and potentially accelerate ice loss. These and other thermodynamic effects associated with snow on sea ice are only now being investigated in the context of a global model (O. Lecomte, personal communication, 2012).	-	-
IPCC, 2019 : IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate	-	-	-
IPCC, 2021 : Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change	-	-	-
Kwack et al., 2003 : A study of the onset of melt over the Arctic Ocean in RADARSAT synthetic aperture radar data	Measurements from 3 June show the albedo dropped to wet snow values of 0.7 to 0.75. In some places, the snow was no longer optically thick, resulting in a modest amount of spatial variability in albedo (0.1). Melting of the snowpack continued, and by 15 June the albedo line consisted of melting snow, bare melting ice, and a few melt ponds. Spatial variability along the line increased greatly, with albedo ranging from 0.3 for the ponds to 0.7 for the melting snow.	-	-
Langlois et al., 2017 : Detection of rain-on-snow (ROS) events and ice layer formation using passive microwave radiometry: A context for Peary caribou habitat in the Canadian Arctic	-	-	-
Lannuzel et al., 2020 : The future of Arctic sea-ice biogeochemistry and ice-associated ecosystems	-	In spring, precipitation (snow and rain) may promote melt pond formation, leading to greater CO2 uptake from the atmosphere	-
Liang et al., 2023 : The Role of Atmospheric Rivers in Antarctic Sea Ice Variations	-	-	-
Liston et al., 2020 : A Lagrangian Snow-Evolution System for Sea-Ice Applications (SnowModel-LG): Part I—Model Description	-	-	-
McCrystall et al., 2021 : New climate models reveal faster and larger increases in Arctic precipitation than previously projected	-	-	-
O'Sadnick et al., 2020 : Ice extent in sub-arctic fjords and coastal areas from 2001 to 2019 analyzed from MODIS imagery	-	-	-
Overland, 2022 : Arctic Climate Extremes	-	-	-
Pauling et Bitz, 2021 : Arctic Sea Ice Response to Flooding of the Snow Layer in Future Warming Scenarios	There are additional effects as well (to rain reducing the snow cover) : the albedo effect (less snow and/or liquid water at the surface reduces surface albedo in summer), driving increased sea ice melt The July albedo response in the September–October only flooding cases is a decrease of roughly 0.05–0.15 in the central Arctic and an increase of a similar amount near the sea ice edge. The weaker response in the future warming scenario shows that the flooding has a smaller effect when there is less ice area over which the flooding can occur. Late winter and spring snow removal decreases surface albedo As a result of simulating artificial flooding of the sea ice surface, we have found that thinning the snow layer in summer drives sea ice loss due to the reduced surface albedo.	-	-

Annexe 5-25. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : l'albédo (*on albedo*), les bassins de fonte (*on melt ponds*), le flushing (*on flushing*). (Partie 2)

Reference	On albedo	On melt ponds	On flushing
Salaranta, 2000 : Modeling the evolution of snow, snow ice and ice in the Baltic Sea	-	-	-
Schreiber et Serreze, 2020 : Impacts of synoptic-scale cyclones on Arctic sea-ice concentration: a systematic analysis	When falling as rain on the sea ice, precipitation will result in a decrease in albedo of the surface. However, this explanation does not work for autumn, when air temperatures within and outside of cyclone influence are not much different, and there is more longwave radiation to the surface (Table 1) outweighing the decrease in downward shortwave and turbulent fluxes. Snowfall onto the ice will increase the albedo and may prevent some of this energy from being absorbed – though rainfall will have the opposite effect.	-	-
Serreze et al., 2021 : Arctic rain on snow events: bridging observations to understand environmental and livelihood impacts	ROS events influence snow structure, albedo, density and conductivity, and hence the ground thermal regime (e.g. Mazurkiewicz et al 2008, Romanovsky et al 2010, Westermann et al 2011, Freudiger et al 2014, Guan et al 2016).	-	-
Shang et al., 2023 : More frequent atmospheric rivers slow the seasonal recovery of Arctic sea ice	-	-	-
Stirling et Denrocher, 1993 : Possible Impacts of Climatic Warming on Polar Bears	-	-	-
Stroeve et al., 2022 : Rain on snow (ROS) understudied in sea ice remote sensing: a multi-sensor analysis of ROS during MOSAIC (Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate)	-	-	ROS can flush brine from the snow, thereby freshening the snowpack (Nandan et al., 2020).
Theresa et al., 2004 : Climate Change and Sea Ice: Local Observations from the Canadian Western Arctic	-	-	-
Viceto et al., 2022 : Atmospheric rivers and associated precipitation patterns during the ALOUD and PASCAL campaigns near Svalbard (May–June 2017): case studies using observations, reanalyses, and a regional climate model	-	-	-
Vihma et al., 2016 : The atmospheric role in the Arctic water cycle: A review on processes, past and future changes, and their impacts	Over sea ice in summer, projected increase in rain and decrease in snowfall decrease the surface albedo although Persson [2012] estimated the rain effect of lowering surface albedo by approximately 0.07 at melt onset. If precipitation falls as rain instead of snow, it has a dramatic effect on surface albedo	-	-
Walsh et al., 2020 : Extreme weather and climate events in northern areas: A review	-	-	-
Wang et al., 2019 : Comparison of ERA5 and ERA-Interim near-surface air temperature, snowfall and precipitation over Arctic sea ice: effects on sea ice thermodynamics and evolution	-	-	-
Webster et al., 2022 : Spatiotemporal evolution of melt ponds on Arctic sea ice	-	Shortly after May 25, a multi-day period of above-freezing temperatures and rainfall occurred, which reduced the snowpack and preconditioned the surface for melt pond formation Over the next few days, heavy rainfall (approximately 24 mm) ensued and a coincident increase in areal fraction and depths was observed in both subnivean ponds and melt ponds. The mean thickness of subnivean ponds reached 14 ± 9 cm during this time, but decreased, albeit variably, for the remainder of the season to a minimum of 5 ± 3 cm on July 25 Despite variable melt pond behavior, a notable vertical drainage event occurred during windy, rainy conditions (12 m s^{-1} wind speeds, approximately 5 mm water equivalent) on July 11–13. During this event, large melt ponds exceeding 50–100 m in diameter experienced vertical drainage, either through flaw holes or interconnected brine channels. The amount of pond water drained from one of these large ponds was approximately 14,200 m ³ ; its area decreased from approximately 25,700 m ² to 5,300 m ² . Above-freezing temperatures and intermittent rainfall lead to a steady reduction in the snow/SSL and a "re-opening" of melt ponds as their ice lids melted away.	-
Zayvalov, 2020 : Influence of the Atmospheric Precipitation Phase Composition on Seasonal Evolution of Snow-Ice Cover in the Taganrog Bay Apex	Snow accumulates on the ice surface, and precipitation in the form of rain falling on the snow is absorbed by it, changing the snow cover density and albedo.	-	-

Annexe 5-26. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : l'albédo (*on albedo*), les bassins de fonte (*on melt ponds*), le flushing (*on flushing*). (Partie 3)

Reference	On primary producers	On marine mammals and seabirds
Bartsch et al., 2023 : Towards long-term records of rain-on-snow events across the Arctic from satellite data	-	-
Berger et al., 2018 : Climate Degradation and Extreme Iceing Events Constrain Life in Cold-Adapted Mammals	However snowpack also insulates ground vegetation ^{17,18} , and thus reduced snowpack could negatively affect plant productivity and resource availability in the following growing season.	-
Bintanja et Andry, 2017 : Towards a rain-dominated Arctic	-	-
Blunden et al., 2023 : State of the Climate in 2022	-	-
Boisvert et al., 2020 : Intercomparison of Precipitation Estimates over the Southern Ocean from Atmospheric Reanalyses	-	-
Descamps et al., 2017 : Climate change impacts on wildlife in a High Arctic archipelago – Svalbard, Norway	Winter rain results in encapsulation of vegetation in ice	-
Dou et al., 2019 : A key factor initiating surface ablation of Arctic sea ice: earlier and increasing liquid precipitation	-	-
Dou et al., 2021 : Trends and spatial variation in rain-on-snow events over the Arctic Ocean during the early melt season	-	-
Dou et al., 2022 : More Frequent, Intense, and Extensive Rainfall Events in a Strongly Warming Arctic	-	-
Ehn et al., 2006 : Surface albedo observations of Hudson Bay (Canada) landfast sea ice during the spring melt	-	-
Ferguson, 2005 : CLIMATE CHANGE AND RINGED SEAL (PHOCA HISPIDA) RECRUITMENT IN WESTERN HUDSON BAY	-	We observed a decadal pattern in ringed seal recruitment with low recruitment in the 1970s, high in the 1980s, followed by low in the 1990s that mirrored a temporal pattern of changing environmental correlates. This trend matched a similar temporal trend in snowfall with low snowfall in the 1970s, high in the 1980s, and low in the 1990s With reduced snowfall, there may be less snow available to accumulate in drifts in the lee of pressure ridges, resulting in shallower drifts and consequently less protection for pups from predators when they most rely on being concealed in subnivean birth lairs. Our results suggest that decreased snowfall in western Hudson Bay may be an important environmental factor partially responsible for declining ringed seal recruitment The amount of snowfall in April and May is likely important, and may correlate with factors such as the predation rate (negative) on seal pups by polar bears (Hammill and Smith 1991), depth of drifts with subnivean birth lairs (positive), or rainfall (negative) (Stirling and Smith 2004). In addition to predation risk, survival of pups in April and May may be influenced by the negative effects of exposure, including hypothermia (Smith et al. 1991, Kelly 2001), in the event of den collapse. Our goal was to determine whether annual variation in the survivorship curve was correlated with these environmental factors.
Galindo et al., 2014 : Biological and physical processes influencing sea ice, under-ice algae, and dimethylsulfoniopropionate during spring in the Canadian Arctic Archipelago	The acceleration of snow melting by the two rain events in 2011 enhanced ice warming and consequently ice melt that caused bottom ice Chl a to slough from the ice cover. rain accelerated snow melting in 2011 and resulted in a snow-free, nearly algae-free, and highly transparent ice cover. key role of snowmelt and precipitation on the temporal pattern of ice-DMSP release to the water column and on the timing, taxonomic composition, and DMSP content of phytoplankton under-ice blooms in the Arctic. The release of bottom ice algae and DMSP in the water column was gradual in 2010 and rapid (8 days) in 2011. Bottom brine drainage during the presnowmelt period in 2010 and a rapid loss of the snow cover in 2011 coinciding with rain events explain most of the difference between the 2 years. During both years, less than 13% of the DMSPd lost from the ice was detected in the water column, suggesting a rapid microbial consumption. An under-ice diatom bloom developed in both years. In 2010, the bloom was dominated by centric diatoms while in 2011 pennates dominated, likely reflecting seeding by ice algae following the faster snowmelt progression induced by rainfall events in 2011. Different rainfall conditions encountered during the two sampling years led to distinct patterns of snowmelt, ice-algal release, and under-ice bloom development these interannual variations influenced both the release pattern of the ice algae and its related DMSP in the water column and the subsequent development of the under-ice blooms The two sampling years exhibited different temporal patterns of ice algal and DMSP declines mostly related to snowmelt dynamics In 2010, the decline was gradual and ice algae were still present at the bottom of the ice by the end of the sampling period. In 2011, the decline of the ice algal biomass and its associated DMSPp was more abrupt (62% Chl a and 60% DMSPp lost in 8 days), closely following the increase in light transmittance resulting from the rapid, rain induced, snowmelt. These results suggest that the loss of biomass mostly resulted from the warming and melting of ice. these results suggest that the loss of bottom ice algae during spring is controlled by a combination of factors including ice warming, brine drainage, flushing, and bottom ice erosion caused by currents. Our results suggest that difference in the patterns of algal biomass loss from the ice between 2010 and 2011 mostly resulted from the difference in wet precipitation between the two years. Thus, in 2011, rainfalls caused a more rapid and almost complete termination of the ice algal bloom. These results suggest that the projected increase in rainfall during the spring period due to climate warming could favor the development of DMSP-rich under-ice blooms dominated by pennate diatoms. In 2011 the conditions led to the rapid development of an under-ice bloom dominated by pennate sympagic diatoms in contrast with the under-ice bloom dominated by centric pelagic diatoms in 2010. DMSP production was also higher in the 2011 pennate diatom bloom than in the 2010 centric bloom.	-

Annexe 5-27. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : les producteurs primaires (*on primary producers*), les mammifères et oiseaux marins (*on marines mammals and seabirds*). (Partie 1)

Reference	On primary producers	On marine mammals and seabirds
Grenfell et Putkonen, 2008 : A method for the detection of the severe rain-on-snow event on Banks Island, October 2003, using passive microwave remote sensing	-	-
Hansen et Aanes, 2012 : Kelp and seaweed feeding by High-Arctic wild reindeer under extreme winter conditions	-	-
Hansen et al., 2014 : Warmer and wetter winters: characteristics and implications of an extreme weather event in the High Arctic	The water freezes and releases latent heat to the snow and the frozen soil, and a coat of solid ground-ice can build up and cover the underlying vegetation (Woo and Heron 1981,Hansenet al 2010), which in Svalbard consists mainly of mosses, lichens, dwarf shrubs, forbs and graminoids (Jónsdóttir 2005) and rarely exceeds ~10 cm height.	-
Hezel et al., 2012 : Projected decline in spring snow depth on Arctic sea ice caused by progressively later autumn open ocean freeze-up this century	-	Based solely on a 20 cm April snow depth threshold, we estimate that the mean area of potential habitat for ringed seal reproduction north of 70N decreases by nearly 70% over the 21st century in RCP8.5 in the CMIP5 models. ... We note therefore that an increase in April and May rainfall as simulated in the CMIP5 models would further impact seal habitat, an impact not quantified here.
IPCC, 2019 : IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate	-	-
IPCC, 2021 : Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change	-	-
Kwok et al., 2003 : A study of the onset of melt over the Arctic Ocean in RADARSAT synthetic aperture radar data	-	-
Langlois et al., 2017 : Detection of rain-on-snow (ROS) events and ice layer formation using passive microwave radiometry: A context for Peary caribou habitat in the Canadian Arctic	-	-
Lannuzel et al., 2020 : The future of Arctic sea-ice biogeochemistry and ice-associated ecosystems	-	-
Liang et al., 2023 : The Role of Atmospheric Rivers in Antarctic Sea Ice Variations	-	-
Liston et al., 2020 : A Lagrangian Snow-Evolution System for Sea-Ice Applications (SnowModel-LG): Part I –Model Description	-	-
McCrystall et al., 2021 : New climate models reveal faster and larger increases in Arctic precipitation than previously projected	-	-
O'Sadnick et al., 2020 : Ice extent in sub-arctic fjords and coastal areas from 2001 to 2019 analyzed from MODIS imagery	-	-
Overland, 2022 : Arctic Climate Extremes	-	-
Pauling et Bitz, 2021 : Arctic Sea Ice Response to Flooding of the Snow Layer in Future Warming Scenarios	-	-
Saboranta, 2000 : Modeling the evolution of snow, snow ice and ice in the Baltic Sea	-	-
Schreiber et Serreze, 2020 : Impacts of synoptic-scale cyclones on Arctic sea-ice concentration: a systematic analysis	-	-

Annexe 5-28. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : les producteurs primaires (*on primary producers*), les mammifères et oiseaux marins (*on marine mammals and seabirds*). (Partie 2)

Reference	On primary producers	On marine mammals and seabirds
Serreze et al., 2021 : Arctic rain on snow events: bridging observations to understand environmental and livelihood impacts	Impacts have been documented on vegetation (e.g. stress due to ice encasement) (Bjerke et al 2015)	In marine environments, polar bears (<i>Ursus maritimus</i>) and ringed seals (<i>Phoca hispida</i>) are also impacted—rains early in the breeding season can melt subnivean lairs and increase cub mortality (Stirling and Smith 2003). Turning to the marine environment, Furgal et al (2002), in documenting details of seal hunting at Arctic Bay, Nunavut, note how unusual weather conditions such as ROS events can affect local ringed seal populations. A local hunter described how a February rain created a thick ice cover over seal breathing holes, leading to fewer seal harvests. In marine environments, polar bears (<i>Ursus maritimus</i>) and ringed seals (<i>Phoca hispida</i>) are also impacted—rains early in the breeding season can melt subnivean lairs and increase cub mortality (Stirling and Smith 2003).
Shang et al., 2023 : More frequent atmospheric rivers slow the seasonal recovery of Arctic sea ice	-	-
Stirling et Derocher, 1993 : Possible Impacts of Climatic Warming on Polar Bears	-	The increased precipitation expected to accompany climatic warming (Elkin, 1990) may have mixed consequences for ringed seals, which give birth to their young in late March or early April in subnivean birth lairs on the ice (Smith and Stirling, 1975). Alternatively, if there was more rain while seal pups were still in their lairs hidden from predators, the effects could be devastating to the seal population. For example, in mid-April 1979, an unseasonably heavy rain at the end of the Hall Peninsula on southeast Baffin Island caused the roofs of many subnivean birth lairs to collapse, exposed the young seal pups, and resulted in heavy predation by polar bears (I. Stirling and T.G. Smith, unpubl. observations). In such circumstances, predation of neonate ringed seals by arctic foxes (<i>Alopex lagopus</i>) can also be significant (Smith and Lydersen, 1991). Thus, it seems likely that if a warming climate significantly increased the frequency or amount of rain when seal pups were in their birth lairs, increased predation by both polar bears and arctic foxes could depress the seal population size enough to cause a significant decline in polar bear numbers Had there been maternity dens in any of these banks, it is likely the bears would have been crushed. Had there been maternity dens in any of these banks, it is likely the bears would have been crushed. - Rain during the late winter may cause polar bear maternity dens to collapse, causing the death of occupants. A serious potential consequence of warmer winters is the increased probability that rain in the late winter will cause maternity dens in the snow to collapse before females and cubs have departed. For example, in early March 1990 we experienced unseasonable rain while conducting surveys in the polar bear denning area south of Churchill, Manitoba, and observed large snow banks along creeks and rivers used for denning that had collapsed because of the weight of wet snow (I. Stirling and A.E. Derocher, unpubl. observations). A serious potential consequence of warmer winters is the increased probability that rain in the late winter will cause maternity dens in the snow to collapse before females and cubs have departed. For example, in early March 1990 we experienced unseasonable rain while conducting surveys in the polar bear denning area south of Churchill, Manitoba, and observed large snow banks along creeks and rivers used for denning that had collapsed because of the weight of wet snow (I. Stirling and A.E. Derocher, unpubl. observations).
Stroeve et al., 2022 : Rain on snow (ROS) understudied in sea ice remote sensing: a multi-sensor analysis of ROS during MOSAIC (Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate)	-	-
Theresa et al., 2004 : Climate Change and Sea Ice: Local Observations from the Canadian Western Arctic	-	-
Viceto et al., 2022 : Atmospheric rivers and associated precipitation patterns during the ALOUD and PASCAL campaigns near Svalbard (May–June 2017): case studies using observations, reanalyses, and a regional climate model	-	-
Vihma et al., 2016 : The atmospheric role in the Arctic water cycle: A review on processes, past and future changes, and their impacts	-	-
Walsh et al., 2020 : Extreme weather and climate events in northern areas: A review	-	-
Wang et al., 2019 : Comparison of ERA5 and ERA-Interim near-surface air temperature, snowfall and precipitation over Arctic sea ice: effects on sea ice thermodynamics and evolution	-	-
Webster et al., 2022 : Spatiotemporal evolution of melt ponds on Arctic sea ice	-	-
Zayvalov, 2020 : Influence of the Atmospheric Precipitation Phase Composition on Seasonal Evolution of Snow-Ice Cover in the Taganrog Bay Apex	-	-

Annexe 5-29. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : les producteurs primaires (*on primary producers*), les mammifères et oiseaux marins (*on marines mammals and seabirds*). (Partie 3)

Reference	On land biology	Biais on remote sensing
Bartsch et al., 2023 : Towards long-term records of rain-on-snow events across the Arctic from satellite data	ROS events captured on the Yamal and Seward peninsulas have had severe impacts on reindeer and caribou, respectively, due to ice crust formation. Rain-on-snow (ROS) events modify snow properties and can lead to the formation of ice crusts which impact wildlife (including musk ox, reindeer, fox, crows). ROS events in this region are rare but have a severe impact especially as they occur in the first part of the winter, which is an issue for reindeer, for example, in the region. From 2010-2017, caribou regularly migrated south on their autumn migration to the Seward Peninsula but not since. The distribution of caribou observed during the winter of 2021/2022 was different than 2010-2017. They stayed further northeast (including the Kobuk River plain) and did not disperse to the Seward Peninsula. The Seward Peninsula was among the most affected regions during the two Alaska events in December 2021. If, in January 2022, caribou migrated to where they were found in January 2010-2017, they would have experienced 40.5 % greater τ than the caribou actually experienced in January 2022.	-
Berger et al., 2018 : Climate Degradation and Extreme Icing Events Constrain Life in Cold-Adapted Mammals	thirteen years before (2002), a major winter rain-on-snow (ROS) event encased the ground in ice preventing the Arctic's largest land mammal from accessing food: an estimated 20,000 muskoxen (<i>Ovibus moschatus</i>) died. While not likely to be as catastrophic to wildlife as extreme ROS, smaller events may still lead to partial or complete ground icing ¹¹ and less access to food, with potentially negative effects on fitness. For example, warmer winter temperatures coupled with precipitation can have indirect negative effects on herbivores by increasing the probability of ROS ground-icing events which limit access to food resources ^{11,14} . Likewise winter precipitation falling as rain can reduce snowpack, thereby reducing the metabolic costs of foraging in deep snow ^{15,16} .	-
Birtanja et Andry, 2017 : Towards a rain-dominated Arctic	biology/ecosystems, since for instance winter rainfall and icing have been shown to inhibit reindeer food availability ¹⁰ , causing a dramatic population decline and associated strong fluctuations in the fragile Arctic ecosystem As an example, observations suggest that Arctic winter rainfall is already currently increasing, with refreezing and icing posing considerable problems for foraging reindeer, leading to starvation and major population declines ¹⁰ . These result in considerable fluctuations, and possibly even (irreversible) trends, in the vulnerable Arctic ecosystem ⁵ . precipitation falling as rain instead of snow strongly impacts Arctic ecosystems, with more frequent episodes of relatively mild weather, rainfall and icing (especially in winter) affecting faunal food availability ^{10,28}	-
Blunden et al., 2023 : State of the Climate in 2022	-	-
Boisvert et al., 2020 : Intercomparison of Precipitation Estimates over the Southern Ocean from Atmospheric Reanalyses	-	-
Descamps et al., 2017 : Climate change impacts on wildlife in a High Arctic archipelago – Svalbard, Norway	Winter rain creates ice that blocks access to food for herbivores and synchronizes the population dynamics of the herbivore-predator guild. Winter rain results in encapsulation of vegetation in ice, which blocks access to food resources for herbivores (Hansen et al., 2013). ROS events have synchronized the population dynamics of the Svalbard reindeer <i>Rangifer tarandus platyrhynchus</i> , the Svalbard rock ptarmigan <i>Lagopus muta hyperborea</i> , the sibley vole <i>Microtus levis</i> and with a time delay also their principal predator/scavenger, the Arctic fox <i>Vulpes lagopus</i> (Hansen et al., 2013, Stien et al., 2012). Changes in winter climate and the frequency of occurrence of ROS events has also affected Svalbard reindeer behaviour (i.e. habitat use and diet, Hansen et al., 2010, Stien et al., 2010) and population sex-ratios (Peeters, 2014). ROS events likely represent one of the most important facets of ongoing climate change for Arctic terrestrial ecosystems (Thompson et al., 2013)	-
Dou et al., 2019 : A key factor initiating surface ablation of Arctic sea ice: earlier and increasing liquid precipitation	-	-
Dou et al., 2021 : Trends and spatial variation in rain-on-snow events over the Arctic Ocean during the early melt season	-	-
Dou et al., 2022 : More Frequent, Intense, and Extensive Rainfall Events in a Strongly Warming Arctic	-	-
Ehn et al., 2006 : Surface albedo observations of Hudson Bay (Canada) landfast sea ice during the spring melt	-	for radiometers : Frost and water droplets were removed from the sensor domes before 0800 h every morning. For most weather conditions, the sensor domes remained clear from frost or water droplets during daytime, but during rain events it was not possible to keep domes clear and these data may be affected by the water droplets.
Ferguson, 2005 : CLIMATE CHANGE AND RINGED SEAL (PHOCA HISPIDA) RECRUITMENT IN WESTERN HUDSON BAY	-	-
Galindo et al., 2014 : Biological and physical processes influencing sea ice, under-ice algae, and dimethylsulfoniopropionate during spring in the Canadian Arctic Archipelago	-	-
Grenfell et Pulkonen, 2008 : A method for the detection of the severe rain-on-snow event on Banks Island, October 2003, using passive microwave remote sensing	Severe wintertime rain-on-snow (ROS) events create a strong ice layer (or layers) in the snow on arctic tundra that act as a barrier to ungulate grazing. They are linked with large-scale ungulate (reindeer, caribou, elk, and musk-ox) herd declines via starvation and reduced calf production rate when the animals are unable to penetrate the resulting subsnowpack ice layer. a particular ROS event that took place on Banks Island in early October 2003 that resulted in the death of 20,000 musk oxen It is well documented that severe winter rain-on-snow events (ROS) affect ungulate herds and permafrost temperatures in the arctic Such ROS-generated layers are linked with large-scale ungulate deaths and herd reductions via starvation and reduced calf production rate, as the animals are unable to penetrate the subsnowpack ice layer. The rainwater froze at the base of the preexisting snowpack and formed an ice layer that proved too thick for the native musk-oxen to penetrate and access their food sources at the soil surface, and approximately 20,000 of the animals perished over the winter. The severe ROS event resulted in a catastrophic die off of approximately 20,000 of the musk oxen. This is the largest known die-off of ungulates due to ROS	-

Annexe 5-30. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : la biologie terrestre (*on land biology*), les biais en télédétection (biais on remote sensing). (Partie 1)

Reference	On land biology	Biais on remote sensing
Hansen et Aanes, 2012 : Kelp and seaweed feeding by High-Arctic wild reindeer under extreme winter conditions	Here, we document how ice-locked pastures following substantial amounts of ROS forced coastal Svalbard reindeer (<i>Rangifer tarandus platyrhynchus</i>) to use marine habitat in late winter 2010. A thick coat of ground ice covered 98% of the lowland ranges, almost completely blocking access to terrestrial forage. Accordingly, a population census revealed that 13% of the total population (n = 26 of 206 individuals) and 21% of one sub-population were feeding on washed-up kelp and seaweed on the sea-ice foot. Calves were overrepresented among the individuals that applied this foraging strategy, which probably represents a last attempt to avoid starvation under particularly severe foraging conditions. The study adds to the impression that extreme weather events such as heavy ROS and associated icing can trigger large changes in the realized foraging niche of Arctic herbivores Ground-ice was present in 98% (n 56 of 57) of the snow profiles (median thickness 11 cm), and 89% of the profiles had 3 cm ground-ice. Under these severe foraging conditions, the population survey revealed that 13% of the total reindeer metapopulation was feeding on washed-up kelp on the sea-ice foot. The proportion of kelp feeders during this population "snapshot" was 0% on Brøggerhalvøya, 12% on Kalføyra and 21% on Sarsøya, which provided the best access to this food source. The present study has documented how parts of a coastal Svalbard reindeer meta-population used kelp as food during a winter with extremely poor foraging conditions due to heavy ROS and extensive ground-icing. o our knowledge, such use of non-terrestrial food has neither been demonstrated nor quantified previously in Svalbard reindeer. Although quantitative data on kelp feeding are not available from other years, we have only observed this foraging strategy during winters when the accessibility of terrestrial forage has been particularly limited due to icing (R. Aanes, pers. obs.). The nutritional value of kelp and seaweed for terrestrial herbivores is largely unknown, but ... high mineral contents may possibly also have a significant nutritional value. On the other hand, roughly one fourth of the kelp feeders in our study apparently had diarrhoea (R. Aanes, pers. obs.). This was observed only occasionally among animals utilizing terrestrial foraging sites and could, therefore, be associated with, e.g., high salt intake from marine algae. The overrepresentation of calves among the kelp feeders further indicates that kelp is not a high-quality food source, as this demographic group has the poorest ability to compete for (or dig their way down to) the few ice-free terrestrial feeding sites. Our results confirm that heavy ROS and icing can block access to winter forage and thereby generate important changes in the realized foraging niche of Arctic herbivores. The behavioural plasticity demonstrated in the rapidly warming Ny-Å lesund area may nonetheless serve as a bellwether of changes in range use and foraging niche expansion in Arctic herbivores facing an increase in extreme weather (such as heavy ROS) or climate change in general. Furthermore, the present study adds to the impression that warmer and wetter winters may reduce forage accessibility and have overall negative implications for herbivore populations across the Arctic.	-
Hansen et al., 2014 : Warmer and wetter winters: characteristics and implications of an extreme weather event in the High Arctic	The ground-ice not only affected inhabitants by closing roads and airports as well as reducing mobility and thereby tourism income, but it also led to high starvation-induced mortality in all monitored populations of the wild reindeer by blocking access to the winter food source. Several studies have suggested that icing following warm spells and heavy ROS events can seriously reduce the availability of food for herbivores (Ims et al 2008, Kausrud et al 2008, Gilg et al 2009, Hansen et al 2011, 2013, Sten et al 2012 High-latitude island populations of reindeer and caribou are especially vulnerable to heavy ROS events because natural barriers restricts migration to ice-free ranges, potentially resulting in mass starvation in late winter (Parker et al 1975, Forchhammer and Boertmann 1993, Kohler and Aanes 2004). For instance, a population of wild Svalbard reindeer (<i>Rangifer tarandus platyrhynchus</i>) in Ny-Ålesund crashed from 360 to ~80 individuals during the winter of 1993-94 (Kohler and Aanes 2004), when the amount of ROS and the ground-icing almost reached the extreme levels observed in 2011-12 In spite of very favourable winter feeding conditions until the extreme warm spell and ROS events, the number of carcasses found during the summer 2012 censuses was among the highest ever recorded, and the estimated mortality indices for winter 2012 were hence generally very high. Thus, even though the 2012 extreme ROS events occurred relatively late in the winter, the resulting ice layer and 'locked pastures' caused extensive starvation among the reindeer. Furthermore, because top predators such as the Arctic fox (<i>Vulpes lagopus</i>) are influenced through changes in prey or reindeer carcass availability (Ede et al 2012, Hansen et al 2013), it is likely that the effects of such rare weather events indirectly impact migratory prey (i.e. ground-breeding birds) in summer (Fuglei et al 2003) and thereby cause trophic cascades through the entire tundra food-web.	-
Hezel et al., 2012 : Projected decline in spring snow depth on Arctic sea ice caused by progressively later autumn open ocean freeze-up this century	-	-
IPCC, 2019 : IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate	Ice formation from rain-on-snow events is associated with population changes including cases of catastrophic mass starvation (Bartsch et al., 2010; Forbes et al., 2016)	-
IPCC, 2021 : Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change	Rain-on-snow events can create a solid barrier that hinders wildlife and livestock grazing that is important to indigenous communities (Forbes et al., 2016) Increases in winter rainfall have led to more frequent development of difficult wildlife and livestock grazing conditions as basal ice conditions coat the ground below snowpack (Peeters et al., 2019)	-
Kwok et al., 2003 : A study of the onset of melt over the Arctic Ocean in RADARSAT synthetic aperture radar data	-	"Possibly, the melt signal could be delayed because of different effect of snow wetness on surface emissivity at the passive microwave wavelengths. These factors could cause variability in signatures that could confound the detection procedures."
Langjols et al., 2017 : Detection of rain-on-snow (ROS) events and ice layer formation using passive microwave radiometry: A context for Peary caribou habitat in the Canadian Arctic	The comparison with the Peary caribou population estimates suggest that caribou numbers decrease with increased occurrence of ROS and icing events, where 3-4 ROS events and 12 icing events in one winter season are sufficient to have a negative impact on Peary caribou. (The major hypothesis for the decline is that severe weather events lead to more difficult winter grazing conditions.) Winters with more than three ROS events are associated with lower summer caribou numbers, whereas winters with rare-to-no ROS events are associated with higher caribou numbers. ROS events can be punctual in nature, both in time and space, but we expected the decrease in caribou numbers to be more pronounced following numerous ROS events. We compared the same caribou numbers with the presence of ice layers detected using the threshold on ΔPR. The results are consistent with the hypothesis that ice hinders grazing conditions for Peary caribou, suggesting that Peary caribou numbers are lower when 1 to 2 winter events are detected. Despite the potential limitations, the results presented in Fig. 7, do suggest a negative impact of ROS and IDI occurrence on Peary caribou populations, where higher Peary caribou estimates are associated with lower occurrences of ROS and IDI. Moreover, there is much less variability (b1000) in the low Peary caribou estimates corresponding to years where IDI events are detected. This makes sense given the fact that not all ROS events will lead to an ice layer of sufficient thickness to have a negative impact on grazing conditions.	-
Lannuzel et al., 2020 : The future of Arctic sea-ice biogeochemistry and ice-associated ecosystems	-	-
Liang et al., 2023 : The Role of Atmospheric Rivers in Antarctic Sea Ice Variations	-	-
Liston et al., 2020 : A Lagrangian Snow-Evolution System for Sea-Ice Applications (SnowModel-LG): Part I – Model Description	-	-
McCrystall et al., 2021 : New climate models reveal faster and larger increases in Arctic precipitation than previously projected	The transition to more rainfall will also impact the frequency of rain-on-snow (ROS) events, which can be devastating to wild caribou, reindeer and muskoxen populations18,21,43 Not all impacts will be negative, however. For example, the population of migratory birds has significantly increased due to a warmer and wetter Arctic45	-

Annexe 5-31. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : la biologie terrestre (*on land biology*), les biais en télédétection (biais on remote sensing). (Partie 2)

Reference	On land biology	Biais on remote sensing
O'Sadnick et al., 2020 : Ice extent in sub-arctic fjords and coastal areas from 2001 to 2019 analyzed from MODIS imagery	-	-
Overland, 2022 : Arctic Climate Extremes	-	-
Pauling et Bliz, 2021 : Arctic Sea Ice Response to Flooding of the Snow Layer in Future Warming Scenarios	-	-
Saloranta, 2000 : Modeling the evolution of snow, snow ice and ice in the Baltic Sea	-	-
Schreiber et Serreze, 2020.: Impacts of synoptic-scale cyclones on Arctic sea-ice concentration: a systematic analysis	-	As noted, SIC estimates in summer from passive microwave retrievals can be influenced by surface melt, which also affects the calculated 4 d SIC changes. Weather effects (i.e., water vapor, cloud liquid water, wind speed) can also influence the retrievals (Masiarik, 1992; Emery and others, 1997; Andersen and others, 2006), particularly as cyclone winds advect water vapor into a region and promote cloud formation.
Serreze et al., 2021 : Arctic rain on snow events: bridging observations to understand environmental and livelihood impacts	On land, ROS events influence... and bird species that seek shelter in the snowpack, including owls, ptarmigan, and grouse (Mysterud 2016) [Notably, icing can foster fading of lemming cycles, causing crashes of Arctic predators such as snowy owls and Arctic fox, which depend on them (Sokolov et al 2016).] Perhaps the most devastating impact of ROS events, however, is that ice layers, in creating barriers that prohibit foraging [ROS and other icing events are historically known to cause strong declines in reindeer populations in Fennoscandia (Riseth et al 2016, Eira et al 2018). Ice barriers, especially in early winter, can force animals to expand their grazing range, depleting body fat and protein reserves as they travel in search of soft snow. Starvation can occur quickly or drag on for many months and even longer (Bartsch et al 2010, Forbes et al 2016). Spring weight, calf production, calf size, and adult survivability are all lower when reindeer are unable to satisfy their energy needs. Cumulative energy loss can lead to late winter/early spring abortion of calves and low calf survival rates in late spring and early summer (Tveraa et al 2003, Helle and Kojala 2008). On the Seward Peninsula, weather related stressors, including ROS events, can be one of multiple drivers leading caribou to expand their range onto the peninsula, causing competition with other reindeer for food, often resulting in reindeer being pulled away from their herd (Project Jukebox 2001).] November 2013 : Ice covered an area of approximately 27 000 km ² and completely blocked reindeer from foraging, leading to the death of 61 000 animals between November 2013 and June 2014 (Forbes et al 2016).] Svalbard, January 2012 : Temperatures then dropped, and Spitsbergen became covered in 10–20 cm of ice (Hansen et al 2014), covering the low growing tundra vegetation and blocking reindeer from grazing. Despite favorable feeding conditions prior to the ROS event, there was a large starvation induced mortality episode. The number of reindeer carcasses counted in the summer 2012 census was among the highest ever recorded (Hansen et al 2014).] Canada, October 2003 : According to reports from hunters in the area at the time, following intermittent rains and falling temperatures, the former 6 inches of new snow was turned into a thick sheet of ice on the northern two thirds of the island (Rennert et al 2009). The surface icing had severe impacts on Banks Island's ungulate populations, especially musk oxen; approximately 20 000 animals died. In addition to the physical barrier created by ice, water that had percolated through the snowpack and pooled at the ground surface caused vegetation to spoil. This forced musk oxen to expand their grazing range. After the event, in mid- to late-winter, some animals wandered onto the sea ice in search of food and were left stranded at sea (Rennert et al 2009).] Rennert et al (2009) conclude that the severe impacts of the event can be traced to it having occurred early in the cold season so that food sources were blocked for the entire winter... Rennert et al (2009) also argues that, as has been observed for reindeer, the lack of new calves coupled with the decline of overall herd health can remove multiple generations of calves from a herd, leading to a population crash years after the ROS event. For this particular event, there were few calves born in summer 2004 with another population decline expected 4–5 years later as the adults aged without replacement (Rennert et al 2009) Rasmus et al (2018) focused on the formation of basal ice layers on the pastures. They found that rain and subsequent freezing of the liquid precipitation in the basal layer of the snow cover (or in the whole of a thin snow cover) was reported in 27% of cases. Icing was also found to be regularly attended by mold formation on pastures during early winter, which can have severe negative effects on the condition of reindeer (Kumpulä et al 2000)	Despite advances in our understanding of ROS events and their impacts, many gaps in knowledge still exist. These include uncertainties in detecting liquid water on the snowpack from satellite data, detection of ROS events and precipitation amount from atmospheric reanalyses, and the general sparseness of direct surface observations.
Shang et al., 2023 : More frequent atmospheric rivers slow the seasonal recovery of Arctic sea ice	-	-
Stirling et Derocher, 1993 : Possible Impacts of Climatic Warming on Polar Bears	-	-

Annexe 5-32. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : la biologie terrestre (*on land biology*), les biais en télédétection (biais on remote sensing). (Partie 3)

Reference	On land biology	Biais on remote sensing
Stroeve et al., 2022 : Rain on snow (ROS) understudied in sea ice remote sensing: a multi-sensor analysis of ROS during MOSAIC (Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate)	-	By altering radar backscatter and microwave emissivity, ROS over sea ice can influence the accuracy of sea ice variables retrieved from satellite radar altimetry, scatterometers, and passive microwave radiometers. - winter ROS events over sea ice can generate ice layers at the surface or within the snowpack that could modify emitted and backscattered radar energy used to retrieve various sea ice geophysical variables, such as sea ice concentration, ice thickness, snow depth, and the timing of melt onset and freeze-up Given that currently all CryoSat-2 radar-altimetry-derived sea ice thickness data products assume the dominant scattering surface is the snow-ice interface, the presence of liquid water, changes to snow structure, and/or ice layers resulting from a cold-season ROS event could bias thickness retrievals. During the first ROS event, radar backscatter declines at both frequencies and all polarizations as a result of increasing signal attenuation by liquid water, due to greater dielectric loss (Ulaby and Stiles, 1980). The decline is larger at Ka-band due to stronger sensitivity of higher frequencies to snow surface changes. Soon after the onset of melt and the second ROS event, the snowpack transitions to a lenticular regime (i.e., liquid water occupies continuous pathways through the snow pore spaces). This results in downward percolation of liquid water via gravity drainage (Colbeck, 1982a; Denoth, 1999), resulting in a completely saturated snowpack. This likely leads to the large backscatter decline during the melt onset and the second rain event. ROS can alter waveform shape, with impacts on discrimination of sea ice from leads and the potential to alter the retrieved surface elevation over sea ice and hence thickness retrievals from CryoSat-2/AltKa. Permanent changes observed in microwave emissivity have the potential to impact retrieved ice concentrations and snow depths. Since Fram Strait to the North Pole is often visited by temporary winter warming events (e.g., Graham et al., 2017), we may expect that this region of the Arctic is already more vulnerable to potential biases in satellite-retrieved sea ice variables as a result of ice layers from warmer air temperatures and/or rain-on-snow events. Coupled with shallower snowpacks atop the ice cover, due to later ice formation (Stroeve et al., 2020) and the fact that snowpacks atop first-year ice have a non-negligible brine content that also affects microwave emission and backscatter (e.g., Nandan et al., 2017), thickness and snow depth retrievals will become more challenging in the coming decades, raising the importance of improving our process-level understanding and obtaining ground truth such as that collected during MOSAIC.
Theresa et al., 2004 : Climate Change and Sea Ice: Local Observations from the Canadian Western Arctic	-	-
Viceto et al., 2022 : Atmospheric rivers and associated precipitation patterns during the ACLOUD and PASCAL campaigns near Svalbard (May–June 2017): case studies using observations, reanalyses, and a regional climate model	-	-
Vihma et al., 2016 : The atmospheric role in the Arctic water cycle: A review on processes, past and future changes, and their impacts	-	-
Walsh et al., 2020 : Extreme weather and climate events in northern areas: A review	A type of extreme event with major impacts in northern areas is freezing rain, often referred to as rain-on-snow events. Because ice layers can persist for weeks or even months in the Arctic, freezing rain is a major hazard to surface transportation and to foraging wildlife (Hansen et al., 2011) Rain-on-snow events that cause ice layer formation, winter warm spells, and extreme snowfall may lead to winter food shortages for arctic herbivores (Loe et al., 2016; Hansen et al., 2011) or arriving spring migratory birds in years when extreme snow cover extends late in the season (Krause et al., 2016). Notable examples of impacts of a rain-on-snow event include the massive reindeer mortality events of 2006 and 2013 on Russia's Yamal Peninsula (Forbes et al., 2016). Food shortages result in reduced overall body mass and condition, leading to higher mortality rates in less mobile species, such as musk oxen (Reynolds, 1998; Schmidt et al., 2016). These negative impacts on arctic herbivores and their forage availability may then influence the population dynamics of predators or secondary consumers, such as the arctic fox (Hansen et al., 2013). However, counterintuitively, negative effects on herbivores may also be buffered in highly mobile species that are able to locate better forage conditions, such as caribou, resulting in lower mortality rates and higher fecundity (Loe et al., 2016). Furthermore, recent work suggests that as some extreme events become more common, such as rain-on-snow events, herbivore populations may trend towards more resilient age classes, reducing population crashes during future rain-on-snow events (Hansen et al., 2019).	-
Wang et al., 2019 : Comparison of ERA5 and ERA-Interim near-surface air temperature, snowfall and precipitation over Arctic sea ice: effects on sea ice thermodynamics and evolution	-	-
Webster et al., 2022 : Spatiotemporal evolution of melt ponds on Arctic sea ice	-	-
Zayvalov, 2020 : Influence of the Atmospheric Precipitation Phase Composition on Seasonal Evolution of Snow-Ice Cover in the Taganrog Bay Apex	-	-

Annexe 5-33. Tableau intégral de données extraites des études incluses dans la revue de la portée. Informations sur : la biologie terrestre (*on land biology*), les biais en télédétection (biais on remote sensing). (Partie 4)

Référence	Localité	Temporalité	Secteurs	Tendance	
(Descamps et al., 2017)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique	Augmentation continue jusqu'en 2100.	
(Wang et al., 2019)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique	Augmentation annuelle la plus forte (de 40 à 100 mm) (dans ERA5).	
(Walsh et al., 2020)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Siberian Shelf, Mer de Beaufort, Archipel Canadien	Augmentation de l'intensité quotidienne, du nombre de jours de fortes précipitations sur l'année, des précipitations maximales sur 5 jours et le nombre de jours de fortes précipitations. Ainsi qu'une augmentation de 20 à 30% des quantités de précipitations maximales sur 5 jours au cours d'une année, d'ici 2081 à 2100 (modèles CMIP5 dans le cadre du scénario RCP 8.5). Périodes de retour plus courtes pour les événements de fortes précipitations.	
			Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentations aussi prévues pour le niveau de retour sur 20 ans des précipitations quotidiennes dans les hautes latitudes septentrionales (surtout en hiver).	
			Secteur Atlantique, Siberian shelf	Augmentation du nombre de jours.	
			Archipel Canadien, Mer de Beaufort	Diminution du nombre de jours de fortes précipitations.	
		Hiver	Secteur Atlantique, Siberian Shelf	Augmentations mensuelles et saisonnières les plus fortes jusqu'en 2100 (modèles CMIP5).	
		Été	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation du niveau de retour sur 50 ans des précipitations quotidiennes.	
(Stirling et Derocher, 1993)	Océan Arctique	Annuelle	Archipel Canadien	Augmentation attendue.	
(Hezel et al., 2012)	Océan Arctique	Hiver	Arctique Central	Augmentation tout au long du siècle.	
(Viñna et al., 2016)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation générale des précipitations moyennes annuelles au cours des dernières décennies (mais avec de grandes différences spatiales et temporelles). Augmentation d'environ 5% des précipitations annuelles par rapport à la moyenne des années 1950. Augmentation de l'intensité des précipitations. Augmentation des extrêmes de précipitations en fréquence et/ou en intensité. Augmentation probable du niveau de retour sur 20 ans des extrêmes annuels de précipitations quotidiennes. Augmentation probable des précipitations totales des jours humides, des précipitations très humides, des précipitations maximales sur 5 jours et des jours de fortes précipitations. Augmentations de 20 à 30 % des précipitations maximales sur 5 jours sont prévues (augmentations moins prononcées en été qu'en hiver).	
			Autonne + hiver	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Diminution du nombre de jours secs consécutifs.
			Printemps + été	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation probable de la moyenne de précipitation de 35 % et 60 % (selon des trajectoires de concentration représentatives de gaz à effet de serre moyennes et élevées, respectivement (RCP4.5 et 8.5)), par rapport à la période 1986-2005.
			Hiver	Secteur Atlantique, Siberian shelf	Augmentation probable de la moyenne de précipitation de 15 % et 30 % (selon des trajectoires de concentration représentatives de gaz à effet de serre moyennes et élevées, respectivement (RCP4.5 et 8.5)), par rapport à la période 1986-2005.
			Été	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Arctique Central	Augmentation probable du niveau de retour tous les 50 ans de précipitation quotidienne.
(Bintanja et Andry, 2017)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Arctique Central	Augmentation des taux de précipitations d'ici la fin du XXIe siècle (2091-2100) jusqu'à 50 - 60%. Augmentation de 40% des précipitations totales.	
(Dou et al., 2019)	Océan Arctique	Hiver + printemps	Siberian shelf	Augmentation (ces dernières décennies).	
(Blunden et al., 2023)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation du nombre de jours avec précipitations (effet dynamique) ou augmentation de l'intensité moyenne des précipitations (effet thermodynamique) ; explique les tendances des quantités extrêmes de précipitations quotidiennes. Augmentation des précipitations et augmentation des précipitations abondantes plus fréquentes. Augmentation d'environ 10 % des précipitations annuelles totales (avec des augmentations plus importantes en hiver qu'en été). Les précipitations arctiques en 2022 ont été caractérisées par des conditions plus humides que la normale dans de nombreuses régions, avec des précipitations record à divers endroits. Les précipitations panarctiques (au nord de 60°N) étaient dans l'ensemble les troisièmes plus élevées depuis 1950 (derrière seulement 2020 et 2017). L'hiver (janvier-mars), l'été (juillet-septembre) et l'automne (octobre-décembre) figuraient tous parmi les 10 plus humides pour leurs saisons respectives.	
			Secteur Atlantique, Mer de Beaufort	Augmentation moyenne des précipitations (à chaque saison) depuis 1950.	
			Hiver	Mer de Beaufort	Augmentation de l'intensité des précipitations.
			Automne	Mer de Béring	Saisonnièrement sec mais le mois de décembre a été anormalement humide (centre-sud de l'Alaska).
(Serreze et al. 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Anormalement humide en automne (sud-est de l'enclave de l'Alaska).	
(Serreze et al. 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation probable de 30 à 60 % des précipitations totales.	
(Pauling et Bitz, 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation de la quantité totale de précipitations tout au long du 21e siècle (avec les plus fortes augmentations en automne et en hiver : septembre - janvier).	
(Dou et al., 2022)	Océan Arctique	Autonne + hiver + printemps	Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation du nombre de jours avec précipitations totales la plus forte.	
		Printemps	Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Le nombre de jours avec des précipitations totales le plus petit.	
		Été	Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Le nombre de jours avec précipitations totales est le plus élevé en août ; mais, à partir du milieu de ce siècle, septembre sera le mois où les précipitations seront les plus fréquentes.	
(McCrystall et al., 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation des précipitations totales (surtout en automne).	

Annexe 6. Tableau résumant et synthétisant les données extraites des études incluses dans la revue de la portée concernant les tendances sur les précipitations générales, selon la localité, temporalité et secteurs. Le code couleur des tendances signifie : rouge = diminution ou impact négatif ; vert = augmentation ou impact positif. (Partie 1)

Référence	Localité	Temporalité	Secteurs	Tendance	
(Hezel et al., 2012)	Océan Arctique	Hiver + printemps	Arctique Central	Augmentation moyenne multimodale des précipitations totales est de 69 +/- 21 %.	
(IPCC, 2019)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation des précipitations au cours des dernières décennies d'après les nouvelles analyses atmosphériques. Augmentations des précipitations extrêmes prévues sur les bassins hydrographiques du Nord. Augmentation probable des précipitations au cours du 21ème siècle selon les projections CMIP6, presque partout dans l'Arctique. Avec la plus forte augmentation simulée dans les régions des mers de Barents, de Kara, de Sibérie orientale, et nord-est du Groenland. Une incertitude prononcée dans la projection existe pour l'Atlantique Nord et le sud du Groenland car le signal de précipitations n'est pas significatif même à la fin du 21e siècle et dans le cadre de scénarios d'émissions élevées.	
(IPCC, 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation des précipitations moyennes annuelles avec les plus fortes hausses observées pendant la saison froide (octobre-mai), avec notamment une augmentation de 1,5 à 2% par décennie. Augmentation attendue des précipitations moyennes annuelles atteignant 49 ± 19 % sur la période 2081-2100 (par rapport à une base de référence 1995-2014) dans le scénario le plus fort. Les changements ne seront certainement pas uniformes, avec les hautes latitudes notamment touchées.	
			Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Diminution générale de l'aridité, des jours secs, dans l'Arctique.	
			Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation de l'intensité des précipitations.	
			Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation attendue des précipitations moyennes pour l'Arctique dans un climat qui se réchauffe mais avec des taux différents pour les différents scénarios et saisons. Des précipitations moyennes. L'augmentation projetée la plus forte des précipitations est à la fin de l'automne et en hiver.	
			Siberian Shelf	Augmentation de l'intensité des précipitations pour la Siberian Shelf en toutes saisons (plus forte en hiver et au printemps, plus faible en été).	
	Océan Austral	Annuelle	Siberian Shelf	Diminution de la fréquence des précipitations pour la Siberian Shelf.	
			Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation probable de la variabilité interannuelle des précipitations arctiques (jusqu'à 40% au cours du 21e siècle) en particulier en été.	
			Péninsule Antarctique Ouest, Mers d'Amundsen et de Bellingshausen, Mer de Ross, Mer de Weddell, Antarctique Est	Augmentation probable des précipitations au cours du 21ème siècle, avec des augmentations en pourcentage projetées bien supérieures à celles de la plupart des régions subpolaires du monde.	
			Péninsule Antarctique Ouest, Mers d'Amundsen et de Bellingshausen, Mer de Ross, Mer de Weddell, Antarctique Est	Augmentation significative attendue des précipitations d'ici la fin de ce siècle dans tous les scénarios d'émissions utilisés dans CMIP5 et CMIP6.	
			Péninsule Antarctique Ouest, Mers d'Amundsen et de Bellingshausen, Mer de Ross, Mer de Weddell, Antarctique Est	Augmentations projetées selon les scénarios moyennements et plus forts (SSP2-4.5 et SSP5-8.5) de 5% pour 2021-2040, 7 à 10% pour 2041-2060, 12 à 25% pour 2081-2100. La plus forte augmentation relative des précipitation est prévue au niveau régional (selon tous les scénarios), sur la côte de l'Antarctique Ouest et la Péninsule Antarctique occidentale.	
(Boisvert et al., 2020)	Océan Austral	Annuelle	Mer de Ross, Mer de Weddell,	Moins de précipitations dans le sud des mers de Ross et de Weddell.	
			Mers d'Amundsen et de Bellingshausen	Pic en avril, puis diminution des précipitations jusqu'à un montant presque constant en juin-octobre avant de finalement diminuer à nouveau.	
			Antarctique Est	Précipitations les plus élevées au large des côtes de l'Antarctique oriental, dans les régions de l'océan Indien et du Pacifique.	
			Péninsule Antarctique Ouest, Mer de Weddell, Mers d'Amundsen et de Bellingshausen, Antarctique Est	D'avantage de précipitations à l'ouest de la péninsule Antarctique et moins de précipitations du côté est. Cela est probablement dû à des tempêtes plus persistantes et à des conditions météorologiques se déplaçant généralement vers l'est depuis les mers de Bellingshausen/Amundsen vers la mer de Weddell.	
			Mers d'Amundsen et de Bellingshausen, Mer de Ross, Mer de Weddell, Antarctique Est	Augmentation des précipitations généralement vers le nord (basse latitudes) à partir du continent Antarctique. La seule zone où cela ne se produit pas se trouve au large des côtes de Terre Adélie et de Wilkes Land, dans le secteur de l'océan Pacifique Sud, où aucun gradient latitudinal clair n'apparaît.	
		Autonne + hiver	Antarctique Est	Minimum de précipitations de l'océan Indien (Pacifique) en décembre (novembre). Diminution des précipitations dans les Océans Pacifique et Indien entre octobre et décembre.	
			Printemps	Mer de Weddell	Précipitations les plus faibles en novembre (à l'instar de l'océan Austral).
					Précipitations les plus élevées en mars.
				Antarctique Est	Pic de précipitations de l'océan Indien (Pacifique) en mai (en mars).
			Autonne		

Annexe 6. Tableau résumant et synthétisant les données extraites des études incluses dans la revue de la portée concernant les tendances sur les précipitations générales, selon la localité, temporalité et secteurs. Le code couleur des tendances signifie : rouge = diminution ou impact négatif ; vert = augmentation ou impact positif. (Partie 2)

Référence	Localité	Temporalité	Secteurs	Tendance
(Pauling et Blitz, 2021)	Océan Arctique	Été + automne	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Diminution de la quantité de précipitations tombant sous forme de neige.
(Wang et al., 2019)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation du rapport SnowFall/TotalPrecipitation dans l'ERA5 : plus significatif en automne (- 0.2) et en été (- 0.3-0.4), et relativement faible en hiver (- 0.1) et au printemps (- 0.1-0.2). Donc davantage de précipitations tombent sous forme de neige dans l'ERA5 (en automne mais aussi en été).
(Walsh et al., 2020)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf	Augmentation des chutes de neige (de 100 à 200 mm) dans ERA5. Augmentation des chutes de neige prévue. Diminution des chutes de neige annuelles moyennes.
		Hiver	Mer de Beaufort	Augmentation probable de la fréquence des chutes de neige extrêmes pour les climats les plus froids. Diminution de la fréquence des chutes de neige extrêmes pour les climats plus chauds (car les températures inférieures à zéro seront moins fréquentes).
(McCrystall et al., 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf	Augmentation probable des événements de fortes chutes de neige (nord du Canada) durant la saison froide raccourcie.
		Hiver + printemps	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf, Arctique Central	Domination des chutes de neige dans les mers de Beaufort, des Tchouktsches, de Béring, du Laptev et de Sibérie orientale dans un monde réchauffé à 1.5 °C et 2 °C.
		Été + automne	Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf, Arctique Central	Diminution des chutes de neige sur la majeure partie de l'Arctique en hiver et au printemps (avec un réchauffement climatique de 3 °C), tout au long du siècle, malgré de fortes réductions du rapport chutes de neige/précipitations dans la plupart des régions de l'Arctique.
		Hiver	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf, Arctique Central	Diminution des chutes de neige d'ici la fin de ce siècle. Il y a une plus grande réduction des chutes de neige en été (16 %) et en automne (38 %) à la fin du siècle dans CMIP6 par rapport à CMIP5, ce qui est cohérent avec une saison d'enneigement plus courte que celle simulée précédemment.
		Printemps	Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation des chutes de neige qui restent le type de précipitation dominant à la fin du siècle dans la majeure partie de l'Arctique. Ces augmentations de chutes de neige sont encore plus importantes dans le CMIP6, notamment en Sibérie et dans l'archipel arctique canadien.
(Hezel et al., 2012)	Océan Arctique	Automne + hiver + printemps	Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf, Arctique Central	Peu de variation au printemps des chutes de neige tout au long du siècle.
		Hiver + printemps	Arctique Central	Les chutes de neige cumulées de septembre à avril ne changent cependant pas.
		Automne + hiver	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation du taux de chute de neige moyen multimodèle de 1981-2000 à 2081-2100, pour les mois de novembre à mars, avec une augmentation moyenne de 27 +/- 16 %, et une fourchette de 5% à 51%.
		Été + automne	Arctique Central	Pic plus élevé des taux moyens de chutes de neige multimodèles au nord de 70°N en hiver à la fin du 21ème siècle par rapport à la fin du 20ème siècle. De plus, le moment du pic de chutes de neige se déplace d'octobre à décembre, car une plus grande partie des précipitations tombe sous forme de pluie pendant les mois d'automne.
		Hiver	Arctique Central	Diminution des chutes de neige en été et en automne.
		Été	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation des chutes de neige en hiver.
(Vihma et al., 2016)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf	Pic plus faible des taux moyens de chutes de neige multimodèles au nord de 70°N en été à la fin du 21ème siècle par rapport à la fin du 20ème siècle.
(Bintanja et Andry, 2017)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Arctique Central, Archipel Canadien, Siberian Shelf, Mer de Beaufort	Augmentation des chutes de neige aux hautes latitudes (par exemple, le nord de la Sibérie) et à haute altitude (par exemple, le centre du Groenland), où les températures de l'air restent suffisamment froides, surtout en hiver.
		Été	@	Diminution prévue des chutes de neige estivales (40 % entre 1989 et 2009), principalement en raison du changement de phase avec un passage des chutes de neige à la pluie.
		Été + automne	Secteur Atlantique, Arctique Central	Diminution de la fraction de chute de neige vers la fin du 21e siècle (2091-2100). Avec des taux de précipitations dans l'Arctique augmentant de 50 à 60 %, la fraction de chute de neige simulée diminue considérablement, seul le Groenland continuant à connaître des fractions de chute de neige supérieures à 80 %. Dans le centre de l'Arctique, la fraction des chutes de neige reste à peine supérieure à 50 %. Les réductions les plus spectaculaires de la fraction des chutes de neige se produiront sur l'Atlantique Nord et en particulier sur la mer de Barents. Diminution des chutes de neige d'après les modèles simulant un réchauffement relativement fort, principalement à l'automne.
		Hiver	Secteur Atlantique, Arctique Central	Majoritairement de la neige entre 2006-2015, dans le centre glacial de l'Arctique et dans les étendues de haute altitude du Groenland, 70 à 100 % des précipitations annuelles tombant sous forme de neige. La fraction annuelle des chutes de neige, définie comme le rapport entre les chutes de neige et les précipitations totales, tombe à 40 % dans les régions périphériques les plus douces de l'Arctique.
(Dou et al., 2021)	Océan Arctique	Printemps + été	Secteur Atlantique	Diminution des chutes de neige dans l'Arctique plus prononcée en été et en automne.
(Schreiber et Serreze, 2020)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Arctique Central	Augmentation des chutes de neige à la fin du siècle lors des hivers arctiques car les saisons devraient encore être encore suffisamment froides.
				Diminution des précipitations solides au Svalbard à un rythme de 2,3 à 6,5 % par décennie au cours des dernières décennies.
				Neige principalement en automne, hiver, et au printemps tel que représenté dans ERA-Interim. Mais également fréquentes encore en été, en particulier dans les latitudes plus élevées de l'océan Arctique.

Annexe 7. Tableau résumant et synthétisant les données extraites des études incluses dans la revue de la portée concernant les tendances sur les chutes de neige, selon la localité, temporalité et secteurs. Le code couleur des tendances signifie : rouge = diminution ou impact négatif ; vert = augmentation ou impact positif. (Partie 1)

Référence	Localité	Temporalité	Secteurs	Tendance
(Bintanja et Andry, 2017)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Arctique Central, Archipel Canadien, Siberian Shelf, Mer de Beaufort	Diminution de la fraction de chute de neige vers la fin du 21e siècle (2091-2100). Avec des taux de précipitations dans l'Arctique augmentant de 50 à 80 %, la fraction de chute de neige simulée diminue considérablement, seul le Groenland continuant à connaître des fractions de chute de neige supérieures à 80 %. Dans le centre de l'Arctique, la fraction des chutes de neige reste à peine supérieure à 50 %. Les réductions les plus spectaculaires de la fraction des chutes de neige se produiront sur l'Atlantique Nord et en particulier sur la mer de Barents. Diminution des chutes de neige d'après les modèles simulant un réchauffement relativement fort, principalement à l'automne.
		Été + automne	Secteur Atlantique, Arctique Central	Diminution des chutes de neige dans l'Arctique plus prononcée en été et en automne.
		Hiver	Secteur Atlantique, Arctique Central	Augmentation des chutes de neige à la fin du siècle lors des hivers arctiques car les saisons devraient encore être encore suffisamment froides.
(Dou et al., 2021)	Océan Arctique	Printemps + été	Secteur Atlantique	Diminution des précipitations solides au Svalbard à un rythme de 2,3 à 6,5 % par décennie au cours des dernières décennies.
(Schreiber et Serreze, 2020)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Archipel Central	Neige principalement en automne, hiver, et au printemps tel que représenté dans ERA-Interim. Mais également fréquentes encore en été, en particulier dans les latitudes plus élevées de l'océan Arctique.
(IPCC, 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf, Arctique Central	Diminution de la fréquence des fortes chutes de neige au cours des dernières décennies.
			Secteur Atlantique	Diminution des chutes de neige dans les régions du nord et sud de la Scandinavie.
			Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf, Arctique Central	Diminution selon les modèles CMIP5 des chutes de neige annuelles dans l'Arctique. Dans le centre, la fraction des chutes de neige reste à peine supérieure à 50 %, seul le Groenland a encore des fractions de chutes de neige supérieures à 80%. Les diminutions les plus fortes de la fraction des chutes de neige devrait se poursuivre dans l'Atlantique Nord (dans la mer de Barents surtout).
			Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf, Arctique Central	Peu de preuves de changements dans les fortes chutes de neige en raison des influences concurrentes d'une saisonnalité des chutes de neige plus courte, et de précipitations plus intenses (et importantes dans l'ensemble).
			Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf, Arctique Central	Chutes de neige totales les plus importantes (en raison de l'augmentation des précipitations) dans certaines régions les plus froides.
	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf, Arctique Central	Domination des précipitations sous forme de neige (malgré une grande incertitude sur cette estimation) à environ 40%, selon une moyenne de cinq réanalyses entre 2000-2010.		
	Océan Austral	Annuelle	Péninsule Antarctique Ouest, Mers d'Amundsen et de Bellingshausen, Mer de Ross, Mer de Weddell, Antarctique Est	Contribution dominante des événements de chutes de neige extrêmes aux précipitations annuelles totales le long des régions côtières (avec la plus forte augmentation sur la côte de l'Antarctique Ouest et la Péninsule Antarctique Ouest).
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation des chutes de neige dans tous les scénarios d'émissions, à l'exception de la partie nord et centrale de la Péninsule Antarctique Ouest.
			Péninsule Antarctique Ouest	Diminution des chutes de neige dans tous les scénarios d'émissions dans la partie nord et centrale de la Péninsule Antarctique Ouest.
(Boisvert et al., 2020)	Océan Austral	Annuelle	Mers d'Amundsen et de Bellingshausen, Mer de Ross, Mer de Weddell, Antarctique Est	Les chutes de neige sont indiquées presque tous les jours de l'année sur les zones les plus proches du continent Antarctique. Le nombre de jours pendant lesquels chaque réanalyse produit des pluies est opposé aux chutes de neige.
			Mer de Ross, Mer de Weddell	Les chutes de neige les moins variables se produisent dans les mers de Weddell et de Ross les plus proches du continent. Contrairement aux précipitations totales, l'ampleur des chutes de neige diminue vers le nord (latitudes inférieures) du continent.
			Antarctique Est	Les chutes de neige les plus importantes se produisent juste au large de la côte est de l'Antarctique, de Terre Adélie à la Terre Princesse Elizabeth, et légèrement plus à l'ouest entre la Terre de Kemp et la Terre d'Enderby.

Annexe 7. Tableau résumant et synthétisant les données extraites des études incluses dans la revue de la portée concernant les tendances sur les chutes de neige, selon la localité, temporalité et secteurs. Le code couleur des tendances signifie : rouge = diminution ou impact négatif ; vert = augmentation ou impact positif. (Partie 2)

Référence	Localité	Temporalité	Secteurs	Tendance
(Lannuzel et al., 2020)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Siberian Shelf, Mer de Beaufort, Mer de Béring	La pluie devrait devenir la forme dominante de précipitation (plutôt que la neige) d'ici la fin du siècle.
(Dou et al., 2019)	Océan Arctique	Hiver + printemps	Siberian Shelf	Arrivée plus précoce des premières pluies printanières depuis les années 1970, en particulier après le milieu des années 1990. Cette tendance vers des pluies printanières plus précoces est plus prononcée depuis le début des années 2000 (26,9 jours décennie ⁻¹ entre 2000 et 2015). Augmentation de la quantité de pluie (surtout au cours des 10 dernières années). Augmentation de la quantité de pluie en mai (au début de la saison de fonte) au cours des 60 dernières années avec une tendance linéaire de 0,43 mm décennie ⁻¹ entre 1952 et 2015 et de 1,4 mm décennie ⁻¹ depuis le milieu des années 1990.
(Serreze et al., 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation de la fréquence des épisodes de pluie.
(Pauling et Bitz, 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation des précipitations dont une plus grande partie devrait tomber sous forme de pluie (surtout en automne et au début de l'hiver).
		Été + automne	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation de la quantité des précipitations tombant sous forme de pluie.
		Hiver	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Changement de phase : le type de précipitations passe de la neige à la pluie (au début de l'hiver).
		Automne	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Changement de phase : en septembre et octobre les modèles prévoient le plus grand passage des précipitations gelées aux précipitations liquides au cours du 21 ^e siècle.
(Ferguson, 2005)	Océan Arctique	Printemps	Archipel Canadien	Augmentation des pluies printanières (enregistrées à Churchill) de 1962 à 2000.
(Theresa et al., 2004)	Océan Arctique	Automne	Mer de Beaufort	Augmentation de la quantité de pluie ces dernières années.
		Été	Mer de Beaufort	Changement de phase : chutes de neige prévues remplacées par de la pluie.
(Walsh et al., 2020)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf	Augmentation de la durée, fréquence et intensité des épisodes de pluie.
		Été + automne + hiver	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf	Changement de phase : émergence probable au milieu du 21 ^e siècle d'un signal statistiquement significatif du passage de la neige à la pluie.
		Hiver	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf	Augmentation de la fraction des précipitations sous forme de pluie jusqu'à la fin du 21 ^e siècle (dans une grande partie des terres du nord).
			Secteur Atlantique	Augmentation des pluies annuelles : augmentation plus forte en été et en automne, mais se produira également en hiver. Augmentation des événements de pluie à partir de 1998 : un hiver sur trois ou quatre au cours des décennies précédentes était essentiellement sans pluie, mais en 1998, le régime climatique a changé de sorte qu'un peu de pluie s'est produite pratiquement chaque hiver.

Annexe 8. Tableau résumant et synthétisant les données extraites des études incluses dans la revue de la portée concernant les tendances sur les pluies, selon la localité, temporalité et secteurs. Le code couleur des tendances signifie : rouge = diminution ou impact négatif ; vert = augmentation ou impact positif. (Partie 1)

Référence	Localité	Temporalité	Secteurs	Tendance	
(Dou et al., 2022)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Expansion vers le nord de l'étendue des pluies. Tendance observée dans l'océan Arctique pendant la saison chaude (juin-octobre) et plus évidente dans le secteur atlantique pendant la saison froide (novembre-mai). Augmentation de la fréquence, de l'intensité et de la portée des pluies. Augmentation de la fréquence des événements pluvieux d'ici la fin du siècle. Dans les zones où la température est proche du point de fusion, les changements dans la phase de précipitations sont particulièrement sensibles au réchauffement local.	
			Automne + hiver + printemps	Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian Shelf, Arctique Central	Augmentation du nombre de jours de pluie, indiquant que les pluies se produiront plus fréquemment dans l'Arctique. Augmentation plus importante des jours de pluie avec jusqu'à 12 jours/mois durant les saisons froides (octobre-mai) d'ici la fin du siècle (2091-2100) par rapport à 2006-2015. Le nombre de jours avec des pluies est le plus petit pendant toute la saison froide (novembre-mai), selon divers ensemble de données de réanalyse. Augmentation de l'intensité des pluies dans le futur qui se produisent uniquement dans les secteurs du Pacifique et de l'Atlantique avec des intensités supérieures à 3 mm/jour durant la période hivernale (octobre-avril). Il fait encore trop froid pour former des pluies pendant cette période dans d'autres régions d'ici la fin de ce siècle. Augmentation du nombre de jours de pluie s'observe principalement dans les secteurs Atlantique et Pacifique pendant les saisons froides. Le réchauffement local contribue à presque toutes les augmentations du nombre de jours de pluie dans les zones où il pleut pendant les mois froids (octobre-avril).
				Siberian shelf	Pas de changement significatif dans le nombre de jours de pluie d'ici la fin de ce siècle dans certaines parties de la Sibérie. Le réchauffement local n'est pas suffisant pour élever la température au-dessus du point de fusion dans certaines parties de cette région pendant les saisons froides.
		Printemps + été	Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation de l'intensité des pluies pendant les saisons chaudes (mai-septembre). Les changements d'intensité des pluies sur la zone terrestre arctique au réchauffement climatique sont plus sensibles que ceux sur l'océan Arctique, avec la plus forte augmentation de l'intensité de -2 mm/jour le long de la côte sud-ouest du Groenland.	
		Été + automne	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation la plus forte du nombre de jours de pluies observée en août-octobre d'ici la fin du siècle. Correspondant à la période avec la plus forte augmentation du rapport jours de pluie/jours de précipitation totale. Il y a notamment une augmentation attendue de 11 jours par mois en septembre car les projections montrent que ce rapport augmente d'environ 40 %.	
			Printemps	Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf, Arctique Central	Arrivée beaucoup plus précoce selon les projections du moment du premier événement pluvieux au printemps d'environ 38 jours en moyenne par rapport à aujourd'hui, d'ici la fin de ce siècle. Le changement dans les pluies au début de la saison de fonte est plus évident dans les secteurs du Pacifique et de l'Atlantique Nord, en particulier dans la mer des Tchoukches et le nord de la mer de Barents, où la date de début des pluies au printemps survient environ 3 mois (une saison) plus tôt que maintenant.
		Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central		Arrivée beaucoup plus précoce (de plus d'un mois) des pluies printanières à la fin de ce siècle. Par exemple, en mer des Tchoukches et au nord de la mer de Barents, les premières pluies printanières à la fin de ce siècle se produiront 3 mois plus tôt qu'aujourd'hui.	
		Secteur Atlantique, Arctique Central		Augmentation des événements pluvieux avec une portée des pluies qui s'étendra davantage vers le centre de l'Océan Arctique et l'intérieur du Groenland à l'avenir.	
		Été	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf, Arctique Central	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation de l'intensité des pluies dans le futur. D'ici la fin de ce siècle, l'intensité des pluies de la saison chaude (juin-septembre) peut atteindre plus de 6 mm/jour sur le continent arctique et -4 mm/jour en moyenne dans l'océan Arctique. La plus forte augmentation de l'intensité maximale des pluies se produit sur l'est de la Sibérie, l'ouest de l'Alaska et la bordure sud-ouest du Groenland de juillet à septembre, qui peuvent atteindre -12 mm/jour. Les événements de pluies les plus forts seront probablement observés à l'avenir dans le nord-ouest de l'Alaska, l'est de la Sibérie, le nord de l'Europe et la zone marginale du Groenland, et l'intensité de ces événements de pluie pourra atteindre 32 mm/jour. Dans une grande partie de l'est de la Sibérie, l'augmentation de l'intensité maximale des événements de pluie en été sera supérieure à 10 mm/jour par rapport à aujourd'hui.
				Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation du nombre de jours de pluie s'observe principalement sur l'océan Arctique pendant les saisons chaudes, notamment en septembre.
			Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation attendue de la fréquence des pluies en août. Dans le cadre du scénario de fortes émissions, l'océan Arctique devient libre de glace pendant les mois d'août et de septembre à la fin de ce siècle, ce qui fournit de la vapeur d'eau en abondance, faisant de septembre le mois avec les précipitations les plus fréquentes à partir du milieu de ce siècle. Parallèlement, un réchauffement local important se produit pendant la période d'absence de glace. Par conséquent, le mois d'août remplacera juillet en tant que mois avec le rapport jours de pluie/jours de précipitation totale le plus élevé dans la seconde moitié de ce siècle (89% à la fin de ce siècle), ce qui entraînera les événements pluvieux les plus fréquents en août.	
			Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation de la fréquence des événements pluvieux particulièrement évident dans l'océan Arctique en août et septembre.	
Secteur Atlantique, Arctique Central	Augmentation prévue de l'intensité des pluies.				
(McCrystall et al., 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf, Arctique Central	Les événements pluvieux ont tendance à se produire plus tôt (en août à l'avenir dans le centre de l'océan Arctique et la zone intérieure de la calotte glaciaire du Groenland).	
			Secteur Atlantique, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation plus importante des jours de pluie avec jusqu'à 14 jours/mois durant les saisons chaudes (juin-septembre) d'ici la fin du siècle (2091-2100) par rapport à 2006-2015.	
			Secteur Atlantique, Siberian shelf	Augmentation des pluies pour toutes les saisons dans les deux ensembles CMIP (CMIP5 et CMIP6) d'ici la fin de ce siècle. A la fin du siècle (2100) par rapport à l'année 2000, on note une augmentation de 422% des pluies du CMIP6 en hiver ; les valeurs correspondantes sont 261 % au printemps, 71 % en été et 268 % en automne. Les tendances sont également plus importantes dans le CMIP6 : en automne, les pluies augmentent de 0,9 mm jour ⁻¹ (81,9 mm par saison) de 2020 à 2100. Des augmentations de pluie plus importantes sont également simulées au cours d'autres saisons : l'hiver à une augmentation de 39 % plus élevée dans le CMIP6, tandis que le printemps et l'été ont des augmentations de 36 % et 14 % plus élevées, respectivement.	
			Secteur Atlantique	Domination par les pluies dans la plupart des régions à l'exception de celles du côté Pacifique de l'Arctique avec un réchauffement de 3 °C.	
		Été + automne	Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	La transition vers les pluies dans l'ouest de la Russie et en Europe nécessitera probablement un réchauffement climatique de 2 °C, davantage de modèles CMIP6 montrant ce changement que CMIP5.	
			Secteur Atlantique	Transition vers des précipitations dominées par les pluies qui se produira probablement dans les mers du Groenland et de Norvège, quelle que soit la limite de 1,5 °C ou 2 °C, en particulier dans le CMIP6.	
			Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation des pluies d'ici la fin de ce siècle. D'ici 2100, de fortes augmentations des pluies automnales sont simulées dans tout l'Arctique dans les deux ensembles CMIP avec des augmentations statistiquement significatives allant jusqu'à 0,6 mm jour ⁻¹ autour des mers du Groenland et de Barents. En été, l'Arctique est largement dominé par les pluies dans les deux expériences de modélisation.	

Annexe 8. Tableau résumant et synthétisant les données extraites des études incluses dans la revue de la portée concernant les tendances sur les pluies, selon la localité, temporalité et secteurs. Le code couleur des tendances signifie : rouge = diminution ou impact négatif ; vert = augmentation ou impact positif. (Partie 2)

Référence	Localité	Temporalité	Secteurs	Tendance
(Hezel et al., 2012)	Océan Arctique	Annuelle	Arctique Central	Augmentation de la pluie.
		Hiver + printemps	Arctique Central	Augmentation substantielle de l'augmentation des précipitations qui se produit sous forme de pluie pour les mois de novembre à mars.
		Printemps	Arctique Central	Augmentation de la série chronologique des pluies mensuelles moyennes multi-modèles sur avril et mai jusqu'à la fin du 21e siècle dans le RCP8.5. La fraction des précipitations tombant sous forme de pluie en avril et mai augmente de 19 +/- 7 % à 44 +/- 7 % dans la moyenne multimodèle sur ces deux périodes.
			Arctique Central	Constante dans la moyenne multimodèle des chutes de neige pour avril et mai. Par conséquent, la quasi-totalité de l'augmentation des précipitations au cours de ces mois se présente sous forme de pluie.
(Stroeve et al., 2022)	Océan Arctique	Automne + hiver + printemps	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation attendue des pluies hivernales. Car il y a une tendance positive statistiquement significative vers plus de pluie pendant la saison hivernale (d'octobre à avril) qui est observée pour l'océan Arctique et ses mers marginales. Bien que la quantité de pluie soit encore d'ampleur relativement faible, il est probable qu'elles deviennent de plus en plus importantes à mesure que l'Arctique commence à passer à des pluies plus importantes plus tôt que prévu.
(Vihma et al., 2016)	Océan Arctique	Printemps	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Transition neige-pluie plus précoce au printemps, donc, augmentation de la période de pluie printanière.
		Été	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation prévue des pluies.
		Automne	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Transition pluie-neige plus tardive en automne, donc, augmentation de la période de pluie automnale.
		Annuelle	Secteur Atlantique, Arctique Central, Archipel Canadien, Siberian Shelf, Mer de Beaufort	Augmentation attendue de la pluie d'ici la fin du siècle. Entre 2006-2015, les précipitations annuelles moyennes dans l'Arctique sont dominées par les chutes de neige, avec 65 ± 5 % des précipitations tombant sous forme solide. Toutefois, selon les modèles climatiques, la répartition pluie/neige va radicalement changer au cours du 21e siècle. Alors que les précipitations totales dans l'Arctique augmenteront d'environ 40 %, les chutes de neige diminueront en réalité. Les modèles climatiques prévoient qu'à la fin du 21e siècle, sous un fort forçage (RCP8.5), environ 60 % des précipitations dans l'Arctique seront constituées de pluie ; par conséquent, les pluies deviendront la forme dominante de précipitations. Même dans un forçage climatique plus modéré (RCP4.5), les pluies arctiques domineront les changements de précipitations. Il est intéressant de noter que les chutes de neige augmentent en fait sur les régions continentales de l'Arctique.
(Bintanja et Andry, 2017)	Océan Arctique	Hiver	Secteur Atlantique, Arctique Central	Domination attendue de la pluie dans la région arctique d'ici 2091-2100 en particulier dans le Nord Atlantique et la mer de Barents.
(Dou et al., 2021)	Océan Arctique	Hiver	Secteur Atlantique, Arctique Central	Augmentation de l'intensité des pluies hivernales.
		Printemps + été	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf	Augmentation de la pluie pour chaque mois au cours des dernières décennies, en particulier en mai et juin. La tendance la plus significative se produit en juin pour tous les ensembles de données de réanalyse.
(Hansen et al., 2014)	Océan Arctique	Hiver	Secteur Atlantique	Augmentation des précipitations liquides au Svalbard à un rythme de 0,6 à 9,4 % par décennie au cours des dernières décennies.
(Schreiber et Serreze, 2020)	Océan Arctique	Été	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Arctique Central	Augmentation de la fréquence d'événements météorologiques extrêmes, tels que de fortes pluies.
(Blunden et al., 2023)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Siberian Shelf	Pluie principalement en été.
		Annuelle	Secteur Atlantique	Augmentation de l'intensité des épisodes de pluie dans certaines régions comme le Secteur Atlantique Arctique.
			Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation du nombre de jours de pluie consécutifs dans certaines régions, comme du Svalbard vers l'est jusqu'à la mer des Tchoukches.
			Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf, Arctique Central	Changement de phase avec un remplacement de la neige par la pluie à des altitudes plus élevées d'après les observations et modélisation. Les pluies sont prévues d'être la forme dominante de précipitations dans la région Arctique d'ici la fin du 21e siècle.
(IPCC, 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation du pourcentage de précipitations arctiques tombant sous forme de pluie, en particulier en automne et au printemps. La plupart des régions terrestres (en dehors du Groenland) devenant dominées par les pluies (plus de 50% des précipitations totales d'ici 2100). Augmentation de la pluie. Augmentation de la fraction de précipitations totales tombant sous forme de pluie. Les pluies sont plus présentes pendant la période estivale.
		Annuelle	Secteur Atlantique	Augmentation de la fréquence des pluies de 2,7 à 5,4% pendant la période 2000-2016, notamment en Europe et au Svalbard.
		Hiver	Secteur Atlantique	Augmentation de la fréquence des pluies hivernales au Svalbard depuis 2000. D'ailleurs, les hivers sans pluie se sont rarement produits depuis 1998.
(Boisvert et al., 2020)	Océan Austral	Annuelle	Péninsule Antarctique Ouest, Mers d'Amundsen et de Bellingshausen, Mer de Ross, Mer de Weddell, Antarctique Est	Augmentation attendue des pluies. Augmentation attendue de la fraction de précipitations tombant sous forme de pluie (renforcement du cycle de l'eau dans les deux régions polaires). Augmentation attendue des pluies côtières dans la partie Nord et centrale de la Péninsule Antarctique Ouest, dans tous les scénarios d'émissions.
		Annuelle	Mers d'Amundsen et de Bellingshausen, Mer de Ross, Mer de Weddell, Antarctique Est	Augmentation de l'ampleur des événements pluvieux entre 2000 et 2016.
			Mers d'Amundsen et de Bellingshausen	Augmentation de la quantité de pluie lorsque l'on va du continent Antarctique vers les latitudes plus basses (plus septentrionales). Les pluies les plus fréquentes se produisent aux latitudes inférieures, et diminuent légèrement jusqu'à finalement presque aucun jour avec des pluies au plus proche du continent Antarctique.
			Mer de Weddell	Les quantités de pluies les plus importantes sont observées dans les mers de Bellingshausen/Amundsen. Il est toutefois important de considérer que la majorité des pluies dans toutes les régions se produisent à des latitudes plus basses et pas nécessairement sur la banquise.
(Zayvalov, 2020)	Autres mers	Hiver	Mer de Ross	Les pluies les plus fréquentes se trouvent au niveau des mers de Bellingshausen/Amundsen.
			Zone non polaire	Les pluies les plus faibles dans la mer de Weddell. Il est toutefois important de considérer que la majorité des pluies dans toutes les régions se produisent à des latitudes plus basses et pas nécessairement sur la banquise.
				Les pluies les moins fréquentes se trouvent au niveau de l'océan Pacifique.
				Précipitations mixtes : nombre de jours de pluie peut dépasser le nombre de jours de neige même pendant la saison froide.

Annexe 8. Tableau résumant et synthétisant les données extraites des études incluses dans la revue de la portée concernant les tendances sur les pluies, selon la localité, temporalité et secteurs. Le code couleur des tendances signifie : rouge = diminution ou impact négatif ; vert = augmentation ou impact positif. (Partie 3)

Référence	Localité	Temporalité	Secteurs	Tendance
(Dou et al., 2019)	Océan Arctique	Hiver + printemps	Siberian Shelf	Arrivée plus précoce des événements. Les premiers événements de l'année ont été décalés à des dates antérieures au cours des 60 dernières années (2,8 jours décennie ⁻¹).
(Grenfell et Putkonen, 2008)	Océan Arctique	Automne	Archipel Canadien	Augmentation de la fréquence.
(Serreze et al., 2021)	Océan Arctique	Automne + hiver	Secteur Atlantique, Siberian Shelf, Mer de Beaufort, Archipel Canadien	Les événements sont occasionnels dans l'ouest de la Sibérie, dans le sud du Groenland et dans certaines parties du Canada, et ils sont rares dans l'archipel arctique canadien froid. Les événements qui se produisent dans l'archipel arctique canadien (une région classée désert polaire) ont tendance à se produire au début de l'automne, lorsqu'il fait plus chaud.
			Secteur Atlantique, Siberian Shelf, Mer de Beaufort, Archipel Canadien	Augmentation probable de la fréquence des événements.
		Hiver	Mer de Beaufort	Les événements sont les plus fréquents dans le sud de l'Alaska.
			Siberian Shelf	Augmentation de la fréquence des événements (péninsule de Yamal). Au cours de la période de 5 ans suivant 2013, plusieurs autres événements importants se sont produits sur la péninsule de Yamal. Les événements sont plus fréquents et relativement petits à proximité de la côte par rapport à ceux plus à l'intérieur des terres qui sont moins fréquents mais plus importants.
(Descamps et al., 2017)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique	Augmentation de la fréquence des événements.
(Berger et al., 2018)	Océan Arctique	Annuelle	Siberian Shelf	Augmentation de la fréquence. Augmentation de la fréquence des événements mineurs (<10 mm) dans les régions arides de la Béringie. Ils étaient 2 fois plus fréquents dans le secteur est-asiatique de la Béringie sur l'île Wrangel. Les événements extrêmes sont rares.
(Langlois et al., 2017)	Océan Arctique	Annuelle	Archipel Canadien	Augmentation de la fréquence des événements. L'occurrence des événements de pluie sur neige a triplé entre les périodes 1979-1995 et 1996-2011, avec des années très actives au cours des hivers 1993-1994, 1998-1999 et 2002-2003. Augmentation des événements entre les périodes 79-80/94-95 par rapport à la période 95-96/10-11. Le nombre d'événements cumulé observé au cours de la première période est de 102 (26 % de tous les événements observés) et de 284 (74 % de tous les événements observés) dans la seconde. Cela suggère une augmentation significative de l'occurrence des événements, les années les plus actives étant 02-03, 08-09, 98-99 et 93-94. Les régions situées dans la partie sud de la CAA sont plus sujettes à une augmentation de la fréquence des événements. Augmentation attendue des événements à court terme, et à l'avenir selon les simulations.
(Walsh et al., 2020)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Siberian Shelf, Mer de Beaufort, Mer de Béring	Augmentation attendue de la fréquence et de l'étendue des événements.
			Secteur Atlantique, Siberian Shelf	Augmentation substantielle ont été détectées dans le nord de la Norvège, tandis que des tendances d'augmentation un peu moins cohérentes ont été constatées en Sibérie et en Russie européenne.
		Automne + hiver	Mer de Béring	Diminution de la fréquence des événements dans le sud-ouest et le sud de l'Alaska.
(Stroeve et al., 2022)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Mer de Béring	Diminution de la fréquence des événements dans l'ouest de la Scandinavie et le sud-ouest de l'Alaska selon la réanalyse MERRA.
		Hiver	Siberian Shelf, Secteur Atlantique, Arctique Central	Augmentation attendue de la fréquence et l'intensité des événements.
			Siberian Shelf, Mer de Beaufort	Des événements se produisent dans de nombreuses régions au milieu de l'hiver. Les événements se sont produits sur plusieurs jours (progressant spatialement). Événements rares dans cette région (mais impact important, notamment si ils se produisent au début de l'hiver).
(Dou et al., 2021)	Océan Arctique	Printemps + été	Siberian Shelf, Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort	Arrivée plus précoce des événements (ils se produisent plus tôt qu'il y a 40 ans).
			Siberian Shelf	Augmentation des quantités de pluie des événements à l'exception de la partie sud de la mer des Tchoukches et de la partie occidentale de la mer de Sibérie orientale.
		Printemps	Siberian Shelf, Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort	Arrivée plus précoce des événements. Le calendrier des événements s'est déplacé vers des dates antérieures au cours des dernières décennies (avec des tendances maximales allant jusqu'à -4 à -6 jours par décennie dans certaines régions de l'ERA-Interim).
(Hansen et al., 2014)	Océan Arctique	Hiver	Secteur Atlantique	Augmentation des événements.
(IPCC, 2019)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Siberian Shelf, Mer de Beaufort, Archipel Canadien	Augmentation de la fréquence des événements.
(IPCC, 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian Shelf, Arctique Central	Augmentation attendue des événements. Diminution des événements de pluie sur neige dans les régions du Nord à basses altitude, et même de 48 % en moyenne dans le sud de la Scandinavie. Tout cela en raison de la diminution des chutes de neige.
(Blunden et al., 2023)	Océan Austral	Annuelle	Mers d'Amundsen et de Bellingshausen, Mer de Ross, Mer de Weddell, Antarctique Est	Augmentation des événements à haute altitude où la neige a tendance à être remplacée par la pluie. Sur base de 40 années d'observation, il y a une augmentation identifiée de pluies verglaçantes en Norvège et à l'est et l'ouest de la Russie. Augmentations futures des jours et des quantités des événements de pluie sur neige.
				Événements existant.

Annexe 9. Tableau résumant et synthétisant les données extraites des études incluses dans la revue de la portée concernant les tendances des événements de pluie sur neige, selon la localité, temporalité et secteurs. Le code couleur des tendances signifie : rouge = diminution ou impact négatif ; vert = augmentation ou impact positif.

Référence	Localité	Temporalité	Secteurs	Tendance
(Overland, 2022)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique	Augmentation de la fréquence.
(Viceto et al., 2022)	Océan Arctique	Printemps + été	Siberian Shelf, Secteur Atlantique	Majoritairement des précipitations sous forme de pluie mais aussi avec un mix des phases, ou seulement des chutes de neige dans certaines régions (surtout sur la côte nord-est du Groenland et nord-est de l'Islande). Événements associés avec des précipitations intenses que ce soit sous forme de pluie ou de neige.
			Secteur Atlantique	Les événements sont très variables. Même si plusieurs se produisent sur une courte période (moins de 2 semaines). Bien qu'ils soient consécutifs, ils présentaient des quantités et des transports d'humidité différents, une structure verticale, des quantités et des phases de précipitations et des sources d'humidité différentes. Par exemple, le dernier événement a causé de fortes quantités de précipitations (pluie et neige) sur la côte est du Groenland mais aucune sur la région du Svalbard.
(Walsh et al., 2020)	Océan Arctique	Annuelle	Siberian Shelf, Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Mer de Béring	Présence d'événements.
(Shang et al., 2023)	Océan Arctique	Annuelle	Siberian Shelf, Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Béring, Arctique Central	Augmentation de la fréquence des événements.
		Hiver	Siberian Shelf, Secteur Atlantique, Arctique Central	Augmentation de la fréquence des événements au cours des dernières décennies.
(Liang et al., 2023)	Océan Austral	Annuelle	Antarctique Est	Accumulation de neige induite par les rivières atmosphériques dans l'Antarctique de l'Est.
	Océan Austral	Hiver + printemps	Mers d'Amundsen et de Bellingshausen, Mer de Ross, Mer de Weddell, Antarctique Est	La fréquence des événements varie d'une année à l'autre avec une variabilité plus élevée en hiver et au printemps. La fréquence des événements est plus élevée en hiver austral (juin, juillet, août) et au printemps (septembre, octobre, novembre) avec des moyennes de 0,33 % et 0,30 % respectivement. La fréquence hivernale des événements dépasse 0,4 % dans les secteurs de la mer d'Amundsen-Bellingshausen, de l'est de l'océan Indien et de l'est de l'océan Pacifique. Les maxima allant jusqu'à 0,6 % se situent dans le secteur de la mer de Weddell.
		Été + automne		La fréquence des événements varie d'une année à l'autre avec une variabilité plus faible en été. En été (décembre, janvier, février) et en automne (mars, avril, mai), les événements influencent principalement la mer de Weddell et la mer d'Amundsen-Bellingshausen, et la fréquence des événements n'est que de 0,12% et 0,17% respectivement.
(Blunden et al., 2023)	Océan Austral	Annuelle	Péninsule Antarctique, Antarctique Est	Présence de rivières atmosphériques (engendrant des événements de réchauffement exceptionnels en 2022 : un début février sur la péninsule Antarctique et un en mars à l'Est du Plateau Antarctique).
			Antarctique Est	Augmentation des chutes de neige due à une rivière atmosphérique. Événement ayant provoqué des anomalies de température record sur le plateau de l'Antarctique oriental et constitué jusqu'à présent l'événement de fonte de fin de saison le plus important enregistré dans cette région au 4 février dans les enregistrements d'observation par satellite.

Annexe 10. Tableau résumant et synthétisant les données extraites des études incluses dans la revue de la portée concernant les tendances des phénomènes de rivières atmosphériques, selon la localité, temporalité et secteurs. Le code couleur des tendances signifie : rouge = diminution ou impact négatif ; vert = augmentation ou impact positif.

Référence	Localité	Temporalité	Secteurs	Tendance
(Pauling et Bitz, 2021)	Océan Arctique	Automne	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian Shelf, Arctic Central	Augmentation du volume de la glace marine grâce à l'inondation de la couche de neige en septembre et octobre.
		Été		Perte de glace de mer (en raison de l'albédo de surface réduit) en simulant une inondation artificielle de la surface de la glace de mer, car cela provoque l'amincissement de la couche de neige.
(O'Sadnick et al., 2020)	Océan Arctique	Hiver - printemps	Secteur Atlantique	Les pluies, les chutes de neige et la fonte des neiges fournissent de l'eau douce à la surface des fjords. Toutefois, les pluies et la fonte des neiges peuvent ne pas créer une couche d'eau douce importante lorsque c'est directement à la surface d'un fjord. En revanche, l'accumulation de pluie et la fonte des neiges dans les rivières et ruisseaux menant à un fjord a un impact plus important en créant un panache d'eau douce et une colonne d'eau stratifiée plus près des exutoires des rivières. Les chutes de neige vont contribuer à la formation de glace en refroidissant la surface et en permettant la formation de glace en ensemençant. Mais une fois qu'une fine couche de glace est créée, les chutes de neige vont s'accumuler dessus en épaississant et renforcer la glace. Cependant, après la formation de la glace, si il y a des chutes de neige cela va pouvoir ralentir la formation de la glace en l'isolant par le haut, et permettant une fonte plus importante par le bas. Ce n'est pas encore bien clair et établis pour le fait de savoir quel processus : les chutes de neige à la surface d'un fjord, ou les pluies et la fonte des neiges qui s'écoulent dans le fjord, va déclencher le plus efficacement la formation de glace. Mais ce mécanisme de formation de la glace peut différer selon la localisation, entraînant des différences dans les propriétés de la glace.
(Schreiber et Serreze, 2020)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian Shelf, Arctic Central	De grandes quantités de précipitations liquides (et solides) sous l'influence de cyclones peuvent favoriser la croissance de la glace de mer en rafraîchissant la surface de l'océan.
(Shang et al., 2023)	Océan Arctique	Hiver	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Béring, Siberian Shelf, Arctic Central	L'humidité transportée par les rivières atmosphériques plus fréquentes a intensifié les pluies (ainsi que le rayonnement à ondes longues), provoquant une fonte et un déclin plus fort de la couverture de glace et a aussi ralenti la reconstitution saisonnière de la glace de mer (représentant 34% du déclin de la couverture de glace de mer dans les mers de Barents et Kara et dans l'Arctique Central). Ces événements ralentissent considérablement la croissance de la glace dans toutes les mers marginales.
(Dou et al., 2022)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian Shelf, Arctic Central	Accélération de la perte massive de la glace de mer à cause de la pluie dans un Arctique au réchauffement rapide et dans un contexte de réchauffement climatique.
(McCrystall et al., 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian Shelf, Arctic Central	Modification de la croissance thermodynamique de la glace de mer due aux changements dans les précipitations sur ces zones de glace.
(Vihma et al., 2016)	Océan Arctique	Été	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian Shelf, Arctic Central	Déclin de la glace de mer probablement dû à l'augmentation des pluies et la diminution des chutes de neige estivales.
(Liang et al., 2023)	Océan Austral	Automne - hiver	Mers d'Amundsen et de Bellingshausen, Mer de Ross, Mer de Weddell, Antarctique Est	Lors de phénomènes de rivières atmosphériques il peut y avoir des implications profondes sur la glace de mer en automne et en hiver.

Annexe 11. Tableau résumant et synthétisant les données extraites des études incluses dans la revue de la portée concernant les tendances de l'impact de la pluie sur le volume (et les données non définies) de la glace de mer, selon la localité, temporalité et secteurs. Le code couleur des tendances signifie : rouge = diminution ou impact négatif ; vert = augmentation ou impact positif.

Référence	Localité	Temporalité	Secteurs	Tendance
(Overland, 2022)	Océan Arctique	Été	Secteur Atlantique	La pluie a été accompagnée d'une forte étendue spatiale de fonte en surface le 14 août 2021 au Groenland.
(Pauling et Bitz, 2021)	Océan Arctique	Automne	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation de la superficie de la glace marine grâce à l'inondation de la couche de neige en septembre et octobre.
(Viceto et al., 2022)	Océan Arctique	Printemps + été	Secteur Atlantique, Siberian Shelf	Retrait de la lisière des glaces de mer suite à des précipitations en phase mixte.
(O'Sadnick et al., 2020)	Océan Arctique	Hiver + printemps	Secteur Atlantique	Les pluies, les chutes de neige et la fonte des neiges fournissent de l'eau douce à la surface des fjords. Toutefois, les pluies et la fonte des neiges peuvent ne pas créer une couche d'eau douce importante lorsque c'est directement à la surface d'un fjord. En revanche, l'accumulation de pluie et la fonte des neiges dans les rivières et ruisseaux menant à un fjord a un impact plus important en créant un panache d'eau douce et une colonne d'eau stratifiée plus près des exutoires des rivières. Les chutes de neige vont contribuer à la formation de glace en refroidissant la surface et en permettant la formation de glace en l'ensemencement. Mais une fois qu'une fine couche de glace est créée, les chutes de neige vont s'accumuler dessus en épaississant et renforcer la glace. Cependant, après la formation de la glace, si il y a des chutes de neige cela va pouvoir ralentir la formation de la glace en l'isolant par le haut, et permettant une fonte plus importante par le bas. Ce n'est pas encore bien clair et établis pour le fait de savoir quel processus : les chutes de neige à la surface d'un fjord, ou les pluies et la fonte des neiges qui s'écoulent dans le fjord, va déclencher le plus efficacement la formation de glace. Mais ce mécanisme de formation de la glace peut différer selon la localisation, entraînant des différences dans les propriétés de la glace.
(Schreiber et Serreze, 2020)	Océan Arctique	Été	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian Shelf, Arctic Central	Diminution de la concentration de glace de mer généralement en été, et plus fortement au niveau des mers marginales que sur le centre de l'océan Arctique. Mais les cyclones vont ralentir ce déclin en agissant contre le cycle saisonnier.
(Shang et al., 2023)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Béring, Siberian Shelf, Arctic Central	Il y a une contribution croissante des pluies associées aux rivières atmosphériques avec le retrait de la glace de mer. L'effet de fonte des rivières atmosphériques joue aussi sur le rétrécissement de la couverture de la glace de mer avec les pluies et les rayonnement de grandes longueurs d'ondes vers le bas.
(Bartsch et al., 2023)	Océan Arctique	Hiver	Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Siberian Shelf	Diminution de l'étendue de la glace de mer et reculée de la limite des glaces au-delà de l'étendue médiane à long terme pour décembre, au cours d'événements de pluie sur neige. Cependant, le nombre d'événements étant trop faible, aucun lien ne peut être déduit.
(Bintanja et Andry, 2017)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Arctique Central	Amplification du retrait de la glace de mer par les pluies puisqu'elles vont diminuer l'étendue de la couverture neigeuse, abaisser considérablement l'albédo de surface de la neige saisonnière, de la glace, renforçant donc le réchauffement de la surface.
(Liang et al., 2023)	Océan Austral	Annuelle	Mers d'Amundsen et de Bellingshausen, Mer de Ross, Mer de Weddell, Antarctique Est	Quand il y a des rivières atmosphériques avec de la pluie, il y a une décroissance plus importante de la glace de mer.

Annexe 12. Tableau résumant et synthétisant les données extraites des études incluses dans la revue de la portée concernant les tendances de l'impact de la pluie sur l'extension de la glace de mer, selon la localité, temporalité et secteurs. Le code couleur des tendances signifie : rouge = diminution ou impact négatif ; vert = augmentation ou impact positif.

Référence	Localité	Temporalité	Secteurs	Tendance
(Pauling et Bitz, 2021)	Océan Arctique	Hiver + printemps	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian Shelf, Arctic Central	Épaississement de la glace de mer lorsque les inondations de neige sur la glace de mer commencent au début de la saison de croissance de la glace de mer. Cette pluie qui va inonder la couche de neige au dessus de la glace de mer va geler en hiver en raison de l'atmosphère froide, épaississant donc la glace. La réduction de l'épaisseur de la neige va diminuer l'isolation entraînant aussi indirectement un processus d'épaississement. En fait si de la pluie tombe sur la glace de mer alors que de la neige est présente, la pluie va inonder la couche de neige, créant un mélange liquide eau-neige qui peut geler et épaissir la glace de mer. L'amincissement de la couche de neige sur la glace au début de la saison de croissance va produire une glace de mer beaucoup plus épaisse en raison d'une conductivité thermique effective plus élevée.
		Été		Réduction de la glace de mer en été, car l'amincissement de la couche de neige entraine un albédo de surface réduit, engendrant une perte de glace de mer.
(Galindo et al., 2014)	Océan Arctique	Printemps	Archipel Canadien	En 2010, l'épaisseur moyenne de la glace de mer sur le site était constante à environ 140 cm pour toute la période d'échantillonnage alors qu'en 2011 l'épaisseur moyenne de la glace de mer sur le site était constante à environ 140 cm pendant la majeure partie de la période d'échantillonnage, mais une perte de glace importante a été observée vers la fin de la période d'échantillonnage (diminution de 154 à 107 cm entre le 8 et le 24 juin). Cela peut s'expliquer par la perte de la couverture neigeuse accélérée par des épisodes de pluie.
(O'Sadnick et al., 2020)	Océan Arctique	Hiver + printemps	Secteur Atlantique	Les pluies, les chutes de neige et la fonte des neiges fournissent de l'eau douce à la surface des fjords. Toutefois, les pluies et la fonte des neiges peuvent ne pas créer une couche d'eau douce importante lorsque c'est directement à la surface d'un fjord. En revanche, l'accumulation de pluie et la fonte des neiges dans les rivières et ruisseaux menant à un fjord a un impact plus important en créant un panache d'eau douce et une colonne d'eau stratifiée plus près des exutoires des rivières. Les chutes de neige vont contribuer à la formation de glace en refroidissant la surface et en permettant la formation de glace en l'ensemencant. Mais une fois qu'une fine couche de glace est créée, les chutes de neige vont s'accumuler dessus en épaississant et renforçant la glace. Cependant, après la formation de la glace, si il y a des chutes de neige cela va pouvoir ralentir la formation de la glace en l'isolant par le haut, et permettant une fonte plus importante par le bas. Ce n'est pas encore bien clair et établis pour le fait de savoir quel processus : les chutes de neige à la surface d'un fjord, ou les pluies et la fonte des neiges qui s'écoulent dans le fjord, va déclencher le plus efficacement la formation de glace. Mais ce mécanisme de formation de la glace peut différer selon la localisation, entraînant des différences dans les propriétés de la glace.
(Vihma et al., 2016)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian Shelf, Arctic Central	La pluie peut favoriser la croissance des glaces de mer en constituant une source de glace superposée.

Annexe 13. Tableau résumant et synthétisant les données extraites des études incluses dans la revue de la portée concernant les tendances de l'impact de la pluie sur l'épaisseur de la glace de mer, selon la localité, temporalité et secteurs. Le code couleur des tendances signifie : rouge = diminution ou impact négatif ; vert = augmentation ou impact positif.

Référence	Localité	Temporalité	Secteurs	Tendance
(Dou et al., 2019)	Océan Arctique	Hiver + printemps	Siberian Shelf	Déclenchement (et préconditionnement) de l'ablation des neiges et de la fonte de surface de la glace de mer par les précipitations liquides. Les événements de pluie sur neige sont un facteur critique dans le déclenchement de la fonte de surface. Selon certaines observations (Utqiagvik et dans la banquise au large de la mer des Tchoukches), ces événements agissent comme un déclencheur efficace mais pour la plupart du temps, irréversible, de la transition vers la saison d'ablation en surface. La pluie peut en fait entraîner l'achèvement de la phase de réchauffement en seulement quelques heures. Pendant la phase de maturation, la pluie va augmenter la teneur en eau dans la couche de neige, et provoque le début de la phase de production d'eau de fonte dans le manteau neigeux. Début plus précoce de la fonte en surface suite à des changements de précipitations sur la glace de mer. Accélération du réchauffement et de la maturation du manteau neigeux même avec de petites quantités de pluie (0,3 mm par exemple).
(Kwok et al., 2003)	Océan Arctique	Printemps + été	Mer de Beaufort	Déclenchement de la saison de fonte et de la transition de la neige sèche à mouillée et fondante marqué par les pluies du 29 mai.
(Galindo et al., 2014)	Océan Arctique	Printemps	Archipel Canadien	Accélération de la fonte des neiges causée par des épisodes pluvieux en 2011, ce qui a accru le réchauffement des glaces, et donc leur fonte.
(Theresa et al., 2004)	Océan Arctique	Annuelle	Mer de Beaufort	Prolongement de la saison de fonte car la pluie retarde le gel.
(Schreiber et Serreze, 2020)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian Shelf, Arctic Central	Accélération de la fusion provoquée par les précipitations tombant sous forme de pluie sur la banquise.
(Shang et al., 2023)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Béring, Siberian Shelf, Arctic Central	Renforcement de l'effet de fonte par les rivières atmosphériques en particulier sur la mince et fragile couverture de glace nouvellement formée, car l'humidité et la chaleur transportée par les ces événements intensifient le rayonnement à ondes longues et les pluies. L'augmentation de la fréquence des rivières atmosphériques peut donc aussi renforcer leur effet de fonte sur la glace de mer, notamment pendant la saison de croissance des glaces. L'effet de fonte plus fort dû à ces événements a déjà été remarqué lors de la saison de récupération des glaces (novembre, décembre, janvier) pour la période 1979-2021. Dans le secteur Atlantique, où la couverture de glace nouvellement formée est relativement mince, ces événements provoquent d'ailleurs même jusqu'à 60% de la fonte des glaces de mer.
(Dou et al., 2022)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian Shelf, Arctic Central	Les premières pluies de la fin de siècle se produiront plus tôt qu'aujourd'hui d'environ 38 jours en moyenne. La période d'ablation des glaces sera donc prolongée (dans le cadre d'un scénario d'émissions élevées).
		Printemps		Accélération à l'avenir de la fonte des neiges et des glaces à cause des pluies.
(Vihma et al., 2016)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian Shelf, Arctic Central	Amplification attendue de la fonte de la surface de la neige et de la glace à cause de l'augmentation prévue des pluies (et de la diminution des chutes de neige). Le changement de type de précipitations a un effet dramatique sur l'albédo de surface et la fonte des glaces de mer, car la pluie favorise fortement la fonte de la glace.
(Bintanja et Andry, 2017)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Arctique Central	Renforcement de la fonte des neige par la pluie.
(Dou et al., 2021)	Océan Arctique	Printemps + été	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian Shelf	Accélération de l'ablation de la surface de la glace de mer par les événements de pluie sur neige.
				Le calendrier des événements de pluie sur neige s'est déplacé (selon toutes les réanalyses) vers des dates antérieures au cours des dernières décennies, avec des tendances maximales allant de 4 à 6 jours plus tôt, par décennie dans certaines régions (selon ERA-1). Déclenchement de la fonte des neiges et des glaces de mer par les événements de pluie sur neige qui peuvent se produire parallèlement à des invasions d'air chaud et humide. Les événements printaniers (notamment le moment des premiers) sont un facteur influençant le début de la fonte des glaces de mer, principalement au cours des premières étapes de l'ablation des glaces de mer (de mars à juin). Les zones sensibles à ces moments sont le secteur Pacifique de l'Arctique, les mers marginales eurasiennes, notamment le plateau des Tchoukches, les mers de Kara, Laptev et Sibérie orientale.
(IPCC, 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian Shelf, Arctic Central	Les rivières atmosphériques peuvent être liées aux événements de réchauffement/fonte par le biais d'intrusions d'airs chauds et humides.
	Océan Austral		Mers d'Amundsen et de Bellingshausen, Mer de Ross, Mer de Weddell, Antarctique Est	Les rivières atmosphériques peuvent être liées aux événements de réchauffement/fonte par le biais d'intrusions d'airs chauds et humides.
(Liang et al., 2023)	Océan Austral	Annuelle	Mers d'Amundsen et de Bellingshausen, Mer de Ross, Mer de Weddell, Antarctique Est	Amplification de la fonte de la glace par les rivières atmosphériques (temps chaud, humide et nuageux) pendant les mois froids notamment.
				Amplification de la fonte, notamment en été par les fortes pluies.
(Zayvalov, 2020)	Autres mers	Hiver + printemps	Zone non polaire	Renforcement de la fonte de la glace et de la neige provoquée par les précipitations liquides, même lorsque la température de la pluie est légèrement supérieure à 0°C.

Annexe 14. Tableau résumant et synthétisant les données extraites des études incluses dans la revue de la portée concernant les tendances de l'impact de la pluie sur la fonte de la glace de mer, selon la localité, temporalité et secteurs. Le code couleur des tendances signifie : rouge = diminution ou impact négatif ; vert = augmentation ou impact positif.

Référence	Localité	Temporalité	Secteurs	Tendance
(IPCC, 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Mer de Béring, Arctique Central	Formation d'une barrière de glace solide par les épisodes de pluie sur neige.
		Hiver		Formation plus fréquente de couches de glace basales recouvrant le sol sous la couche de neige à cause de l'augmentation des précipitations hivernales.
(Lannuzel et al., 2020)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Siberian Shelf, Mer de Beaufort, Mer de Béring	Formation de couches de glace superposées à cause des conditions plus chaudes et pluvieuses (la neige va donc fondre puis regeler).
(Dou et al., 2019)	Océan Arctique	Hiver + printemps	Siberian Shelf	Formation de couches de glace dans la partie inférieure du manteau neigeux après que de l'eau se soit écoulée vers le bas suite à de forts épisodes de pluie.
(Grenfell et Putkonen, 2008)	Océan Arctique	Automne	Archipel Canadien	Formation de couches de glace à la base de la neige, ou à un niveau où la pluie atteint une profondeur à une température inférieure à zéro dans le manteau neigeux et y gèle. Une ou plusieurs couches imperméables de barrière de glace peuvent donc être créées.
(Serreze et al., 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Formation de couches de glace dans la neige ou à la base du manteau neigeux après le gel de l'eau de pluie.
(Descamps et al., 2017)	Océan Arctique	Hiver	Secteur Atlantique	Les pluies hivernales créent des couches de glace qui bloquent l'accès à la nourriture pour les herbivores avec l'encapsulation de la végétation dans cette glace.
(Berger et al., 2018)	Océan Arctique	Hiver	Siberian Shelf	Des événements de pluie sur neige, notamment associés avec des températures plus chaudes (surtout en hiver) vont augmenter la probabilité d'emprisonner le sol, totalement, ou partiellement dans la glace.
(Langlois et al., 2017)	Océan Arctique	Annuelle	Archipel Canadien	Création de couches de glace suite à des événements de pluie sur neige et un regel ultérieur des précipitations.
(Walsh et al., 2020)	Océan Arctique	Hiver	Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian Shelf	La formation de couches de glace peut être provoquée par les épisodes de pluie sur neige et/ou les périodes chaudes hivernales.
(Hansen et Aanes, 2012)	Océan Arctique	Hiver	Secteur Atlantique	Les forts événements de pluie sur neige et le givrage vont englacer les sols.
(Stroeve et al., 2022)	Océan Arctique	Hiver	Secteur Atlantique, Siberian Shelf, Arctic Central	Les événements de pluie sur neige hivernaux sur la glace peuvent générer des couches de glace à la surface ou dans le manteau neigeux.
(Ehn et al., 2006)	Océan Arctique	Printemps	Archipel Canadien	Après des épisodes de pluie et une fonte importante, le manteau neigeux s'est entièrement métamorphosé par fonte/gel et en glace superposée.
(Vihma et al., 2016)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian Shelf, Arctic Central	La pluie peut être une source de formation de glace superposée bien qu'elle favorise fortement la fonte des glaces de mer.
(Bintanja et Andry, 2017)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Arctique Central	Les précipitations tombant sous forme de pluie au lieu de neige ont un impact important (surtout en hiver) quand un gel ultérieur est possible puisqu'elles vont créer du givrage.
(Hansen et al., 2014)	Océan Arctique	Hiver	Secteur Atlantique	Des couches de glace peuvent se former dans, ou à la base du manteau neigeux à la suite d'événements de pluie sur neige, ou à la suite d'un dégel de pluie sur un sol gelé.
(Blunden et al., 2023)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian Shelf, Arctic Central	Formation de couches de glace possible suite à des événements de pluie sur neige. Ces événements peuvent engendrer des transformations extrêmes de la couverture neigeuse.
(Saloranta, 2000)	Autres mers	Hiver	Zone non polaire	Des couches relativement imperméables peuvent être formées dans le manteau neigeux suite à l'infiltration d'eau qui sera ensuite re congelée plus profondément.

Annexe 15. Tableau résumant et synthétisant les données extraites des études incluses dans la revue de la portée concernant les tendances de l'impact de la pluie sur la création de *superimposed ice*, selon la localité, temporalité et secteurs. Le code couleur des tendances signifie : rouge = diminution ou impact négatif ; vert = augmentation ou impact positif.

Référence	Localité	Temporalité	Secteurs	Tendance
(Serreze et al., 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Des pluies suivies de basses températures, ou des pluies verglaçantes sur une couverture neigeuse existante peuvent engendrer des croûtes de glace à la surface ou dans le manteau neigeux.
(Stroeve et al., 2022)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Siberian Shelf, Arctic Central	Les événements de pluie sur neige déposent de l'eau liquide sur le manteau neigeux existant, et lors du regel, cela peut conduire à la formation de croûtes de glace à la surface ou dans le manteau neigeux.
(Ehn et al., 2006)	Océan Arctique	Printemps	Archipel Canadien	À la suite de pluies importantes (associées à des températures élevées), des lentilles de glace se sont formées à différents niveaux du manteau neigeux.
(Bartsch et al., 2023)	Océan Arctique	Hiver	Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Siberian Shelf	Les événements de pluie sur neige modifient les propriétés de la neige et peuvent conduire à la formation de croûtes de glace.
(Saloranta, 2000)	Autres mers	Hiver	Zone non polaire	L'eau s'infiltrant dans le manteau neigeux peut se congeler plus profondément dans la neige et former des lentilles de glace (et d'autres couches relativement imperméables).

Annexe 16. Tableau résumant et synthétisant les données extraites des études incluses dans la revue de la portée concernant les tendances de l'impact de la pluie sur la formation de croûtes et lentilles de glace, selon la localité, temporalité et secteurs. Le code couleur des tendances signifie : rouge = diminution ou impact négatif ; vert = augmentation ou impact positif.

Référence	Localité	Temporalité	Secteurs	Tendance
(IPCC, 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf, Arctique Central	Inondations potentiellement plus élevées et importantes avec l'augmentation attendue des jours d'évènements de pluie sur neige, ainsi que leur quantité et ruissellement, cela lié avec la fonte des neiges plus précoce.
(Pauling et Bitz, 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Inondation de la couche de neige par la pluie sur le dessus de la glace de mer.
(Saloranta, 2000)	Autres mers	Hiver	Zone non polaire	Une période avec des températures supérieures à zéro et de la pluie va provoquer le mouillage de la neige, entraînant alors la formation d'une couche de neige fondante. Le gel de cette neige fondante va donner ce que l'on appelle de la glace de neige. L'eau de fonte et la pluie contribuent à la formation de cette glace de neige.

Annexe 17. Tableau résumant et synthétisant les données extraites des études incluses dans la revue de la portée concernant les tendances de l'impact de la pluie sur le *flooding* et la glace de neige, selon la localité, temporalité et secteurs. Le code couleur des tendances signifie : rouge = diminution ou impact négatif ; vert = augmentation ou impact positif.

Référence	Localité	Temporalité	Secteurs	Tendance
(Saloranta, 2000)	Autres mers	Hiver	Zone non polaire	La pénétration de l'eau de pluie, de fonte, et/ou les inondations sont probablement les principaux processus de formation des couches de neige fondantes. L'eau va s'infiltrer dans le manteau neigeux et contribuer à la formation de cette couche de neige fondante. Le gel éventuel de cette couche de neige conduira à ce que l'on appelle la glace de neige. Il y a deux périodes de formation de neige fondante (avec des caractéristiques différentes) : début février lorsque la couverture neigeuse est devenue assez épaisse pour déclencher des inondations, et en avril, lorsque l'eau de pluie et de fonte contribuent à la couche de neige fondante.

Référence	Localité	Temporalité	Secteurs	Tendance
(Liston et al., 2020)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Augmentation de la densité de la neige dans les couches proches de la surface lorsque de la pluie tombe sur la neige froide et va se geler dans le manteau neigeux.
(Serreze et al., 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Les événements de pluie sur neige influencent la structure de la neige, sa densité et sa conductivité.
(Hezel et al., 2012)	Océan Arctique	Hiver + printemps	Arctique Central	Modification de la densité de la glace de mer par la pluie tombée pendant la saison de croissance de la glace.
(Zayvalov, 2020)	Autres mers	Hiver + printemps	Zone non polaire	Modification de la densité de la couverture neigeuse suite à la pluie tombée et absorbée par la neige.

Référence	Localité	Temporalité	Secteurs	Tendance
(IPCC, 2019)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf, Arctique Central	Réduction de l'épaisseur de neige sur la glace de mer cohérente avec les estimations de fractions plus élevées de précipitations liquides. Cependant, il y a un degré élevé de variabilité régionale.
(Dou et al., 2019)	Océan Arctique	Printemps	Siberian Shelf	Réduction rapide de l'épaisseur de neige suite aux événements de pluie sur neige à la fin du printemps. L'épaisseur de la neige printanière est en effet très sensible à la phase de précipitation. Les précipitations solides l'augmentant, protégeant ainsi la glace marine de la fonte, et à l'inverse, les précipitations liquides réchauffant le manteau neigeux, et diminuant ainsi son épaisseur. En l'absence de pluie, le réchauffement est généralement lent, et la réduction de l'épaisseur de la neige est beaucoup plus progressive à mesure que la fonte des neiges progresse. Mais, en poussant le manteau neigeux dans la phase isotherme, de maturation et d'évacuation des eaux de fonte, les précipitations liquides peuvent réduire considérablement l'épaisseur de la neige et initier le début d'une ablation rapide en surface.
(Pauling et Bitz, 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Réduction de la couche de neige sur la glace de mer au début de l'année suite à la simulation d'une inondation artificielle de la surface de la glace de mer. Cet effet est quelque peu analogue à celui de la pluie naturelle tombant sur la neige qui recouvre la glace de mer dans un Arctique plus chaud. En effet, si de la pluie tombe sur la glace marine alors qu'une couche de neige est présente, la pluie va inonder la couche de neige, créant un mélange liquide eau-neige qui pourra finir par regeler, provoquant alors une augmentation directe de l'épaisseur de la glace, mais un amincissement de la couche de neige associée.
(Galindo et al., 2014)	Océan Arctique	Printemps	Archipel Canadien	Réduction rapide du manteau neigeux en 2011 coïncidant avec des épisodes pluvieux. En 2010, en revanche, l'épaisseur de neige moyenne du site est restée relativement stable avant une diminution progressive. Alors qu'en 2011, l'épaisseur de neige moyenne est passée de 15 cm environ, à 3 cm pendant la période des pluies en 4 jours. La pluie a accélérée la fonte des neiges en 2011 et a entraîné une couverture de glace sans neige.
(Berger et al., 2018)	Océan Arctique	Annuelle	Siberian Shelf	Réduction du manteau neigeux possible par les pluies hivernales.
(Wang et al., 2019)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian Shelf, Arctic Central	Réduction du manteau neigeux qui est plus fin lorsqu'il y a plus de précipitations sous forme de pluie que de neige, et/ou des températures inférieures à zéro.
(Walsh et al., 2020)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian Shelf	Manque de couverture neigeuse due à un réchauffement extrême éventuellement combiné à des pluies hivernales.
(McCrystall et al., 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian Shelf, Arctic Central	Réduction de la durée de la couverture neigeuse. Modification de l'épaisseur de la neige due aux changements dans les précipitations sur les zones de glace de mer.
(Webster et al., 2022)	Océan Arctique	Printemps Été	Arctique Central	Réduction du manteau neigeux en mai après plusieurs jours de pluie et températures supérieures à zéro. Réduction du manteau neigeux de 8 ± 5 cm à 4 ± 3 cm après un épisode de pluie sur neige à la mi-septembre provoqué par un cyclone.
(Ehn et al., 2006)	Océan Arctique	Printemps	Archipel Canadien	Transformation du manteau neigeux en neige métamorphosée par fonte et/ou gel, et en glace superposée après des épisodes de pluie et une fonte importante.
(Bintanja et Andry, 2017)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Arctique Central	Diminution de la couverture neigeuse à cause des pluies.
(Dou et al., 2021)	Océan Arctique	Printemps	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Siberian Shelf	Diminution de l'épaisseur de la neige dans la plupart des mers marginales de l'Arctique à cause du changement de phase de précipitation dans l'ERAS. Mais il y a des variations spatiales significatives. Dans certaines petites zones (y compris le bassin central du Canada et une partie de la mer de Sibérie orientale), une augmentation de l'épaisseur de la neige est induite. Les mers de Kara et de Barents et l'archipel arctique canadien présentant la tendance à la baisse la plus importante (plus de -2.0 cm par décennie). En moyenne sur l'océan Arctique, le taux de réduction de l'épaisseur de la neige associé à la transition de phase de précipitation est de -0.5 cm par décennie au cours des dernières décennies. L'épaisseur de la neige sur la glace de mer est très sensible aux changements de phase des précipitations. Les précipitations solides augmentent l'épaisseur de la neige, contrairement aux précipitations liquides. L'augmentation des événements de pluie sur neige contribue donc à une réduction substantielle de l'épaisseur de la neige sur la glace de mer au début de la saison de fonte.
(Blunden et al., 2023)	Océan Arctique	Annuelle	Mer de Béring	Diminution, voir perte totale du manteau neigeux en raison de la pluie et de températures persistantes au-dessus de zéro au début du mois de décembre (ayant apporté une chaleur extrême), au nord-ouest de l'Alaska, et pour certaines communautés du détroit de Béring.
(Boisvert et al., 2020)	Océan Austral	Annuelle	Mers d'Amundsen et de Bellingshausen, Mer de Ross, Mer de Weddell, Antarctique Est	Réduction de l'épaisseur de neige en raison de la fonte, et de la fonte associée aux épisodes de pluie.
(Saloranta, 2000)	Autres mers	Hiver	Zone non polaire	Réduction de l'épaisseur de la neige due à la présence de fortes concentrations d'eau liquide (la capillarité s'oppose au compactage du manteau neigeux). Déformation rapide du manteau neigeux possible notamment pendant la saison de fonte et en raison des précipitations.

Annexe 20. Tableau résumant et synthétisant les données extraites des études incluses dans la revue de la portée concernant les tendances de l'impact de la pluie sur la couche de neige recouvrant la glace de mer, selon la localité, temporalité et secteurs. Le code couleur des tendances signifie : rouge = diminution ou impact négatif ; vert = augmentation ou impact positif.

Référence	Localité	Temporalité	Secteurs	Tendance
(Dou et al., 2019)	Océan Arctique	Hiver + printemps	Siberian Shelf	Libération de chaleur latente dans la couche de neige suite à la pénétration de la pluie et son regel dans le manteau neigeux. La pluie modifie le bilan énergétique, déclenchant la phase de réchauffement de la fonte des neiges en transférant notamment la chaleur dans le manteau neigeux. Une fois que le manteau neigeux a atteint la phase de réchauffement, l'énergie restante est utilisée pour faire fondre davantage la neige, poussant le manteau neigeux vers la phase de maturation. Les pluies sont certainement le principal facteur du réchauffement rapide de la couche de neige jusqu'à un état isotherme.
(Grenfell et Putkonen, 2008)	Océan Arctique	Automne	Archipel Canadien	Libération de chaleur latente suite à la pénétration, infiltration et gel de la pluie.
(Overland, 2022)	Océan Arctique	Été	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian Shelf	Transfert de chaleur important au Groenland, en 2021, en raison de la condensation, la température élevée de l'air et les pluies lors de la rivière atmosphérique d'août.
(Serreze et al., 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian Shelf	Diminution de la capacité isolante du manteau neigeux suite à des épisodes de pluies.
(Pauling et Bitz, 2021)	Océan Arctique	Hiver + printemps	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	L'amincissement de la couche de neige sur la glace de mer au début de la saison de croissance (ou au début de l'hiver) par les pluies, augmente la conductivité thermique effective, et donc la croissance basale de la glace de mer.
(Schreiber et Serreze, 2020)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian Shelf, Arctic Central	Les pluies vont diminuer l'albédo et augmenter l'absorption de chaleur.
(Bintanja et Andry, 2017)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Arctique Central	Les pluies vont diminuer l'étendue de la couverture neigeuse et abaisser considérablement l'albédo de surface de la neige saisonnière, renforçant ainsi le réchauffement de la surface.
(Dou et al., 2021)	Océan Arctique	Printemps + été	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian Shelf	Les événements de pluie sur neige peuvent, durant les premiers stades de l'ablation de la glace de mer (de mars à juin), affecter la réduction de l'albédo de la neige et améliorer le transfert de chaleur dans le manteau neigeux.
(Hansen et al., 2014)	Océan Arctique	Hiver	Secteur Atlantique	Les événements de pluie sur neige peuvent fortement influencer le bilan thermique du manteau neigeux ainsi que celui du sol en s'infiltrant à travers la neige. L'eau va geler et libérer de la chaleur latente vers la neige et le sol gelé.

Annexe 21. Tableau résumant et synthétisant les données extraites des études incluses dans la revue de la portée concernant les tendances de l'impact de la pluie sur les échanges de chaleur, selon la localité, temporalité et secteurs. Le code couleur des tendances signifie : rouge = diminution ou impact négatif ; vert = augmentation ou impact positif.

Référence	Localité	Temporalité	Secteurs	Tendance
(Dou et al., 2019)	Océan Arctique	Hiver + printemps	Siberian Shelf	Diminution de l'albédo de surface par les événements de pluie sur neige. La pluie peut diminuer l'albédo de surface de 0,1 environ en quelques heures. Cet impact sur l'albédo est donc très différent de celui d'un processus de réchauffement ou de fusion progressif car ce dernier a besoin d'environ 10 jours pour réduire l'albédo du même montant.
(Kwok et al., 2003)	Océan Arctique	Printemps + été	Mer de Beaufort	Diminution de l'albédo au fur et à mesure que les précipitations sous forme liquide augmentent, et que la neige passe à des stades de plus en plus mouillés, jusqu'à même des mares de fonte.
(Serreze et al., 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Les événements de pluie sur neige influencent l'albédo.
(Pauling et Bitz, 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian shelf, Arctique Central	Diminution de l'albédo de surface par la pluie. La pluie réduisant la couverture neigeuse.
(Galindo et al., 2014)	Océan Arctique	Printemps	Archipel Canadien	Diminution rapide de l'albédo de surface suite à des événements pluvieux et la formation de mares de fonte en 2011. En effet, l'albédo était resté relativement constant (0,8 environ) jusqu'au 6 juin, puis a diminué rapidement jusqu'à 0,2 le 15 juin à cause de ces événements. L'albédo a par la suite augmenté jusqu'à 0,6 en raison du drainage des mares de fonte. En revanche, en 2010, l'albédo de surface est resté relativement constant (0,8 environ) jusqu'au 6 juin, puis a diminué lentement jusqu'à 0,7 le 13 juin en raison de la fonte des neiges et est tombé à 0,3 lorsqu'une mare de fonte s'est formée dans la région.
(Schreiber et Serreze, 2020)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian Shelf, Arctique Central	Diminution de l'albédo de surface provoqué par la pluie.
(Hezel et al., 2012)	Océan Arctique	Printemps + été	Arctique Central	Modification de l'albédo par la pluie tombant sur la glace de mer pendant la saison de fonte.
(Ehn et al., 2006)	Océan Arctique	Printemps	Archipel Canadien	Diminution irréversible de l'albédo de surface en raison de métamorphoses du manteau neigeux provoqué par des épisodes de pluie.
(Vihma et al., 2016)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian Shelf, Arctique Central	Diminution de l'albédo de surface suite à l'augmentation attendue de la pluie et la diminution des chutes de neige. En effet, si les précipitations tombent sous forme de pluie au lieu de neige, alors cela a un effet dramatique sur ce paramètre.
(Bintanja et Andry, 2017)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Arctique Central	Diminution/abaissement de l'albédo de surface de la neige et de la glace de mer suite à des épisodes de pluie.
(Dou et al., 2021)	Océan Arctique	Printemps + été	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian Shelf	Réduction de l'albédo de la neige suite à des événements de pluie sur neige. Ces événements influencent grandement la rétroaction de l'albédo de la glace.
(Zayvalov, 2020)	Autres mers	Hiver + printemps	Zone non polaire	Modification de l'albédo de la couverture neigeuse par la pluie.

Annexe 22. Tableau résumant et synthétisant les données extraites des études incluses dans la revue de la portée concernant les tendances de l'impact de la pluie sur l'albédo, selon la localité, temporalité et secteurs. Le code couleur des tendances signifie : rouge = diminution ou impact négatif ; vert = augmentation ou impact positif.

Référence	Localité	Temporalité	Secteurs	Tendance
(Lannuzel et al., 2020)	Océan Arctique	Printemps	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Siberian Shelf, Mer de Beaufort, Mer de Béring	Formation d'étangs de fonte favorisée au printemps par les précipitations (pluie et neige).
(Dou et al., 2019)	Océan Arctique	Hiver + printemps	Siberian Shelf	Formation plus précoce de bassins de fonte à cause de précipitations liquides plus précoces et importantes, entraînant une fonte plus précoce et rapide du manteau neigeux sur la glace de mer.
(Webster et al., 2022)	Océan Arctique	Printemps + été + automne	Arctique Central	Formation et développement de bassins de fonte suite à des épisodes de pluie et plusieurs jours de températures au dessus du point de congélation. Le manteau neigeux s'est donc réduit et la surface était conditionnée à la formation de bassins de fonte. Les bassins de fonte subissent toutefois des épisodes de drainage vertical (par des trous de faille ou des canaux de saumures interconnectés) durant des périodes venteuses et/ou conditions pluvieuses. Les températures supérieures à zéro et les pluies intermittentes entraînent en fait une réduction constante de la neige et une « réouverture » des bassins de fonte à mesure que leurs couvertures de glace fondent.
(Dou et al., 2021)	Océan Arctique	Printemps + été	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian Shelf	Formation et développement de bassins de fonte suite à des événements de pluie sur neige lors des premiers stades d'ablation de la glace de mer. Ces événements vont déclencher la fonte des neiges et des glaces (par la réduction notamment de l'albédo, l'amélioration du transfert de chaleur à travers le manteau neigeux).

Annexe 22. Tableau résumant et synthétisant les données extraites des études incluses dans la revue de la portée concernant les tendances de l'impact de la pluie sur les bassins de fonte, selon la localité, temporalité et secteurs. Le code couleur des tendances signifie : rouge = diminution ou impact négatif ; vert = augmentation ou impact positif.

Référence	Localité	Temporalité	Secteurs	Tendance
(Serreze et al., 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique	Les évènements de pluie sur neige peuvent créer du stress sur la végétation à cause de l'emprisonnement dans la glace.
(Galindo et al., 2014)	Océan Arctique	Printemps	Archipel Canadien	Accélération de la fonte des neiges causée par des épisodes pluvieux en 2011, ce qui a favorisé le réchauffement des glaces, et donc leur fonte, entraînant la disparition de la chlorophylle a de la couverture de glace de fond. La couverture de glace s'est retrouvée sans neige, presque sans algue, et transparente. Les différentes conditions pluviométriques entre 2010 et 2011 ont conduit à des schémas différents de fonte des neiges, de libération d'algues par la glace, de leur DMSP dans la colonne d'eau, et de développement ultérieur d'efflorescences sous la glace. En 2011, il y a eut des évènements pluvieux coïncidant avec une perte rapide de la couverture neigeuse ainsi qu'une libération des algues de la glace de fond et de la DMSP dans la colonne d'eau rapide (en 8 jours), suivant de près l'augmentation de la transmittance lumineuse (résultat de la fonte rapide de la neige induite par la pluie). L'efflorescence était dominée par les pennées, reflétant probablement l'ensemencement par des algues de glace. Donc, l'augmentation prévue des pluies au cours de la période printanière (en raison du réchauffement climatique) pourrait favoriser le développement d'efflorescences sous la glace riches en DMSP et dominées par des diatomées pennées.
(Descamps et al., 2017)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique	Les pluies hivernales entraînent l'encapsulation de la végétation dans la glace.
(Berger et al., 2018)	Océan Arctique	Annuelle	Siberian Shelf	Une couverture neigeuse réduite peut affecter négativement la productivité et la disponibilité des ressources (manque d'isolation de la végétation au sol) au cours de la saison de croissance suivante des animaux.
(Hansen et al., 2014)	Océan Arctique	Hiver	Secteur Atlantique	L'eau qui gèle va libérer de la chaleur latente dans la neige et le sol gelé, et une couche de glace souterraine solide peut s'accumuler et recouvrir la végétation sous-jacente.

Annexe 23. Tableau résumant et synthétisant les données extraites des études incluses dans la revue de la portée concernant les tendances de l'impact de la pluie sur les producteurs primaires, selon la localité, temporalité et secteurs. Le code couleur des tendances signifie : rouge = diminution ou impact négatif ; vert = augmentation ou impact positif.

Référence	Localité	Temporalité	Secteurs	Tendance
(Serreze et al., 2021)	Océan Arctique	Hiver + printemps	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian Shelf, Arctique Central	Les pluies au début de la saison de reproduction des ours polaires (<i>Ursus maritimus</i>) et des phoques annelés (<i>Phoca hispida</i>) peuvent faire fondre les tanières et augmenter la mortalité des petits.
		Hiver	Archipel Canadien	Les évènements de pluie sur neige peuvent affecter les populations locales de phoques annelés en créant une épaisse couche de glace sur les trous de respiration des phoques par exemple.
(Ferguson, 2005)	Océan Arctique	Printemps	Archipel Canadien	La survie des petits phoques annelés (<i>Phoca hispida</i>) peut être influencée par les précipitations. Avec de la pluie, les tanières peuvent s'effondrer et donc exposer à la fois les petits à l'hypothermie, mais aussi aux prédateurs tels que les ours polaires.
(Stirling et Derocher, 1993)	Océan Arctique	Hiver	Archipel Canadien	Conséquences mitigées pour les populations de mammifères marins. La pluie peut provoquer l'effondrement des tanières de maternité des ours polaires et des phoques. Si cela arrive alors que les petits sont encore dans leurs tanières, les effets pourraient être dévastateurs. Aussi, l'effondrement des tanières, pourrait exposer les petits à une mort directe que ce soit, par écrasement, l'hypothermie par exposition à l'environnement humide et frais, mais aussi, pour les petits phoques, aux prédateurs tels que, l'ours polaire et le renard arctique. Tout cela pourrait réduire considérablement la population de phoques mais aussi provoquer le déclin significatif par la suite du nombre d'ours polaires dépendant de la population de phoques.
				Conséquences mitigées pour les populations de mammifères marins. La pluie peut provoquer l'effondrement des tanières de maternité des ours polaires et des phoques. Si cela arrive alors que les petits sont encore dans leurs tanières, les effets pourraient être dévastateurs. Il s'agirait notamment de l'effondrement des tanières, exposant les petits à, une mort directe par écrasement, l'hypothermie par exposition à l'environnement humide et frais, mais aussi, pour les petits phoques, aux prédateurs tels que, l'ours polaire et le renard arctique. Ces prédateurs auraient alors un certain temps une source de nourriture plus facile et abondante.
(Hezel et al., 2012)	Océan Arctique	Printemps	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian Shelf, Arctique Central	Une augmentation des pluies en avril et mai (comme simulée dans les modèles CMIP5) aurait un impact supplémentaire sur l'habitat des phoques en le réduisant. En se basant uniquement sur un seuil d'épaisseur de neige de 20 cm en avril, il est estimé que la superficie moyenne d'habitat potentiel pour la reproduction du phoque annelé au nord de 70°N diminue de près de 70 % au cours du 21e siècle dans le RCP8.5 des modèles CMIP5.

Annexe 24. Tableau résumant et synthétisant les données extraites des études incluses dans la revue de la portée concernant les tendances de l'impact de la pluie sur les mammifères et oiseaux marins, selon la localité, temporalité et secteurs. Le code couleur des tendances signifie : rouge = diminution ou impact négatif ; vert = augmentation ou impact positif.

Référence	Localité	Temporalité	Secteurs	Tendance
(IPCC, 2019)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf, Arctique Central	La formation de glace à partir d'épisodes de pluie sur neige est associée à des changements dans les populations de grands herbivores, notamment des cas de famine massive catastrophique.
(IPCC, 2021)	Océan Arctique	Hiver	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian shelf, Arctique Central	L'augmentation des pluies hivernales peut créer une barrière solide conduisant à un développement plus fréquent de conditions de pâturage difficiles pour la faune et le bétail.
		Annuelle		Les épisodes de pluie sur neige peuvent créer une barrière solide conduisant à un développement plus fréquent de conditions de pâturage difficiles pour la faune et le bétail.
(Grenfell et Putkonen, 2008)	Océan Arctique	Hiver	Archipel Canadien	Les épisodes hivernaux sévères de pluie sur neige créent une ou plusieurs couches de glace solides dans la neige qui agissent comme une barrière au pâturage des ongulés. Ces événements sont liés au déclin des troupeaux d'ongulés à grande échelle (rennes, caribous, wapitis, boeufs musqués), en raison de la famine et d'une réduction du taux de reproduction. En 2003, un grave événement a provoqué la mort d'environ 20000 boeufs musqués. L'eau de pluie avait gelée à la base du manteau neigeux préexistant et a formé une couche de glace qui s'est avérée trop épaisse pour que les animaux puissent la pénétrer et accéder à leurs ressources alimentaires à la surface du sol.
(Serreze et al., 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian Shelf	Les événements de pluie sur neige vont engendrer des couches de glace créant une barrière pour la recherche de nourriture. Par exemple, en novembre 2013, la glace a complètement empêché les rennes de se nourrir, entraînant la mort de 61000 animaux entre novembre 2013 et juin 2014. Ces barrières naturelles peuvent forcer (surtout au début de l'hiver) les animaux à élargir leur aire de pâturage, épuisant leurs réserves de graisse corporelle et de protéines pour la recherche de neige molle. Le poids au printemps, la reproduction, la taille des veaux, la capacité de survie des adultes, sont tous inférieurs lorsque les animaux sont incapables de satisfaire leurs besoins énergétiques. La perte d'énergie peut d'ailleurs conduire à l'avortement des petits à la fin de l'hiver et au début du printemps, et à de faibles taux de survie des veaux à la fin du printemps et au début de l'été. Les caribous eux, vont aller étendre leur aire de répartition, provoquant une concurrence avec d'autres pour la nourriture et entraînant souvent l'éloignement de leur troupeau. Il a été constaté pour les rennes que le manque de nouveaux veaux associé au déclin de la santé globale du troupeau peut éliminer plusieurs générations de veaux d'un troupeau, conduisant à un effondrement de la population des années après l'événement de pluie sur neige. Le givrage s'accompagne régulièrement de formation de moisissures sur les pâturages au début de l'hiver, ce qui peut avoir de graves effets (négatifs) sur la condition des herbivores. Le givrage peut également favoriser la disparition des cycles des lemmings, provoquant alors le crash des prédateurs de l'Arctique tels que les harfangs des neiges et le renard arctique qui en dépendent. Les événements de pluie sur neige influencent également les espèces d'oiseaux cherchant refuge dans le manteau neigeux, notamment les hiboux, lagopèdes et les téttras en augmentant leur aire de répartition.
(Descamps et al., 2017)	Océan Arctique	Hiver	Secteur Atlantique	Les pluies hivernales créent de la glace qui bloque l'accès à la nourriture pour les herbivores terrestres en emprisonnant la végétation. Cela a synchronisé la dynamique de population de la guilda herbivores-prédateurs, concernant notamment, le renne du Svalbard (Rangifer tarandus platyrhynchus), le lagopède alpin du Svalbard (Lagopus muta hyperborean), le campagnol frère (Microtus levis), et avec un certain retard, leur principal prédateur/charognard, le renard arctique (Vulpes lagopus). Les changements du climat hivernal et la fréquence d'apparition des événements de pluie sur neige ont aussi affecté le comportement des rennes du Svalbard, soit, l'utilisation de l'habitat et le régime alimentaire). Ces événements représentent probablement l'une des facettes les plus importantes du changement climatique en cours pour les écosystèmes terrestres de l'Arctique.
(Berger et al., 2018)	Océan Arctique	Annuelle	Siberian Shelf	Les événements de pluie sur neige peuvent enfoncer le sol dans la glace, empêchant les mammifères terrestres, dont le boeuf musqué, d'accéder à la nourriture. En 2003, il a été estimé à 20000 le nombre de boeufs musqués (Ovibus moschatus) morts suite à un épisode hivernal de pluie sur neige. Des événements plus petits peuvent entraîner un gel partiel ou complet du sol, et donc un accès réduit à la nourriture avec donc des effets potentiellement négatifs sur la condition physique des animaux.
		Hiver		Les précipitations hivernales tombant sous forme de pluie peuvent réduire le manteau neigeux, ce qui réduira alors ensuite les coûts métaboliques liés à la recherche de nourriture dans la neige profonde.
(Langlois et al., 2017)	Océan Arctique	Annuelle	Archipel Canadien	Le nombre de Caribous de Peary diminue avec l'augmentation de la fréquence des événements de pluie sur neige et de givrage. Ces événements météorologiques entraînant des conditions de pâturage hivernal plus difficiles. Les hivers avec plus de trois événements de pluie sur neige sont associés à un nombre plus faible de caribous en été, tandis que les hivers avec des événements rares ou inexistantes sont associés à un nombre de caribous plus élevé.
(Walsh et al., 2020)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian Shelf	La pluie verglaçante, ou pluie sur neige est un type d'événement extrême, ayant des répercussions majeures en Arctique en formant une couche de glace pouvant entraîner des pénuries alimentaires hivernales pour les herbivores de l'Arctique. Étant donné que les couches de glace peuvent persister pendant des semaines, voire des mois, cela va entraîner une réduction de la masse corporelle et de la condition physique globale des herbivores, entraînant des taux de mortalité plus élevés chez les espèces les moins mobiles (comme le boeuf musqué). Cela peut donc influencer la dynamique des populations de prédateurs ou de consommateurs secondaires comme le renard arctique. Les effets négatifs sur les herbivores des événements de pluie sur neige peuvent, contre-intuitivement, être atténués chez les espèces très mobiles comme le caribou, qui sont capables de localiser de meilleures conditions de fourrage. Cela entraîne alors des taux de mortalité plus faibles et une fécondité plus élevée. Des travaux récents suggèrent qu'à mesure que certains événements extrêmes deviennent plus fréquents (comme la pluie sur neige), les populations d'herbivores pourraient évoluer vers des classes d'âge plus résilientes, réduisant alors les effondrements de population lors des futurs événements.

Annexe 25. Tableau résumant et synthétisant les données extraites des études incluses dans la revue de la portée concernant les tendances de l'impact de la pluie sur la biologie terrestre, selon la localité, temporalité et secteurs. Le code couleur des tendances signifie : rouge = diminution ou impact négatif ; vert = augmentation ou impact positif. (Partie 1)

Référence	Localité	Temporalité	Secteurs	Tendance
(Hansen et Aanes, 2012)	Océan Arctique	Hiver	Secteur Atlantique	<p>Suite à des événements de pluie sur neige importants en 2010, une épaisse couche de glace recouvrait environ 98% des chaînes de plaine au Svalbard, bloquant presque entièrement l'accès aux rennes au fourrage terrestre.</p> <p>Les événements de pluie sur neige et le givrage associé peuvent également déclencher d'importants changements dans la niche d'alimentation des herbivores arctiques. Il a été révélé qu'en 2010, 13% de la population totale des rennes côtiers (26 sur 206) et 21% d'une sous-population se nourrissaient de varech et d'algues échouées sur le pied de glace. Une utilisation de ces aliments non terrestres n'avait jamais été démontrée ni quantifiée auparavant chez le renne du Svalbard. Aussi, les veaux étaient surreprésentés parmi les individus appliquant cette stratégie de recherche de nourriture, en outre, certainement car ce groupe démographique a la plus faible capacité pour rivaliser et/ou se frayer un chemin vers les quelques sites d'alimentation terrestres libres de glace. Il s'agit donc probablement d'une dernière tentative pour éviter la famine.</p>
(McCrystall et al., 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Mer de Béring, Siberian Shelf, Arctic Central	<p>Les événements de pluie sur neige peuvent être dévastateurs pour les populations de caribous sauvages, de rennes et de boeufs musqués.</p> <p>La transition vers un Arctique plus chaud et plus humide n'a pas que des impacts négatifs. Certaines populations d'oiseaux migrateurs ont considérablement augmentées.</p>
(Bintanja et Andry, 2017)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Arctique Central	<p>Les précipitations tombant sous forme de pluie au lieu de neige ont un impact important sur l'écosystème arctique, avec des épisodes plus fréquents de temps relativement doux, de pluie, et de givre (surtout en hiver), affectant alors la disponibilité alimentaire de la faune. Cela pose notamment problème pour la recherche de nourriture des rennes, conduisant à des famines et à un déclin important de la population. Engendrant par la suite des fluctuations considérables, voire, des tendances (irréversibles) dans l'écosystème vulnérable de l'Arctique.</p>
(Bartsch et al., 2023)	Océan Arctique	Hiver	Secteur Atlantique, Mer de Beaufort, Siberian Shelf	<p>Les événements de pluie sur neige modifiant les propriétés de la neige et pouvant conduire à la formation de croûtes de glace impactent fortement la faune, dont, les rennes, caribous, boeufs musqués, renards, corbeaux. Les croûtes de glace vont notamment emprisonner le sol et donc la végétation qui s'y trouvent, bloquant l'accès à la nourriture.</p> <p>Des modifications de comportement ont d'ailleurs été remarquées, concernant la migration des caribous avec un changement de direction ces dernières années.</p>
(Hansen et al., 2014)	Océan Arctique	Hiver	Secteur Atlantique	<p>Les événements de pluie sur neige peuvent impacter les populations de grands herbivores (rennes, caribous) en créant des barrières naturelles de glace, limitant la migration des animaux vers des aires de répartition libres de glace, mais aussi bloquant l'accès à la nourriture. Cela pouvant entraîner une famine massive. Par exemple, en 2012, malgré des conditions d'alimentation hivernales très favorables jusqu'à la vague de chaleur extrême et les événements de pluie sur neige, le nombre de carcasses retrouvées lors des recensements de l'été 2012 était parmi les plus élevés jamais enregistrés, et les indices de mortalité estimés pour l'hiver 2012 étaient donc globalement très élevés. Certains grands prédateurs comme le renard arctique (<i>Vulpes lagopus</i>) sont aussi influencés, notamment par les changements dans la disponibilité des proies et/ou carcasses de rennes. Il est probable que les effets de ces événements de pluie sur neige aient un impact indirect ensuite sur des proies migratrices tels que des oiseaux nicheurs au sol, provoquant des cascades trophiques à travers l'ensemble du réseau trophique.</p>

Annexe 26. Tableau résumant et synthétisant les données extraites des études incluses dans la revue de la portée concernant les tendances de l'impact de la pluie sur la biologie terrestre, selon la localité, temporalité et secteurs. Le code couleur des tendances signifie : rouge = diminution ou impact négatif ; vert = augmentation ou impact positif. (Partie 2)

Référence	Localité	Temporalité	Secteurs	Tendance
(Kwok et al., 2003)	Océan Arctique	Printemps + été	Mer de Beaufort	Signal de fonte possiblement retardé à cause des effets de l'humidité de la neige sur l'émissivité de la surface aux longueurs d'onde des micro-ondes passives. Cela pourrait entraîner une variabilité des signatures qui pourraient perturber les procédures de détection. ».
(Serreze et al., 2021)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian Shelf, Arctic Central	De nombreuses lacunes subsistent dans les connaissances des impacts des événements de pluie sur neige. Notamment à propos des incertitudes liées à la détection de l'eau liquide sur le manteau neigeux à partir des données satellitaires, de la détection de ces événements et de la quantité de précipitations à partir des réanalyses atmosphériques.
(Schreiber et Serreze, 2020)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Archipel Canadien, Mer de Beaufort, Siberian Shelf, Arctic Central	Les estimations de la concentration de la glace de mer en été à partir des récupérations passives par micro-ondes peuvent être influencées par la fonte de surface, ce qui affecte également les modifications calculées de la concentration de la glace de mer sur 4 jours. Les effets météorologiques (c'est-à-dire la vapeur d'eau, l'eau liquide des nuages, la vitesse du vent) peuvent également influencer les récupérations.
(Stroeve et al., 2022)	Océan Arctique	Annuelle	Secteur Atlantique, Siberian Shelf, Arctic Central	En modifiant la rétrodiffusion radar et l'émissivité des micro-ondes, les événements de pluie sur neige sur la glace de mer peuvent influencer la précision des variables de la glace de mer extraites de l'altimétrie radar par satellite, des diffusiomètres et des radiomètres passifs à micro-ondes. Ces événements hivernaux sur la glace de mer peuvent générer des couches de glace à la surface ou dans le manteau neigeux qui pourraient modifier l'énergie radar émise et rétrodiffusée utilisée pour récupérer diverses variables géophysiques de la glace de mer, telles que la concentration de glace de mer, l'épaisseur de la glace, la profondeur de la neige et le moment de la fonte et du gel. La présence d'eau liquide ou les changements dans la structure de la neige et/ou des couches de glace résultant d'un événement de pluie sur neige pendant la saison froide pourraient fausser les récupérations d'épaisseur. Il est d'ailleurs attendu que le détroit de Fram jusqu'au pôle Nord soit déjà plus vulnérable aux biais potentiels dans les variables de glace de mer récupérées par satellite en raison des couches de glace résultantes des événements de pluie sur neige et/ou des températures de l'air plus chaudes. La rétrodiffusion radar diminue en fait à cause de l'atténuation du signal par l'eau liquide (due à une plus grande perte diélectrique). Aussi, couplé à des manteaux neigeux moins profonds au sommet de la couverture de glace, de la formation ultérieure de glace et du fait que les manteaux neigeux au dessus de la glace de première année aient une teneur en saumure non négligeable affectant aussi l'émission des micro-ondes et la rétrodiffusion, les récupérations d'épaisseur et de profondeur de neige deviendront de plus en plus difficile dans les décennies à venir.
(Ehn et al., 2006)	Océan Arctique	Printemps	Archipel Canadien	Dans la plupart des conditions météorologiques, les dômes des capteurs sont restés dégagés du gel ou des gouttelettes d'eau pendant la journée, mais lors des épisodes de pluie, il n'a pas été possible de maintenir les dômes dégagés et les données peuvent être affectées par les gouttelettes d'eau.

Annexe 27. Tableau résumant et synthétisant les données extraites des études incluses dans la revue de la portée concernant les tendances de l'impact de la pluie sur les biais en télédétection, selon la localité, temporalité et secteurs. Le code couleur des tendances signifie : rouge = diminution ou impact négatif ; vert = augmentation ou impact positif.

Nombre d'études/ Impact	Impact	Localisation	Secteur	Tendance	Nombre d'études
(n = 8)	Glace de mer : volume et non défini (n = 3)	Océan Arctique (n = 3)	Secteur Atlantique	Augmentation	1
				Diminution	1
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	1
				Diminution	1
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	1
			Mer de Beaufort	Augmentation	1
			Diminution	1	
		Archipel Canadien	Augmentation	1	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	1	
			Diminution	1	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 9)	Glace de mer : extension (n = 3)	Océan Arctique (n = 2)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	2
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	1
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	1
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	1	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	2	
		Océan Austral (n = 1)	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	1
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	1			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	1			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	1			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 4)	Glace de mer : épaisseur (n = 1)	Océan Arctique (n = 1)	Secteur Atlantique	Augmentation	1
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	1
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	1
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	1	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	1	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 13)	Fonte (n = 8)	Océan Arctique (n = 7)	Secteur Atlantique	Augmentation	5
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	4
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	2
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	4
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	3	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	5	
			Diminution	-	
		Océan Austral (n = 2)	Mer de Weddell	Augmentation	1
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	1
				Diminution	-
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		1		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	1			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	1			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		

Annexe 29. Tableau résumant le nombre d'étude faisant référence à un impact en particulier selon chaque secteur, selon les données annuelles des études incluses dans la revue de la portée. (Partie 1)

Nombre d'études/ impact	Impact	Localisation	Secteur	Tendance	Nombre d'études
(n = 17)	<i>Superimposed ice</i> (n = 7)	Océan Arctique (n = 7)	Secteur Atlantique	Augmentation	6
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	5
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	2
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	5
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	6	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	5	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 5)	Croûtes et lentilles de glace (n = 2)	Océan Arctique (n = 2)	Secteur Atlantique	Augmentation	2
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	2
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	1
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	1	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	2	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 3)	<i>Flooding</i> et glace de mer (n = 2)	Océan Arctique (n = 2)	Secteur Atlantique	Augmentation	2
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	2
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	1
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	2
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	2	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	2	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 1)	<i>Slush layer</i> (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		

Annexe 29. Tableau résumant le nombre d'étude faisant référence à un impact en particulier selon chaque secteur, selon les données annuelles des études incluses dans la revue de la portée. (Partie 2)

Nombre d'études/ impact	Impact	Localisation	Secteur	Tendance	Nombre d'études
(n = 4)	Densité/conductivité (n = 2)	Océan Arctique (n = 2)	Secteur Atlantique	Augmentation	1
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	1
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	1
				Diminution	-
		Océan Austral	Archipel Canadien	Augmentation	1
				Diminution	-
			Arctique Central	Augmentation	1
				Diminution	-
			Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
Autres mers	Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-		
		Diminution	-		
	Mer de Ross	Augmentation	-		
		Diminution	-		
	Antarctique Est	Augmentation	-		
		Diminution	-		
	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 15)	Couche de neige (n = 9)	Océan Arctique (n = 8)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	6
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	5
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	4
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
				Diminution	4
		Océan Austral (n = 1)	Archipel Canadien	Augmentation	-
				Diminution	3
			Arctique Central	Augmentation	-
				Diminution	5
			Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	1
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
Autres mers	Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-		
		Diminution	1		
	Mer de Ross	Augmentation	-		
		Diminution	1		
	Antarctique Est	Augmentation	-		
		Diminution	1		
	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 9)	Échanges de chaleur (n = 3)	Océan Arctique (n = 3)	Secteur Atlantique	Augmentation	3
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	2
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	2
				Diminution	-
		Océan Austral	Archipel Canadien	Augmentation	2
				Diminution	-
			Arctique Central	Augmentation	2
				Diminution	-
			Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
Autres mers	Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-		
		Diminution	-		
	Mer de Ross	Augmentation	-		
		Diminution	-		
	Antarctique Est	Augmentation	-		
		Diminution	-		
	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 12)	Albédo (n = 5)	Océan Arctique (n = 5)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	4
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	3
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
				Diminution	3
		Océan Austral	Archipel Canadien	Augmentation	-
				Diminution	3
			Arctique Central	Augmentation	-
				Diminution	4
			Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
Autres mers	Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-		
		Diminution	-		
	Mer de Ross	Augmentation	-		
		Diminution	-		
	Antarctique Est	Augmentation	-		
		Diminution	-		
	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		

Annexe 29. Tableau résumant le nombre d'étude faisant référence à un impact en particulier selon chaque secteur, selon les données annuelles des études incluses dans la revue de la portée. (Partie 3)

Nombre d'études/ impact	Impact	Localisation	Secteur	Tendance	Nombre d'études
(n = 4)	Bassins de fonte (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 2)	Flushing (n = 1)	Océan Arctique (n = 1)	Secteur Atlantique	Augmentation	1
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	1
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	1	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 5)	Producteurs primaires (n = 3)	Océan Arctique (n = 3)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	2
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	1
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		

Annexe 29. Tableau résumant le nombre d'étude faisant référence à un impact en particulier selon chaque secteur, selon les données annuelles des études incluses dans la revue de la portée. (Partie 4)

Nombre d'études/ impact	Impact	Localisation	Secteur	Tendance	Nombre d'études
(n = 4)	Mammifères et oiseaux marins (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
		Mer de Beaufort	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 13)	Biologie terrestre (n = 6)	Océan Arctique (n = 8)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	6
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	6
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	4
		Mer de Beaufort	Augmentation	-	
			Diminution	5	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	3	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	4	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 5)	Biais en télédétection (n = 3)	Océan Arctique (n = 3)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	3
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	3
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
		Mer de Beaufort	Augmentation	-	
			Diminution	2	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	2	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	3	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		

Annexe 29. Tableau résumant le nombre d'étude faisant référence à un impact en particulier selon chaque secteur, selon les données annuelles des études incluses dans la revue de la portée. (Partie 5)

Nombre d'études/ Impact	Impact	Localisation	Secteur	Tendance	Nombre d'études
(n = 8)	Glace de mer : volume et non défini (n = 2)	Océan Arctique (n = 1)	Secteur Atlantique	Augmentation	1
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	1
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
				Diminution	-
		Océan Austral (n = 1)	Archipel Canadien	Augmentation	1
				Diminution	-
			Arctique Central	Augmentation	1
				Diminution	-
			Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	1
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
Autres mers	Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-		
		Diminution	1		
	Mer de Ross	Augmentation	-		
		Diminution	1		
	Antarctique Est	Augmentation	-		
		Diminution	1		
	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 9)	Glace de mer : extension (n = 1)	Océan Arctique (n = 1)	Secteur Atlantique	Augmentation	1
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	1
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	1
				Diminution	-
		Océan Austral	Archipel Canadien	Augmentation	1
				Diminution	-
			Arctique Central	Augmentation	1
				Diminution	-
			Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
Autres mers	Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-		
		Diminution	-		
	Mer de Ross	Augmentation	-		
		Diminution	-		
	Antarctique Est	Augmentation	-		
		Diminution	-		
	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 4)	Glace de mer : épaisseur (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
				Diminution	-
		Océan Austral	Archipel Canadien	Augmentation	-
				Diminution	-
			Arctique Central	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
Autres mers	Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-		
		Diminution	-		
	Mer de Ross	Augmentation	-		
		Diminution	-		
	Antarctique Est	Augmentation	-		
		Diminution	-		
	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 13)	Fonte (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
				Diminution	-
		Océan Austral	Archipel Canadien	Augmentation	-
				Diminution	-
			Arctique Central	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
Autres mers	Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-		
		Diminution	-		
	Mer de Ross	Augmentation	-		
		Diminution	-		
	Antarctique Est	Augmentation	-		
		Diminution	-		
	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		

Annexe 30. Tableau résumant le nombre d'étude faisant référence à un impact en particulier selon chaque secteur, selon les données automnales des études incluses dans la revue de la portée. (Partie 1)

Nombre d'études/ impact	Impact	Localisation	Secteur	Tendance	Nombre d'études
(n = 17)	<i>Superimposed ice</i> (n = 1)	Océan Arctique (n = 1)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	1	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 5)	Croûtes et lentilles de glace (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 3)	<i>Flooding</i> et glace de mer (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 1)	<i>Slush layer</i> (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		

Annexe 30. Tableau résumant le nombre d'étude faisant référence à un impact en particulier selon chaque secteur, selon les données automnales des études incluses dans la revue de la portée. (Partie 2)

Nombre d'études/ Impact	Impact	Localisation	Secteur	Tendance	Nombre d'études
(n = 4)	Densité/conductivité (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-
			Diminution	-	
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 15)	Couche de neige (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-
			Diminution	-	
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 9)	Échanges de chaleur (n = 1)	Océan Arctique (n = 1)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	1	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-
			Diminution	-	
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 12)	Albédo (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-
			Diminution	-	
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		

Annexe 30. Tableau résumant le nombre d'étude faisant référence à un impact en particulier selon chaque secteur, selon les données automnales des études incluses dans la revue de la portée. (Partie 3)

Nombre d'études/ impact	Impact	Localisation	Secteur	Tendance	Nombre d'études
(n = 4)	Bassins de fonte (n = 1)	Océan Arctique (n = 1)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	1	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 2)	Flushing (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 5)	Producteurs primaires (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		

Annexe 30. Tableau résumant le nombre d'étude faisant référence à un impact en particulier selon chaque secteur, selon les données automnales des études incluses dans la revue de la portée. (Partie 4)

Nombre d'études/ impact	Impact	Localisation	Secteur	Tendance	Nombre d'études
(n = 4)	Mammifères et oiseaux marins (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
		Diminution		-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 13)	Biologie terrestre (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
		Diminution		-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 5)	Biais en télédétection (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
		Diminution		-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		

Annexe 30. Tableau résumant le nombre d'étude faisant référence à un impact en particulier selon chaque secteur, selon les données automnales des études incluses dans la revue de la portée. (Partie 5)

Nombre d'études/ Impact	Impact	Localisation	Secteur	Tendance	Nombre d'études
(n = 8)	Glace de mer : volume et non défini (n = 3)	Océan Arctique (n = 2)	Secteur Atlantique	Augmentation	1
				Diminution	1
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	1
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	1
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
				Diminution	-
		Océan Austral (n = 1)	Archipel Canadien	Augmentation	-
				Diminution	1
			Arctique Central	Augmentation	-
				Diminution	1
			Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	1
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
Autres mers	Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-		
		Diminution	1		
	Mer de Ross	Augmentation	-		
		Diminution	1		
	Antarctique Est	Augmentation	-		
		Diminution	1		
	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 9)	Glace de mer : extension (n = 2)	Océan Arctique (n = 2)	Secteur Atlantique	Augmentation	1
				Diminution	1
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	1
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
				Diminution	1
		Océan Austral	Archipel Canadien	Augmentation	-
				Diminution	-
			Arctique Central	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
Autres mers	Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-		
		Diminution	-		
	Mer de Ross	Augmentation	-		
		Diminution	-		
	Antarctique Est	Augmentation	-		
		Diminution	-		
	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 4)	Glace de mer : épaisseur (n = 2)	Océan Arctique (n = 2)	Secteur Atlantique	Augmentation	2
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	1
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	1
				Diminution	-
		Océan Austral	Archipel Canadien	Augmentation	1
				Diminution	-
			Arctique Central	Augmentation	1
				Diminution	-
			Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
Autres mers	Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-		
		Diminution	-		
	Mer de Ross	Augmentation	-		
		Diminution	-		
	Antarctique Est	Augmentation	-		
		Diminution	-		
	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 13)	Fonte (n = 2)	Océan Arctique (n = 1)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	1
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
				Diminution	-
		Océan Austral	Archipel Canadien	Augmentation	-
				Diminution	-
			Arctique Central	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
Autres mers (n = 1)	Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-		
		Diminution	-		
	Mer de Ross	Augmentation	-		
		Diminution	-		
	Antarctique Est	Augmentation	-		
		Diminution	-		
	Zone non polaire	Augmentation	1		
		Diminution	-		

Annexe 31. Tableau résumant le nombre d'étude faisant référence à un impact en particulier selon chaque secteur, selon les données hivernales des études incluses dans la revue de la portée. (Partie 1)

Nombre d'études/ Impact	Impact	Localisation	Secteur	Tendance	Nombre d'études	
(n = 17)	<i>Superimposed ice</i> (n = 9)	Océan Arctique (n = 8)	Secteur Atlantique	Augmentation	6	
				Diminution	-	
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	5	
				Diminution	-	
			Mer de Béring	Augmentation	2	
				Diminution	-	
			Mer de Beaufort	Augmentation	2	
				Diminution	-	
		Océan Austral	Archipel Canadien	Augmentation	1	
				Diminution	-	
			Arctique Central	Augmentation	2	
				Diminution	-	
			Mer de Weddell	Augmentation	-	
		Autres mers (n = 1)	Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-	
				Diminution	-	
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-			
	Diminution		-			
Mer de Ross	Augmentation		-			
(n = 5)	Croûtes et lentilles de glace (n = 2)	Océan Arctique (n = 1)	Antarctique Est	Augmentation	-	
				Diminution	-	
			Zone non polaire	Augmentation	1	
				Diminution	-	
			Océan Austral	Secteur Atlantique	Augmentation	1
					Diminution	-
				<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	1
					Diminution	-
		Mer de Béring		Augmentation	-	
				Diminution	-	
		Mer de Beaufort		Augmentation	1	
			Diminution	-		
		Autres mers (n = 1)	Archipel Canadien	Augmentation	-	
				Diminution	-	
			Arctique Central	Augmentation	-	
	Diminution		-			
Mer de Weddell	Augmentation		-			
	Diminution		-			
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-			
Autres mers (n = 1)	Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-			
		Diminution	-			
	Mer de Ross	Augmentation	-			
		Diminution	-			
	Antarctique Est	Augmentation	-			
		Diminution	-			
	Zone non polaire	Augmentation	1			
	Diminution	-				
(n = 3)	<i>Flooding et glace de mer</i> (n = 1)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-	
				Diminution	-	
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-	
				Diminution	-	
			Mer de Béring	Augmentation	-	
				Diminution	-	
			Mer de Beaufort	Augmentation	-	
				Diminution	-	
		Océan Austral	Archipel Canadien	Augmentation	-	
				Diminution	-	
			Arctique Central	Augmentation	-	
				Diminution	-	
			Mer de Weddell	Augmentation	-	
				Diminution	-	
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-	
Autres mers (n = 1)	Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-			
		Diminution	-			
	Mer de Ross	Augmentation	-			
		Diminution	-			
	Antarctique Est	Augmentation	-			
		Diminution	-			
	Zone non polaire	Augmentation	1			
	Diminution	-				
(n = 1)	<i>Slush layer</i> (n = 1)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-	
				Diminution	-	
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-	
				Diminution	-	
			Mer de Béring	Augmentation	-	
				Diminution	-	
			Mer de Beaufort	Augmentation	-	
				Diminution	-	
		Océan Austral	Archipel Canadien	Augmentation	-	
				Diminution	-	
			Arctique Central	Augmentation	-	
				Diminution	-	
			Mer de Weddell	Augmentation	-	
				Diminution	-	
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-	
Autres mers (n = 1)	Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-			
		Diminution	-			
	Mer de Ross	Augmentation	-			
		Diminution	-			
	Antarctique Est	Augmentation	-			
		Diminution	-			
	Zone non polaire	Augmentation	1			
	Diminution	-				

Annexe 31. Tableau résumant le nombre d'étude faisant référence à un impact en particulier selon chaque secteur, selon les données hivernales des études incluses dans la revue de la portée. (Partie 2)

Nombre d'études/ impact	Impact	Localisation	Secteur	Tendance	Nombre d'études
(n = 4)	Densité/conductivité (n = 2)	Océan Arctique (n = 1)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
			Augmentation	-	
			Diminution	-	
			Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
	Augmentation	-			
	Diminution	-			
	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers (n = 1)	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 15)	Couche de neige (n = 1)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
			Augmentation	-	
			Diminution	-	
			Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
	Augmentation	-			
	Diminution	-			
	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers (n = 1)	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	1		
(n = 9)	Échanges de chaleur (n = 3)	Océan Arctique (n = 3)	Secteur Atlantique	Augmentation	2
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	2
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	1
			Diminution	-	
			Augmentation	1	
			Diminution	-	
			Augmentation	1	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
	Augmentation	-			
	Diminution	-			
	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 12)	Albédo (n = 2)	Océan Arctique (n = 1)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	1
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
			Augmentation	-	
			Diminution	-	
			Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
	Augmentation	-			
	Diminution	-			
	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers (n = 1)	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	1		

Annexe 31. Tableau résumant le nombre d'étude faisant référence à un impact en particulier selon chaque secteur, selon les données hivernales des études incluses dans la revue de la portée. (Partie 3)

Nombre d'études/ impact	Impact	Localisation	Secteur	Tendance	Nombre d'études
(n = 4)	Bassins de fonte (n = 1)	Océan Arctique (n = 1)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			Siberian Shelf	Augmentation	1
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
		Diminution		-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-
		Diminution		-	
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 2)	Flushing (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			Siberian Shelf	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
		Diminution		-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-
		Diminution		-	
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 5)	Producteurs primaires (n = 1)	Océan Arctique (n = 1)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	1
			Siberian Shelf	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
		Diminution		-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-
		Diminution		-	
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		

Annexe 31. Tableau résumant le nombre d'étude faisant référence à un impact en particulier selon chaque secteur, selon les données hivernales des études incluses dans la revue de la portée.
(Partie 4)

Nombre d'études/ impact	Impact	Localisation	Secteur	Tendance	Nombre d'études
(n = 4)	Mammifères et oiseaux marins (n = 3)	Océan Arctique (n = 3)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	1
			Siberian Shelf	Augmentation	-
				Diminution	1
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
		Diminution		1	
		Archipel Canadien	Augmentation	1	
			Diminution	3	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	1	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-
Diminution	-				
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 13)	Biologie terrestre (n = 7)	Océan Arctique (n = 7)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	5
			Siberian Shelf	Augmentation	1
				Diminution	2
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	1
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
		Diminution		2	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	2	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	1	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-
Diminution	-				
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 5)	Biais en télédétection (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			Siberian Shelf	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
		Diminution		-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-
Diminution	-				
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		

Annexe 31. Tableau résumant le nombre d'étude faisant référence à un impact en particulier selon chaque secteur, selon les données hivernales des études incluses dans la revue de la portée. (Partie 5)

Nombre d'études/ impact	Impact	Localisation	Secteur	Tendance	Nombre d'études
(n = 8)	Glace de mer : volume et non défini (n = 1)	Océan Arctique (n = 1)	Secteur Atlantique	Augmentation	1
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 9)	Glace de mer : extension (n = 2)	Océan Arctique (n = 2)	Secteur Atlantique	Augmentation	1
				Diminution	1
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	1
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 4)	Glace de mer : épaisseur (n = 3)	Océan Arctique (n = 3)	Secteur Atlantique	Augmentation	2
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	1
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	1
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	1	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	1	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 13)	Fonte (n = 6)	Océan Arctique (n = 5)	Secteur Atlantique	Augmentation	2
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	3
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	1
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	3
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	2	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	1	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers (n = 1)	Mer d'Azov	Augmentation	1		
		Diminution	-		

Annexe 32. Tableau résumant le nombre d'étude faisant référence à un impact en particulier selon chaque secteur, selon les données printanières des études incluses dans la revue de la portée. (Partie 1)

Nombre d'études/ impact	Impact	Localisation	Secteur	Tendance	Nombre d'études
(n = 17)	<i>Superimposed ice</i> (n = 2)	Océan Arctique (n = 2)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	1
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	1	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 5)	Croûtes et lentilles de glace (n = 1)	Océan Arctique (n = 1)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	1	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 3)	<i>Flooding</i> et glace de mer (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 1)	<i>Slush layer</i> (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		

Annexe 32. Tableau résumant le nombre d'étude faisant référence à un impact en particulier selon chaque secteur, selon les données printanières des études incluses dans la revue de la portée. (Partie 2)

Nombre d'études/ impact	Impact	Localisation	Secteur	Tendance	Nombre d'études
(n = 4)	Densité/conductivité (n = 2)	Océan Arctique (n = 1)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers (n = 1)	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 15)	Couche de neige (n = 5)	Océan Arctique (n = 5)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	1
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	2
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	3	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	1	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 9)	Échanges de chaleur (n = 3)	Océan Arctique (n = 3)	Secteur Atlantique	Augmentation	2
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	3
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	2
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	2	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	1	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 12)	Albédo (n = 7)	Océan Arctique (n = 6)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	1
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	2
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	2	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	3	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	1	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers (n = 1)	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	1		

Annexe 32. Tableau résumant le nombre d'étude faisant référence à un impact en particulier selon chaque secteur, selon les données printanières des études incluses dans la revue de la portée. (Partie 3)

Nombre d'études/ impact	Impact	Localisation	Secteur	Tendance	Nombre d'études
(n = 4)	Bassins de fonte (n = 4)	Océan Arctique (n = 4)	Secteur Atlantique	Augmentation	2
				Diminution	-
			Siberian Shelf	Augmentation	3
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	1
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	2
		Diminution		-	
		Archipel Canadien	Augmentation	2	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	1	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-
		Diminution	-		
		Mer de Ross	Augmentation	-	
			Diminution	-	
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 2)	Flushing (n = 1)	Océan Arctique (n = 1)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			Siberian Shelf	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
		Diminution		-	
		Archipel Canadien	Augmentation	1	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-
		Diminution	-		
		Mer de Ross	Augmentation	-	
			Diminution	-	
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 5)	Producteurs primaires (n = 1)	Océan Arctique (n = 1)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			Siberian Shelf	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
		Diminution		-	
		Archipel Canadien	Augmentation	1	
			Diminution	1	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-
		Diminution	-		
		Mer de Ross	Augmentation	-	
			Diminution	-	
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		

Annexe 32. Tableau résumant le nombre d'étude faisant référence à un impact en particulier selon chaque secteur, selon les données printanières des études incluses dans la revue de la portée. (Partie 4)

Nombre d'études/ impact	Impact	Localisation	Secteur	Tendance	Nombre d'études
(n = 4)	Mammifères et oiseaux marins (n = 3)	Océan Arctique (n = 3)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	2
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	2
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
		Diminution		2	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	3	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	2	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
Diminution	-				
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
Diminution	-				
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 13)	Biologie terrestre (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
		Diminution		-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
Diminution	-				
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
Diminution	-				
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 5)	Biais en télédétection (n = 2)	Océan Arctique (n = 2)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
		Diminution		1	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	1	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation	-
Diminution	-				
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
Diminution	-				
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		

Annexe 32. Tableau résumant le nombre d'étude faisant référence à un impact en particulier selon chaque secteur, selon les données printanières des études incluses dans la revue de la portée. (Partie 5)

Nombre d'études/ Impact	Impact	Localisation	Secteur	Tendance	Nombre d'études
(n = 8)	Glace de mer : volume et non défini (n = 2)	Océan Arctique (n = 2)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	2
			Siberian Shelf	Augmentation	-
				Diminution	2
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
		Diminution		2	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	2	
		Océan Austral	Arctique Central	Augmentation	-
				Diminution	2
			Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 9)	Glace de mer : extension (n = 3)	Océan Arctique (n = 3)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	3
			Siberian Shelf	Augmentation	-
				Diminution	2
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
		Diminution		1	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	1	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	1	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 4)	Glace de mer : épaisseur (n = 1)	Océan Arctique (n = 1)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	1
			Siberian Shelf	Augmentation	-
				Diminution	1
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
		Diminution		1	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	1	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	1	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 13)	Fonte (n = 2)	Océan Arctique (n = 2)	Secteur Atlantique	Augmentation	1
				Diminution	-
			Siberian Shelf	Augmentation	1
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	2
		Diminution		-	
		Archipel Canadien	Augmentation	1	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		

Annexe 33. Tableau résumant le nombre d'étude faisant référence à un impact en particulier selon chaque secteur, selon les données estivales des études incluses dans la revue de la portée. (Partie 1)

Nombre d'études/ impact	Impact	Localisation	Secteur	Tendance	Nombre d'études		
(n = 17)	<i>Superimposed ice</i> (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation Diminution	- -		
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation Diminution	- -		
			Mer de Béring	Augmentation Diminution	- -		
			Mer de Beaufort	Augmentation Diminution	- -		
			Archipel Canadien	Augmentation Diminution	- -		
			Arctique Central	Augmentation Diminution	- -		
			Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation Diminution	- -	
		Péninsule Antarctique Ouest		Augmentation Diminution	- -		
		Mers de Bellingshausen et d'Amundsen		Augmentation Diminution	- -		
		Mer de Ross		Augmentation Diminution	- -		
		Antarctique Est		Augmentation Diminution	- -		
		Autres mers	Zone non polaire	Augmentation Diminution	- -		
		(n = 5)	Croûtes et lentilles de glace (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation Diminution	- -
					<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation Diminution	- -
					Mer de Béring	Augmentation Diminution	- -
					Mer de Beaufort	Augmentation Diminution	- -
					Archipel Canadien	Augmentation Diminution	- -
Arctique Central	Augmentation Diminution				- -		
Océan Austral	Mer de Weddell				Augmentation Diminution	- -	
	Péninsule Antarctique Ouest			Augmentation Diminution	- -		
	Mers de Bellingshausen et d'Amundsen			Augmentation Diminution	- -		
	Mer de Ross			Augmentation Diminution	- -		
	Antarctique Est			Augmentation Diminution	- -		
Autres mers	Zone non polaire			Augmentation Diminution	- -		
(n = 3)	<i>Flooding et glace de mer</i> (n = 0)			Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation Diminution	- -
					<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation Diminution	- -
					Mer de Béring	Augmentation Diminution	- -
					Mer de Beaufort	Augmentation Diminution	- -
					Archipel Canadien	Augmentation Diminution	- -
		Arctique Central	Augmentation Diminution		- -		
		Océan Austral	Mer de Weddell		Augmentation Diminution	- -	
			Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation Diminution	- -		
			Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation Diminution	- -		
			Mer de Ross	Augmentation Diminution	- -		
			Antarctique Est	Augmentation Diminution	- -		
		Autres mers	Zone non polaire	Augmentation Diminution	- -		
		(n = 1)	<i>Slush layer</i> (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation Diminution	- -
					<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation Diminution	- -
					Mer de Béring	Augmentation Diminution	- -
					Mer de Beaufort	Augmentation Diminution	- -
					Archipel Canadien	Augmentation Diminution	- -
Arctique Central	Augmentation Diminution				- -		
Océan Austral	Mer de Weddell				Augmentation Diminution	- -	
	Péninsule Antarctique Ouest			Augmentation Diminution	- -		
	Mers de Bellingshausen et d'Amundsen			Augmentation Diminution	- -		
	Mer de Ross			Augmentation Diminution	- -		
	Antarctique Est			Augmentation Diminution	- -		
Autres mers	Zone non polaire			Augmentation Diminution	- -		

Annexe 33. Tableau résumant le nombre d'étude faisant référence à un impact en particulier selon chaque secteur, selon les données estivales des études incluses dans la revue de la portée. (Partie 2)

Nombre d'études/ Impact	Impact	Localisation	Secteur	Tendance	Nombre d'études
(n = 4)	Densité/conductivité (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			Siberian Shelf	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 15)	Couche de neige (n = 1)	Océan Arctique (n = 1)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			Siberian Shelf	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	1	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 9)	Échanges de chaleur (n = 2)	Océan Arctique (n = 2)	Secteur Atlantique	Augmentation	2
				Diminution	-
			Siberian Shelf	Augmentation	2
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	2
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	2	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 12)	Albédo (n = 3)	Océan Arctique (n = 3)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	1
			Siberian Shelf	Augmentation	-
				Diminution	1
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	2	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	1	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	1	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		

Annexe 33. Tableau résumant le nombre d'étude faisant référence à un impact en particulier selon chaque secteur, selon les données estivales des études incluses dans la revue de la portée.
(Partie 3)

Nombre d'études/ impact	Impact	Localisation	Secteur	Tendance	Nombre d'études
(n = 4)	Bassins de fonte (n = 2)	Océan Arctique (n = 2)	Secteur Atlantique	Augmentation	2
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	2
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	1
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	2
		Diminution		-	
		Archipel Canadien	Augmentation	2	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	1	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 2)	<i>Flushing</i> (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
		Diminution		-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 5)	Producteurs primaires (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
		Diminution		-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		

Annexe 33. Tableau résumant le nombre d'étude faisant référence à un impact en particulier selon chaque secteur, selon les données estivales des études incluses dans la revue de la portée. (Partie 4)

Nombre d'études/ impact	Impact	Localisation	Secteur	Tendance	Nombre d'études
(n = 4)	Mammifères et oiseaux marins (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 13)	Biologie terrestre (n = 0)	Océan Arctique	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	-	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		
(n = 5)	Biais en télédétection (n = 1)	Océan Arctique (n = 1)	Secteur Atlantique	Augmentation	-
				Diminution	-
			<i>Siberian Shelf</i>	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Béring	Augmentation	-
				Diminution	-
			Mer de Beaufort	Augmentation	-
			Diminution	1	
		Archipel Canadien	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Arctique Central	Augmentation	-	
			Diminution	-	
		Océan Austral	Mer de Weddell	Augmentation	-
				Diminution	-
Péninsule Antarctique Ouest	Augmentation		-		
	Diminution		-		
Mers de Bellingshausen et d'Amundsen	Augmentation		-		
	Diminution	-			
Mer de Ross	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Antarctique Est	Augmentation	-			
	Diminution	-			
Autres mers	Zone non polaire	Augmentation	-		
		Diminution	-		

Annexe 33. Tableau résumant le nombre d'étude faisant référence à un impact en particulier selon chaque secteur, selon les données estivales des études incluses dans la revue de la portée.
(Partie 5)