



Département de géomatique appliquée

Faculté des lettres et sciences humaines

Détection et cartographie des événements de pluie sur neige dans le nord
des Territoires du Nord-Ouest

Par Florence Larouche

Essai présenté à la Faculté des lettres et sciences humaines

en vue de l'obtention du grade de

Maître ès sciences (M. Sc.) en géomatique appliquée et télédétection

Janvier 2026

© Florence Larouche, 2026

Jury d'évaluation

Supervision de l'essai

Alexandre Langlois

Département de géomatique appliquée

Université de Sherbrooke

Examineur interne

Frédéric Bouchard

Département de géomatique appliquée

Université de Sherbrooke

Dépôt initial : 7 janvier 2026

Dépôt final : 14 janvier 2026

Résumé

Les régions arctiques connaissent un réchauffement accéléré par rapport à la moyenne mondiale, un phénomène connu sous le nom d'amplification arctique. Ce réchauffement entraîne une augmentation de la fréquence et de l'intensité de plusieurs événements météorologiques extrêmes, dont les événements de pluie sur neige (PSN). Ces événements peuvent entraîner des conséquences durables sur les écosystèmes nordiques et des impacts majeurs sur les communautés autochtones et la faune, notamment les caribous, pour lesquels l'accès à la nourriture hivernale peut être compromis.

L'objectif principal de ce projet est de détecter et de cartographier les événements de PSN dans la région entourant la communauté de Tuktoyaktuk, dans le nord des Territoires du Nord-Ouest, pour la période 1988–2023. Pour se faire, un algorithme de détection de PSN par micro-ondes passives développé au Groupe de Recherche Interdisciplinaire sur les Milieux Polaires (GRIMP) a été employé. Puisque le territoire à l'étude se situe dans une zone de transition entre la taïga et la toundra, la présence de végétation peut affecter le signal satellitaire par sa transmissivité. Les objectifs spécifiques incluent la correction de l'influence des arbres sur les températures de brillance (T_B), la production de cartes spatio-temporelles des PSN à l'aide d'un algorithme basé sur le rapport de gradient polarisé (GRP), ainsi que l'évaluation des liens entre les PSN et les variations de populations de caribous.

Les données utilisées proviennent principalement du jeu de données Calibrated Enhanced Resolution Brightness Temperature (CETB) pour les T_B micro-ondes, du modèle North American Regional Reanalysis (NARR) pour l'eau précipitable atmosphérique, des cartes de couverture neigeuse de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), de données d'occupation du sol et de volume forestier, ainsi que des observations météorologiques d'Environnement et Changement climatique Canada. Une correction atmosphérique et une correction de la transmissivité de la végétation ont été appliquées aux T_B afin d'obtenir un signal plus représentatif de la neige au sol.

Les résultats montrent que la correction de la transmissivité des arbres améliore la détection des PSN, notamment dans les zones forestières, en augmentant le nombre de détections cohérentes avec les observations *in situ*, bien qu'elle entraîne aussi une hausse des faux positifs. Une tendance à la hausse du nombre de jours et de la superficie affectée par les PSN est observée sur la période étudiée. Enfin, les analyses statistiques révèlent des corrélations négatives entre l'occurrence des PSN et les populations de caribous, particulièrement pour les troupeaux de Tuktoyaktuk et de Cape Bathurst, suggérant que les PSN constituent un facteur important pour ces populations. Ce travail met en évidence le potentiel de la télédétection micro-ondes passives pour appuyer la gestion des impacts climatiques en milieu nordique et soutenir les communautés locales.

Mots-clés : Pluie sur neige; micro-ondes passives; température de brillance; transmissivité; caribous; changements climatiques; Territoires du Nord-Ouest.

Table des matières

Résumé	i
Table des matières	iii
Liste des tableaux	v
Liste des figures	vi
Liste des sigles et des acronymes.....	vii
Liste des symboles	viii
Remerciements.....	ix
1. Introduction	1
1.1. Mise en contexte.....	1
1.2. Problématique.....	2
1.3. Objectifs	4
2. Cadre théorique.....	5
2.1. Détection de PSN par micro-ondes passives	5
2.2. Corrections atmosphériques	6
2.3. Couverture neigeuse	6
2.4. Détection de PSN par données <i>in situ</i>	7
2.5. Transmissivité des arbres.....	7
3. Matériel et méthodes.....	9
3.1. Territoire d'étude	9
3.2. Données	11
3.2.1. Micro-ondes passives (MOP).....	11
3.2.2. Eau précipitable.....	11
3.2.3. Couverture neigeuse.....	12
3.2.4. Occupation du sol.....	12
3.2.5. Volume forestier	12
3.2.6. Données météorologiques	13
3.2.7. Populations de caribous.....	14
3.3. Méthodes d'analyse	15
3.3.1. Zone d'étude.....	15
3.3.2. Correction des températures de brillance	16
3.3.3. Correction de la contribution de végétation	17
3.3.4. Détection de PSN	18
3.3.5. Validation	20
3.3.6. Événements de PSN à grande échelle	21
4. Résultats.....	22
4.1. Correction de la transmissivité des arbres	22
4.2. Occurrence de PSN.....	25
4.3. Tendances à long-terme	28
4.4. Populations de caribous.....	30
5. Discussion et conclusion.....	34

5.1. Évaluation de l'atteinte des objectifs de l'essai	34
5.2. Contribution de l'essai.....	35
5.3. Recommandations	36
Bibliographie.....	38
Annexe 1. Cartes de détection des événements grande échelle de PSN	43

Liste des tableaux

Tableau 1 Paramètres du modèle de transmissivité de Langlois et al. (2011).....	8
Tableau 2 Capteurs sélectionnés	11
Tableau 3 Indicateurs de détection d'événements de PSN	21
Tableau 4 Métriques de performance pour les stations d'Aklavik et d'Inuvik avant et après correction de transmissivité des arbres.....	23
Tableau 5 Métriques de performance pour les stations de Paulatuk, Tuktoyaktuk et Trail Valley.....	23
Tableau 6 Liste des événements grande échelle de PSN.....	27
Tableau 7 coefficients de corrélations entre les populations de caribous et les événements de PSN	32

Liste des figures

Figure 1- Répartition des sous-espèces de caribou dans les Territoires du Nord-Ouest (Environment and Natural Resources, 2016; 2017)	3
Figure 2 Site d'étude et communautés (NWT Centre for Geomatics, s.d.; Natural Resources Canada, 2011)	9
Figure 3 Classes d'écozones sur le territoire (Canada, 2023; Natural Resources Canada, 2011)	10
Figure 4 Stations météorologiques d'ECCC dans la zone d'étude (Environnement et ressources naturelles Canada, s.d.)	13
Figure 5 Schéma méthodologique	15
Figure 6 Données de volume et masques (Beaudoin, 2014)	17
Figure 7 Seuil de température quotidienne moyenne	20
Figure 8 Nombre total de détections de PSN entre 1988 et 2023	22
Figure 9 Total des PSN sur les années 1988-2023	24
Figure 10 Exemple de cartes d'événements grande échelle de PSN	26
Figure 11 Nombre total de pixels de PSN par année	29
Figure 12 Nombre de jours de PSN par année	29
Figure 13 Population de Tuktoyaktuk et jours de PSN par année	31
Figure 14 Population de Cape Bathurst et jours de PSN par année	31
Figure 15 Population de Bluenose-Ouest et jours de PSN par année	32

Liste des sigles et des acronymes

PSN	Pluie sur neige
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GRIMP	Groupe de Recherche Interdisciplinaire sur les Milieux Polaires
MOP	Micro-ondes passives
GR	Rapport de gradient
GRP	Rapport de gradient polarisé
DBSCAN	Density-Based spatial clustering of applications with noise
CETB	Calibrated Enhanced Resolution Brightness Temperature
NARR	North American Regional Reanalysis
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
IMS	Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System
CALU	Circumarctic Land cover Units
IFN	l'inventaire forestier national du Canada
VP	Vrai positif
VN	Vrai négatif
FP	Faux positif
FN	Faux négatif

Liste des symboles

T_B	Température de brillance
$T_{Bf\ raw}$	Température de brillance brute à la fréquence
$T_{Bf\ corrected}$	Température de brillance corrigée
$T_{B\ atm\uparrow}$	Contribution atmosphérique ascendante
GR	Rapport de gradient
GRP	Rapport de gradient polarisé
τ	Transmissivité
t_{veg}	Transmissivité de la végétation
SV	Volume forestier (m ³ /ha)
ε	Paramètre de distance (Epsilon)

Remerciements

Je souhaite remercier Josée-Anne Langlois pour m'avoir offert l'opportunité de travailler sur un projet motivant et inspirant. Son accompagnement, sa générosité et ses conseils tout au long du projet ont été précieux.

Je tiens à remercier mon directeur d'essai, Alexandre Langlois, pour sa disponibilité et son expertise, et la confiance qu'il m'a accordée, tant pour ce projet que pour la suite de mon parcours académique.

Merci à ma famille et mes ami.es pour leurs encouragements constants et leur soutien tout au long de mes études.

Enfin, je remercie David pour son écoute et sa présence depuis la dernière année.

1. Introduction

Cette section présente les impacts occasionnés par les changements climatiques dans le nord du Canada, et décrit plus spécifiquement les événements de pluie sur neige (PSN) et ses conséquences pour les communautés du nord des Territoires du Nord-Ouest et pour les caribous. Les objectifs de la recherche sont présentés, qui visent principalement à la détection et cartographie des événements de PSN dans la région entourant la communauté de Tuktoyaktuk (Territoires du Nord-Ouest).

1.1. Mise en contexte

Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a partagé dans son dernier rapport que la température de surface moyenne aurait augmenté d'environ 1,09 °C depuis les années 1850-1900 à 2011-2020, dont 1,07 °C serait attribuable aux activités anthropiques (Calvin *et al.*, 2023). Cependant, ce réchauffement et ses conséquences ne sont pas répartis de façon homogène sur le globe. En effet, le milieu arctique se réchauffe entre deux et quatre fois plus vite que la moyenne mondiale suivant un phénomène appelé amplification arctique (Rantanen *et al.*, 2022; Cohen *et al.*, 2014; Hansen *et al.*, 2014; Serreze et Barry, 2011), attribuable à une série de cinq rétroactions climatiques positives (Serreze et Barry, 2011). Un réchauffement aussi rapide en milieu arctique est à l'origine de plusieurs conséquences, dont l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements météorologiques extrêmes (Zhang *et al.*, 2025). On note parmi ceux-ci l'augmentation de la fréquence des vagues de chaleur et des épisodes où la température est au-dessus de 0 °C (Cohen *et al.*, 2014; Hansen *et al.*, 2014; Rennert *et al.*, 2009), un changement de la durée des périodes d'eaux libres (*p. ex.* polynies) dans les mers arctiques (Couture, 2022; Klein, 1999; Naakka *et al.*, 2025), l'augmentation de la fréquence des tempêtes cycloniques océaniques (Klein, 1999; Song *et al.*, 2025) ainsi que l'augmentation de la fréquence des événements de PSN (Cohen *et al.*, 2014; Hansen *et al.*, 2014; Klein, 1999; Rennert *et al.*, 2009; Sasseville *et al.*, 2024).

Les événements de PSN sont des périodes pendant lesquelles des précipitations liquides tombent sur une couverture neigeuse, suivies d'une chute de température, entraînant la création d'une couche de glace dans le manteau neigeux ou à la surface du sol (Serreze *et al.*, 2021; Hansen *et al.*, 2014; Rennert *et al.*, 2009; Grenfell et Putkonen, 2008). Ces événements sont généralement de courte durée, c'est-à-dire de quelques heures à quelques jours, mais leurs impacts peuvent persister sur les écosystèmes pendant des années (Serreze *et al.*, 2021; Rennert *et al.*, 2009). Les

événements de PSN influencent la structure de la neige, l'albédo, la densité, la conductivité et le régime thermique du sol, et peuvent être à l'origine d'avalanches en déstabilisant le manteau neigeux et en fournissant une surface dure et glissante (Serreze *et al.*, 2021; Hansen *et al.*, 2014; Rennert *et al.*, 2009). Ces événements peuvent également avoir des impacts socio-économiques négatifs chez les populations locales, notamment sur le transport, le tourisme, les infrastructures et l'alimentation (Serreze *et al.*, 2021; Hansen *et al.*, 2014).

Les événements de PSN peuvent être aussi dévastateurs pour la faune, notamment pour les oiseaux qui se réfugient dans le manteau neigeux, pour les campagnols et les lemmings dont le cycle de reproduction peut être influencé par le givrage, ainsi que pour les populations de prédateurs arctiques (Serreze *et al.*, 2021). Toutefois, l'impact le plus dévastateur des événements de PSN est probablement la création de couches de glaces qui empêchent les grands herbivores d'atteindre leur nourriture (Langlois *et al.*, 2017; Serreze *et al.*, 2021; Tyler, 2010). Les couches de glace dans le manteau neigeux affectent la capacité des ongulés comme le caribou et le bœuf musqué à se déplacer et à atteindre leur nourriture : les lichens de surface riches en nutriments (Serreze *et al.*, 2021; Mallory et Boyce, 2018; Hansen *et al.*, 2014; Rennert *et al.*, 2009; Klein, 1999). La limitation de l'accès aux ressources alimentaires chez les caribous peut engendrer la malnutrition et des famines, accroître les déficits énergétiques liés à l'expansion du territoire de recherche de nourriture, compromettre la capacité des troupeaux à se rétablir par la reproduction et conduire à des mortalités massives (Serreze *et al.*, 2021; Mallory et Boyce, 2018; Hansen *et al.*, 2014; Rennert *et al.*, 2009).

1.2. Problématique

Le caribou occupe une place importante dans les communautés des Territoires du Nord-Ouest; il existe une relation sacrée entre cet animal et les communautés autochtones du territoire depuis des milliers d'années (Conference of Management Authority, 2020). Non seulement le caribou est une ressource alimentaire essentielle, mais il a aussi une influence pour de nombreux peuples autochtones sur les plans social, culturel et spirituel (Conference of Management Authority, 2020; Prowse *et al.*, 2009).

Deux sous-espèces de caribou se retrouvent au nord des Territoires du Nord-Ouest dans les régions d'Inuvik et de Sahtu : le caribou boréal (*Rangifer tarandus caribou*) ainsi que le caribou de la toundra (*Rangifer tarandus groenlandicus*) (figure 1). Le caribou boréal vit dans la taïga,

principalement sous la ligne des arbres. Le caribou de la toundra est quant à lui le plus répandu dans le territoire. Cette sous-espèce se distingue en différents troupeaux, séparés en fonction de leurs aires de mise-bas. On retrouve les troupeaux de Bluenose-Est, Bluenose-West, Cape Bathurst, Porupine et de Tuktoyaktuk Peninsula (Government of the Northwest Territories, s.d.).

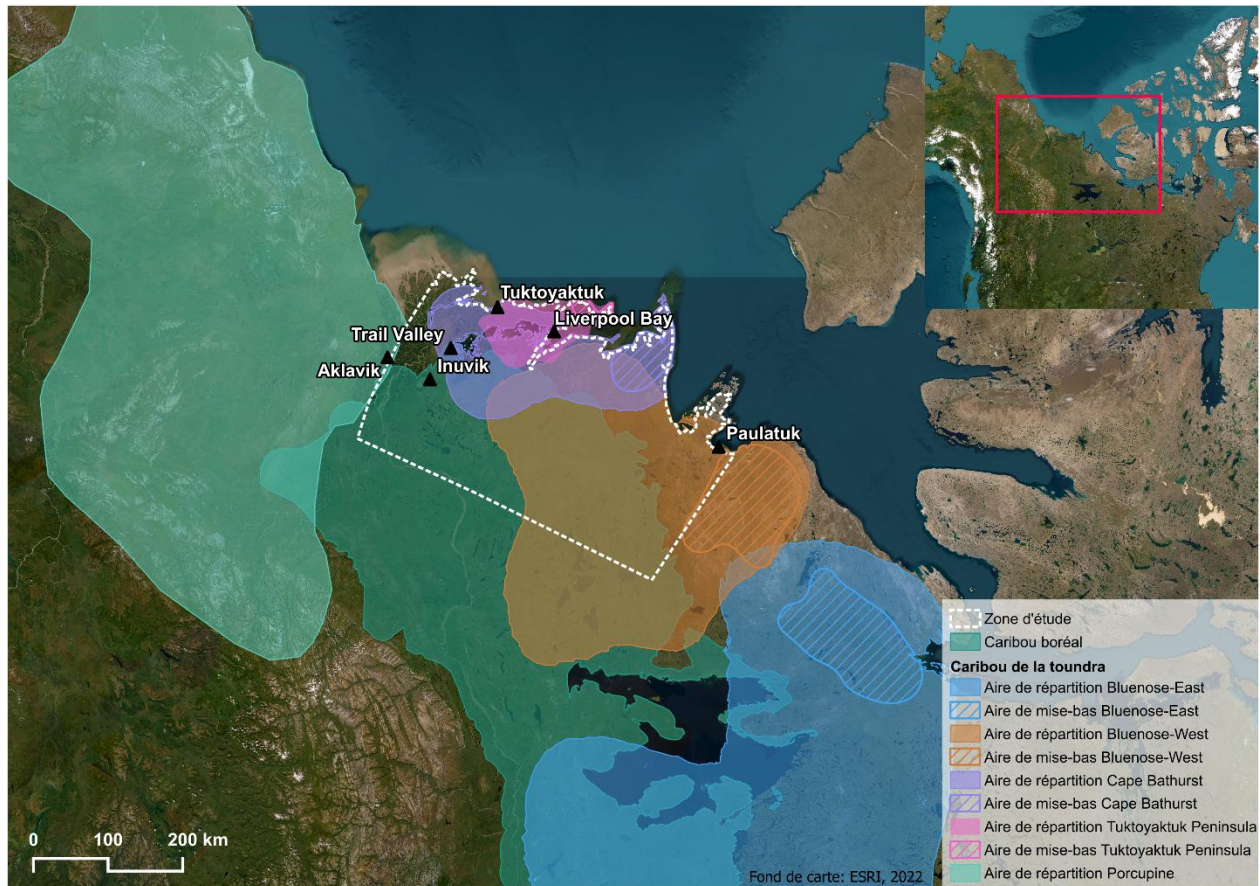


Figure 1- Répartition des sous-espèces de caribou dans les Territoires du Nord-Ouest (Environment and Natural Resources, 2016; 2017)

Bien qu'il soit connu que la taille et l'abondance des hardes de caribous des Territoires du Nord-Ouest sont cycliques, certains troupeaux dont ceux de la péninsule de Tuktoyaktuk, de Bluenose-East et de Bathurst ont subi un déclin en raison d'un ensemble de menaces et d'effets cumulatifs incluant les événements de PSN (Beaulieu, 2012; Tyler, 2010; Conference of Management Authority, 2020).

Langlois *et al.* (2026) se sont intéressés au cas du caribou de Peary (*Rangifer tarandus pearyi*). Dans le cadre de leur projet, des ateliers collaboratifs de validation de cartes se sont tenus à Yellowknife en 2025 avec des communautés Inuit (Yellowknife PCP map validation workshop,

2025). Des cartes de détection de PSN pour l'île de Banks en Arctique ont été présentées lors de ces ateliers où un membre du *Tuktoyaktuk Hunters & Trappers Committee* a exprimé un intérêt à obtenir des cartes similaires couvrant son territoire, ce qui motive le présent travail.

Bien que des méthodes aient déjà été suggérées pour détecter les événements de PSN (Dolant *et al.*, 2016; Langlois *et al.*, 2026; Sasseville *et al.*, 2024), celles-ci sont surtout employées en milieu polaire où la présence d'arbres est négligeable. Toutefois, le territoire visé par le membre du *Tuktoyaktuk Hunters & Trappers Committee* est en partie sous la ligne des arbres; il est donc nécessaire d'adapter la méthodologie afin de minimiser l'impact de la présence d'arbres sur les résultats.

Il est donc attendu de ce projet qu'il permette de détecter les événements historiques de PSN dans le nord des Territoires du Nord-Ouest et qu'il soit possible d'en faire une analyse spatio-temporelle. On s'attend à une tendance à la hausse de ces événements, et que la fréquence soit plus élevée près de la côte (Langlois *et al.*, 2026). Il est aussi attendu que les événements de PSN détectés concordent avec les variations de population des caribous sur le territoire.

1.3. Objectifs

L'objectif principal du projet est de faire la détection et la cartographie des événements de PSN dans la région entourant la communauté de Tuktoyaktuk. De cet objectif principal découlent les objectifs spécifiques suivants :

- Corriger l'influence des arbres sur les valeurs de température de brillance (T_B) au sol à partir des sources de données satellitaires disponibles;
- À partir des T_B corrigés, produire des cartes des événements de PSN dans le nord des Territoires du Nord-Ouest de 1988 à 2023 à l'aide de l'algorithme développé au Groupe de Recherche Interdisciplinaire sur les Milieux Polaires (GRIMP) (Dolant *et al.*, 2016, 2018; Langlois *et al.*, 2026);
- Évaluer les liens possibles entre l'occurrence et les tendances des PSN détectées et les variations de populations observées chez les caribous.

2. Cadre théorique

Cette section présente des éléments théoriques issus de la littérature à partir desquels ce projet sera construit. Elle décrit entre autres l'apport de la télédétection micro-ondes passives (MOP) dans un contexte de détection de PSN ainsi que les corrections qui peuvent être appliquées aux données.

2.1. Détection de PSN par micro-ondes passives

Les MOP peuvent être utilisées pour faire le suivi spatio-temporel des événements de PSN (Dolant *et al.*, 2016). Le capteur détecte l'intensité de l'émission de la cible, qui est convertie en température de brillance (T_B) en fonction de la température physique et de l'émissivité de la cible (Serreze *et al.*, 2021; Ulaby *et al.*, 1981). L'émissivité de la couverture de neige est influencée par ses propriétés diélectriques et sa rugosité de surface; lorsqu'il y a présence d'eau dans la neige, l'émissivité augmente fortement en raison de la constante diélectrique élevée de l'eau, ce qui augmente aussi la T_B des micro-ondes passives (Serreze *et al.*, 2021). Le signal peut avoir une réponse différente en fonction de la fréquence et de la polarisation de l'onde. Généralement, plus la fréquence est élevée et plus la sensibilité à la présence d'eau près de la surface est élevée (Dolant *et al.*, 2016). Par exemple, dans des conditions normales et sèches, les valeurs de T_B à 19 GHz sont supérieures à celles à 37 GHz, alors que le contraire est observé dans des conditions humides (Sasseville *et al.*, 2024; Dolant *et al.*, 2016). À partir des valeurs de T_B à 19 et 37 GHz, on peut mesurer le rapport de gradient (GR) pour les polarisations horizontale (h) et verticale (v) (Dolant *et al.*, 2016; Grenfell et Putkonen, 2008) (équation 1).

$$GR(pol_{19,37}) = \frac{[T_B(pol_{37}) - T_B(pol_{19})]}{[T_B(pol_{37}) + T_B(pol_{19})]} \quad (1)$$

Dolant *et al.* (2016) ont développé, à partir des valeurs des deux GR (v et h), une nouvelle approche permettant de distinguer les événements de PSN des conditions hivernales normales en calculant le rapport de gradient polarisé (GRP) (équation 2).

$$GRP = \frac{GR_v}{GR_h} \quad (2)$$

Des fortes valeurs négatives de GRP indiquent un événement de PSN, alors que des conditions légèrement humides présentent des fortes valeurs positives. Dolant *et al.* (2018) ont constaté que l'application d'un seuil de -10 aux valeurs de GRP permettait d'obtenir un bon équilibre entre les

omissions et les commissions dans la détection des pixels de PSN, mais que ce seuil pourrait être ajustable selon les différentes applications.

Langlois *et al.* (2026) ont comparé cette méthode à une nouvelle méthode qui consiste à appliquer un seuil plus sensible aux petits épisodes de PSN au GRP, soit de -2, et d'appliquer l'algorithme de regroupement *Density-Based spatial clustering of applications with noise* (DBSCAN). Le paramètre Epsilon (ϵ), soit la distance maximale entre deux points voisins, a été paramétré à 8 km et le paramètre de nombre de pixels minimum d'un regroupement a été paramétré à 7. L'application de cet algorithme permet de retirer les pixels ou groupes de pixels d'un événement de PSN plus petit que 250 km². Il a été constaté que cette nouvelle approche présentait de meilleurs résultats au score F1 et à l'erreur d'omission en comparaison avec les données *in situ*.

2.2. Corrections atmosphériques

Dolant *et al.* (2018) et Langlois *et al.* (2026) ont appliqué une correction atmosphérique aux valeurs de T_B avant de mesurer le GRP en fonction du contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère (PWAT). Les T_B ascendantes de l'atmosphère à 19 et 37 GHz ont été mesurés avec les équations 3 et 4, et les valeurs de transmissivité de l'atmosphère ont été mesurées avec les équations 5 et 6.

$$T_{B_{atm}\uparrow(19)} = (0.879 \cdot PWAT) + 4.780 \quad (3)$$

$$T_{B_{atm}\uparrow(37)} = (0.602 \cdot PWAT) + 18.297 \quad (4)$$

$$\tau_{(19)} = (-0.003 \cdot PWAT) + 0.979 \quad (5)$$

$$\tau_{(37)} = (-0.002 \cdot PWAT) + 0.924 \quad (6)$$

Les T_B corrigées, utilisées pour le calcul du GRP, ont été obtenues à partir de l'équation 7.

$$T_{Bf\ corrected}^{pol} = T_{Bf\ raw}^{pol} \cdot \tau_f + T_{B_{atm}\uparrow f} \quad (7)$$

2.3. Couverture neigeuse

Afin d'éviter les fausses détections de pixels de PSN (c'est-à-dire une détection de PSN alors qu'il n'y en a pas), Langlois *et al.* (2026) et Sasseville *et al.* (2024) ont appliqué un filtre pour s'assurer que les détections soient faites sur des pixels enneigés. Sasseville *et al.* (2024) ont détecté la couverture neigeuse quand la T_B à 19 GHz est supérieure que la T_B à 37 GHz dans la polarisation verticale, qui est un critère utilisé dans les algorithmes d'équivalent en eau de la neige et de profondeur de neige (Sasseville *et al.*, 2024). Langlois *et al.* (2026) ont utilisé des cartes de

couverture neigeuse pour filtrer les pixels où il y a présence de neige. Le jeu de données utilisé contient un indicateur binaire de couverture neigeuse par pixel (1 ou 0). Ainsi, pour qu'une détection de PSN par MOP soit valide, un pixel doit également respecter la condition d'être couvert de neige, et le territoire à l'étude doit être couvert de neige à au moins 70 %.

2.4. Détection de PSN par données *in situ*

Langlois *et al.* (2026) ont utilisé les données historiques des stations météorologiques d'Environnement et Changement climatique Canada pour détecter les événements de PSN *in situ*. À partir des données quotidiennes de précipitations totales, de température moyenne et d'observations météorologiques sur le site d'étude, les auteurs ont déterminé que le seuil de température traçant la limite entre les précipitations liquides et solides était de -1.4 °C. Les auteurs ont également établi que le 5^e percentile de la quantité totale de précipitation quotidienne en automne, soit 0,2 mm de pluie, correspondait au seuil de quantité de précipitations pour identifier un événement de PSN. Les conditions pour détecter un événement de PSN *in situ* sont donc une température quotidienne supérieure ou égale à -1.4 °C ainsi que des précipitations totales quotidiennes supérieures ou égales à 0,2 mm ou une mention de pluie ou de bruine d'un observateur. Ces détections *in situ* ont permis de valider localement les détections de PSN faites par MOP, à condition que celles-ci affectent plus de 5 % des pixels à l'intérieur d'un rayon de 10 km de la station météorologique pour au moins une des deux images de MOP quotidiennes et que les cartes de couverture de neige montraient plus de 70 % de couverture neigeuse.

2.5. Transmissivité des arbres

La radiométrie MOP est grandement utilisée pour l'étude de la neige dans les régions nordiques. Cependant, la présence de forêt peut entraîner des incertitudes dans les résultats puisque la forêt atténue l'émission de la neige au sol et contribue à la radiation émise mesurée (Cohen *et al.*, 2015; Langlois *et al.*, 2011; Li et Kelly, 2017). Langlois *et al.* (2011) ont modélisé la transmissivité de la forêt en fonction de la fraction de forêt et du volume forestier, pour chaque fréquence et polarisation (équation 8)

$$t_{veg,p}(F \cdot SV) = a_p + [1 - a_p] \exp[-b_p \cdot (F \cdot SV)] \quad (8)$$

Les constantes a_p et b_p sont les constantes du modèle, ajustées par régression des moindres carrés partiels (tableau 1).

Tableau 1 Paramètres du modèle de transmissivité de Langlois et al. (2011)

Fréquence (polarisation) (GHz)	Paramètre du modèle de transmissivité	Valeur
19 (V)	a	0,51
	b	0,021
19 (H)	a	0,55
	b	0,020
37 (V)	a	0,52
	b	0,018
37 (H)	a	0,52
	b	0,021

Cette proposition de correction de la végétation permet de réduire significativement l'écart entre les T_B de la neige mesurées par satellite et les T_B de la neige mesurées avec un capteur aéroporté (Langlois *et al.*, 2011).

En somme, la détection des événements de PSN par MOP repose sur une compréhension précise des processus contrôlant l'émissivité de la neige et la réponse spectrale des fréquences sensibles à la présence d'eau liquide. Ainsi, en corrigeant les températures de brillance pour les effets atmosphériques et la contribution de la végétation, il devient possible d'obtenir un signal MOP véritablement représentatif de la neige au sol. Ces T_B corrigées constituent un intrant essentiel pour l'algorithme PSN, permettant une détection plus précise et plus cohérente des événements de pluie sur neige en présence de végétation.

3. Matériel et méthodes

Cette section expose les étapes qui ont permis de réaliser le projet ainsi que le territoire à l'étude, les données utilisées et les traitements appliqués aux données.

3.1. Territoire d'étude

Les limites du territoire d'étude ont été définies pour couvrir la majorité de l'étendue spatiale mentionnée par les membres de la communauté de Tuktoyaktuk lors des ateliers mentionnés précédemment. Le territoire est situé au nord des Territoires du Nord-Ouest et au sud de l'océan Arctique. Il couvre une superficie d'environ 113 275 km². La zone d'étude est située principalement dans la région administrative d'Inuvik, et une petite portion du territoire fait partie de la région administrative de Sahtu, voir figure 2 (NWT Centre for Geomatics, s.d.).



Figure 2 Site d'étude et communautés (NWT Centre for Geomatics, s.d.; Natural Resources Canada, 2011)

La zone d'étude est localisée entre la taïga des plaines et le bas-arctique, c'est-à-dire que la limite entre la forêt boréale et la toundra, ou encore la ligne des arbres, traverse le territoire à l'étude (figure 3) (Canada, 2013).



Figure 3 Classes d'écozones sur le territoire (Canada, 2023; Natural Resources Canada, 2011)

On retrouve dans la zone d'étude les communautés de Inuvik (337 habitants), de Paulatuk (355 habitants), de Tsiigehtchic (183 habitants) et de Tuktoyaktuk (1 026 habitants) (NWT Bureau of Statistics, 2025). Les communautés de Aklavik (648 habitants) et de Fort McPherson (742 habitants), bien qu'elles ne soient pas directement à l'intérieur de la zone d'étude, sont localisées à proximité des limites de la zone (NWT Bureau of Statistics, 2025).

3.2. Données

Les différentes sources de données utilisées dans le cadre de cet essai sont décrites dans cette section.

3.2.1. Micro-ondes passives (MOP)

Les valeurs de T_B ont été extraites du jeu de données *Calibrated Enhanced Resolution Brightness Temperature* (CETB) (Brodzik *et al.*, 2016) aux fréquences 19 et 37 GHz et pour les polarisations horizontale (H) et verticale (V). Le jeu de données est construit à partir des mesures prises par différents capteurs; les capteurs et plateformes dont les valeurs de T_B ont été sélectionnées pour faire la détection des événements de PSN sont présentés dans le tableau 2. La résolution spatiale des mesures de T_B à 19 GHz est de 6,25 par 6,25 km, et de 3,125 par 3,125 km pour les mesures à 37 GHz. Les valeurs de T_B à 19 GHz ont été rééchantillonnées à une résolution spatiale de 3,125 par 3,125 km avec la méthode du plus proche voisin. Les valeurs de T_B sont disponibles deux fois par jour, soit le matin et le soir, pour toute la zone d'étude. Les données ont été téléchargées au format netCDF.

Tableau 2 Capteurs sélectionnés

Capteur	Plateforme	Début de la période couverte	Fin de la période couverte	Version
<i>Special Sensor Microwave/Imager</i> (SSM/I) sur le <i>Defense Meteorological Satellite Program</i> (DMSP)	F8	7 septembre 1987	15 décembre 1991	1,3
	F11	16 décembre 1991	31 août 1998	1,3
	F13	1 ^{er} septembre 1998	30 avril 2008	1,3
<i>Special Sensor Microwave Imager/Sounder</i> (SSMIS) sur le DMSP	F17	1 ^{er} mars 2008	31 décembre 2015	1,3
	F18	1 ^{er} janvier 2016	31 décembre 2023	1,3, 1,4 et 1,5.

3.2.2. Eau précipitable

Le contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère (PWAT) a été extrait du modèle *North American Regional Reanalysis* (NARR) produit par le *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) (Mesinger *et al.*, 2006). Les valeurs d'eau précipitable sont disponibles quotidiennement en format netCDF, et elles ont une résolution spatiale de 32 par 32 km.

3.2.3. Couverture neigeuse

Les données de couverture neigeuse proviennent de la base de données sur la couverture de neige produite par le *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) (Robinson *et al.*, 2012), qui fournit depuis 1966 des cartes hebdomadaires et depuis 1997 des cartes quotidiennes de la couverture de neige au sol de façon binaire. Les cartes créées entre 1980 et 1997 ont été numérisées à une résolution spatiale de 24 km et distribuées comme jeu de données : *Rutgers Northern Hemisphere 24km Weekly Snow Cover Extent* (Robinson et Estilow, 2021). À partir de 1997, les cartes quotidiennes ont été produites par le *Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System* (IMS) (Ramsay, 1998) à une résolution spatiale de 24 par 24 km, puis à une résolution spatiale de 4 par 4 km à partir de 2004 (U.S. National Ice Center, 2008). Il est à noter que pour les données hebdomadaires, la couverture neigeuse est considérée pour la semaine précédant la date attribuée à la valeur (Robinson et Estilow, 2021).

3.2.4. Occupation du sol

Les données d'occupation du sol proviennent de la carte *Circumarctic Land cover Units* (CALU) (Bartsch *et al.*, 2024) générée à partir d'une classification non supervisée avec la méthode *k-means* des images satellitaires de Sentinel-1 dans la bande C-SAR et de Sentinel-2 dans les bandes spectrales, qui a été validée avec des données acquises sur le terrain. La couche de données est en format geoTIFF à une résolution de 10 par 10 m.

3.2.5. Volume forestier

La carte de volume forestier (Beaudoin *et al.*, 2014) a été produite à partir de 26 couches de données géospatiales, comme les données spectrales de MODIS et des variables climatiques et topographiques, sur lesquelles l'algorithme d'apprentissage supervisé des *k* plus proches voisins (*k*NN) a été appliqué. Les données des placettes photographiques de l'inventaire forestier national du Canada (IFN), provenant d'observations normalisées de la surface forestière inventoriée de 2001, sont les données de référence pour l'algorithme. Les polygones issus des placettes photographiques de l'IFN à une résolution spatiale de 25 par 25 m ont été rastérisés et agrégés par moyenne surfacique simple à la résolution spatiale des données de MODIS, soit 250 par 250 m. Les données de volume total représentent le volume total moyen des polygones en m³/ha.

3.2.6. Données météorologiques

Les données météorologiques publiées par Environnement et ressources naturelles Canada proviennent de stations météorologiques. À certaines stations, des données fournies par du personnel telles que les observations sur les phénomènes atmosphériques sont disponibles pour toutes les heures. Des données quotidiennes sont aussi disponibles à partir des données horaires, ainsi que des stations climatiques quotidiennes qui procurent des observations de température et de précipitations. Dans le cadre de ce projet, des données de température et de précipitations ainsi que les observations des phénomènes atmosphériques ont été utilisées des stations d'Aklavik (1988 à 2023), d'Inuvik (1988 à 2023), de Paulatuk (1988 à 2023), de Tuktoyaktuk (1988 à 2023), de Liverpool Bay (1992 à 2023) et de Trail Valley (1998 à 2023) (figure 4) (Environnement et ressources naturelles Canada, s.d.).

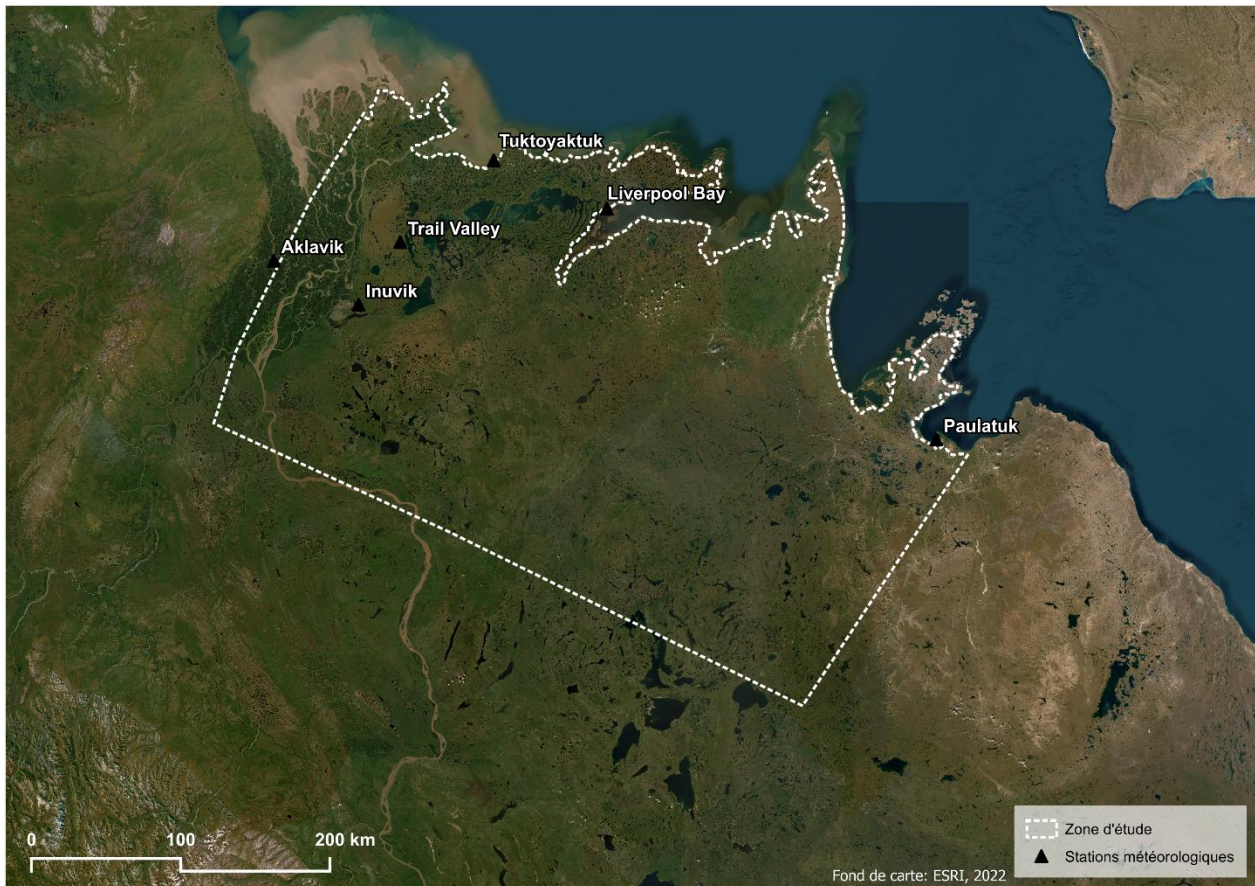


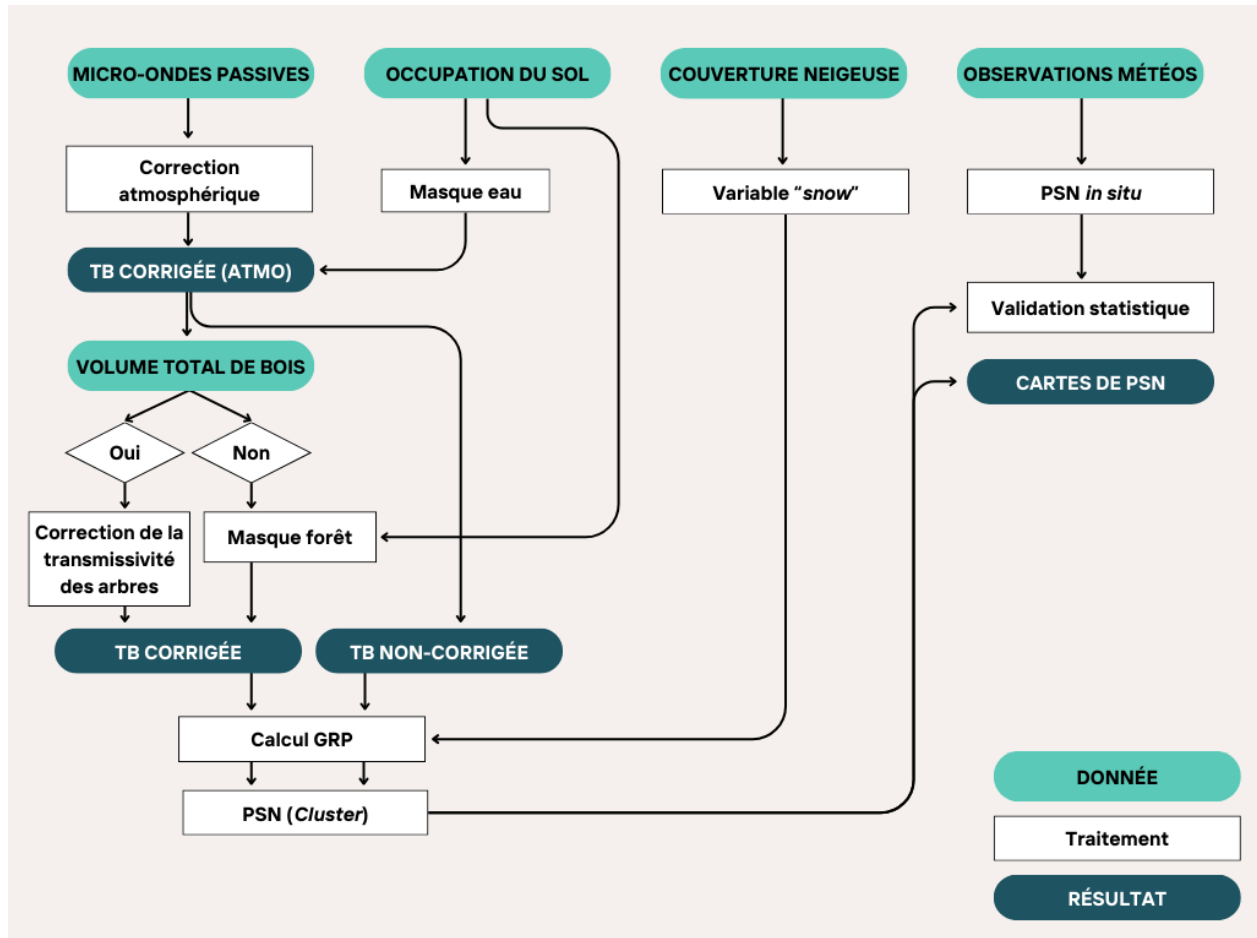
Figure 4 Stations météorologiques d'ECCC dans la zone d'étude (Environnement et ressources naturelles Canada, s.d.)

3.2.7. Populations de caribous

Des données de populations sont disponibles sur le site du gouvernement des Territoires du Nord-Ouest et de Northern Caribou Canada (Conference of Management Authority, 2020; Environment and Climate Change, s.d.-a, s.d.-b, s.d.-c; Northern Caribou Canada, s.d.; Nagy, 2009). Les suivis de populations pour les troupeaux de Cape Bathurst, Tuktoyaktuk, Bluenose-Ouest, Bluenose-Est et Bathurst sont mis en place par des experts des gouvernements et des communautés autochtones (Environment and Climate Change, s.d.-c). Dans le cadre de ce projet, les données pour les troupeaux de Tuktoyaktuk, Bluenose-Ouest et Cape Bathurst sont utilisées. Les suivis de ces troupeaux se font à la période post mise-bas. Un petit avion permet de faire le repérage des troupeaux à partir des colliers satellites que portent quelques individus par troupeau, qui envoient un signal de localisation précise à un satellite une fois par jour. Les observateurs reçoivent aussi un signal radio à courte-distance lorsqu'ils sont à proximité des troupeaux, qui permet de suivre le mouvement des animaux en temps réel. Lorsque les troupeaux sont repérés, des photographies sont prises dans une période maximale de quelques jours pour éviter de compter deux fois le même individu. Les photographies sont visionnées sur un ordinateur, où au moins deux observateurs dénombrent les caribous. Le total de toutes les photographies par troupeau est fait, puis des méthodes statistiques sont utilisées pour estimer les caribous qui auraient pu être manqués. Cette méthode est utilisée environ une fois aux trois ans depuis une vingtaine d'années. Ce suivi permet donc d'estimer la population de chaque troupeau de caribous (Environment and Climate Change, s.d.-c).

3.3. Méthodes d'analyse

Cette section présente les étapes qui ont été effectuées pour réaliser les objectifs. Le schéma méthodologique est illustré à la figure 5.



3.3.1. Zone d'étude

Les limites du territoire d'étude ont été définies pour couvrir la majorité de l'étendue spatiale mentionnée par les membres de la communauté de Tuktoyaktuk lors des ateliers collaboratifs dans le cadre du projet sur le Caribou de Peary avec Environnement et Changement climatique Canada. Un shapefile a été créé, auquel une zone tampon de 1 500 m a été appliquée aux zones côtières afin de réduire l'influence de la présence d'eau sur les traitements de MOP.

3.3.2. Correction des températures de brillance

Les données de T_B de MOP ont été extraites dans quatre fichiers par fréquence et polarisation (19H, 19V, 37H et 37V). Les valeurs pour les journées de septembre à mars inclusivement ont été conservées, puisque l'effet des PSN d'automne et d'hiver est potentiellement plus grand pour les caribous que les PSN de printemps, près de la fonte des neiges.

Les données de PWAT ont été extraites dans un fichier netCDF, puis reprojctées, alignées et rééchantillonnées avec la méthode du plus proche voisin pour correspondre au format des données de T_B . Celles-ci ont été corrigées à partir des équations 3 à 7 pour former quatre nouveaux fichiers netCDF avec les T_B corrigées pour chaque combinaison de fréquence et polarisation.

Les cartes de couverture neigeuse ont été extraites dans un netCDF, puis elles ont été reprojctées et rééchantillonnées avec la méthode du plus proche voisin pour correspondre au format des données de T_B . Pour chacun des quatre fichiers de T_B , la variable *snow* a été ajoutée où, pour chaque pixel, la valeur de 1 indique la présence de neige et la valeur de 0 indique l'absence de neige.

Un masque a été appliqué pour écarter les pixels contenant une superficie importante d'eau. Les données d'occupation du sol de la carte CALU ont été utilisées. D'abord, les pixels du geoTIFF d'occupation du sol ont été alignés avec ceux des netCDF de T_B . Puis, pour chaque pixel de T_B , la proportion des pixels représentant de l'eau dans le fichier d'occupation du sol a été faite. Les pixels dont la moyenne des pixels d'eau était supérieure à 40 % ont été masqués pour la suite des traitements (figure 6) (Wang *et al.*, 2022).

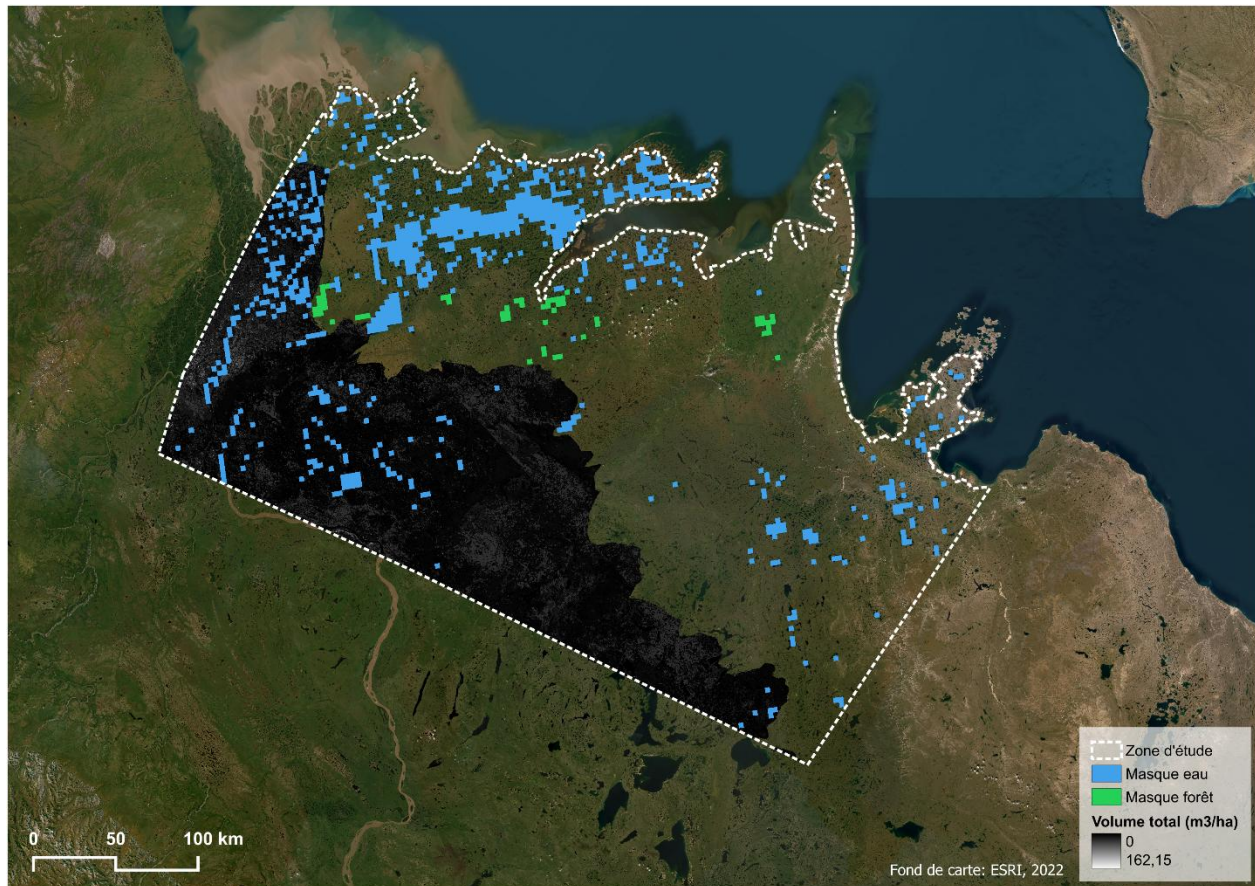


Figure 6 Données de volume et masques (Beaudoin, 2014)

3.3.3. Correction de la contribution de végétation

La carte du volume total de bois a été téléchargée au format geoTIFF, puis alignée et découpée aux limites de la région d'étude. L'étendue de la carte de volume total ne couvre pas l'entièreté de la région d'étude; elle s'arrête environ où commence la toundra (figure 6). Les pixels ont été rééchantillonnés à la résolution spatiale des fichiers netCDF de T_B avec la méthode de moyenne par pixel.

Il peut tout de même y avoir des arbres et des arbustes qui affectent le signal à l'extérieur de la zone couverte par les données de volume forestier. Pour cette raison, certain pixels avec une présence considérable de végétation ont été masqués. Comme pour le masque d'eau, un masque de forêt a donc été créé à partir des données d'occupation du sol de la carte CALU. Les pixels indiqués comme « *forest (deciduous) with dwarf and low shrubs* », « *forest (mixed) with dwarf to tall shrubs* » ou « *forest (needle leave) with dwarf and low shrubs* » ont été considérés comme des

pixels de forêt. Pour chaque pixel des netCDF de T_B , la proportion de pixels de forêt a été mesurée. Si celle-ci était supérieure à 50 % le masque a été appliqué.

Pour la partie de la zone d'étude où les données de volume étaient disponibles, l'influence de la transmissivité des arbres a été corrigée à partir de l'équation 8 (Langlois *et al.*, 2011), qui a été modifiée dans le cadre de ce projet (équation 9). Les valeurs des paramètres a et b sont présentées au tableau 1, et SV indique le volume de bois (*stem volume*) en m^3/ha .

$$t_{veg,pol,f}(SV) = a_{pol,f} + [1 - a_{pol,f}]exp[-b_{pol,f}(SV)] \quad 9$$

Les valeurs de T_B corrigées ont été calculées à partir de l'équation 10.

$$T_{Bsnow} = \frac{T_{Bcorr}}{t_{veg}} \quad 10$$

Pour la suite des traitements, deux jeux de données de T_B ont été utilisés. Le premier est celui avec les T_B corrigées; les corrections de transmissivité ont été faites là où les données de volume étaient disponibles, et le masque de forêt a été appliqué au reste du territoire. Le deuxième jeu de données est celui avec les T_B non corrigées; les corrections de transmissivité n'ont pas été appliquées, et le masque de forêt a été appliqué à tout le territoire d'étude.

3.3.4. Détection de PSN

Les étapes décrites dans cette section ont été appliquées aux deux jeux de données de T_B , soit celui avec les corrections de transmissivité et celui avec le masque de forêt seulement. Ces étapes ont été appliquées pour détecter les événements de PSN et pour vérifier la précision.

3.3.4.1. Détection par MOP

Pour chaque pixel de chacune des deux images journalières des mois de septembre à mars inclusivement, le GR a d'abord été mesuré pour les polarisations h et v à partir de l'équation 1. Ensuite, Le GRP a été calculé avec l'équation 2 à partir des GR mesurés pour les deux polarisations. La variable PSN a été ajoutée au fichier de données de GRP, où la valeur de 1 pour un pixel indique un GRP inférieur à -2 et la présence de neige. Si ces deux conditions ne sont pas respectées pour un pixel, la valeur de la variable PSN est de 0.

L'algorithme de regroupement DBSCAN a été appliqué aux images binaires de PSN, avec le paramètre Epsilon (ϵ) mis à 8 km et le paramètre du nombre minimum de pixels d'un regroupement mis à 7. Les pixels isolés de PSN ont été retirés des images, et les regroupements de pixels affectés par les PSN supérieurs à 250 km^2 ont été conservés.

Le déplacement quotidien d'un caribou serait d'environ 2 à 5 km par jour pendant l'hiver (Bergman *et al.*, 2000; Leclerc et Boulanger, 2018). À une allure de moins de 5 km par jour, Tews *et al.* (2007) ont estimé qu'un caribou de Peary mourrait après 14 jours d'inaccessibilité à la végétation pendant l'hiver. À une allure moyenne de 2 km par jour, un animal nécessiterait de 5 à 8 jours pour se déplacer hors d'une superficie de 250 km². Un événement de PSN qui créerait une couche de glace de 100 à 250 km² pourrait impacter les herbivores en termes d'accès à la végétation et de coût énergétique pour se déplacer à l'extérieur de la zone affectée (Langlois *et al.*, 2026).

3.3.4.2. *Détection in situ*

Les données provenant des stations météorologiques de Aklavik (1988 à 2023), Inuvik (1988 à 2023), Paulatuk (1988 à 2023), Tuktoyaktuk (1988 à 2023), Liverpool Bay (1992 à 2023) et Trail Valley (1998 à 2023) ont été utilisées. Ces stations sont situées à l'intérieur de la zone d'étude ou à moins de 10 km de la limite du site. Pour chacune de ces stations, les données quotidiennes et horaires ont été récupérées lorsque disponibles et ont été concaténées. Il est à noter que les données utiles à la validation (température et précipitations) ne sont pas disponibles tous les jours. Par exemple, les données de validation de la station Liverpool Bay ne couvrent que le mois de novembre 2005 et de janvier à mars 2006, et parmi ces journées, aucun événement de PSN n'a été détecté ni par MOP ni *in situ*, c'est pourquoi les données de cette station n'ont finalement pas été utilisées pour la validation.

Lorsqu'un membre du personnel a observé de la pluie ou de la neige pendant les mois de septembre à mars, les précipitations totales moyennes ainsi que la température moyenne ont été notées aux six stations (Aklavik, Inuvik, Paulatuk, Tuktoyaktuk, Liverpool Bay et Trail Valley). Il y a une différence significative dans la température moyenne quotidienne en fonction du type de précipitations observé par le personnel, c'est-à-dire de la pluie ou de la neige; la valeur de 0,89 a été obtenue dans le test de Kolmogorov-Smirnov, qui permet de déterminer si deux distributions sont statistiquement différentes ou non. Le seuil de température optimal qui sépare les deux fonctions de distribution cumulatives est de -1,00 °C (figure 7). Un seuil de 0,20 mm de pluie a été défini, basé sur le 5^e percentile de la quantité totale de précipitation quotidienne.

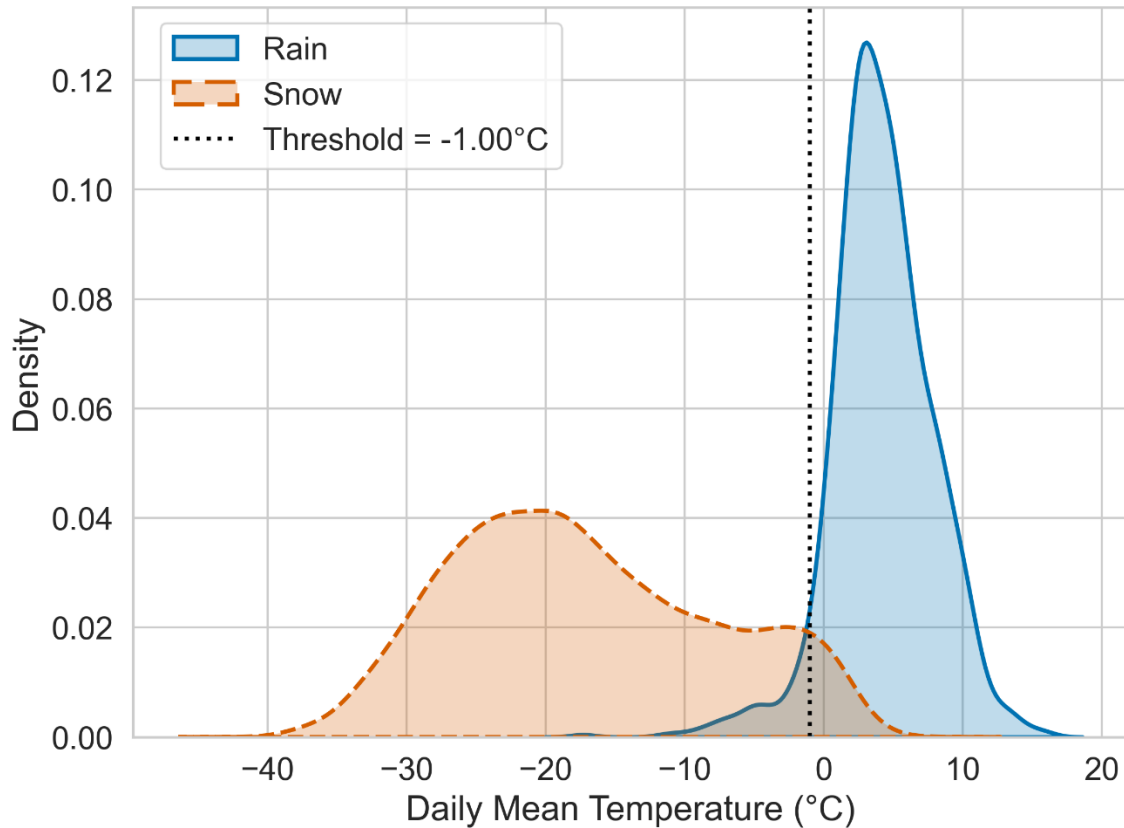


Figure 7 Seuil de température quotidienne moyenne

Un événement de PSN *in situ* a donc été détecté si la température quotidienne moyenne est supérieure ou égale à $-1,00\text{ }^{\circ}\text{C}$ et que la quantité de précipitations journalières était supérieure à $0,2\text{ mm}$ ou que des observations de pluie ou de bruine ont été faites par le personnel pendant la journée.

3.3.5. Validation

Les détections de PSN *in situ* ont été utilisées pour valider les détections faites par MOP. Les conditions nécessaires pour la détection d'un épisode de PSN *in situ* ont été indiquées ci-haut. Pour les détections par MOP, des zones tampons de 10 km ont été tracées autour de chaque station météorologique. À l'intérieur de celles-ci, les conditions pour détecter un événement par MOP sont la présence d'une couverture neigeuse sur au moins 70% des pixels et un minimum de 5% des pixels affectés par un événement de PSN sur au moins une des deux images produites par jour. Le tableau 3 présente les indicateurs de détections faites par MOP et *in situ*, soit vrai positif (VP), faux positif (FP), faux négatif (FN) et vrai négatif (VN).

Tableau 3 Indicateurs de détection d'événements de PSN

	Détection MOP	Détection <i>in situ</i>
VP	Oui	Oui
FP	Oui	Non
FN	Non	Oui
VN	Non	Non

La justesse (*accuracy*) locale a été calculée à partir de ces indicateurs à chacune des cinq stations météorologiques (Aklavik, Inuvik, Paulatuk, Trail Valley et Tuktoyaktuk) à partir de l'équation 11.

$$Justesse = \frac{(VP+VN)}{(VP+FP+VN+FN)} \quad 11$$

Lorsque les valeurs sont débalancées, il est suggéré d'utiliser d'autres métriques que la justesse pour évaluer la performance du modèle (Akosa, 2017). Dans le cas des détections de PSN, il y a beaucoup plus de jours sans événement qu'avec événement, c'est pourquoi le score F1 a aussi été calculé à partir des métriques de précision (*precision rate*) et de taux de faux positifs (*recall rate*), décrites aux équations 12 à 14 (Langlois *et al.*, 2026).

$$Précision = \frac{VP}{(VP+FP)} \quad 12$$

$$Taux\ de\ faux\ positifs = \frac{FP}{FP+VN} \quad 13$$

$$Score\ F1 = 2 * \frac{(Précision * Taux\ de\ faux\ positifs)}{(Précision + Taux\ de\ faux\ positifs)} \quad 14$$

Toutes ces métriques ont été mesurées pour les deux jeux de données, avec et sans corrections de transmissivité, afin de déterminer si la détection MOP est plus performante avec les valeurs de T_B corrigées pour la présence des arbres.

3.3.6. Événements de PSN à grande échelle

Les événements de PSN à grande échelle ont aussi été identifiés en fonction de la durée et de la superficie affectée, tel qu'élaboré par Langlois *et al.* (2026). Les dates où les PSN ont affecté plus de 2,66 % des pixels valides (2 772 km²), soit le 95^e percentile en termes de superficie journalière affectée par les PSN pour toute la période, ont été conservées. Les événements affectant cette superficie minimale sur plusieurs journées consécutives ont été jumelés, ainsi que les événements

séparés par une seule journée. Des cartes ont été créées pour chaque événement détecté pour identifier le territoire affecté par les PSN lors d'un épisode.

4. Résultats

Cette section présente les résultats qui ont été obtenus lors des différentes étapes du projet, incluant des sections sur la correction de la contribution de la végétation, la validation *in situ*, la liste des événements, les tendances spatio-temporelles ainsi que les variations démographiques des troupeaux de caribous.

4.1. Correction de la transmissivité des arbres

Des cartes du nombre total de PSN pour toute la période d'étude et pour les deux orbites ont été produites, à partir des T_B avec et sans correction de la transmissivité des arbres (figure 8). On peut voir que les corrections de transmissivité ont permis de détecter plus d'événements de PSN, notamment dans le secteur d'Aklavik et au sud-est du site d'étude. Puisque les corrections ont été appliquées sous la ligne des données de volume de bois seulement, les détections de PSN sur toute la partie nord du territoire sont identiques.

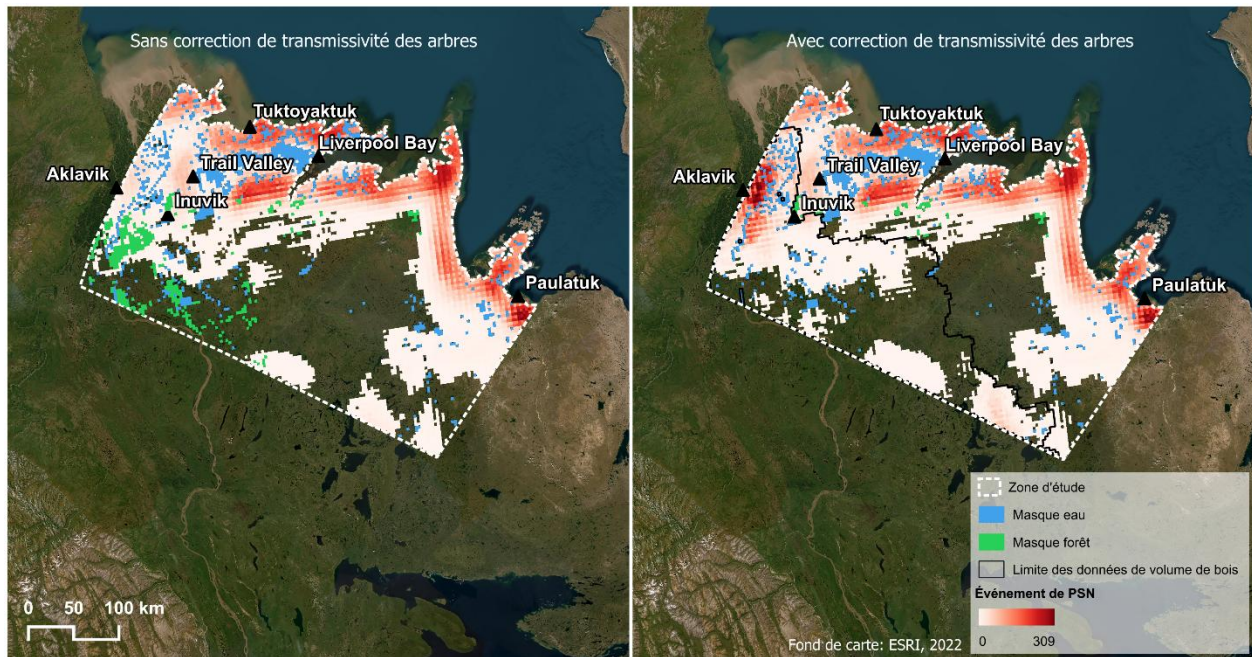


Figure 8 Nombre total de détections de PSN entre 1988 et 2023

Pour vérifier si cette augmentation du nombre de détections de PSN par MOP avec correction de transmissivité des arbres est cohérente avec les détections *in situ*, les métriques de performance

sont comparées aux stations d'Aklavik et d'Inuvik (tableau 4). Les résultats montrent que, pour les deux stations, le nombre de VP a augmenté après avoir appliqué les corrections, tout comme le nombre de FP. La valeur du score F1 a augmenté pour les deux stations, et particulièrement à Aklavik, où le score a plus que doublé. D'un autre côté, l'application des corrections de transmissivité fait aussi augmenter le nombre de faux positifs et diminuer le nombre de vrais négatifs. La justesse diminue d'environ 1 % après correction à la station d'Aklavik, mais reste identique à la station d'Inuvik.

Tableau 4 Métriques de performance pour les stations d'Aklavik et d'Inuvik avant et après correction de transmissivité des arbres

Station	Correction	VP	FP	VN	FN	Justesse (%)	Score F1 (%)
Aklavik	Sans	5	13	3314	57	97,9	12,5
	Avec	27	74	3253	35	96,8	33,1
Inuvik	Sans	16	10	5794	182	96,8	14,3
	Avec	18	12	5792	180	96,8	15,8

Les métriques de performance pour les autres stations sont présentées dans le tableau 5, après correction de transmissivité des arbres.

Tableau 5 Métriques de performance pour les stations de Paulatuk, Tuktoyaktuk et Trail Valley

Station	VP	FP	VN	FN	Justesse (%)	Score F1 (%)
Paulatuk	44	159	5400	112	95,3	24,5
Tuktoyaktuk	11	92	3142	66	95,2	12,2
Trail Valley	13	28	1919	17	97,7	36,6

On remarque que le nombre de FP et de FN restent tout de même considérables en comparaison avec le nombre de VP. Cela pourrait s'expliquer entre autres par la différence d'échelle entre les données; les pixels de MOP font 3,125 km de largeur et de hauteur, alors que les données provenant des stations météorologiques sont ponctuelles et dispersées aux limites nord du territoire. De plus,

l'algorithme MOP permet de détecter une couche d'eau sur la neige, alors que les données utilisées aux stations sont les précipitations et la température. Également, les données disponibles à partir des stations étaient fragmentées; elles ne couvraient pas toute la période d'étude mais seulement certaines plages temporelles.

La carte du total des événements de PSN sur toute la période d'étude avec les corrections de transmissivité des arbres est présentée à la figure 9. On remarque que certains secteurs ont subi un nombre élevé de PSN alors qu'à d'autres secteurs, aucun événement de PSN n'a été détecté par MOP. Les endroits où il y a eu beaucoup d'épisodes de PSN sont principalement les côtes, à proximité de l'eau. En effet, toute la côte au nord du territoire a subi un nombre élevé d'événements de PSN, tout comme le secteur d'Aklavik, où il y a beaucoup de plans d'eau. Au centre du territoire, peu ou pas d'événements de PSN ont été détectés. Ces résultats vont dans le même sens que ceux obtenus par Langlois *et al.* (2026), qui eux aussi montrent une occurrence de PSN plus élevée près des côtes du territoire.

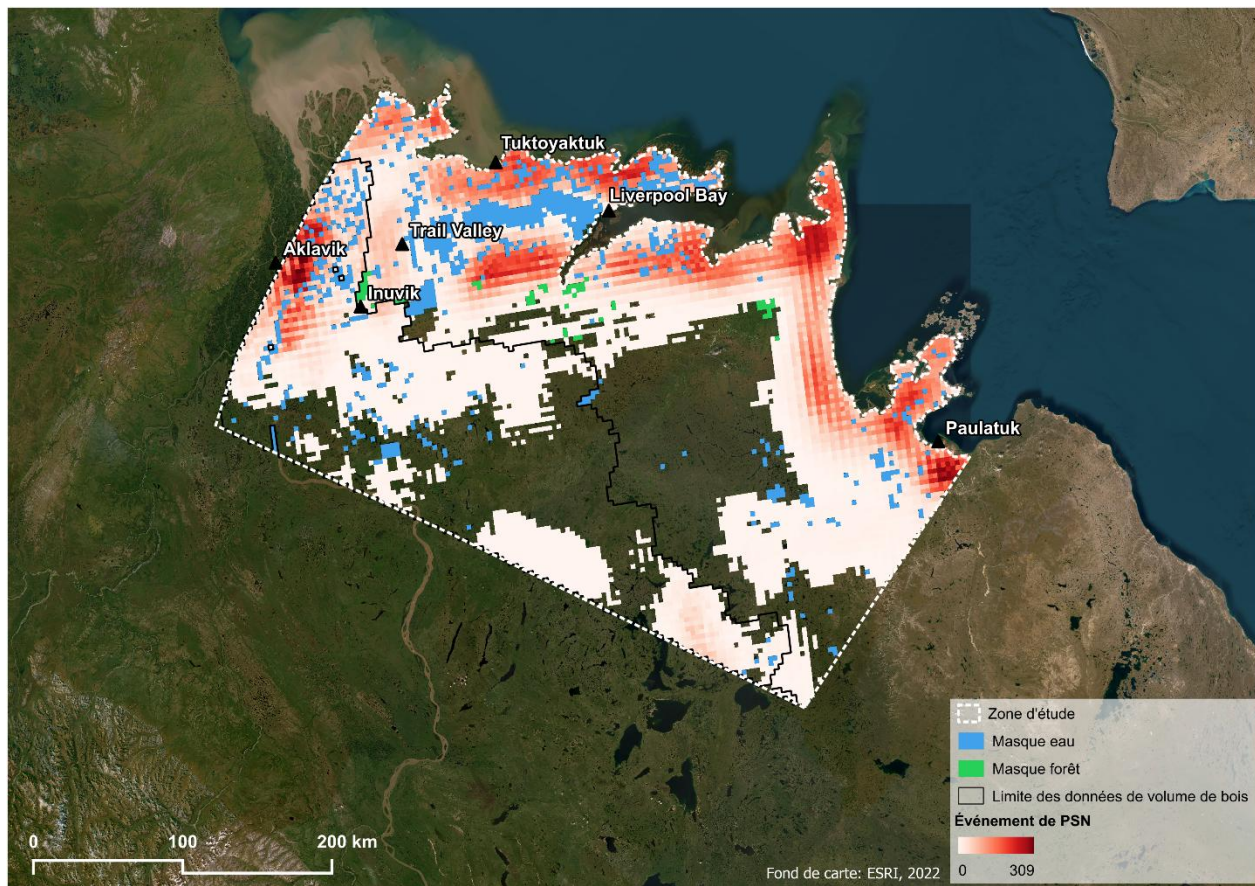


Figure 9 Total des PSN sur les années 1988-2023

4.2. Occurrence de PSN

Chaque épisode de PSN à grande échelle a été cartographié (exemple en figure 10). La totalité des cartes produites est présentée en annexe 1. Bien que la plupart des événements à grande échelle se sont produits en septembre et octobre, deux épisodes ont eu lieu en janvier 2018 et un a eu lieu en mars 2019.

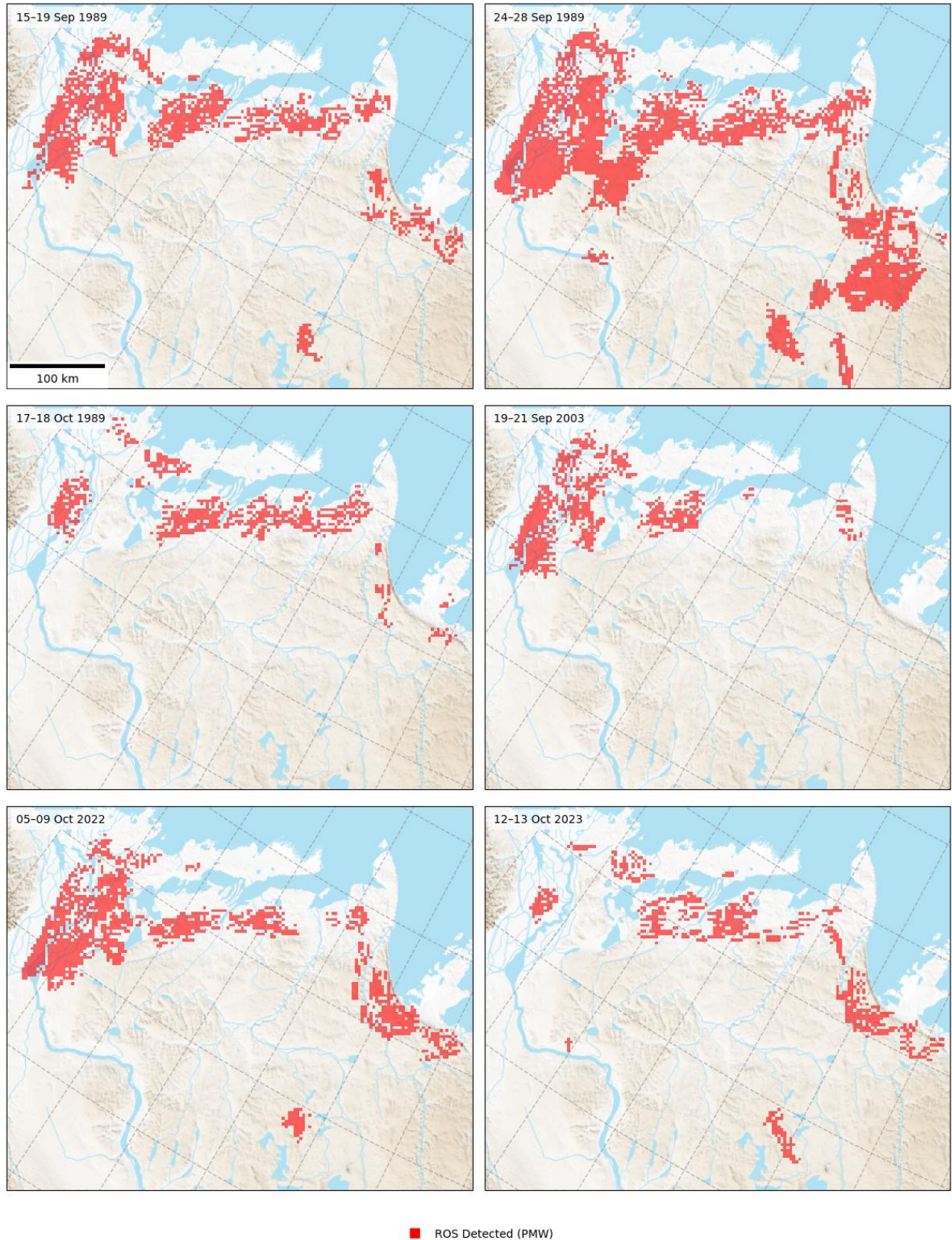


Figure 10 Exemple de cartes d'événements grande échelle de PSN

Les épisodes de PSN détectés par MOP sont listés dans le tableau 6, avec la date de début, la durée de l'événement, la superficie affectée et s'il y a eu une détection *in situ*. Ce sont 46 événements à grande échelle qui ont été détectés au total, et 52 % de ces événements ont aussi été détectés à au moins une des stations.

Tableau 6 Liste des événements grande échelle de PSN

Date de début de l'événement	Durée (jours)	Superficie affectée (km²)	Détection <i>in situ</i> à au moins une station
1989-09-15	5	15 117	Oui
1989-09-24	5	29 902	Oui
1989-10-17	2	7 451	Non
1990-10-09	1	4 219	Non
1990-10-12	3	9 980	Non
1993-10-08	3	11 201	Oui
1995-10-26	1	3 545	Non
1996-09-14	2	13 008	Oui
1996-09-18	2	10 576	Oui
2003-09-19	3	7 725	Oui
2003-10-21	1	4 160	Oui
2005-10-07	1	4 482	Non
2006-10-22	1	5 820	Oui
2007-10-11	1	5 508	Non
2008-10-01	3	23 760	Oui
2009-10-04	1	3 525	Oui
2009-10-14	6	16 621	Non
2009-10-22	7	11 592	Non
2010-09-30	7	19 717	Oui
2010-10-10	1	7 217	Oui
2011-09-27	5	15 986	Oui
2011-10-11	1	5 166	Oui
2011-10-16	2	6 279	Oui
2011-10-21	1	4 346	Non
2013-10-18	3	9 707	Oui
2013-10-28	3	15 439	Oui
2014-10-02	6	17 646	Oui
2014-10-11	1	4 941	Oui
2015-09-29	2	12 549	Oui
2015-10-04	2	11 172	Oui
2015-10-09	1	3 203	Non

2015-10-14	2	7 393	Non
2015-10-19	3	8 604	Non
2015-10-26	1	3 838	Non
2018-01-15	1	3 135	Non
2018-01-19	1	5 029	Non
2019-03-18	1	2 900	Non
2019-10-29	1	9 258	Oui
2021-09-29	2	10 000	Non
2021-10-06	1	4 307	Non
2022-09-26	6	16 592	Oui
2022-10-05	5	14 707	Oui
2022-10-17	5	14 463	Non
2023-10-09	1	11 777	Non
2023-10-12	2	7 920	Non
2023-10-26	1	4 717	Non

4.3. Tendances à long-terme

Le nombre total de pixels de PSN par année est illustré sur la figure 11. On peut voir que lors des 10 premières années, le nombre de pixels se situe entre 10 000 et 22 000 environ, alors qu'à partir de l'année 2000, le nombre de pixels annuel se situe surtout entre 15 000 et 27 000. On remarque deux années où les valeurs sont plus éloignées : en 2005, une valeur élevée est démontrée avec environ 34 000 pixels, et en 2020, c'est un total de moins de 10 000 pixels qui est calculé. Ce graphique démontre la variabilité de la superficie affectée par les événements de PSN d'une année à l'autre, en illustrant toutefois qu'il y a une tendance à la hausse en termes de pixels affectés par année ($r=0,36$, $R^2=0,13$, $p=0,031$).

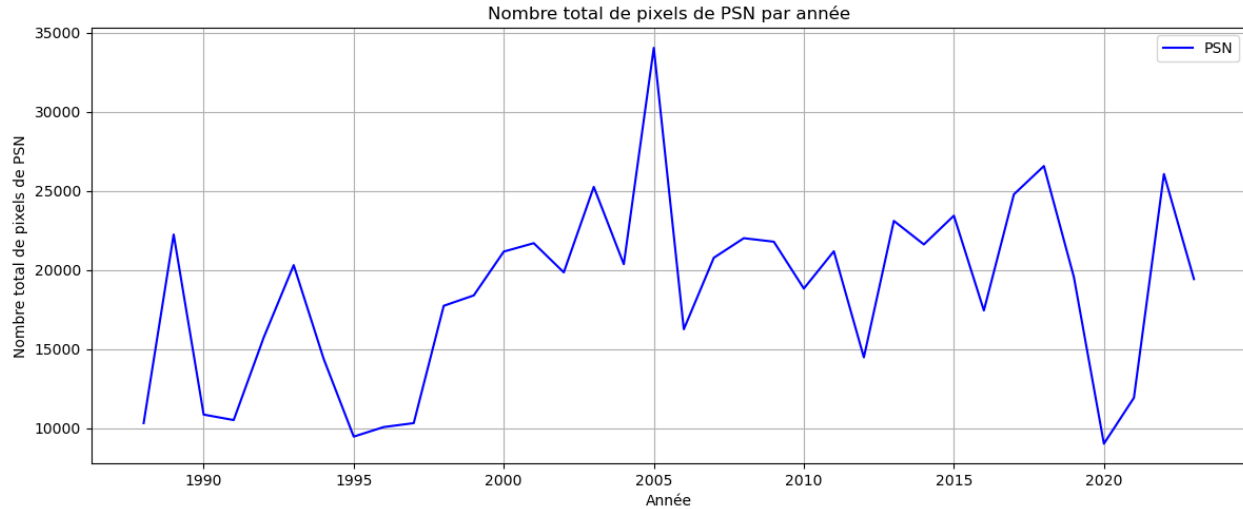


Figure 11 Nombre total de pixels de PSN par année

La figure 12 présente le nombre de jours avec des événements de PSN par année. On remarque qu'après l'année 1996, le nombre de jours où il y a un épisode de PSN passe d'environ 60-80 à environ 100-150. Encore une fois, le graphique démontre la variabilité d'une année à l'autre en termes de jours de PSN par année. La tendance en fonction du temps est aussi à la hausse ($r=0,47$, $R^2=0,22$, $p=0,004$).

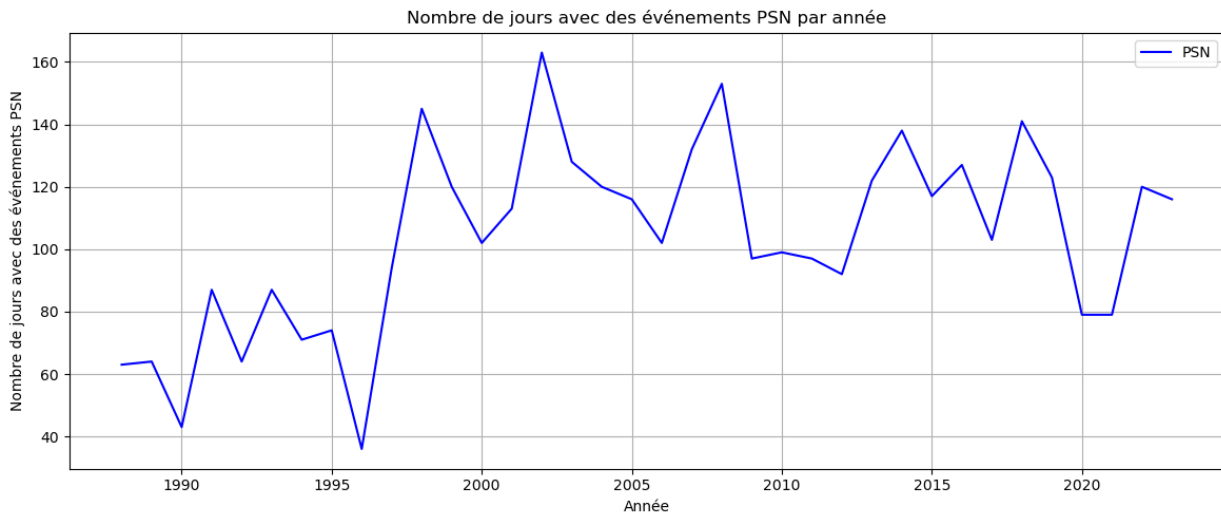


Figure 12 Nombre de jours de PSN par année

4.4. Populations de caribous

Des estimations de la taille des troupeaux de Tuktoyaktuk, Bluenose-Ouest et Cape Bathurst sont disponibles pour quelques années (Conference of Management Authority, 2020; Environment and Climate Change, s.d.-a, s.d.-b, s.d.-c; Nagy, 2009; Northern Caribou Canada, s.d.). Les suivis scientifiques et les estimations de population indiquent que le nombre de caribous de la toundra était généralement bas des années 1950 à 1970, puis qu'il a commencé à augmenter. De la moitié des années 1980 à la moitié des années 1990, les populations de caribous étaient abondantes : le troupeau de Cape Bathurst comptait environ 16 813 individus en 1987 et le troupeau de Bluenose-West comptait environ 140 083 individus en 1987. Un déclin a eu lieu de la fin des années 1990 aux années 2000 (70-90 %), puis le nombre s'est stabilisé pour certains troupeaux entre 2009 et 2012, bien que le déclin des années 1990-2000 ait continué de 2012 à 2018 (Conference of Management Authority, 2020).

Les figures 14, 15 et 16 montrent les variations temporelles des populations de caribous des troupeaux de Tuktoyaktuk, Cape Bathurst et Bluenose-Ouest en fonction du nombre de jours de PSN. Pour le troupeau de Tuktoyaktuk, la population est estimée à environ 3000 en 2006. En 2018, elle baisse à 1 499 individus, puis remonte à 3 073 en 2021. Elle est redescendue à 2 798 en 2024. Pour le troupeau de Cape Bathurst, la population est estimée à 13 476 individus en 1986, puis à 19 000 au début des années 1990. En 2000, on estime 11 089 individus et en 2005, on estime 2 400 individus. En 2009, le nombre estimé est le plus bas avec 1 900. En 2012, on estime 2 400 individus, puis 2 500 en 2015. En 2018, la population serait de 4 500, et serait remontée à 4 913 en 2021 et à 8 533 en 2025.

Pour le troupeau de Bluenose-Ouest, la population est estimée à 88 369 en 1986, à 140 083 en 1987, puis à 112 000 en 1993. Elle chute à 76 376 en 2000, à 21 000 en 2005, puis à 18 000 en 2006 et 2009. En 2012, ce sont 20 000 individus qui sont estimés, puis 21 000 en 2015 et 2018. En 2021, on estime une population de 18 440 individus, puis 20 476 en 2025.

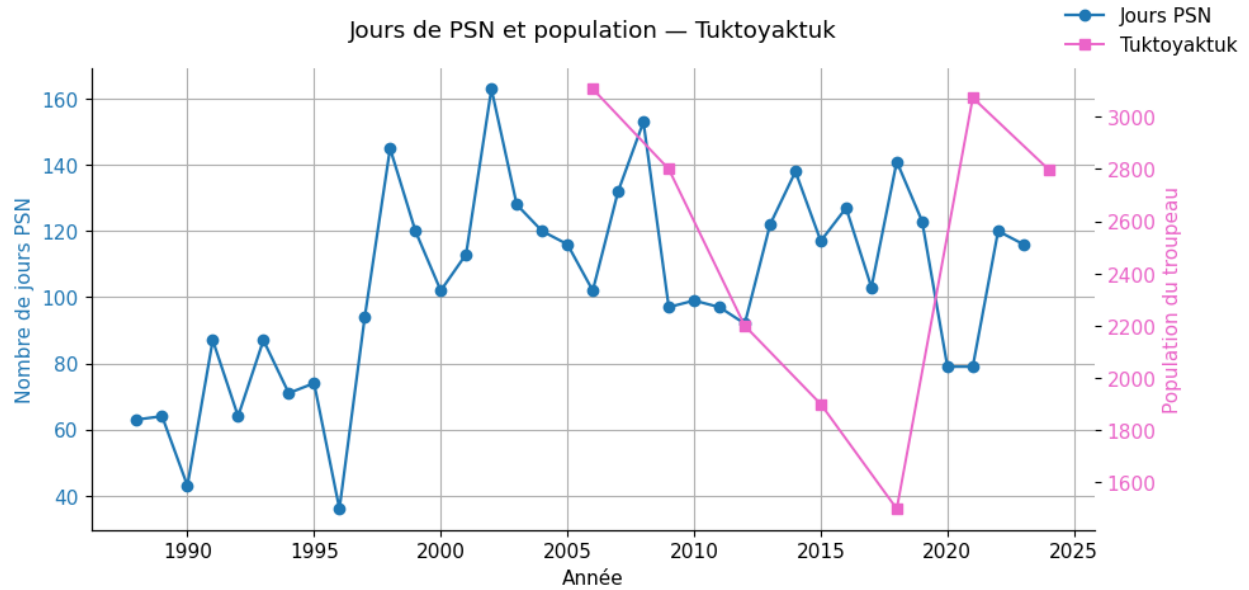


Figure 13 Population de Tuktoyaktuk et jours de PSN par année

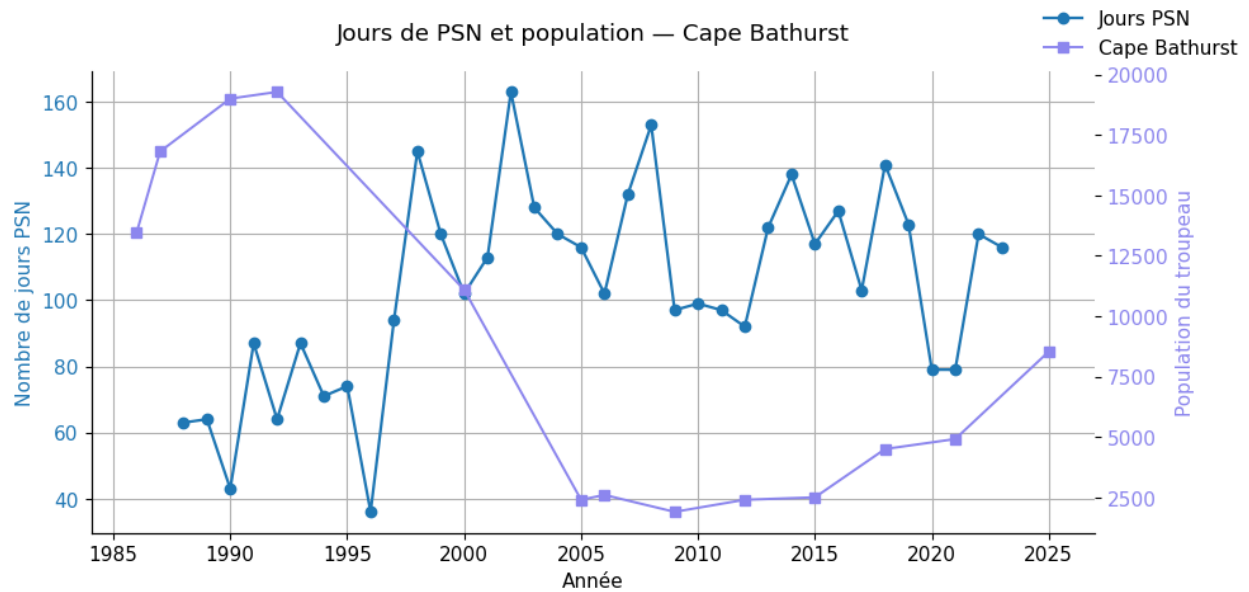


Figure 14 Population de Cape Bathurst et jours de PSN par année

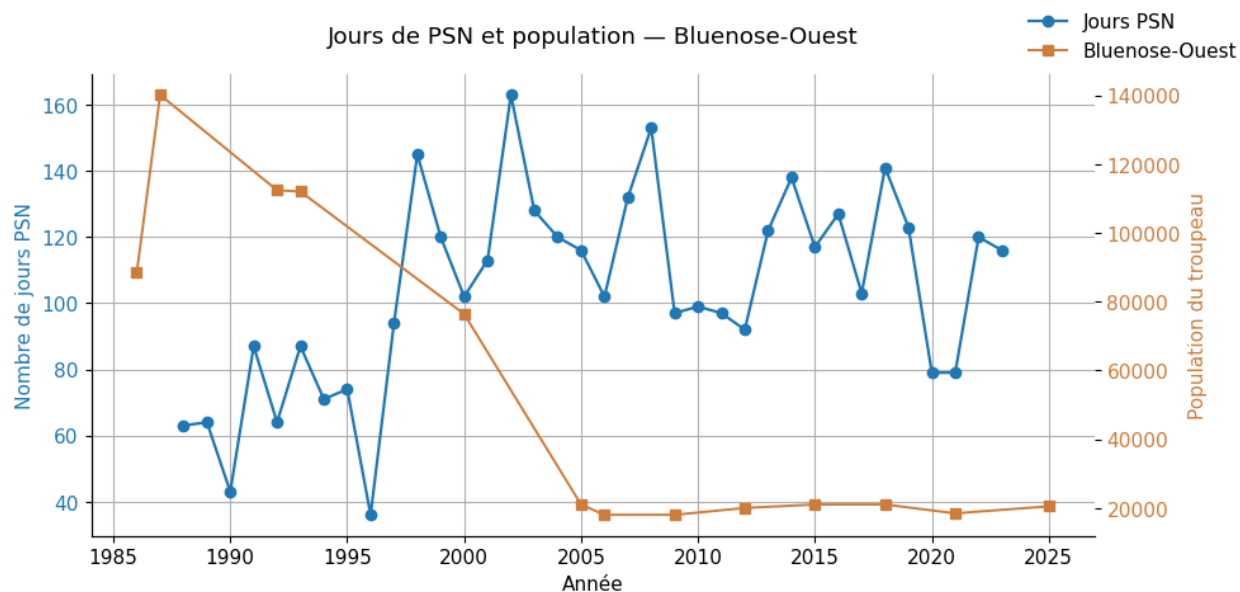


Figure 15 Population de Bluenose-Ouest et jours de PSN par année

Des tests statistiques ont été faits pour déterminer si les variations de population de caribous peuvent être reliées aux événements de PSN. Pour chaque troupeau, le coefficient de corrélation r et le coefficient de détermination R^2 ont été calculés en fonction du nombre de pixels de PSN par année ainsi que le nombre de jours de PSN par année (tableau 7). La valeur-p a aussi été calculée pour déterminer si les corrélations sont statistiquement significatives.

Tableau 7 coefficients de corrélations entre les populations de caribous et les événements de PSN

Variables	Nombre de pixels affectés par année	Nombre de jours de PSN par année
Population du troupeau de Tuktoyaktuk (n=7)	$r = -0,724346$	$r = -0,811954$
	$R^2 = 0,524677$	$R^2 = 0,659269$
	valeur-p = 0,104	valeur-p = 0,050
Population du troupeau de Cape Bathurst (n=13)	$r = -0,455280$	$r = -0,734356$
	$R^2 = 0,207279$	$R^2 = 0,539279$
	valeur-p = 0,186	valeur-p = 0,016
Population du troupeau de Bluenose-Ouest (n=13)	$r = -0,168008$	$r = -0,540757$
	$R^2 = 0,028227$	$R^2 = 0,292419$
	valeur-p = 0,643	valeur-p = 0,107

De façon générale, on remarque que pour toutes les combinaisons entre les variables de population et de PSN, la corrélation est négative, ce qui indique que les populations de caribous tendent à diminuer s'il y a un nombre élevé de pixels affectés par les PSN ou s'il y a un nombre élevé de jours de PSN pendant l'année. On remarque aussi que les coefficients de corrélation sont plus forts en fonction du nombre de jours où il y a des PSN qu'en fonction du nombre de pixels affectés.

Pour le troupeau de Tuktoyaktuk, le coefficient de corrélation est négatif pour les deux métriques de PSN (pixels affectés et nombre de jours). Le coefficient de détermination est plus élevé en fonction du nombre de jours qu'en fonction du nombre de pixels affectés. La relation est significative pour le nombre de jours, mais pas pour le nombre de pixels affectés.

Pour le troupeau de Cape Bathurst, le coefficient de corrélation est négatif pour les deux métriques de PSN, mais significatif seulement en fonction du nombre de jours de PSN par année. Le coefficient de détermination est plus élevé en fonction du nombre de jours de PSN qu'en fonction du nombre de pixels affectés.

Pour le troupeau de Bluenose-Ouest, le coefficient de corrélation est négatif et non significatif pour les deux métriques de PSN, avec des valeurs de coefficient de détermination assez faibles.

5. Discussion et conclusion

Le projet a été réalisé à la suite d'une demande faite par un membre du *Tuktoyaktuk Hunters & Trappers Committee*, afin de produire des cartes des événements de PSN au nord des Territoires du Nord-Ouest tel que réalisé pour l'île de Banks par Langlois *et al.* (2026). Un défi dans la réalisation de ce projet implique la présence d'arbres sur le territoire, puisque l'algorithme employé est généralement utilisé pour des territoires en toundra. Une correction a donc été appliquée afin de réduire la contribution de la végétation sur les valeurs de la T_B de la neige au sol avant de produire les cartes de PSN.

5.1. Évaluation de l'atteinte des objectifs de l'essai

L'objectif principal du projet, qui était de faire la détection et la cartographie des événements de PSN dans la région entourant la communauté de Tuktoyaktuk, a été atteint. Pour ce faire, les trois objectifs spécifiques ont été réalisés.

Le premier objectif spécifique était de corriger l'influence des arbres sur les valeurs de T_B au sol à partir des sources de données satellitaires disponibles. Une équation de correction a été appliquée sur les valeurs de T_B en fonction du volume total de bois pour la partie du territoire où les données étaient disponibles. Les résultats ont démontré que cette correction permettait de détecter plus d'événements de PSN (figure 8), et que le nombre de VP et le score F1 augmentaient, bien que le nombre de FP augmente également (tableau 4).

Le deuxième objectif spécifique était, à partir des T_B corrigées, de produire des cartes des événements de PSN dans la région d'étude de 1988 à 2023 à l'aide de l'algorithme développé au GRIMP. Des cartes de tous les événements détectés à grande échelle sur le territoire à l'étude ont été produites; ce sont 46 événements de PSN à grande échelle qui ont été détectés par MOP et pour lesquels des cartes sont disponibles à l'annexe 1. Il a été constaté que la majorité des épisodes de PSN avaient lieu à l'automne. Certaines tendances spatio-temporelles ont été remarquées dans les occurrences de PSN détectées par MOP sur le territoire. D'une part, les pixels affectés par les PSN sont surtout en milieu côtier (figure 9). D'autre part, les tendances temporelles en termes de nombre de pixels affectés par les PSN annuellement et de nombre de jours de PSN par année ont une tendance à augmenter avec les années (figures 11 et 12). Ces résultats sont cohérents avec les travaux de Langlois *et al.* (2026), qui démontrent qu'il y a une augmentation de l'aire affectée par

les PSN au fil des années sur l'île de Banks, tout en allant dans le même sens que le Savoir Inuit qui décrit que la pluie à l'automne a été plus fréquente au cours des 10 dernières années (Langlois *et al.*, 2026).

Le troisième objectif spécifique était d'évaluer les liens possibles entre l'occurrence et les tendances des PSN détectées et les variations de populations observées chez les caribous. On a effectivement remarqué que les corrélations sont négatives entre chaque troupeau et métrique de PSN (nombre de pixels affectés et nombre de jours de PSN par année), mais que seulement deux relations parmi celles-ci sont significatives : celle entre la population du troupeau de Tuktoyaktuk et le nombre de jours de PSN par année, et celle entre la population du troupeau de Cape Bathurst et le nombre de jours de PSN par année. On a également remarqué que les coefficients de corrélation et de détermination sont plus élevés en fonction du nombre de jours de PSN qu'en fonction du nombre de pixels affectés par année et ce, pour les trois troupeaux de caribous (tableau 7). Au début de la période d'étude, on remarque que les populations de Cape Bathurst et de Bluenose-Ouest sont élevées, puis qu'elles descendent à la fin des années 1990 pour devenir plus basses en 2005. Parallèlement, le nombre de jours de PSN grimpe à partir de 1996. Il pourrait donc y avoir un lien entre la croissance des occurrences de PSN à partir de 1996 et les baisses de population pour les troupeaux de Cape Bathurst et de Bluenose-Ouest.

Bien que les épisodes de PSN aient le potentiel d'affecter négativement les caribous, plusieurs autres facteurs peuvent influencer les variations de population comme la prédation, la chasse, l'occupation du sol, les feux de forêt, la pollution ou encore les maladies et parasites (Conference of Management Authority, 2020). Il est aussi possible que les changements dans l'abondance d'individus dans un troupeau soient dus à des migrations et la distribution plutôt qu'être des nombres absolus (Conference of Management Authority, 2020). Également, une hypothèse est que certains événements de PSN détectés n'ont pas résulté en la création d'une couche de glace dans le manteau neigeux, dépendamment des conditions météorologiques et environnementales. Ainsi, il est possible que de la pluie ait été détectée sur la neige sans qu'elle ait nécessairement créé la croûte de glace qui est néfaste pour les caribous.

5.2. Contribution de l'essai

Cet essai a permis d'appliquer l'algorithme de détection de PSN par MOP sur une nouvelle zone d'étude, où une nouvelle méthodologie a été employée pour corriger la contribution de la

végétation aux T_B . Ces travaux ouvrent la voie à une meilleure détection de PSN dans les zones de transitions entre la taïga et la toundra, qui constituent un habitat hivernal important pour plusieurs troupeaux de caribous. Les résultats obtenus présentent une cohérence avec ceux de Langlois *et al.* (2026) quant aux patrons spatio-temporels des événements de PSN. Par ailleurs, l'essai explore les relations entre la variabilité interannuelle des événements de PSN et l'évolution des populations de caribous. Bien que certains éléments limitent la robustesse des analyses tels que la disponibilité des données démographiques, cet essai constitue une contribution pertinente à la compréhension des menaces auxquelles sont confrontés les caribous et met en évidence les améliorations possibles pour de futures analyses.

5.3. Recommandations

Les corrections appliquées aux T_B pour limiter la contribution de la végétation ont permis de détecter un nombre de PSN plus cohérent avec ceux détectés aux stations météorologiques. Pour des travaux futurs, cette méthode de correction pourrait être comparée à des données prises sur le terrain afin d'évaluer sa justesse. D'autres équations de correction provenant de la littérature pourraient également être testées dans un contexte de détection des PSN en intégrant des paramètres comme la fraction de forêt (Langlois *et al.*, 2011; Luoju *et al.*, 2021).

En ce qui concerne la validation des détections de PSN par MOP à partir des stations météorologiques, certaines limites ont été adressées précédemment telles que la différence d'échelle des données ainsi que la temporalité fragmentée des données disponibles. Les travaux de Langlois *et al.* (2026) ont démontré que le Savoir Inuit permet de répondre à certaines interrogations sur les événements qui ont lieu sur le territoire et permet aussi de combler des manques de données, en plus de valider les détections qui sont faites par MOP. Dans ce contexte-ci, un partenariat avec des communautés des Territoires du Nord-Ouest pourrait constituer un apport pertinent, autant au sujet de l'occurrence des événements de PSN que leurs effets potentiels sur les caribous.

À ce sujet, les données limitées sur les populations de caribous pourraient être bonifiées par des observations faites par des membres des communautés des Territoires du Nord-Ouest. Une analyse des variations de populations des troupeaux de Tuktoyaktuk, de Cape Bathurst et de Bluenose-Ouest en fonction des détections de PSN pourrait aussi être plus précise en analysant spécifiquement les occurrences de PSN dans les aires de répartition respectives des troupeaux.

Néanmoins, plus de recherches sont nécessaires pour comprendre le rôle des PSN ainsi que des autres menaces sur la démographie des caribous.

Bien que les occurrences des PSN dans le temps aient été observées, les facteurs influençant celles-ci n'ont pas été abordées dans cet essai. L'influence de la concentration en glace de mer et des rivières atmosphériques sur la fréquence et l'intensité des PSN pourrait être étudiée pour ce territoire spécifique. En effet, Langlois *et al.* (2026) ont démontré que la concentration en glace de mer influence la fréquence des PSN, et que les rivières atmosphériques influencent plutôt l'intensité des PSN sur l'île de Banks, et il serait intéressant d'observer si ces facteurs occupent le même rôle au nord des Territoires du Nord-Ouest.

Comme il a été mentionné, l'algorithme permet de détecter l'eau sur la neige sans toutefois détecter les croûtes de glace dans le manteau neigeux. De futures recherches viseraient à étudier les facteurs influençant la création d'une couche de glace dans le couvert nival tels que la météo ou l'environnement, ainsi qu'à détecter l'emplacement spécifique des croûtes de glace dans le manteau neigeux à partir d'outils de télédétection et grâce à des relevés sur le terrain. Une détection plus précise des PSN menant à la formation de croûtes de glace permettrait d'avoir une compréhension plus approfondie du rôle des événements météorologiques extrêmes sur la faune.

Bibliographie

Akosa, J. (2017) Predictive Accuracy: A Misleading Performance Measure for Highly Imbalanced Data. SAS Global Forum 2017 Conference, SAS Institute Inc., Cary, North Carolina.

Bartsch, A., Khairullin, R., Efimova, A., Widhalm, B., Muri, X., von Baeckmann, C., Bergstedt, H., Ermokhina, K., Hugelius, G., Heim, B., Leibman, M. et Gruber, C. (2024) Circumarctic Landcover Units. Zenodo.

Beaudoin, A., Bernier, P. Y., Guindon, L., Villemaire, P., Guo, X. J., Stinson, G., Bergeron, T., Magnussen, S. et Hall, R. J. (2014) Mapping attributes of Canada's forests at moderate resolution through kNN and MODIS imagery. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 44, n°5, p. 521-532.

Beaulieu, D. (2012) Dene traditional knowledge about caribou cycles in the Northwest Territories. *Rangifer*, p. 59-67.

Bergman, C. M., Schaefer, J. A. et Luttich, S. N. (2000) Caribou movement as a correlated random walk. *Oecologia*, vol. 123, n°3, p. 364-374.

Brodzik, M. J., Long, D. G., Hardman, M. A., Paget, A. et Armstrong, R. (2016) https://nsidc.org/sites/default/files/nsidc-0630-v001-userguide_1_0.pdf. MEaSUREs Calibrated Enhanced-Resolution Passive Microwave Daily EASE-Grid 2.0 Brightness Temperature ESDR, Version 1.

Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barret, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S. L., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., Jotzo, F., Krug, T., Lasco, R., Lee, Y.-Y., Masson-Delmotte, V., Meinshausen, M., Mintenbeck, K., Mokssit, A., Otto, F. E. L., Pathak, M., Pirani, A., Poloczanska, E., Pörtner, H.-O., Revi, A., Roberts, D. C., Roy, J., Ruane, A. C., Skea, J., Shukla, P. R., Slade, R., Slangen, A., Sokona, Y., Sörensson, A. A., Tignor, M., Van Vuuren, D., Wei, Y.-M., Winkler, H., Zhai, P., Zommers, Z., Hourcade, J.-C., Johnson, F. X., Pachauri, S., Simpson, N. P., Singh, C., Thomas, A., Totin, E., Alegría, A., Armour, K., Bednar-Friedl, B., Blok, K., Cissé, G., Dentener, F., Eriksen, S., Fischer, E., Garner, G., Guivarch, C., Haasnoot, M., Hansen, G., Hauser, M., Hawkins, E., Hermans, T., Kopp, R., Leprince-Ringuet, N., Lewis, J., Ley, D., Ludden, C., Niamir, L., Nicholls, Z., Some, S., Szopa, S., Trewin, B., Van Der Wijst, K.-I., Winter, G., Witting, M., Birt, A., Ha, M., Arias, P., Bustamante, M., Elgizouli, I., Flato, G., Howden, M., Méndez-Vallejo, C., Pereira, J. J., Pichs-Madruga, R., Rose, S. K., Saheb, Y., Sánchez Rodríguez, R., Ürge-Vorsatz, D., Xiao, C., Yassaa, N., Romero, J., Kim, J., Haites, E. F., Jung, Y., Stavins, R., Birt, A., Ha, M., Orendain, D. J. A., Ignon, L., Park, S. et Park, Y. (2023) IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report, Summary for Policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. (p. 1-34). Intergovernmental Panel on Climate Change.

Canada, A. and A.-F. (2013) A National Ecological Framework for Canada - GIS data.

Cohen, J., Lemmetyinen, J., Pulliainen, J., Heinila, K., Montomoli, F., Seppanen, J. et Hallikainen, M. T. (2015) The Effect of Boreal Forest Canopy in Satellite Snow Mapping—A Multisensor Analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, n°12, p. 6593-6607.

Cohen, J., Screen, J. A., Furtado, J. C., Barlow, M., Whittleston, D., Coumou, D., Francis, J., Dethloff, K., Entekhabi, D., Overland, J. et Jones, J. (2014) Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nature Geoscience*, vol. 7, n°9, p. 627-637.

Conference of Management Authorities (2020) Recovery Strategy for Barren-Ground Caribou.

Couture, G. (2022) Analyses spatiotemporelles des conditions de glace de mer et des tendances de formation des polynies de l'Archipel Arctique Canadien.

Dolant, C., Langlois, A., Brucker, L., Royer, A., Roy, A. et Montpetit, B. (2018) Meteorological inventory of rain-on-snow events in the Canadian Arctic Archipelago and satellite detection assessment using passive microwave data. *Physical Geography*, vol. 39, n°5, p. 428-444.

Dolant, C., Langlois, A., Montpetit, B., Brucker, L., Roy, A. et Royer, A. (2016) Development of a rain-on-snow detection algorithm using passive microwave radiometry. *Hydrological Processes*, vol. 30, n°18, p. 3184-3196.

Environment and Climate Change (s.d.-a) Tuktoyaktuk Peninsula Herd. Information, Government of the Northwest Territories.

Environment and Climate Change (s.d.-b) Bluenose-East, Bluenose-West and Cape Bathurst Herds. Information, Government of the Northwest Territories.

Environment and Climate Change (s.d.-c) Population Surveys. Information, Government of the Northwest Territories.

Environnement et ressources naturelles Canada (s.d.) Données historiques - Climat - Environnement et Changement climatique Canada.

Government of the Northwest Territories (s.d.) Caribou in the NWT. Information, Government of the Northwest Territories.

Grenfell, T. C. et Putkonen, J. (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*, vol. 44, n°3.

Hansen, B. B., Isaksen, K., Benestad, R. E., Kohler, J., Pedersen, Å. Ø., Loe, L. E., Coulson, S. J., Larsen, J. O. et Varpe, Ø. (2014) Warmer and wetter winters: characteristics and implications of an extreme weather event in the High Arctic. *Environmental Research Letters*, vol. 9, n°11, p. 114021.

Klein, D. R. (1999) The Roles of Climate and Insularity in Establishment and Persistence of *Rangifer tarandus* Populations in the High Arctic. *Ecological Bulletins*, n°47, p. 96-104.

Langlois, A., Johnson, C.-A., Montpetit, B., Royer, A., Blukacz-Richards, E. A., Neave, E., Dolant, C., Roy, A., Arhonditsis, G., Kim, D.-K., Kaluskar, S. et Brucker, L. (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*, vol. 189, p. 84-95.

Langlois, A., Royer, A., Dupont, F., Roy, A., Goita, K. et Picard, G. (2011) Improved Corrections of Forest Effects on Passive Microwave Satellite Remote Sensing of Snow Over Boreal and Subarctic Regions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, n°10, p. 3824-3837.

Langlois, J.-A., Langlois, A., Dolant, C. et Johnson, C.-A. (2026) Drivers, Detection, and Impacts of Rain-on-Snow Events on Banks Island: Insights from Remote Sensing and Inuit Knowledge [Manuscript submitted for publication].

Leclerc, L.-M. et Boulanger, J. (2018) Population Estimate of the Dolphin and Union Caribou herd (*Rangifer tarandus groenlandicus* x *pearyi*) Coastal Survey, October 2018 and Demographic Indicators. Kitikmeot Region, Department of Environment Wildlife Research Section, Government of Nunavut, P.O. Box 377 Kugluktuk, NU X0B 0E0 2Integrated Ecological Research, Nelson, BC.

Li, Q. et Kelly, R. E. J. (2017) Correcting Satellite Passive Microwave Brightness Temperatures in Forested Landscapes Using Satellite Visible Reflectance Estimates of Forest Transmissivity. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 10, n°9, p. 3874-3883.

Luojus, K., Pulliainen, J., Takala, M., Lemmetyinen, J., Mortimer, C., Derksen, C., Mudryk, L., Moisander, M., Hiltunen, M., Smolander, T., Ikonen, J., Cohen, J., Salminen, M., Norberg, J., Veijola, K. et Venäläinen, P. (2021) GlobSnow v3.0 Northern Hemisphere snow water equivalent dataset. *Scientific Data*, vol. 8, n°1, p. 163.

Mallory, C. D. et Boyce, M. S. (2018) Observed and predicted effects of climate change on Arctic caribou and reindeer. *Environmental Reviews*, vol. 26, n°1, p. 13-25.

Mesinger, F., DiMego, G., Kalnay, E., Mitchell, K., Shafran, P. C., Ebisuzaki, W., Jović, D., Woollen, J., Rogers, E., Berbery, E. H., Ek, M. B., Fan, Y., Grumbine, R., Higgins, W., Li, H., Lin, Y., Manikin, G., Parrish, D. et Shi, W. (2006) North American Regional Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 87, n°3, p. 343-360.

Naakka, T., Köhler, D., Nordling, K., Räisänen, P., Lund, M. T., Makkonen, R., Merikanto, J., Samset, B. H., Sinclair, V. A., Thomas, J. L. et Ekman, A. M. L. (2025) Polar winter climate change: strong local effects from sea ice loss, widespread consequences from warming seas. *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 25, n°14, p. 8127-8145.

Nagy, J. A. (2009) Population Estimates for the Cape Bathurst and Bluenose-West Barren-ground Caribou Herds Using Post-Calving Photography.

Northern Caribou Canada (s.d.) Northern Caribou - Tuk Peninsula.

NWT Bureau of Statistics (2025) NWT Bureau of Statistics | Population - Estimates by Community.

NWT Centre for Geomatics (s.d.) Department of ENR/ITI Administrative Boundaries. Information, Government of the Northwest Territories.

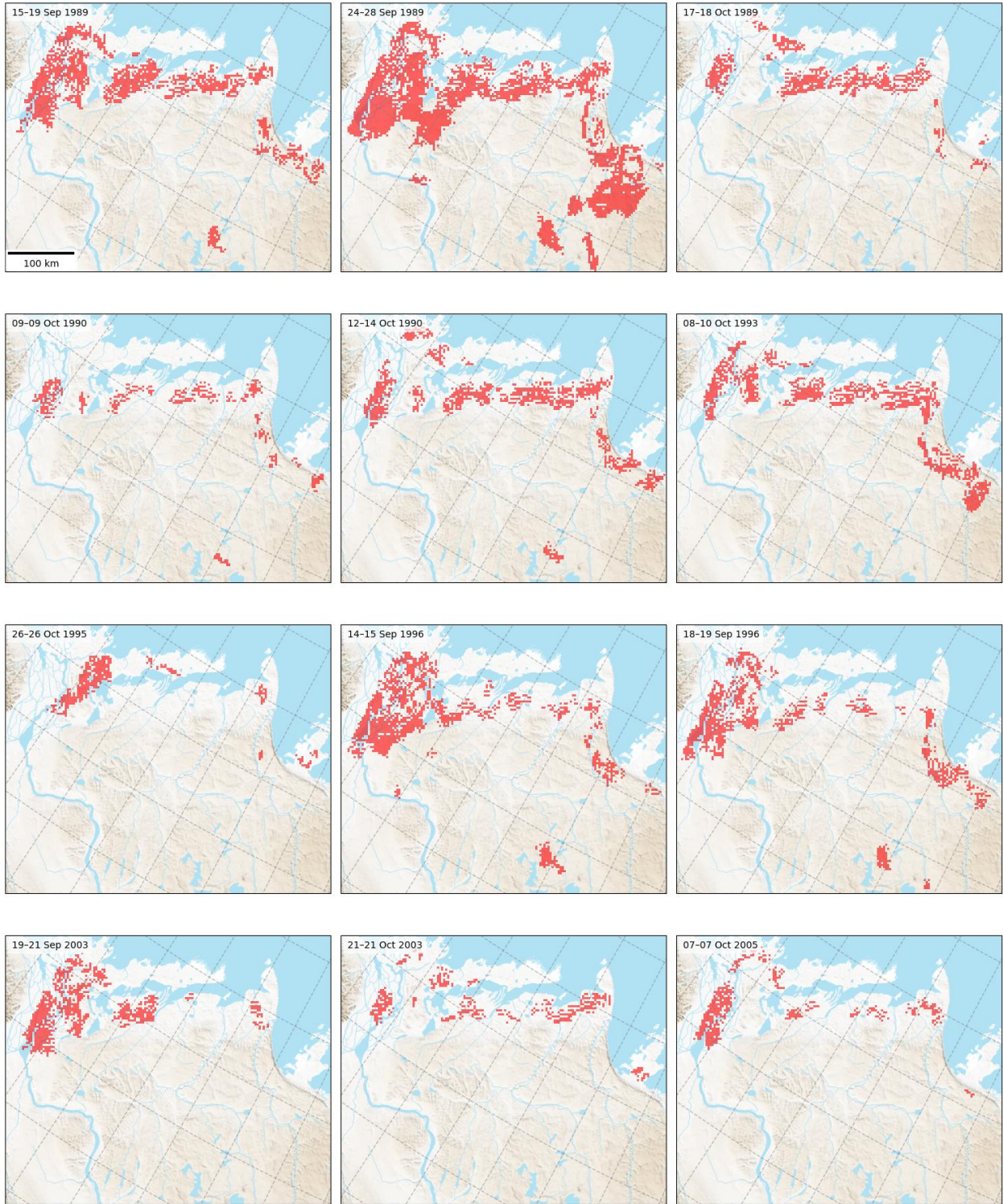
Prowse, T., Furgal, C., Wrona, F. et Reist, J. (2009) Implications of Climate Change for Northern Canada: Freshwater, Marine, and Terrestrial Ecosystems. *Ambio*, vol. 38, p. 282-9.

- Ramsay, B. H. (1998) The interactive multisensor snow and ice mapping system.
- Rantanen, M., Karpechko, A. Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K., Vihma, T. et Laaksonen, A. (2022) The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications Earth & Environment*, vol. 3, n°1, p. 168.
- Rennert, K. J., Roe, G., Putkonen, J. et Bitz, C. M. (2009) Soil Thermal and Ecological Impacts of Rain on Snow Events in the Circumpolar Arctic. *Journal of Climate*, vol. 22, n°9, p. 2302-2315.
- Robinson, D. A. et Estilow, T. W. (2021) Rutgers Northern Hemisphere 24 km Weekly Snow Cover Extent, September 1980 Onward, Version 1. NSIDC.
- Robinson, D. A., Estilow, T. W., et NOAA CDR Program (2012) NOAA Climate Data Record (CDR) of Northern Hemisphere (NH) Snow Cover Extent (SCE), Version 1.
- Sasseville, V., Langlois, A., Brucker, L. et Johnson, C. A. (2024) Patterns and Trend Analysis of Rain-on-Snow Events using Passive Microwave Satellite Data over the Canadian Arctic Archipelago Since 1987. *Journal of Hydrometeorology*, vol. 25, n°2, p. 311-324.
- Serreze, M. C. et Barry, R. G. (2011) Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. *Global and Planetary Change*, vol. 77, n°1, p. 85-96.
- Serreze, M. C., Gustafson, J., Barrett, A. P., Druckenmiller, M. L., Fox, S., Voveris, J., Stroeve, J., Sheffield, B., Forbes, B. C., Rasmus, S., Laptander, R., Brook, M., Brubaker, M., Temte, J., McCrystall, M. R. et Bartsch, A. (2021) Arctic rain on snow events: bridging observations to understand environmental and livelihood impacts. *Environmental Research Letters*, vol. 16, n°10, p. 105009.
- Song, J., Xu, Y., Han, Z. et Wu, J. (2025) CMIP6 projected trend of winter and summer variation in Arctic cyclones over the 21st century. *Climate Dynamics*, vol. 63, n°1, p. 82.
- Tews, J., Ferguson, M. A. D. et Fahrig, L. (2007) Potential net effects of climate change on High Arctic Peary caribou: Lessons from a spatially explicit simulation model. *Ecological Modelling*, vol. 207, n°2, p. 85-98.
- Tyler, N. J. C. (2010) Climate, snow, ice, crashes, and declines in populations of reindeer and caribou (*Rangifer tarandus* L.). *Ecological Monographs*, vol. 80, n°2, p. 197-219.
- Ulaby, F. T., Moore, R. K. et Fung, A. K. (1981) MICROWAVE REMOTE SENSING: ACTIVE AND PASSIVE (in three volumes). Volume I: Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry (Vol. 1-3, Vol. I). ARTECH HOUSE, 685 Canton Street, Norwood, MA 02062 : ARTECH HOUSE INC.
- U.S. National Ice Center (2008) IMS Daily Northern Hemisphere Snow and Ice Analysis at 1 km, 4 km, and 24 km Resolutions, Version 1. NSIDC.
- Wang, G.-R., Li, X.-F., Wang, J., Wei, Y.-L., Zheng, X.-M., Jiang, T., Chen, X.-X., Wan, X.-K. et Wang, Y. (2022) Development of a Pixel-Wise Forest Transmissivity Model at Frequencies of 19 GHz and 37 GHz for Snow Depth Inversion in Northeast China. *Remote Sensing*, vol. 14, n°21, p. 5483.

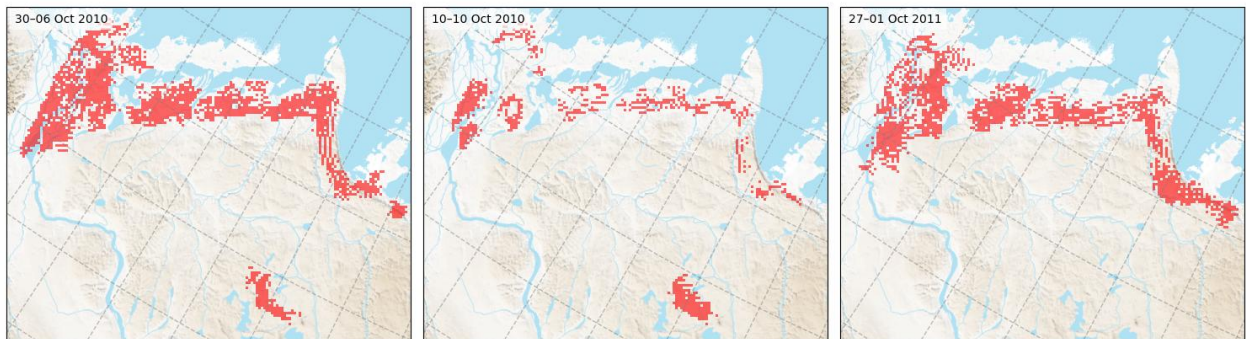
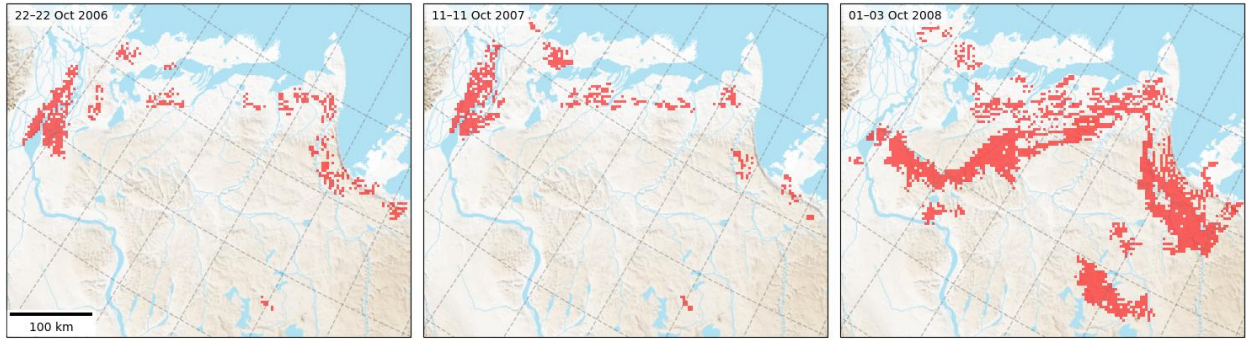
Yellowknife PCP map validation workshop (2025) Workshop on Peary caribou and muskox validation of participatory mapping with the communities of Kugaaruk, NU, Ikaahuk (Sachs Harbour), NWT, Taloyoak, NU, Tuktoyaktuk, NWT, and Ulukhaktok, NWT. Facilitated by Langlois, Josée-Anne, Memogana, Susie, Bureau, Lena & Pantis, Alex. In partnership with the Kurairojuark Hunters & Trappers Association, Olokhaktomiut Hunters & Trappers Committee, Sachs Harbour Hunters & Trappers Committee, Spence Bay Hunters & Trappers Association, and Tuktokaytuk Hunters & Trappers Committee and The Peary Caribou Project [PCP], January.

Zhang, X., Vihma, T., Rinke, A., Moore, G. W. K., Tang, H., Äijälä, C., DuVivier, A., Huang, J., Landrum, L., Li, C., Zhang, J., Boisvert, L., Cheng, B., Cohen, J., Handorf, D., Hanna, E., Hartmuth, K., Jonassen, M. O., Luo, Y., Murto, S., Overland, J. E., Parker, C., Perrie, W., Schulz, K., Schweiger, A., Spengler, T., Steele, M., Tung, W., Tyrrell, N., Valkonen, E., Wang, H., Wang, Z., Weijer, W., Wickström, S., Wu, Y. et Zhang, M. (2025) Weather and climate extremes in a changing Arctic. *Nature Reviews Earth & Environment*, vol. 6, n°11, p. 691-711.

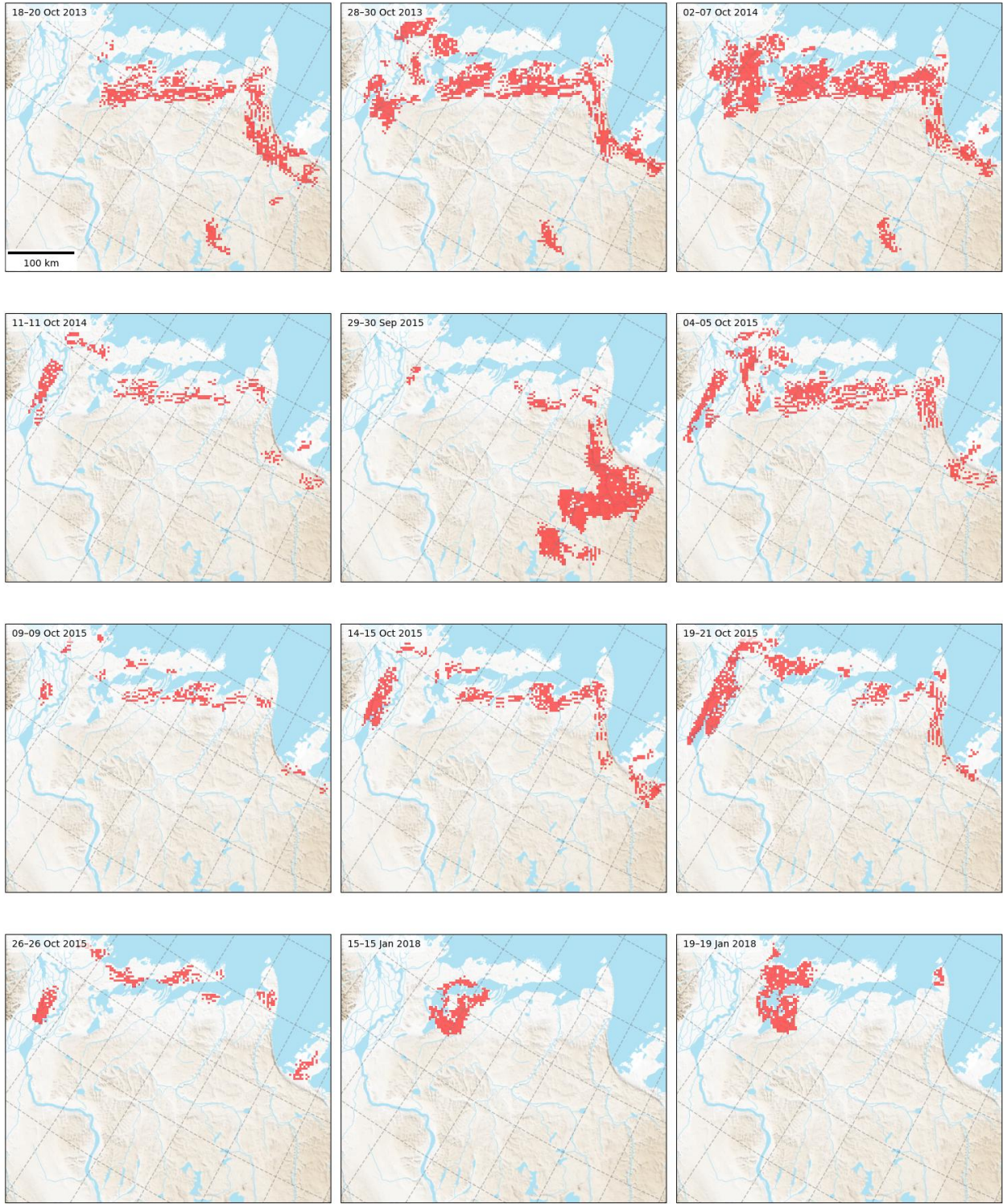
Annexe 1. Cartes de détection des événements grande échelle de PSN



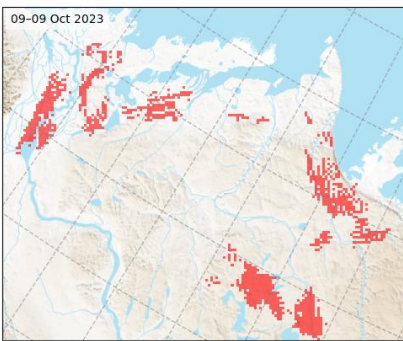
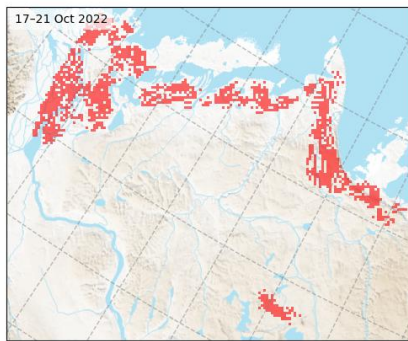
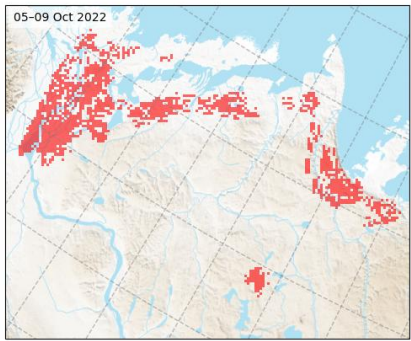
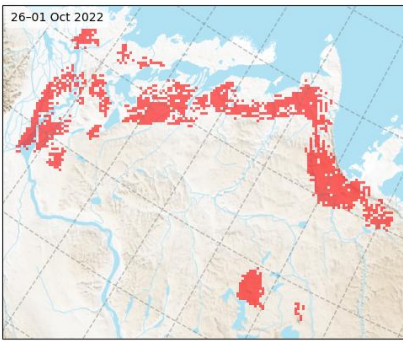
■ ROS Detected (PMW)



■ ROS Detected (PMW)



■ ROS Detected (PMW)



■ ROS Detected (PMW)