

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

DISTRIBUTION SPATIO-TEMPORELLE ET RÉGIMES THERMIQUES DES  
COMBES À NEIGE EN GASPÉSIE CENTRALE

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN GÉOGRAPHIE

PAR

VALENTIN RIVA

JANVIER 2026

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL  
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.12-2023). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

## REMERCIEMENTS

Merci Daniel pour ta riche transmission de savoir, qui me servira tout au long de ma future carrière, et pour les belles opportunités que tu m'as offertes,

Merci Anne-Isabelle et Louna pour votre aide chaleureuse sur le terrain,

Merci Ali (Faghfour) et Charline pour votre aide et votre gentillesse durant ces deux années au département,

Merci Ali (Tarhini) pour ton amitié et ton support tout au long de mon projet.

Merci Valeria pour ta patience, toute l'attention et le soutien que tu as apporté à mes deux années d'études à tes côtés,

Enfin, merci à ma famille pour votre soutien qui a été et sera toujours le plus sincère.

DÉDICACES

*À ma famille et à ma copine que j'aime,  
À Tonton François qui m'a fait aimer la montagne.  
À Mamie Paulette.*

## TABLES DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	xii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES .....	xiv
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS .....	xv
RÉSUMÉ .....	xvi
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE I Définition des combes à neige, limites conceptuelles et états de la recherche .....	12
1.1 Définition selon la littérature scientifique .....	12
1.1.1 Caractéristiques intrinsèques.....	13
1.1.2 Principaux impacts sur l’environnement.....	14
1.1.3 Sensibilité climatique des combes à neige .....	16
1.2 Processus de nivation.....	16
1.3 Historique de la recherche sur les combes à neige .....	17
CHAPITRE II Spécificité des combes à neige à l’échelle planétaire .....	21
2.1 Classification et typologie des combes à neige .....	21
2.1.1 Combes à neige transversales.....	22
2.1.2 Combes à neige longitudinales.....	23
2.1.3 Combes à neige circulaires.....	23
2.2 Fonctionnement et évolution des combes à neige .....	25
2.2.1 Impacts géomorphologiques et thermiques.....	25
2.2.2 Développement d’une végétation spécialisée .....	29
2.2.3 Accumulation de poussières éoliennes .....	31
2.2.4 Recharges pour l’hydrosphère.....	31

2.2.5	Rôle dans les flux thermiques de surface.....	32
2.2.6	Réactions aux variations climatiques.....	33
2.3	Cadre spatial.....	35
2.3.1	Sites d'étude.....	38
CHAPITRE III Méthodologie.....		42
3.1	Principe de l'analyse spatiale des combes à neige.....	43
3.1.1	Classification des combes à neige.....	43
3.2	Analyse des paramètres morphoclimatiques des combes à neige.....	45
3.2.1	Pente.....	46
3.2.2	Géomorphologie.....	47
3.2.3	Insolation et ombrage.....	48
3.2.4	Orientation.....	49
3.2.5	NDVI.....	50
3.3	Analyse multicritère de distribution des combes à neige.....	50
3.4	Évaluation de l'albédo.....	54
3.5	Modélisation prospective de la fonte jusqu'en 2100.....	56
3.6	Modélisation 3D de la fonte.....	61
3.7	Analyse détaillée des combes à neige en milieu forestier.....	64
CHAPITRE IV Résultats.....		66
4.1	Paramètres morphoclimatiques associés aux combes à neige.....	66
4.1.1	Importance de la pente dans le contrôle des combes à neige.....	66
4.1.2	Orientation.....	68
4.1.3	Influence de la géomorphologie.....	70
4.1.4	Influence de l'insolation et de l'ombrage.....	73
4.1.5	Influence du NDVI.....	75
4.1.6	Variations entre deux années consécutives.....	77
4.2	Albédo.....	79
4.3	Résultats de l'analyse multicritère.....	81
4.4	Résultats de la modélisation prospective de la fonte.....	86
4.5	Résultats de la modélisation 3D de la fonte.....	89
4.6	Régimes thermiques des combes à neige.....	92

CHAPITRE V Discussion.....	100
CONCLUSION.....	108
ANNEXE A Script de l'analyse multicritère de la distribution spatiale des combes à neige .....	112
ANNEXE B Script de l'évaluation de l'albédo sur GEE.....	116
ANNEXE C Script du modèle de projection du couvert nival .....	118
ANNEXE D Script du modèle de fonte - Code .....	123
ANNEXE E Script du modèle de fonte - Lien.....	131
BIBLIOGRAPHIE .....	132

## LISTE DES FIGURES

Figure 1. Variation de l'étendue du couvert nival estival pour les périodes 1967-1971, 1995-1999 et 2020-2024 en Amérique du Nord. ....	3
Figure 2. Diminution du couvert nival au Québec nordique et au Canada oriental. A) enneigement au 1er mai pour la période de 1999 à 2002; B) enneigement au 1er mai pour la période de 2021 à 2024. Compilation d'images d'après le U.S National Ice Center (USNIC). ....	4
Figure 3. Évolution des températures moyennes en Gaspésie aux mois de janvier, avril et août pour 2024, 2050 et 2100 d'après le modèle de prédiction des températures du CMIP6. ....	5
Figure 4. Comparaison des températures minimales pour janvier (2024, 2050, 2100) sur la péninsule gaspésienne, d'après les modèles de prédiction climatique du CMIP6. ....	6
Figure 5. Combe à neige en pente moyenne dans une prairie marécageuse au pied du mont de la Madeleine. ....	8
Figure 6. Combes à neige sur le versant est du mont Jacques-Cartier. En 1977, cette combe à neige a persisté tout au long de l'été. Photographie extraite de Gray et Brown (1979). ....	8
Figure 7. Occurrence spatiale des combes à neige du mont Albert en juin de 2014 à 2024. ....	10

Figure 8. Occurrence spatiale des combes à neige des monts McGerrigle en juin de 2014 à 2024. ....	11
Figure 9. Répartition temporelle des domaines de recherche portant sur les combes à neige. ....	19
Figure 10. Évolution temporelle du nombre d'articles scientifiques sur les combes à neige. ....	20
Figure 11. Schéma en coupe de la forme des combes à neige circulaires et longitudinales, selon Brown et Ward (1996). ....	24
Figure 12. Principaux processus et principales formes géomorphologiques de nivation associés à une combe à neige pérenne en milieu sédimentaire non-consolidé, dans une niche de nivation incurvée, d'après Christiansen et al. (1998). Les processus différent à l'amont et à l'aval de la combe à neige. ....	27
Figure 13. Figures montrant la position de lobes de solifluxion possiblement exacerbés par la présence d'importantes combes à neige et glaciers rocheux dans un vallon du mont Albert : A) image satellite; B) image ombragée issue du LiDAR. ....	28
Figure 14. Vue rapprochée d'une forme de fluage (mouvement du sol) vraisemblablement influencée par une grande combe à neige. ....	28
Figure 15. Végétation associée aux combes à neige : A) population d'herbacées sur le mont Nelse, Victoria, Australie (photo prise par Susanna Venn, tirée de Williams et al. (2015)); B) <i>Ranunculus eschscholtzii</i> ( <i>Snowpatch Buttercut</i> ), fleur caractéristique des combes à neige des régions alpines américaines (photo prise par Mark Turner, tirée de Williams et al. (2015)). ....	30
Figure 16. Ensemble du secteur étudié, correspondant à l'est du parc national de la Gaspésie. ....	35

Figure 17. Enneigement du parc national de la Gaspésie le 9 juin 2019. ....	37
Figure 18. Répartition de la végétation au mont Jacques-Cartier, selon Davesne (2015). Le premier étage (1) correspond à une toundra alpine, le deuxième étage (2) abrite une végétation subalpine, et le troisième étage (3) abrite la forêt montagnarde. ....	38
Figure 19. A) Image satellite avec réseaux hydrologiques et écotones de la zone d'étude pour l'étude de cas, B) carte d'indice d'humidité, C) carte de la biomasse aérienne (t/ha) et D) carte du carbone aérien (t/ha). ....	40
Figure 20. Combes à neige de référence pour la classification selon la pente. ....	47
Figure 21. Figure d'entrée et de sortie de l'outil Aspect de ArcGIS, avec le détail des classes d'orientation, d'après ESRI (2024). ....	49
Figure 22. Visualisation des couches d'entrées utilisées pour le modèle de distribution des combes. ....	53
Figure 23. Aperçu de la modélisation d'une combe à neige. Le volume de neige (en bleu) est restreint à une surface déterminée par les surfaces issues des segmentations de couvert nival réalisé depuis les images satellites. ....	63
Figure 24. Distribution des combes à neige selon leur pente moyenne sur le mont Albert, les monts McGerrigle et l'ensemble de la zone d'étude. ....	67
Figure 25. Stéréogrammes d'orientation des combes à neige du parc national de la Gaspésie le 08 juin 2021 et, un mois plus tard, le 03 juillet 2021. On remarque la tendance d'orientation vers l'est avec les sphères jaunes et vertes. ....	69
Figure 26. Distribution des formes géomorphologiques associées aux combes du mont Albert et des monts McGerrigle, selon différentes catégories de pente. La	

catégorie « pente » domine, suivie par les catégories « dépression », « éperon » et « vallée ».	72
Figure 27. A) Insolation sur les combes en pente douce des monts McGerrigle de novembre 2023 à août 2024 et B) insolation sur les combes en pente forte des monts McGerrigle de novembre 2023 à août 2024.	74
Figure 28. Distribution des combes à neige au nord des monts McGerrigle et carte du NDVI après la fonte (2021).	76
Figure 29. Histogramme montrant la distribution des valeurs de NDVI au niveau des combes à neige des monts McGerrigle, peu après leur fonte.	77
Figure 30. Différence d'albédo A) entre la mine Madeleine et le nord du lac Élément (sur deux dates) et, B) dans le nord des monts McGerrigle entre le 8 juin 2021 et le 25 août 2021.	80
Figure 31. Albédo au nord des monts McGerrigle le 8 juin 2021.	81
Figure 32. Carte de distribution des combes à neige prédite par le modèle de susceptibilité pour le mont Albert.	84
Figure 33. Carte de distribution des combes à neige prédite par le modèle de susceptibilité pour les monts McGerrigle.	85
Figure 34. Projections des variables indépendantes (température, précipitations neigeuses et jours chauds) et de la variable dépendante (couvert nival) de 2000 à 2100 suivant les trois scénarios de réchauffements du CMIP6 : A) SSP1-2.6, B) SSP2-4.5, C) SSP5-8.5.	87
Figure 35. Projection de la couverture nivale (en % par rapport à 2024) à la fin-mai selon 3 scénarios climatiques. L'amplitude de chaque projection correspond à la	

valeur pour laquelle la courbe de régression de chaque modèle coupe $y = 0, \pm 3$ ans. ....	88
Figure 36. Représentation du modèle : A) sur l'ensemble du mont Albert, B) vue rapprochée d'une combe à neige et C) visualisation d'une fraction de fonte simulée, la surface brune représente la surface que recouvrait originellement la combe à neige, avant la simulation.....	90
Figure 37. Tableau de comparaison de différentes fractions de fonte de la neige sur le mont Albert, suivant des volumes réels (R) et simulés (S).....	91
Figure 38. Différence d'enneigement entre la zone SP1 (en haut) et SP2 (en bas). On remarque un couvert nival encore important le 09/06 dans la zone SP1 alors qu'il est pratiquement nul dans la zone SP2 le 08/06.....	95
Figure 39. Graphiques et statistiques pour les températures de la zone SP1. Les statistiques correspondent à celles des dates du 2e graphiques. ....	96
Figure 40. Graphiques et statistiques pour les données d'humidité de la zone SP1. Les statistiques correspondent à celles des dates du 2e graphiques. ....	97
Figure 41. Graphiques et statistiques pour les températures de la zone SP2. Les statistiques correspondent à celles des dates du 2e graphiques. ....	98
Figure 42. Graphiques et statistiques pour les données d'humidité de la zone SP2. Les statistiques correspondent à celles des dates du 2e graphiques. ....	99
Figure 43. Combes à neige en milieu forestier sur le flanc ouest du sommet Madeleine, dans les monts McGerrigle.....	101
Figure 44. Modélisation de la grande combe du plateau du mont Albert le 8 juin 2021. ....	103

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Récapitulatif des principales conditions favorables à l'apparition d'une combe à neige.....	14
Tableau 2. Caractéristiques climatiques et écologiques de la zone d'étude. ....	41
Tableau 3. Classes des paramètres appliqués pour le modèle de distribution des combes pour le mont Albert. La couleur représente l'importance de chaque classe, de la plus importante (rouge) à la moins importante (vert). La classe NDVI apparait en blanc car aucune des combes à neige présente sur le plateau ne repose sur un couvert végétal, rendant la catégorie obsolète pour l'étude sur cette zone. ....	52
Tableau 4. Classes des paramètres appliqués pour le modèle de distribution des combes pour les monts McGerrigle. La couleur représente l'importance de chaque classe, de la plus importante (rouge) à la moins importante (verte). ....	53
Tableau 5. Précision du modèle de distribution pour le mont Albert : la précision de la classe 1 est faible mais relevée ( <i>Recall</i> ) après l'utilisation du SMOTE pour surreprésenter la classe 1.....	54
Tableau 6. Précision du modèle de distribution pour les monts McGerrigle : la précision de la classe 1 est faible mais relevée ( <i>Recall</i> ) après l'utilisation du SMOTE pour surreprésenter la classe 1.....	54
Tableau 7. Résumé des éléments du modèle statistique : variables, détails et rôles...	60

Tableau 8. Surface (ha) couverte par les combes à neiges du parc national de la Gaspésie le 8 juin 2021, suivant la pente. ....	67
Tableau 9. Valeurs du NDVI dans le parc national de la Gaspésie en août 2021.....	75
Tableau 10. Statistiques descriptives des valeurs NDVI pour les combes des monts McGerrigle. ....	77
Tableau 11. Surfaces occupées par les combes à neige suivant leur pente le 8 juin 2021. ....	79
Tableau 12. Surfaces occupées par les combes à neige suivant leur pente le 3 juillet 2021.....	79
Tableau 13. Pondérations pour les paramètres associés au mont Albert. ....	83
Tableau 14. Pondérations pour les paramètres associés aux monts McGerrigle. ....	83

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

AMC : Analyse Multi-Critère

CEDA : Centre des Analyses des Données Environnementales

CMIP6 : Coupled Model Intercomparison Project 6

GEE : Google Earth Engine

ECCC : Environment and Climate Change Canada

HR : Humidité relative

MAG : Modèle Additif Généralisé

NIR : Near Infrared

NOAA : National Ocean and Atmospheric Administration

NSIDC : National Snow and Ice Data Center

ROI : Région d'intérêt (Region Of Interest)

RF : Random Forest

SCF : Snow Cover Fraction

SIG : Système d'information géographique

SWIR : Short-Wavelength infrared

## LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

KWh/m<sup>2</sup> : kilowatt heure par mètre carré

MPa (UCS) : Mégapascal ( $10^6$  Pa) (résistance à la compression simple)

## RÉSUMÉ

Face à la diminution du couvert nival en contexte de réchauffement climatique, l'étude de celui-ci s'avère essentielle pour mettre en lumière son importance dans l'équilibre des écosystèmes alpins, leur fragilité et leurs caractéristiques. Le couvert nival saisonnier agit sur les cycles hydriques en régulant et assurant un apport d'eau régulier, créant ainsi des conditions biologiques et climatiques favorables au développement d'une végétation unique et influence la morphologie des régions concernées par le biais de processus géomorphologiques divers tels que l'érosion et le transport sédimentaire. Les combes à neige (ou *snowpatches*) font partie de ce couvert nival. Ce sont des formes d'accumulation de neige persistantes durant le printemps et l'été, présentes en milieu alpin ou froid. Le parc national de la Gaspésie abrite de nombreuses combes à neige, dans un grand éventail de tailles, allant de quelques mètres de diamètre à plusieurs centaines de mètres dans leur axe le plus long. Aucun travail n'a, à ce jour, porté sur les combes à neige dans cette région malgré leur importance dans le dynamisme écologique de la région. La recherche présentée ici a pour but 1) d'apporter une définition mise à jour du terme, à travers la compilation d'une revue de littérature scientifique internationale, 2) d'évaluer l'évolution des combes à neige de la région d'étude à partir de données historiques pour prédire leur présence jusqu'en 2100 suivant les trois scénarios majeurs de réchauffement, à l'aide d'un modèle statistique multivarié, 3) de déterminer les paramètres morphoclimatiques qui influencent leur présence dans la région d'étude par une analyse spatiale multicritère, pour comprendre leurs origines, 4) de documenter une facette de leur influence en milieu forestier (thermique et biologique), à travers une étude de terrain sur une

population échantillonnée lors de différentes missions de terrain. Les résultats de cette recherche visent à éclaircir des notions encore insuffisamment documentées sur les combes à neige, voire non documentées dans la région d'étude, et à démontrer la relation directe existant entre ces formes, leur présence et leur distribution dans l'environnement.

Mots clés : nivation, couverture nivale, fonte, changement climatique, imagerie satellite, régimes thermiques, modélisation.

## INTRODUCTION

Le couvert de neige joue un rôle important dans la régulation du bilan énergétique terrestre, d'une part en réfléchissant une grande partie des radiations solaires et, d'autre part, en isolant le sol et les dépôts de surface des conditions climatiques hivernales (NSIDC, 2024). En 1993, environ 46 millions de km<sup>2</sup> de la surface terrestre de l'hémisphère Nord étaient recouverts de neige en hiver. En 2017, soit 25 ans plus tard, la couverture de neige atteignait à peine 40 millions de km<sup>2</sup> (Robinson et al., 1993, 2017). Au Canada, 65 % des terres sont recouvertes de neige pour une période d'au moins six mois par an (ECCC, 2022). La répartition spatiotemporelle du couvert nival et ses caractéristiques sont donc des éléments cruciaux pour mieux comprendre les changements climatiques (Beniston et al., 2018) et leurs répercussions hydrologiques (Lehning, 2013) et écologiques (Wheeler et al., 2016) dans les régions froides.

Le couvert nival fluctue dans le temps et l'espace en fonction de la température de l'air, des précipitations et des cycles climatiques saisonniers. Ces fluctuations peuvent avoir d'importantes conséquences sur les systèmes naturels et humains. En effet, la fonte printanière de la neige est, dans de nombreuses régions du Canada et du monde, une ressource essentielle pour les milieux naturels – systèmes écologiques (Wheeler et al., 2016) et aquatiques (Hamlet et Lettenmaier, 2007) – et les activités humaines récréatives (Grünewald et al., 2018) et économiques (Sturm et al., 2017). Le couvert nival permet également d'isoler le sol et de protéger les plantes et les animaux des températures négatives hivernales. Grâce à son albédo, c'est-à-dire sa capacité à réfléchir une grande partie du rayonnement solaire, la neige renvoie une proportion importante de l'énergie reçue, contribuant ainsi à limiter le réchauffement de la surface

terrestre. Avec les changements globaux en cours, la diminution du couvert de neige favorise davantage l'absorption de chaleur, ce qui accentue le réchauffement, phénomène connu sous l'appellation de la rétroaction positive de l'albédo de la neige (Ren et Leslie, 2011). La diminution significative, voire la disparition du couvert de neige, est donc une menace pour les écosystèmes des milieux froids dont la pérennité dépend d'un enneigement annuel.

Depuis les années 1970, la couverture de neige et sa durée ont fortement diminué au Canada, en lien direct avec la hausse des températures de l'air observées sur la même période (Figures 1 et 2). Entre les printemps 1972 et 2021, le couvert nival a diminué de 1.7 % par décennie en mai et de 5.2 % en juin. En été, la réduction est encore plus marquée; environ 46 % entre 1972 et 2024, ce qui correspond à une perte de 2 350 000 km<sup>2</sup> de neige estivale au Canada (Figure 1) (ECCC, 2024). Cette différence s'explique par le fait qu'en été, la neige persiste surtout dans l'Arctique et le nord du pays, où le réchauffement climatique est particulièrement prononcé (Figures 3 et 4). Il est donc essentiel de disposer d'informations fines, à la fois temporelles et spatiales, sur l'évolution du couvert nival afin de mieux comprendre les changements climatiques à court et long terme au Canada.

Mott et al. (2017) caractérisent le couvert de neige selon trois modes de distribution : 1) un couvert nival continu, 2) un couvert nival avec la présence d'une ligne de neige distincte (p. ex. une frontière définie entre les espaces avec et sans neige) et 3) un couvert nival irrégulier et dispersé. Dans les deux derniers cas, la répartition discontinue du couvert de neige entraîne un découplage thermique de l'air. Une forte stratification atmosphérique se forme près de la surface, séparant l'air adjacent à la neige du reste de l'atmosphère plus chaude au-dessus. Cette stratification reste stable en raison de l'écart thermique marqué entre ces deux couches et des flux d'air froid qui s'écoulent vers les dépressions topographiques. Cette distribution hétérogène de la

neige est souvent associée à des accumulations localisées appelées ‘combes à neige’, où la neige persiste sous forme de plaques discontinues (*snowpatches*).

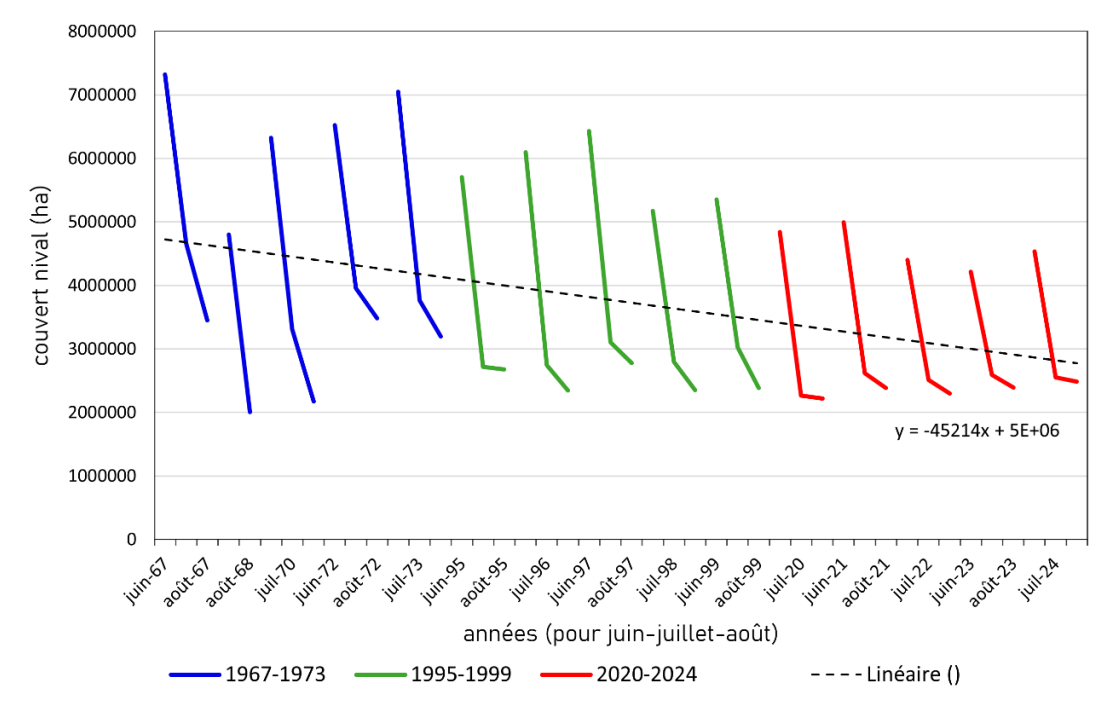


Figure 1. Variation de l'étendue du couvert nival estival pour les périodes 1967-1971, 1995-1999 et 2020-2024 en Amérique du Nord.

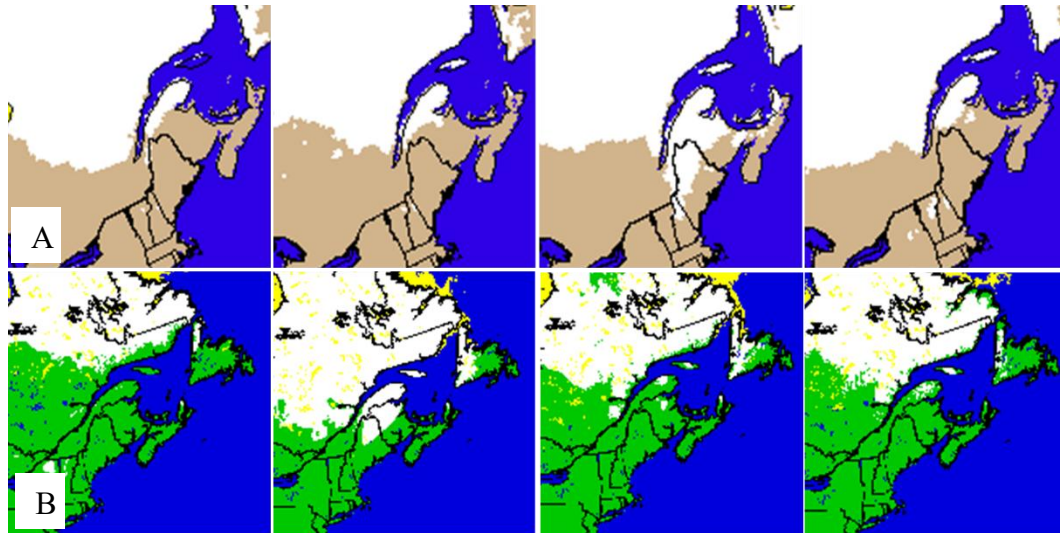


Figure 2. Diminution du couvert nival au Québec nordique et au Canada oriental. A) enneigement au 1er mai pour la période de 1999 à 2002; B) enneigement au 1er mai pour la période de 2021 à 2024. Compilation d'images d'après le U.S National Ice Center (USNIC).

En Gaspésie (Québec), les variations spatiotemporelles du couvert de neige peuvent également être observées à l'aide d'images satellitaires. À titre d'exemple, la durée de l'enneigement annuel pour 2021 était de 10 à 20 jours plus courte par rapport à la moyenne pour la période de 1999 à 2018 (ECCC, 2018). L'étendue du couvert nival a, elle aussi, diminué d'après les données de la NOAA entre 1999 et 2024. Cependant, il convient de mentionner l'absence de données publiques sur les variations de la couverture de neige en Gaspésie au cours des 50 dernières années. Néanmoins, pour la période de 1999 à 2002, puis de 2021 à 2024, le couvert nival au 1<sup>er</sup> mai avait fortement diminué en Gaspésie, hormis pour l'année 2022 qui a connu des conditions d'enneigement exceptionnelles (Figure 2). Toutefois, il est difficile d'extrapoler ces données ou d'y dégager une tendance claire, en raison du manque d'images satellitaires à haute résolution et du faible nombre d'études disponibles sur le sujet.

La Gaspésie centrale abrite des hauts reliefs avec notamment le mont Jacques-Cartier (1268 m), soit le deuxième plus haut sommet du Québec, derrière le mont d'Iberville (1652 m) situé dans les monts Torngat au Nunavik. Le parc de la Gaspésie revêt une importance nationale en raison de sa biodiversité, de ses paysages et de son attrait touristique. Cependant, il n'échappe pas aux effets du changement climatique, qui entraînent vraisemblablement une réduction de son couvert neigeux. Ces hauts reliefs se caractérisent par un climat rude et froid, similaire aux environnements périglaciaires de la toundra arctique située 1 000 km plus au nord. Cet environnement favorise ainsi le maintien, à l'échelle locale, de couverts nivaux estivaux, tels que les combes à neige (Davesne, 2015). Cependant, ces formations caractérisées par un couvert de neige tardif, semblent diminuer dans le temps et dans l'espace.

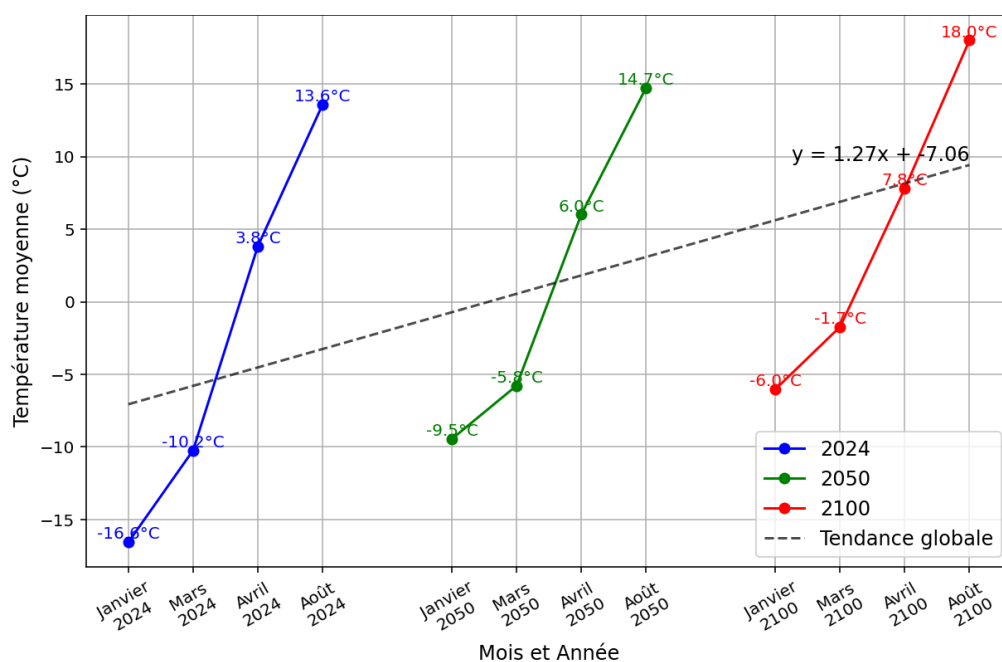


Figure 3. Évolution des températures moyennes en Gaspésie aux mois de janvier, avril et août pour 2024, 2050 et 2100 d'après le modèle de prédiction des températures du CMIP6.

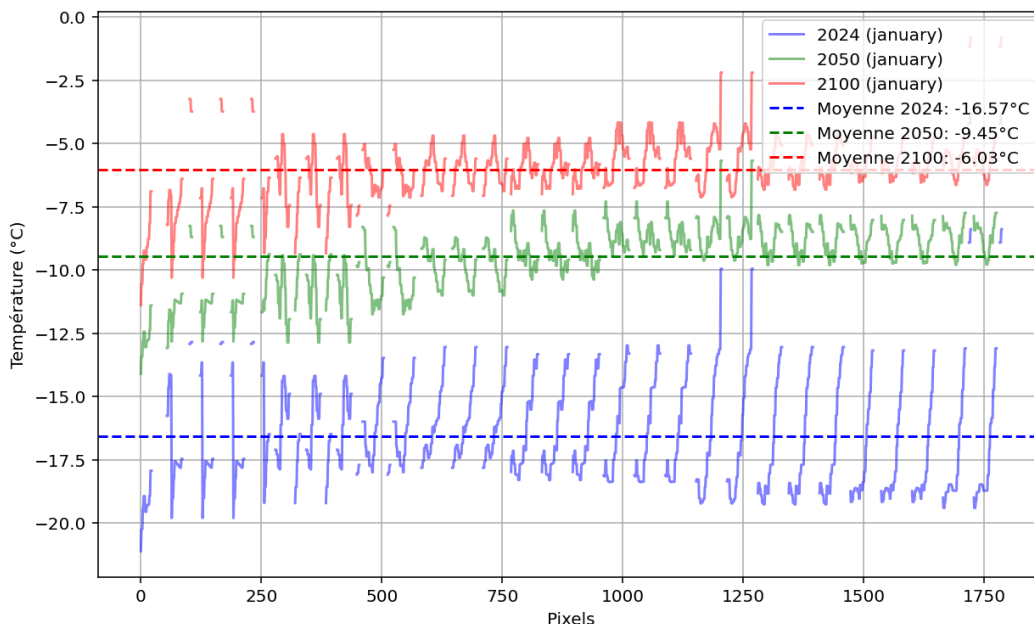


Figure 4. Comparaison des températures minimales pour janvier (2024, 2050, 2100) sur la péninsule gaspésienne, d'après les modèles de prédiction climatique du CMIP6.

Situées sur les plus hauts sommets de la Gaspésie comme le mont Albert et le mont Jacques-Cartier (Figures 7 et 8), les combes à neige sont, pour l'essentiel, associées à l'accumulation de neige dans des dépressions topographiques et des champs de blocs, ou encore des ravines creusées dans la roche en place sur certains versants raides. Ces combes à neige sont aujourd'hui saisonnières (Figure 5), avec la disparition complète du couvert de neige en été, mais certaines ont déjà persisté tout au long de l'année, notamment sur le versant est du mont Jacques-Cartier en 1977 (Figure 6) (Gray et Brown, 1982). À des altitudes plus basses, on note aussi la présence de combes à neige dans les prairies subalpines, mais aussi sous couvert forestier. Généralement d'une taille plus restreinte, ces combes à neige n'ont, à notre connaissance, encore jamais fait l'objet de recherche quant à leur dynamique de fonctionnement et leurs impacts (géo)écologiques. Pourtant, il est généralement reconnu que les endroits avec un couvert nival tardif sont caractérisés, d'un point de vue botanique, par une flore adaptée

et particulière par rapport aux environnements adjacents (Filion et Payette, 1982 ; Brouillet et al., 1998 ; Petraglia et Tomaselli, 2007). Dans le contexte du réchauffement climatique actuel et anticipé, il convient alors de s'interroger sur le fait de savoir si ces combes à neige peuvent servir de refuges pour les espèces adaptées au froid. Dans le parc national de la Gaspésie, aucune étude n'a encore été réalisée sur les combes à neige et sur l'évolution du couvert nival de la région. Ce manque d'information apparaît pourtant crucial dans une perspective de conservation des écosystèmes, mais aussi d'atténuation des impacts des changements climatiques.

Dans l'hémisphère nord, la saison hivernale avec des températures froides et une faible radiation solaire joue un rôle déterminant dans le maintien du couvert nival saisonnier (Daimaru et al., 2002 ; Musselman et al., 2017). Un seuil thermique semble exister : lorsque les conditions hivernales sont suffisamment rigoureuses, certaines combes à neige peuvent persister durant l'été, même sous des températures positives. Ce phénomène souligne l'importance des hivers très froids pour la préservation des combes à neige en milieu montagnard. Toutefois, leur maintien devient de plus en plus incertain à court terme en raison du réchauffement climatique, qui affecte particulièrement les températures hivernales. Les combes à neige agissent ainsi comme de véritables sentinelles climatiques (Morgan et Walker, 2023 ; Cameron et al., 2024 ; Arie et al., 2025 ; Campbell et al., 2025). Leur déclin ou leur transition d'un état pérenne à saisonnier constitue un indicateur clair des changements climatiques en altitude au cours des dernières décennies (Cameron et al., 2024). Les images satellitaires permettent d'obtenir un premier aperçu du couvert nival dans la région à un moment donné, mais la faible fréquence et leur résolution spatiale limitée rendent nécessaires des observations directes sur le terrain.



Figure 5. Combe à neige en pente moyenne dans une prairie marécageuse au pied du mont de la Madeleine.



Figure 6. Combes à neige sur le versant est du mont Jacques-Cartier. En 1977, cette combe à neige a persisté tout au long de l'été. Photographie extraite de Gray et Brown (1979).

Dans le cadre de ce mémoire, le premier chapitre propose une revue de littérature visant à définir la notion de combe à neige et à inventorier les connaissances actuellement disponibles. Cet objectif permet de clarifier un concept parfois insuffisamment ou incorrectement défini dans la littérature scientifique.

Le deuxième objectif repose sur une analyse spatiale des combes à neige, réalisée à partir d'images satellitaires et d'outils de SIG. Cette analyse vise, d'une part, à évaluer l'évolution des combes depuis des données historiques et à projeter leur présence jusqu'en 2100 à l'aide de modèles climatiques, et d'autre part, à identifier les paramètres qui influencent leur distribution et leur persistance en Gaspésie à travers une analyse multicritère. Ces travaux permettront de mieux comprendre le rôle du climat dans la stabilité des combes et les raisons de leur maintien dans la région, et ainsi confirmer leur statut de sentinelles climatiques.

Enfin, un troisième objectif consiste à approfondir l'étude de certaines combes en milieu forestier, à l'aide de données climatiques in situ ainsi que de relevés botaniques et thermiques. L'analyse de leur dynamique met en évidence leur importance écologique, tant pour la gestion des ressources en eau que pour la séquestration du carbone liée à l'accumulation de matière organique, que pour leur influence sur le microclimat local par l'effet d'albédo associé à la neige.

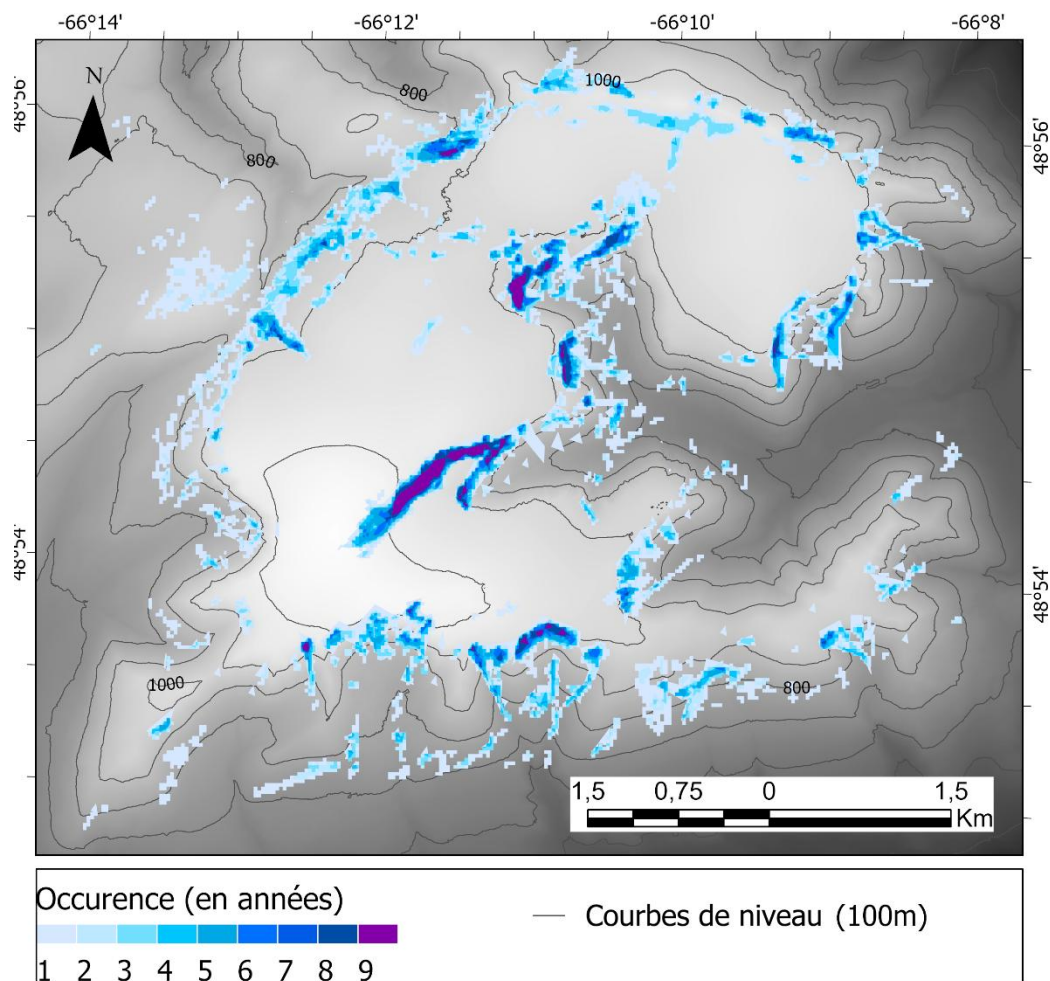


Figure 7. Occurrence spatiale des combes à neige du mont Albert en juin de 2014 à 2024.

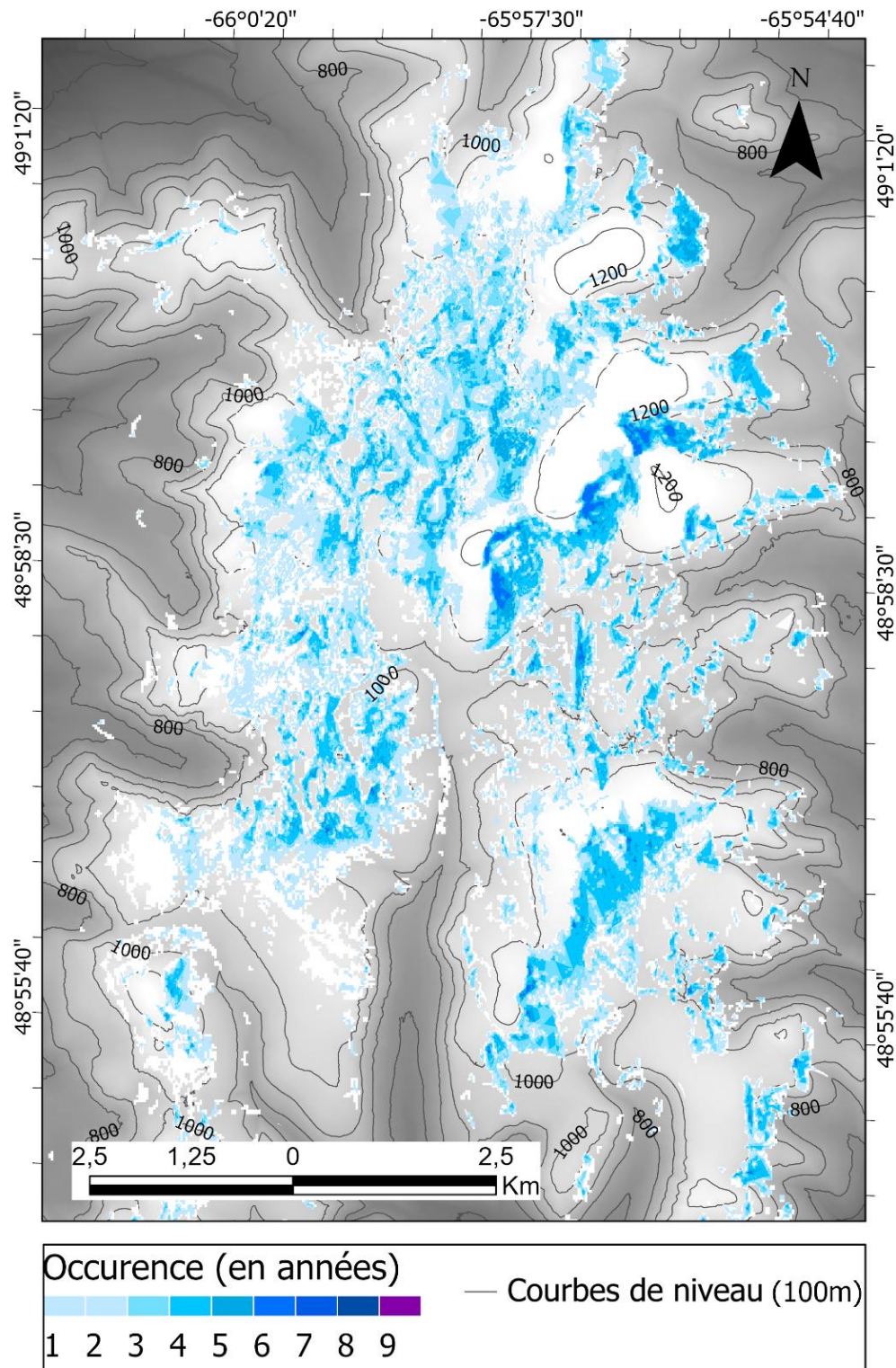


Figure 8. Occurrence spatiale des combes à neige des monts McGerrigle en juin de 2014 à 2024.

## CHAPITRE I

### DÉFINITION DES COMBES À NEIGE, LIMITES CONCEPTUELLES ET ÉTATS DE LA RECHERCHE

L'étude des couverts nivaux saisonniers à petite échelle demeure limitée, car elle nécessite généralement des observations de terrain, les images satellitaires ne permettant pas toujours de les distinguer clairement. Par ailleurs, l'influence de la neige saisonnière sur la modification des reliefs a longtemps été remise en question, ce qui a contribué à freiner l'intérêt scientifique pour le sujet. Ces contraintes expliquent en partie la rareté des publications scientifiques et, par conséquent, le manque de données disponibles sur les combes à neige et, plus largement, sur les couverts nivaux saisonniers.

Dans ce chapitre, une définition en trois volets des combes à neige (ou congères) est proposée à partir de la littérature scientifique. L'état actuel des connaissances est ensuite présenté, avant d'aborder la place des processus de nivation dans les recherches en géomorphologie et en glaciologie. Enfin, un aperçu de l'intérêt porté aux combes à neige dans la littérature scientifique conclut ce chapitre.

#### 1.1 Définition selon la littérature scientifique

Une première définition du terme est proposée après une recension de la littérature scientifique internationale. Celle-ci s'appuie sur des travaux issus de disciplines variées,

telles que la géographie, la géomorphologie, la biologie végétale et la climatologie, dans lesquels les combes à neige sont mentionnées et étudiées.

#### 1.1.1 Caractéristiques intrinsèques

Une combe à neige est une forme d'accumulation nivale typique des milieux froids et alpins. Elle se développe dans des dépressions topographiques de formes et de dimensions variables, appelées niches de nivation. Sa formation dépend de conditions topo-climatiques particulières qui favorisent l'accumulation et la persistance de la neige (Tableau 1). Ces conditions déterminent la taille, la morphologie et la localisation des combes à neige.

On distingue généralement deux grandes classes :

- Combes saisonnières : accumulations de neige qui disparaissent entièrement en fin d'été. Leur bilan de masse annuel est nul.
- Combes pérennes : accumulations de neige qui persistent au moins deux années consécutives. Leur bilan de masse annuel varie selon les fluctuations climatiques interannuelles.

La combe à neige se différencie d'autres formes nivales proches, telles que de la plaque de glace (Lewkowicz et Harry, 1991; Kawashima et al., 1993), caractéristique des milieux polaires, par une action érosive plus limitée, et des petits glaciers (ou glaciettes) par l'absence de base gelée durant la saison chaude (Davesne et al., 2022 ; Davesne et al., 2023). Cette distinction n'est toutefois pas toujours nette : certaines formes présentent une continuité évolutive, allant de la combe à neige au glacier, en fonction des conditions climatiques et topographiques. Ainsi, dans les Alpes japonaises, des combes autrefois considérées comme telles ont été reclassées comme de très petits glaciers (*very small glaciers*) en raison d'une transformation progressive de la neige

vers la glace et d'une persistance accrue (Arie et al., 2025). Il convient également de distinguer la niche de nivation de la combe à neige. La niche de nivation correspond à la dépression topographique propice à l'accumulation de neige (Henderson, 1956 ; Christiansen, 1998 ; Campbell et al., 2025), tandis que la combe désigne la masse de neige elle-même. Généralement, la niche de nivation présente une forme semi-circulaire ouverte vers la pente, conditionnant la géométrie de la combe à neige (Christiansen, 1998). L'origine des niches de nivation demeure difficile à établir, car les processus en jeu sont lents et remontent souvent aux périodes glaciaires. Elles résultent probablement d'actions répétées de nivation (gel-dégel, ruissellement d'eau de fonte), qui sculptent progressivement des dépressions concaves à partir de chenaux de ruissellement, rigoles ou creux préexistants. De plus, les combes peuvent se former en aval d'obstacles naturels (irrégularités du terrain, végétation, ruptures de pente), qui favorisent localement l'accumulation nivale (Davesne, 2015).

<b>Conditions climatiques</b>	<b>Conditions topographiques</b>	<b>Conditions géographiques</b>
Environnement froid avec hivers neigeux et étés frais	Dépressions topographiques	Versant sous le vent
Vent pour le transport efficace de la neige	Pentes	Régions ombragées
		Régions montagnardes

Tableau 1. Récapitulatif des principales conditions favorables à l'apparition d'une combe à neige.

### 1.1.2 Principaux impacts sur l'environnement

L'influence des combes à neige sur leur environnement peut être regroupée en deux grandes catégories : les impacts directs et les impacts indirects.

Les impacts directs découlent de la présence même de la neige. Le plus important est la protection du sol sous-jacent contre les processus de gel-dégel liés aux fluctuations climatiques journalières. Cette protection dépend à la fois de l'épaisseur du manteau neigeux et des propriétés thermiques du sol (pergélisol ou sol non-gelé). D'autres

impacts incluent l'abrasion mécanique du substrat rocheux par la pression exercée par la neige, pouvant entraîner une érosion localisée. Enfin, l'effet d'albédo constitue un autre impact direct : la surface enneigée réfléchit une part importante du rayonnement solaire, modifiant ainsi le bilan énergétique local.

Les impacts indirects proviennent principalement des conditions particulières de température, d'humidité et de ruissèlement associées à la fonte des combes. Sur le plan géomorphologique, la fonte tardive entraîne un ruissellement concentré qui accentue l'érosion des sols meubles, à la fois par action mécanique et par saturation hydrique. Ce processus, connu sous le terme de nivation, favorise la formation de rigoles, de chenaux de drainage et à long terme, l'élargissement des dépressions topographiques. Combinés aux processus de solifluxion et de gélifluxion, ces phénomènes contribuent à l'évolution des reliefs montagnards et participent à la genèse des cirques glaciaires.

Les combes à neige jouent également un rôle dans l'accumulation sédimentaire. Elles piègent des particules éoliennes fines et favorisent le dépôt de matière organique dans des environnements froids et humides, souvent sous forme de tourbières. Sur le plan écologique, elles abritent une végétation spécialisée, adaptée aux contraintes de fort enneigement et à une saison de croissance écourtée. La fonte progressive induit un gradient de végétation qui influence la composition et la répartition des espèces. Cet aspect, largement documenté en milieu montagnard, souligne l'importance écologique des combes, aujourd'hui menacées par le réchauffement climatique. Enfin, la disponibilité en eau issue de la fonte peut également jouer un rôle hydrologique. En abaissant le seuil de précipitations nécessaires au déclenchement d'évènements torrentiels, les combes à neige peuvent contribuer à l'augmentation du risque hydrogéomorphologique local (Lafortune et al., 2006).

### 1.1.3 Sensibilité climatique des combes à neige

Les combes à neige sont des formations nivales particulièrement sensibles aux variations climatiques. Leur existence repose sur des conditions spécifiques d'enneigement et de température, aujourd'hui de plus en plus compromises par le réchauffement global. Les transformations rapides qui affectent les environnements montagnards réduisent leur fréquence et leur durée de persistance. À l'échelle mondiale, une tendance générale au rétrécissement des combes est observée ces dernières décennies (Arie et al., 2025 ; Campbell et al, 2025). L'un des indicateurs les plus marquants de cette évolution réside dans la transition des communautés végétales. Les espèces spécialisées, adaptées à des environnements froids et enneigés, cèdent progressivement la place à des espèces plus typiques des milieux tempérés. Cette dynamique confère aux combes à neige le statut de sentinelles climatiques, permettant d'évaluer les impacts écologiques du réchauffement dans les zones alpines. Comme le soulignent Good et al. (2019):

*'Changes in the timing of snowmelt with a changing climate will undoubtedly result in a shift in the functional composition of alpine communities with those at the extreme end of the snowmelt gradient (snowpatches) experiencing the most fundamental change.'* (Good et al. 2019, p. 61)

## 1.2 Processus de nivation

L'origine des combes à neige et leurs impacts sur le paysage sont étroitement liés au concept de nivation. Ce terme, introduit par Matthes en 1900, précède les premières mentions françaises et anglaises de combes à neige et *snowpatch*. Il désigne l'ensemble des processus géomorphologiques induits par l'action de la neige, en particulier les cycles de gel-dégel affectant le sol. La nivation englobe plusieurs mécanismes,

notamment l'altération mécanique et chimique liée aux cycles de gel-dégel, le ruissellement des eaux de fonte, qui redistribue les sédiments et accentue l'abrasion du substrat rocheux, le transport de sédiments, conduisant à la formation de rigoles et de cônes de déjection, et contribuant ainsi au remodelage du relief montagnard, l'influence sur la végétation, qui favorise le développement d'espèces adaptées aux conditions périglaciaires, l'accumulation de tourbe et la mise en place d'un gradient végétal. Ce processus est à l'origine des niches de nivation, des dépressions topographiques où s'accumule la neige des combes et qui résultent d'une érosion progressive induite par la nivation.

Toutefois, la portée de ce processus fait débat. Si son effet est manifeste à petite échelle, son rôle dans l'évolution des paysages alpins reste controversé. Certains chercheurs le considèrent comme un processus lent et limité (Thorn, 1988 ; Kariya, 2002, Thorn et al., 2002), tandis que d'autres y voient un facteur déterminant de l'érosion, de la sédimentation et plus largement de l'évolution géomorphologique, biologique et climatique des environnements alpins et montagnards (Gardner, 1969). Ce clivage scientifique reflète des perspectives contrastées quant à l'importance réelle de la nivation dans la dynamique des milieux de montagne.

### 1.3 Historique de la recherche sur les combes à neige

Bien que plus développée que la littérature sur la géomorphologie et les conditions nivales en Gaspésie, la recherche scientifique sur les combes à neige demeure souvent vague et imprécise, tant sur le plan de leur définition que de leurs impacts.

L'introduction du terme *snowpatch* par Lewis en 1939 dans une étude de géomorphologie glaciaire constitue la première étape marquante. Son usage a toutefois connu des fluctuations selon les époques et les disciplines. Entre cet article fondateur et le début des années 1970, peu de travaux se sont intéressés directement aux combes

à neige (Figure 10). Ceux qui l'ont fait ont surtout étudié leurs effets géomorphologiques, mécaniques et sédimentaires, en les comparant aux processus de nivation décrits dès 1900 par Matthes. Ces recherches ciblaient des environnements froids, souvent sur sols meubles, afin d'évaluer l'impact érosif de la neige et de sa fonte. À partir des années 1970, les études deviennent plus nombreuses, mais restent majoritairement centrées sur la géomorphologie glaciaire (Costin et al., 1973, Thorn, 1979). Les décennies 1980 et 1990 marquent un tournant : de nouvelles thématiques émergent, telles que les caractéristiques thermiques des combes, leur influence microclimatique, leur répartition spatiale (Brown et Ward, 1996), ou encore leur rôle écologique (Figure 9). Cette diversification ouvre la voie à des recherches en climatologie, en physique, en cartographie et en biologie, élargissant ainsi l'intérêt scientifique pour ces formations.

À la fin des années 1990, Christiansen (1998) propose une redéfinition des processus de nivation, renforçant la pertinence de l'étude des combes à neige, longtemps considérées comme des formes passives et secondaires. La littérature demeure toutefois largement anglophone. Quelques contributions francophones existent, notamment au Québec, surtout en écologie : Payette et al. (2015), Matthieu et al. (1987), et plus récemment Davesne (2015, 2021). Cependant, ces études abordent rarement directement les couverts nivaux, à l'exception des travaux de Davesne (2015).

Depuis le début du XXI<sup>e</sup> siècle, l'intérêt pour les combes à neige s'est renforcé et diversifié (Daimaru et al., 2002 ; Verrall et al., 2023 ; Morgan et Walker, 2023, Campbell et al., 2025). En géomorphologie, les recherches insistent sur leurs impacts érosifs et sédimentaires; en écologie, elles mettent en évidence leur rôle dans la protection des sols, la dynamique de la flore et la biodiversité associée. Toutefois, si le terme combe à neige apparaît plus fréquemment dans la littérature récente, il demeure le plus souvent employé comme simple contexte d'étude plutôt que comme objet de recherche en soi. Depuis 2020, les publications sont dominées par des travaux

écologiques (Figure 9), soulignant leur rôle de plus en plus reconnu dans les dynamiques environnementales contemporaines.

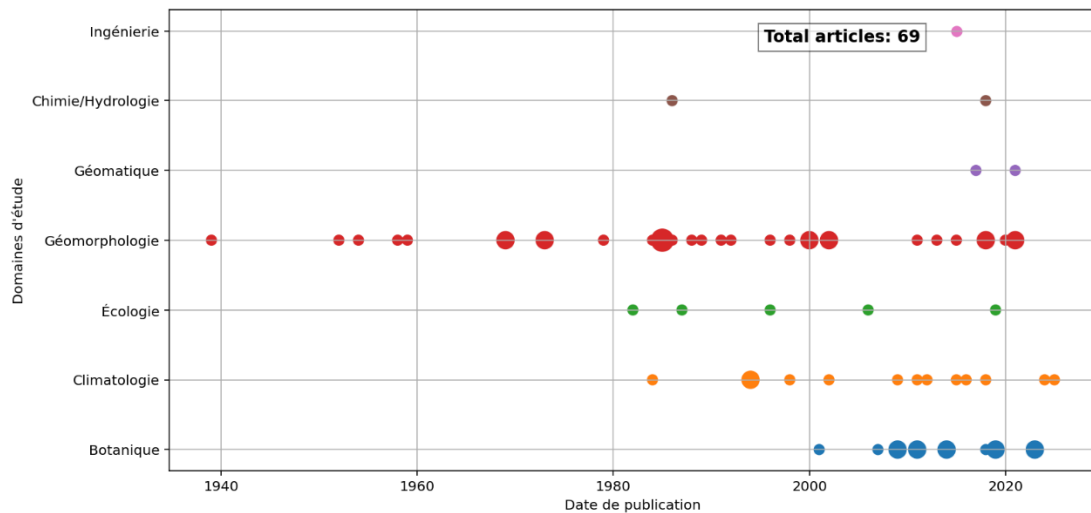


Figure 9. Répartition temporelle des domaines de recherche portant sur les combes à neige.

L'état actuel des connaissances sur les combes à neige demeure limité, ce qui rend nécessaire un approfondissement des recherches (Christiansen, 1998 ; Daimaru et al., 2002 ; Margold et al., 2011 ; Kňazková et al., 2021 ; Morgan et Walker, 2023). Cette lacune apparaît d'autant plus frappante que le terme combe à neige est quasiment absent des grandes encyclopédies spécialisées (e.g., *The Dictionary of Physical Geography*; *A Dictionary of ecology*; *Oxford dictionary*; *Elsevier Dictionary of Glaciology*, etc.), au profit du terme nivation, légèrement mieux documenté. Les processus de nivation associés aux combes à neige en Antarctique restent mal connus, ce qui complique la distinction entre ces formations et d'autres formes nivales comme les plaques de neige et les glacierettes. De plus, si les effets du gel-dégel ont été abordés à plusieurs reprises (Embleton, 1975 ; Nyberg, 1986 ; Christiansen, 1998 ; Kariya, 2002 ; Paquette, 2018, Kňazková et al., 2020), ils sont largement délaissés dans les recherches récentes. À l'inverse, les changements affectant la distribution et la

dynamique de fonte des combes à neige suscitent un intérêt croissant, notamment en raison des réactions rapides de la végétation spécialisée. L'étude de ces communautés, dans une approche biologique et écologique, est aujourd'hui au cœur de la recherche, révélant l'importance des combes à neige comme habitats et régulateurs microclimatiques. Toutefois, une meilleure compréhension de ces interactions nécessite d'abord un approfondissement des connaissances intrinsèques sur les combes à neige, afin de cerner pleinement leur rôle et leurs effets dans les environnements alpins et périglaciaires.

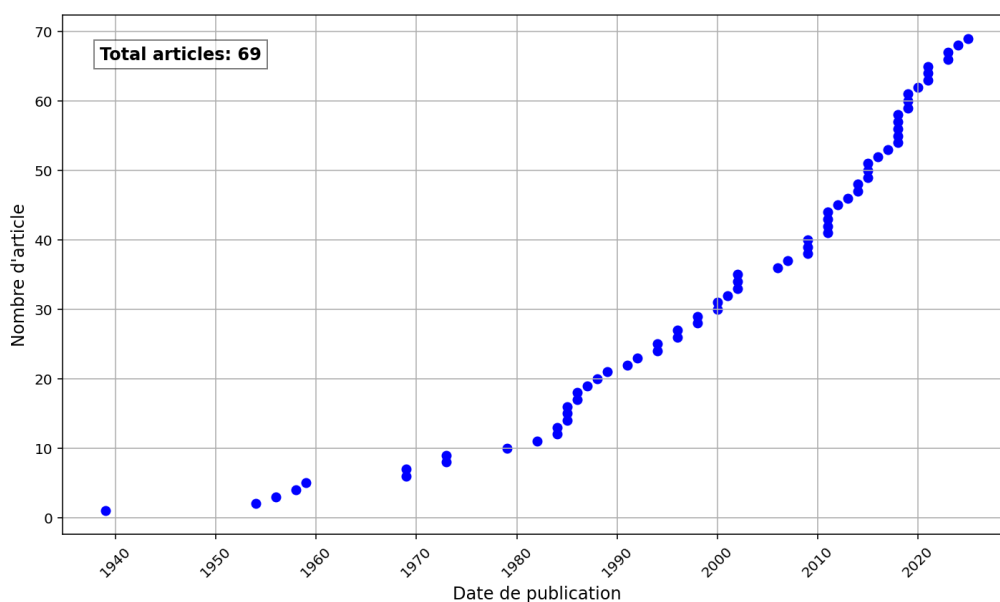


Figure 10. Évolution temporelle du nombre d'articles scientifiques sur les combes à neige.

## CHAPITRE II

### SPÉCIFICITÉ DES COMBES À NEIGE À L'ÉCHELLE PLANÉTAIRE

Les combes à neige présentent des formes et des configurations variées selon leur environnement, lequel est déterminé par des facteurs géologiques, topographiques, climatiques et géomorphologiques. Ces facteurs influencent non seulement leur formation, mais aussi leur évolution dans le temps, ce qui confère à leurs processus et à leurs impacts une grande diversité. Il apparaît donc essentiel de mieux cerner l'ensemble des caractéristiques de ces couverts nivaux tardifs ainsi que les effets qu'ils exercent sur leur environnement.

En Gaspésie, ces formations ne sont pas étudiées de manière approfondie. Ce chapitre propose ainsi de dresser un état des connaissances générales sur les combes à neige, pour mieux appréhender leur dynamique et leur comportement potentiel en Gaspésie, puis de présenter le cadre spatial et temporel de la recherche.

#### 2.1 Classification et typologie des combes à neige

Les combes à neige résultent de l'accumulation de neige dans des niches de nivation, souvent alimentées par le transport de la neige par le vent. Bien qu'elles se forment généralement au même endroit d'une année à l'autre, leur morphologie et leurs conditions de fonte peuvent varier selon les fluctuations annuelles des régimes de vent

(Pedersen et al., 2013 ; Mott et al., 2018). La littérature scientifique mentionne plusieurs facteurs favorisant leur formation comme l'exposition au vent (Boyle, 2011 ; Mott et al., 2018), l'ensoleillement et la température, et la topographie (pente et exposition). Toutefois, aucun consensus clair n'existe sur l'importance relative des précipitations et du transport éolien dans l'accumulation de neige (Green et Pickering, 2018 ; Watson et al., 1994). Le vent est néanmoins généralement reconnu comme le principal facteur expliquant leur répartition. Dans le cas des monts McGerrigle et du mont Albert, les conditions de vent restent mal documentées. Selon Boucher et al. (2003), les versants orientés à l'est des hauts sommets des Chic-Chocs reçoivent une accumulation de neige plus importante que les versants ouest. Cette disparité s'expliquerait par la force des vents hivernaux qui balaient les versants ouest et redistribuent la neige vers les versants est, situés sous le vent.

Plusieurs chercheurs ont tenté de classifier les combes à neige selon leur forme (Lewis, 1939 ; Thorn, 1979). Lewis (1939) a proposé une typologie des niches de nivation, reprise et enrichie par Thorn (1988) et d'autres auteurs (Brown et Ward, 1996), afin de mieux distinguer les différents types observés. Trois catégories principales sont généralement retenues : les niches transversales, les niches longitudinales et les niches circulaires (Figure 11).

#### 2.1.1 Combes à neige transversales

Les niches de nivation transversales se développent le long des lignes de contour d'une pente, généralement au pied de versants abrupts situés sous le vent. Elles peuvent atteindre plusieurs kilomètres de longueur et plusieurs centaines de mètres de largeur dans le sens de la pente (Lewis, 1939). La neige y recouvre souvent des sols dépourvus de végétation, sur des topographies planes où s'accumulent des sédiments issus d'eaux de fonte. Lorsque les processus de nivation sont actifs, la niche peut s'agrandir par surcreusement de la paroi arrière, ce qui favorise la rétention de la neige jusque tard en été. Ce type de combe a fréquemment été évoqué comme un stade précurseur des

cirques glaciaires (Lewis, 1939 ; Costin et al., 1973 ; Brown et Ward, 1996, Goudie, 2003). Plus largement, les processus de nivation en bas de pentes abruptes ont été associés à la genèse de glaciers alpins (Wright, 1914 ; Russell, 1933 ; Watson, 1966). Dans d'autres cas, les combes transversales sont interprétées comme des formes annonciatrices des terrasses de cryoplanation (Lewis, 1939 ; Boyé, 1952), en particulier lorsque l'eau de fonte exerce une altération chimique sur le substrat, par exemple dans les massifs calcaires.

### 2.1.2 Combes à neige longitudinales

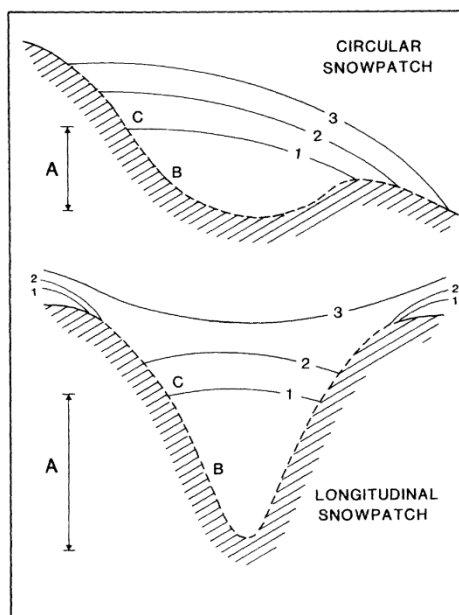
Les niches de nivation longitudinales s'orientent dans le sens de la pente. Elles se développent fréquemment dans des rigoles ou de petits couloirs déjà surcreusés par l'eau. Dans ces contextes, il devient difficile de distinguer l'action de l'érosion hydrique de celle de la nivation (Dineley, 1954). Toutefois, il est généralement admis que la nivation contribue à élargir ces rigoles préexistantes (Lewis, 1939; Christiansen, 1996) et à en arrondir les bordures, leur conférant une morphologie semi-circulaire en entonnoir (Groom, 1959). À l'instar des combes à neige transversales, l'élargissement progressif des combes longitudinales peut favoriser la persistance de la neige en facilitant son accumulation par le vent, la formation de plaques de glace, puis éventuellement de petits glaciers (Groom, 1959). Ce type de combe est particulièrement associé aux reliefs abrupts, où la pente excède fréquemment 40 ° (Groom, 1959).

### 2.1.3 Combes à neige circulaires

Contrairement aux deux types précédents, les combes circulaires, décrites par Lewis (1939), apparaissent comme largement indépendantes de la topographie et des dynamiques d'érosion hydrique. Leur forme est grossièrement circulaire, leur diamètre peut varier de quelques dizaines de mètres à plus d'un kilomètre. Elles se développent généralement sur des pentes douces et végétalisées, sans irrégularité topographique marquées ni structure géologique particulières (Russell, 1933 ; Lewis, 1939).

En raison de leur association fréquente avec des sols végétalisés, ces combes illustrent particulièrement l'effet isolant de la neige (Russel, 1933; McCabe, 1939). Ainsi, en contexte de pergélisol, le sol dégèle souvent autour de la combe au mois de juillet, alors qu'il demeure gelé directement sous celle-ci. Ce contraste accentue les processus de gel-dégel et de gélifluxion (Boch, 1946 ; Embleton, 1975 ; Payette et al., 1985 ; Mathieu et al. 1987 ; Kariya, 2002 ; Lafortune, 2006). La pente, généralement faible, mais rarement nulle, permet l'évacuation des débris par ruissèlement ou gélifluxion, contribuant à l'agrandissement de la niche, à une rétention accrue de la neige et donc à un retard de la fonte estivale.

Figure 11. Schéma en coupe de la forme des combes à neige circulaires et longitudinales, selon Brown et Ward (1996).



Dans les milieux sédimentaires meubles, on observe fréquemment, en aval des combes circulaires, des zones de sédimentation alimentées par le transport de matériel par l'eau de fonte et la solifluxion (Christiansen, 1998). Ces dépôts peuvent donner naissance à des remparts pronivaux (ou protalus) s'ils sont suffisamment volumineux (Christiansen, 1998 ; Margold et al., 2011), ou s'étaler sous forme de cônes alluviaux (Lafortune et al., 2006). Enfin, la structure interne de la neige dans ces combes reste peu documentée. Il est toutefois admis qu'elle se compose souvent de grains grossiers issus d'une métamorphose avancée par fonte, surmontant une couche de glace basale

formée par regel de l'eau de fonte percolée. Ce processus est particulièrement fréquent en milieux polaires, où les températures froides favorisent la conservation de cette glace basale (Woo et al., 1982 ; Davesne, 2015).

## 2.2 Fonctionnement et évolution des combes à neige

### 2.2.1 Impacts géomorphologiques et thermiques

Les impacts géomorphologiques de la nivation sont multiples. Dans les Rocheuses canadiennes, Gardner (1969) a montré que les combes à neige modifient les conditions thermiques des parois rocheuses. En effet, elles favorisent des cycles gel-dégel plus fréquents à l'interface neige-roche, ce qui entraîne une altération mécanique active. La fragmentation du substrat et la formation d'encoches à la base des parois en sont des témoins clairs.

L'érosion liée aux combes demeure l'un des aspects les plus débattus, car elle dépend fortement des conditions environnementales. Néanmoins, de nombreuses études en confirment l'importance (Lewis, 1939 ; Christiansen, 1998 ; Daimaru et al., 2002 ; Hall et al., 2002 ; Kariya, 2002 ; Margold et al., 2011 ; Kňázková et al., 2020). L'érosion mécanique est particulièrement marquée dans les combes à neige pérennes, typiques des milieux périglaciaires et polaires, où dominent les cycles gel-dégel. Dès les travaux de Lewis (1939), ces cycles ont été associés à la nivation décrite par Matthes (1900). Ils se produisent surtout en périphérie des combes, stimulés par le ruissèlement de l'eau de fonte, tandis qu'au centre, la neige agit comme isolant et protège le sol du gel. Leur efficacité dépend également de la sévérité climatique et de la nature du substrat rocheux (Figure 12). Lorsque ces conditions sont réunies, l'érosion mécanique affecte surtout la base et les rebords des combes, en particulier si elles sont adossées à une paroi rocheuse. L'érosion chimique, bien que moins étudiée, a été rapportée (Thorn, 1988 ;

Kňázková, 2020), en lien avec la composition spécifique que peut acquérir la neige des combes.

Le développement de formes de gélifluxion en aval constitue un autre effet bien documenté (Williams, 1975 ; Payette et al., 1985 ; Mathieu et al., 1987 ; Kariya, 2002 ; Davesne, 2015, 2020). L'eau issue de la fonte accroît l'humidité du sol et favorise des cycles gel-dégel en bordure de combe, particulièrement lors des chutes nocturnes de température. Ces conditions induisent des déplacements progressifs du sol (Figure 12). Les combes pérennes, en raison de la durée prolongée d'humidité qu'elles imposent, sont les plus propices à ces processus (Lewis, 1939). L'efficacité est maximale sur des substrats sédimentaires non consolidés (Christiansen, 1998).

Les combes à neige participent également au transport sédimentaire dans de nombreux contextes (Thorn, 1979 ; Thorn, 1988 ; Christiansen, 1998 ; Lafortune et al., 2006 ; Kňázková et al., 2020). Celui-ci dépend de la topographie, de la fréquence des cycles gel-dégel et de la disponibilité en matériaux meubles. Le transport peut se faire par ruissellement direct (Lafortune et al., 2006) ou par des mouvements de masse comme la solifluxion et la gélifluxion (Thorn, 1979 ; Paterson, 1951). Thorn (1979) identifie d'ailleurs la gélifluxion comme le processus de transport le plus efficace. Ces déplacements modifient peu la morphologie originelle des dépressions (Mathieu et al., 1987).

Dans les substrats rocheux durs, l'impact des combes est réduit. Toutefois, Costin et al. (1973) ont montré que la neige persistante exerce un effet abrasif sur des roches dures résistantes (50-100 MPa UCS), comparable au moutonnement. Ces forces de friction latérale sont particulièrement marquées lorsque la base de la combe est glacée, ce qui explique leur occurrence surtout en contexte périglaciaire. Même localisés, ces processus soulignent que les couverts nivaux, en particulier les combes, contribuent à façonner les paysages de haute montagne, selon les conditions topographiques, lithologiques et climatiques.

En Gaspésie, des lobes de gélifluxions ont été observés sur les versants du mont Jacques Cartier (notamment sur son flanc SE) et du mont Albert. Selon Davesne (2015), ils résultent de cycles gel-dégel associés à une forte disponibilité en eau de fonte. D'autres formes similaires, peut-être liées à des combes à neige importantes du mont Albert, ont été repérées sur des images satellites (Figures 13 et 14). Leur origine reste toutefois à confirmer, d'autant plus que la région présente aussi des glaciers rocheux reliques, hérités de la dernière glaciation, également associées à des accumulations nivales favorisant des mouvements fluides en contexte pro et périglaciaire.

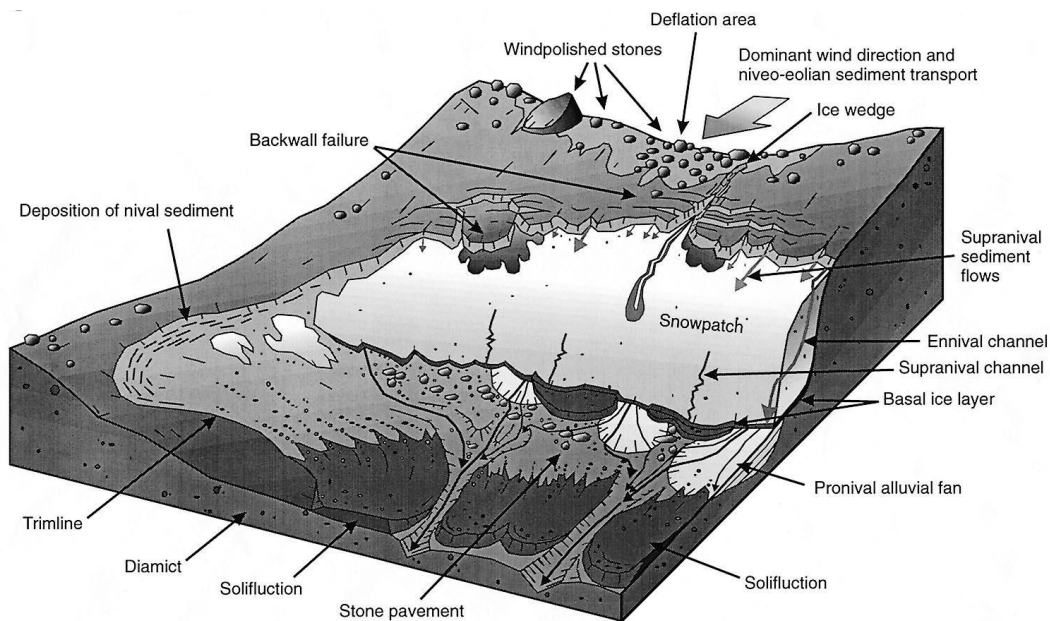


Figure 12. Principaux processus et principales formes géomorphologiques de nivation associés à une combe à neige pérenne en milieu sédimentaire non-consolidé, dans une niche de nivation incurvée, d'après Christiansen et al. (1998). Les processus diffèrent à l'amont et à l'aval de la combe à neige.

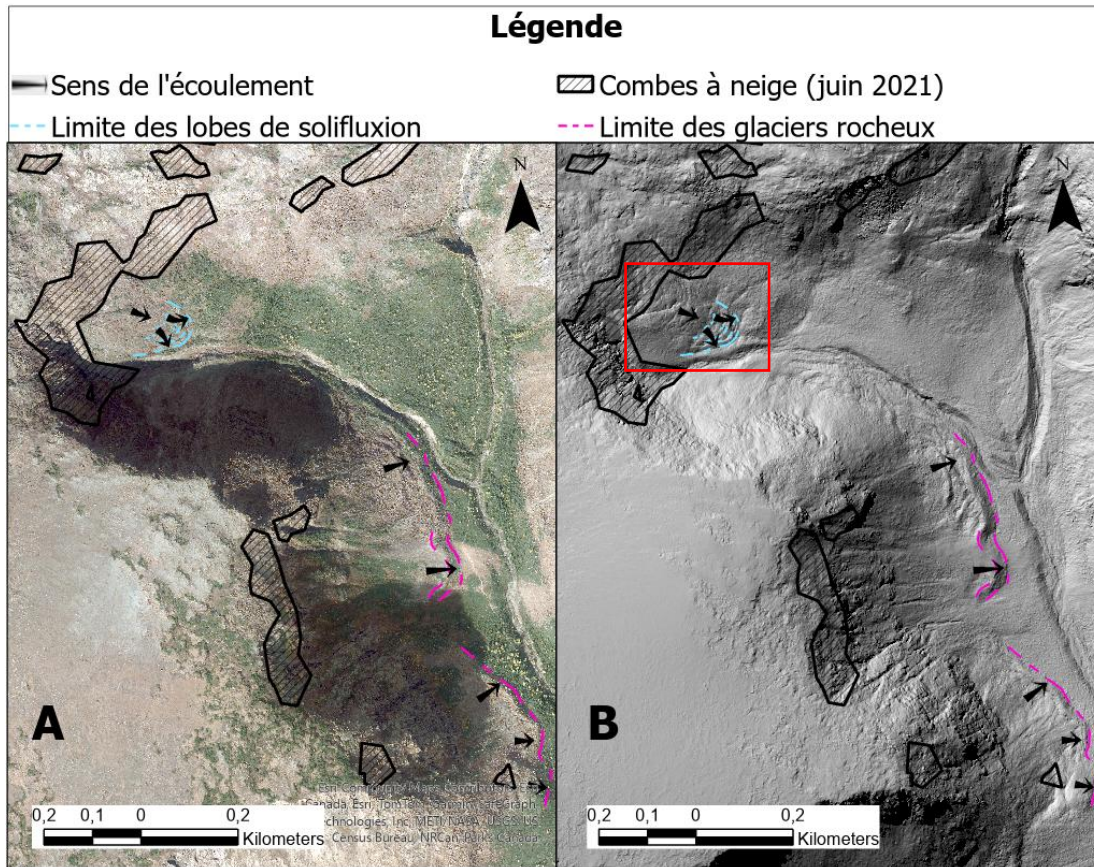


Figure 13. Figures montrant la position de lobes de solifluxion possiblement exacerbés par la présence d'importantes combes à neige et glaciers rocheux dans un vallon du mont Albert : A) image satellite; B) image ombragée issue du LiDAR.

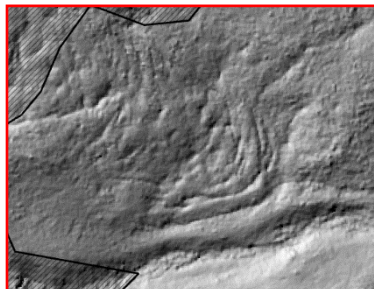


Figure 14. Vue rapprochée d'une forme de fluage (mouvement du sol) vraisemblablement influencée par une grande combe à neige.

### 2.2.2 Développement d'une végétation spécialisée

Les communautés végétales alpines sont fortement conditionnées par la durée et le calendrier de fonte de la neige. La végétation des combes à neige diffère ainsi de celle des zones voisines libres de neige (*snow-free*). Ces différences suggèrent que les communautés végétales des combes à neige possèdent une identité fonctionnelle propre, distincte de la végétation environnante (Good et al., 2019).

Les combes à neige constituent un habitat particulier marqué par un enneigement abondant et une fonte tardive, conditions qui excluent généralement la présence d'arbres (Payette et Lajeunesse, 1980). La neige y joue un rôle protecteur au printemps : elle maintient l'humidité du sol tout en atténuant les cycles gel-dégel alors que les températures peuvent encore descendre sous zéro degré Celsius. Ce microclimat favorise le développement d'une flore spécialisée dite chionophile (Conservatoire botanique national alpin, 2018). Ces communautés comprennent une grande diversité de graminoides, de lichens, d'éricacées et de fougères alpines. Certaines espèces sont strictement inféodées à ces milieux, comme *Ranunculus acrophilus* et *Ranunculus dissectifolius* en Australie (Pickering et al., 2014), ou encore le gnaphale couché (*Gnaphalium supinum*) et la saxifrage androsace (*Saxifraga androsacea*) dans les Pyrénées (Conservatoire botanique national alpin, 2018) (Figure 15).

La fonte progressive des combes saisonnières au printemps et en été alimente en eau les communautés végétales situées sous et en contrebas. Ces dernières profitent non seulement de l'humidité, mais aussi de l'azote libéré durant la saison de croissance, ce qui génère un gradient environnemental marqué sur de faibles distances (Billings et Bliss, 1959; Bowman, 1992; Bjork et Molau, 2007). Le centre de la combe, où la neige persiste le plus longtemps, se caractérise par un sol peu développé et une végétation clairsemée, tandis que la productivité augmente progressivement vers les marges. Ce gradient se traduit par une organisation de végétation en bandes parallèles, disposées

en fonction de la durée de la saison de croissance, comme l'avaient noté Payette et Lajeunesse (1980).

Toute modification du calendrier de fonte, qu'elle soit liée aux fluctuations climatiques ou à des changements de régime nival, entraîne un remodelage graduel et parfois irréversible de la composition et du fonctionnement de ces communautés végétales (Green et Pickering, 2018 ; Good et al., 2020 ; Morgan et Walker, 2023 ; Verrall et al., 2023). Dans les cas extrêmes, une combe qui ne fond pas durant plusieurs étés successifs peut éliminer presque toute couverture végétale et accélérer les processus de nivation (Lewis, 1939). Ce phénomène, bien documenté dans plusieurs massifs alpins, n'a toutefois pas été observé en Gaspésie.



Figure 15. Végétation associée aux combes à neige : A) population d'herbacées sur le mont Nelse, Victoria, Australie (photo prise par Susanna Venn, tirée de Williams et al. (2015)); B) *Ranunculus escholtzii* (*Snowpatch Buttercut*), fleur caractéristique des combes à neige des régions alpines américaines (photo prise par Mark Turner, tirée de Williams et al. (2015)).

### 2.2.3 Accumulation de poussières éoliennes

D'après Wilson (1958), les combes à neige se forment dans des dépressions où la vitesse du vent est ralentie. Ce phénomène favorise à la fois une accumulation nivale importante en hiver et une fonte progressive en été. Or, ces vents ne transportent pas uniquement la neige : ils déposent également divers types de débris à la surface des combes. Lors de la fonte, ces particules sont progressivement relâchées et s'accumulent sur le sol, où elles s'incorporent au fil des années. Avec le temps, cette accumulation devient suffisante pour modifier les propriétés édaphiques et, par conséquent, influencer la composition de la végétation.

Wilson (1958) distingue plusieurs catégories de débris, allant de fragments minéraux aux résidus organiques. La fraction minérale est composée de poussières et de particules fines issues des roches environnantes, tandis que les apports organiques proviennent de mousses, de fleurs fanées, de bulbes et d'autres débris végétaux selon la flore locale. La dynamique de fonte joue également un rôle clé. Celle-ci s'amorce généralement des marges vers le centre de la combe, entraînant une concentration progressive des débris au point le plus tardivement déneigé. L'accumulation récurrente de ces dépôts entraîne à la fois un enfouissement temporaire de la végétation et un enrichissement du sol en nutriments, notamment en azote, un élément particulièrement limité dans les environnements alpins et froids. Cet apport favorise directement la productivité et la structuration des communautés végétales des combes à neige.

### 2.2.4 Recharges pour l'hydrosphère

Les combes à neige constituent une source d'eau essentielle pour les sols et les réseaux hydrographiques en milieu alpin au moment de leur fonte estivale (Embleton, 1975 ; Lafortune et al., 2006 ; Lepparanta, 2013 ; Morgan et Walker, 2023). L'eau issue de la fonte peut s'infiltrer dans le sol ou, lorsque la capacité d'infiltration est limitée, ruisseler en surface. Sur des substrats meubles ou non consolidés, ce processus peut donner naissance à de petits cours d'eau au pied des combes, qui alimentent ensuite des

lacs ou rejoignent des rivières plus importantes en mobilisant des sédiments (Christiansen, 1998 ; Goudie, 2003 ; Paquette, 2018). Dans de nombreuses forêts d'Amérique du Nord, la fonte des couverts nivaux saisonniers, incluant celle des combes à neige, constitue l'évènement hydrologique majeur de l'année. Elle assure une recharge cruciale pour les horizons organiques du sol et contribue à maintenir l'humidité des couches superficielles, tout en réalimentant les nappes souterraines (Price, 1976 ; Jones et Orville-Thomas, 1986). Un aspect déterminant est le calendrier de fonte : cette eau s'infiltré à une période où l'évaporation demeure faible, maximisant ainsi l'effet de recharge et la disponibilité en eau pour la végétation et les écosystèmes associés. L'eau qui n'est pas stockée dans les sols ou les aquifères alimente directement les écoulements de surface, jouant un rôle dans l'érosion et le transport sédimentaire, mais aussi dans la gestion des ressources hydriques en milieu alpin et forestier (Price, 1976)

#### 2.2.5 Rôle dans les flux thermiques de surface

Les échanges d'énergie entre l'atmosphère et le sol (interface de convection) dépendent du bilan radiatif net, c'est-à-dire de la différence entre les radiations émises et reçues par la surface.

Au cours de la fonte printanière, le couvert nival devient discontinu (*patchy*), ce qui accroît la variabilité spatiale des flux énergétiques. Cette hétérogénéité résulte de contrastes marqués d'albédo et d'émissivité thermique entre les zones enneigées (SCA, *Snow Cover Area*) et les zones de sol nu, même à très fine échelle (Mott et al., 2018). Il en découle d'importants gradients thermiques, qui modulent directement la vitesse de fonte. La diminution de l'étendue des SCA est donc liée au réchauffement atmosphérique local, lui-même influencé par ces variations spatiales de flux radiatifs, tant verticalement qu'horizontalement. Plusieurs études (e.g. Ménard et al., 2014 ; Letcher et Minder, 2015 ; Mott et al., 2015) ont montré que ces contrastes énergétiques génèrent une rétroaction thermique significative : le flux de chaleur ascendant au-

dessus des sols nus réchauffe la couche atmosphérique superficielle (*near-surface atmospheric layer*), intensifiant ensuite les flux de chaleur descendant au-dessus des SCA. Ce processus accélère la fonte : Ménard et al. (2014) estiment que la diminution quotidienne des SCA peut être accrue de 22 à 40 % lorsqu'on prend en compte cette rétroaction.

Par ailleurs, ce différentiel thermique influe sur la dynamique des vents locaux. Plusieurs travaux (Segal et al., 1991 ; Mott et al., 2015 ; Letcher et Minder, 2017) soulignent que ces flux énergétiques modulent à la fois la direction et l'intensité des circulations atmosphériques. Sur ces topographies en pentes, comme les parois du mont Albert, des vents locaux similaires aux vents catabatiques ou aux régimes de haute montagne (Shea et Moore, 2010) contribuent à l'ablation, au transport de la neige et au refroidissement de la couche atmosphérique proche de la surface. Ces interactions complexes entre flux radiatifs, fonte et dynamique éolienne contrôlent la variabilité spatiotemporelle des SCA particulièrement dans les grandes combes à neige pérennes (Mott et al., 2017). Toutefois, les taux de fontes associés à ces rétroactions n'ont pas encore été précisément quantifiés et restent pour l'instant basés sur des estimations (Mott et al., 2018).

#### 2.2.6 Réactions aux variations climatiques

La disparition progressive des combes à neige, ou leur transition d'un état pérenne à un état saisonnier suscite un intérêt croissant depuis la dernière décennie, car elle constitue un marqueur direct du changement climatique. Comme le soulignent Hugues et al. (2023): '*There are no glaciers today in Britain and Ireland and snowpatches are only semi-permanent, disappearing entirely from even the highest mountains in some years*' (Hugues et al., 2023, p.13). Un suivi particulièrement détaillé est réalisé par Iain Cameron, qui recense à chaque année l'état des combes à neige dans le nord-est de l'Écosse. La mise à jour la plus récente (hiver 2023-2024) révèle qu'aucune combe n'a

survécu durant l'été 2023, un phénomène observé pour la huitième fois seulement depuis le Petit Âge glaciaire (1933, 1959, 1996, 2003, 2006, 2017, 2022 et 2023). Cette fréquence accrue de disparition estivale illustre l'accélération du réchauffement climatique (Cameron et al., 2024).

Un exemple emblématique est celui de la disparition de la combe « Sphinx », située dans les Highlands écossais sur le troisième plus haut sommet du Royaume-Uni. Autrefois considérée comme pérenne, elle a disparu pour la quatrième année consécutive depuis le Petit Âge de glace. Cameron et al. (2024) la décrivent comme un véritable baromètre du changement climatique.

Les conséquences de cette dynamique dépassent le seul registre nivologique. Comme discuté dans la section 2.1.2.2, l'évolution de la durée et de la stabilité des combes à neige influence directement les communautés végétales associées, en favorisant la migration d'espèces alpines ou boréales vers des environnements de climat tempéré froid. Payette et Lajeunesse (1980) ont ainsi montré l'envahissement progressif de mélèzes dans des combes à neige du nord du Québec entre 1940 et 1970, en lien avec un réchauffement climatique régional. Des observations similaires ont été rapportées en Australie : Pickering et al. (2014) et Morgan et Walker (2023) documentent l'invasion graduelle de buissons et d'arbustes provenant de zones plus basses, transformant la composition des communautés végétales. Selon Morgan et Walker (2023), il s'agit d'une transition vers un nouvel état écologique pour ces milieux.

### 2.3 Cadre spatial

Le terrain d'étude est situé au parc national de la Gaspésie (Figure 16), géré et protégé par la Société des établissements de plein air du Québec (SÉPAQ). Créé en 1937, le parc visait initialement à préserver la faune emblématique de la région, notamment le caribou des bois et le saumon de la rivière Saint-Anne, ainsi que des sites naturels remarquables, tels que le mont Albert et les monts McGerrigle.

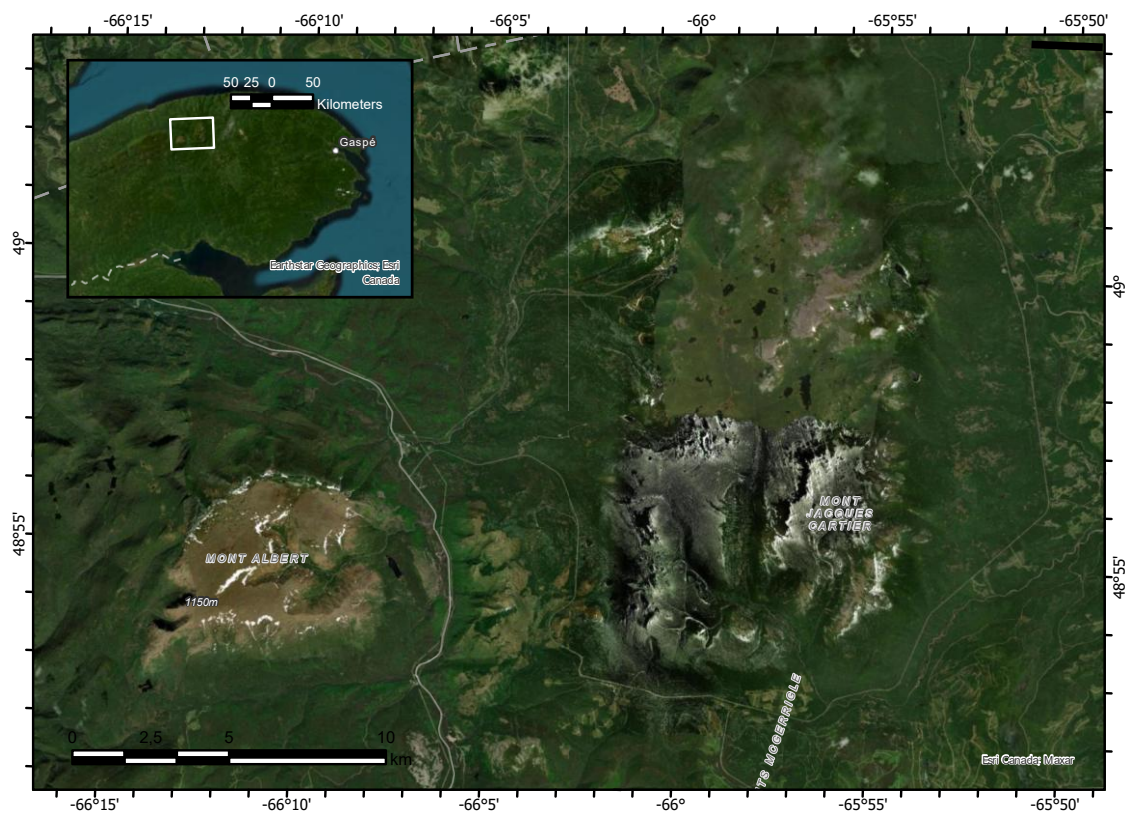


Figure 16. Ensemble du secteur étudié, correspondant à l'est du parc national de la Gaspésie.

Le parc s'étend entre 48.82 ° et 49.10 ° de latitude nord et 65.84 ° et 66.70 ° de longitude ouest (Commission de Toponymie, 2015). Il comprend deux massifs montagneux distincts : les Chic-Chocs et les monts McGerrigle. Les Chic-Chocs constituent l'extrémité nord-est des monts Notre-Dame, eux-mêmes inclus dans la chaîne des Appalaches. Situés au centre-nord de la péninsule gaspésienne, ils s'étendent sur environ 95 km parallèlement à l'estuaire du Saint-Laurent. Les Appalaches se sont formées il y a plus de 480 millions d'années à la suite de l'orogénèse taconienne, et ont poursuivi leur formation jusqu'au Dévonien supérieur, durant l'orogénèse acadienne. Depuis le Carbonifère, la chaîne a subi une érosion continue qui se poursuit encore aujourd'hui, laissant en héritage des vestiges de la paléo-chaîne sous forme de vastes plateaux d'une altitude moyenne entre 800 et 1000 m. Le plus vaste de ces plateaux est celui au mont Albert, qui culmine à 1154 m et s'étend sur 9 km de long et 6.5 km de large (Sirois et al., 1988). Il s'est formé à la suite du charriage et du soulèvement d'un fragment de croûte océanique durant l'orogénèse taconienne (Gray et Brown, 1979). Il est principalement composé de roches serpentinites, aujourd'hui visibles sous forme de champ de blocs, possiblement d'origine pré-quadernaire. Ce plateau est profondément entaillé par des vallées où dominant des colluvions sur ses pourtours (SIGEOM, 2024).

Le plus haut sommet du parc est le mont Jacques-Cartier, culminant à 1270 m. Il est essentiellement constitué de roches amphiboliques. Il abrite encore quelques îlots isolés de pergélisol, les plus méridionaux du Canada, voués toutefois à disparaître à court terme sous l'effet du réchauffement climatique (Davesne, 2015). La chaîne des Chic-Chocs présente un écosystème évoluant en fonction de l'altitude (Figure 18). Jusqu'à 1050 m, on trouve des forêts matures de bouleaux blancs, qui cèdent progressivement la place, dans l'étage subalpin, à des peuplements d'épinettes blanches et noires de plus en plus clairsemés avec l'altitude. Au-delà de 1150 m d'altitude, les conditions arctiques-alpines dominant, favorisant l'installation d'une végétation arbustive caractéristique, dite de krummholz (Payette et Boudreau, 1984). Le climat du parc est

de type subpolaire (Dfc), généralement observé entre 50 ° et 60 ° de latitude nord, tandis que le reste de la Gaspésie est soumis à un climat continental humide (Dfb) (McKnight et Hess, 2000 ; Beck et al., 2023). La température moyenne annuelle est de 3.1°C et les précipitations moyennes annuelles sont de 815.5 mm (Open Weather Map, 2022). Les monts McGerrigle, à l'extrémité occidentale des Chic-Chocs, couvrent environ 100 km<sup>2</sup> entre 48.85 ° à 49.03 ° de latitude nord et 65.92 ° et 66.11 ° de longitude ouest (Commission de Toponymie du Québec, 2012). Ils comprennent 12 sommets dépassant les 1000 m d'altitude, dont le mont Jacques-Cartier.

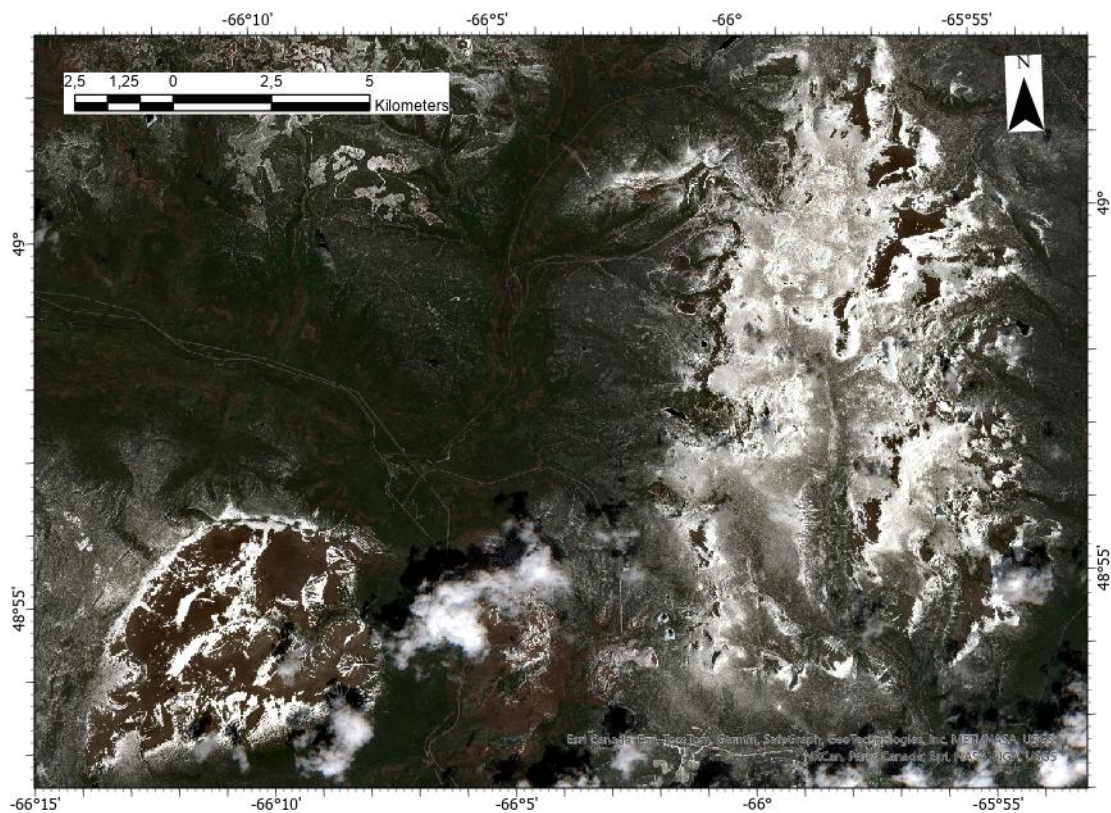


Figure 17. Enneigement du parc national de la Gaspésie le 9 juin 2019.

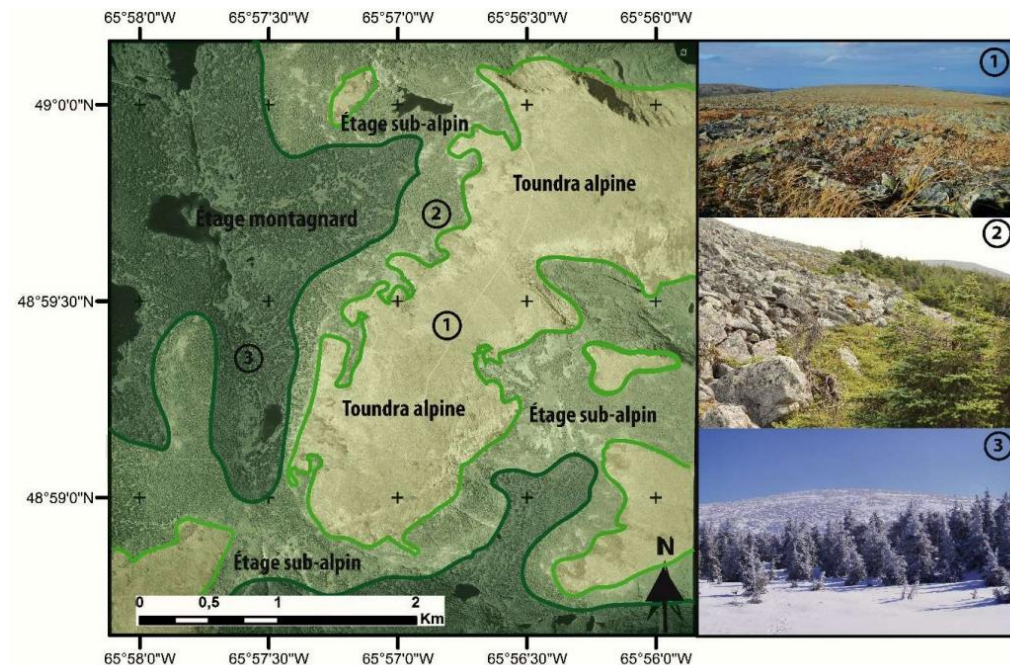


Figure 18. Répartition de la végétation au mont Jacques-Cartier, selon Davesne (2015). Le premier étage (1) correspond à une toundra alpine, le deuxième étage (2) abrite une végétation subalpine, et le troisième étage (3) abrite la forêt montagnarde.

### 2.3.1 Sites d'étude

Les deux régions ciblées sont les monts McGerrigle et le mont Albert, qui concentrent les principales combes à neige de la Gaspésie.

Les monts McGerrigle s'étendent du mont St-Anne au nord au mont McWhirter au sud. Ils regroupent, du nord au sud, les monts Fernald, Comte, Jacques-Cartier, Dos de Baleine, La Passe et Rolland-Germain. Ces sommets sont reliés par un vaste plateau dont l'altitude varie entre 900 et 1270 m. Ce plateau, fortement escarpé et entaillé par de nombreuses vallées, abrite une dizaine de lacs d'au moins 0.5 km<sup>2</sup>, de multiples plans d'eau plus modestes, ainsi qu'un réseau dense de ruisseaux et de tourbières. Ce

complexe plateau-vallée a été retenu en raison de la forte densité de combes à neige, présentes autant sur les hauteurs du plateau que dans les vallées forestières. Le plateau du mont Albert, moins fragmenté, constitue une unité topographique cohérente et bien circonscrite. Sa toponymie correspond à celle des cartes géographiques officielles canadiennes.

L'étude en milieu forestier s'étend du refuge de la mine Madeleine, situé sur un versant de vallon exposé à l'est-nord-est ( $49^{\circ}00'18''\text{N}$   $65^{\circ}59'51''\text{W}$ ), jusqu'au flanc ouest du plateau du mont Jacques-Cartier ( $48^{\circ}59'20''\text{N}$   $65^{\circ}58'57''\text{W}$ ) (Figure 19). La partie supérieure est dominée par un couvert forestier composé d'épinettes noires et blanches, qui croît sur des champs de blocs grossiers (dont la taille varie du centimètre au décimètre) (Tableau 2). Plus bas, au sud-ouest du secteur, la forêt cède progressivement la place à une zone humide de type tourbière, recouverte de sphaigne d'épaisseur variable (épaisseur moyenne d'environ 10 cm). Le substrat, d'âge précambrien (SIGEOM, 2022), est constitué de roches intrusives recouvertes de dépôts meubles et de colluvions de grande taille (1 à 10 m de diamètre), déplacés lors de la dernière époque glaciaire (Énergie et ressources naturelles Québec, 2000). Cette zone est également traversée par plusieurs ruisseaux et un lac. La transition entre la forêt et la zone humide est progressive, variant selon l'altitude. L'attention est portée sur un secteur dominé par des champs de blocs, dont les aspérités favorisent le ruissèlement souterrain de l'eau de fonte, et constituent ainsi des sites privilégiés pour l'étude des combes à neige.

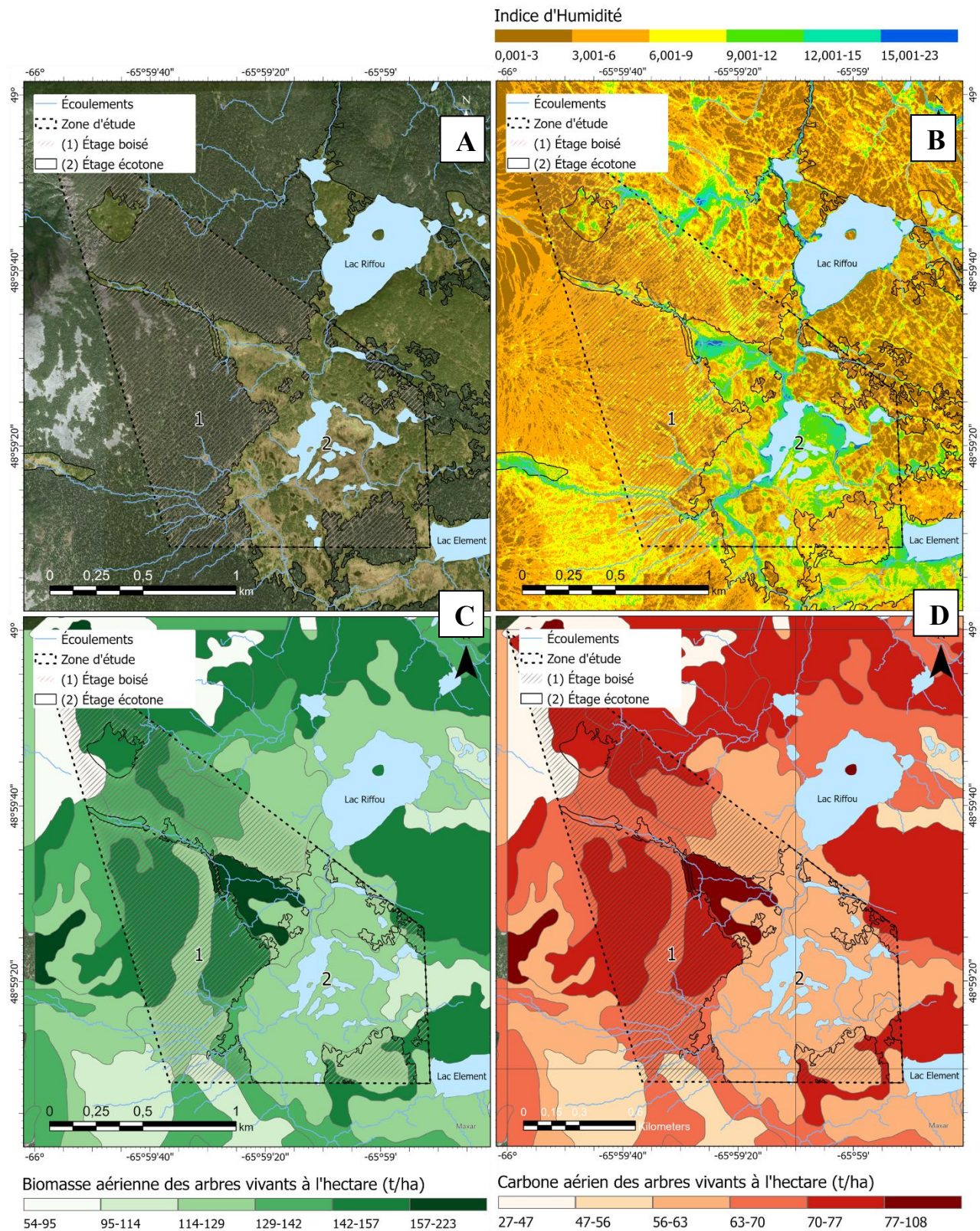


Figure 19. A) Image satellite avec réseaux hydrologiques et écotones de la zone d'étude pour l'étude de cas, B) carte d'indice d'humidité, C) carte de la biomasse aérienne (t/ha) et D) carte du carbone aérien (t/ha).

<b>Caractéristiques</b>	<b>Données</b>
Région écologique	Hauts massifs gaspésien
Domaine climatique	Sapinière à bouleau à papier
Température annuelle moyenne	> 0 à 1.5 °C
Étage de végétation	Montagnard à alpin
Zone de végétation	Végétation boréale
Sous-zone de végétation	Forêt boréale fermée
Peuplement écoforestier	Sapin baumier (1) et terrain forestier improductif (2)
Végétation potentielle	Végétation d'altitude (1) et tourbière / marécage arbustif (2)
Hauteur de la canopée	0 à 7 m
Type de dépôt dominant et co-dominant	Dépôt glaciaire et dépôt de pente et d'altération

Tableau 2. Caractéristiques climatiques et écologiques de la zone d'étude.

## CHAPITRE III

### MÉTHODOLOGIE

Cette recherche se divise en deux sections principales. La première porte sur l'analyse de l'ensemble des combes à neige du parc de la Gaspésie, en s'appuyant sur des images satellites et des outils issus des SIG. L'objectif consiste à recueillir des informations générales sur l'ensemble de la zone d'étude afin d'évaluer le futur probable des combes à neige et d'identifier les conditions favorisant leur distribution et leur pérennité. Cette approche repose sur une analyse multicritère et sur l'étude des facteurs influençant la présence et la persistance du couvert de neige. La seconde section consiste en l'étude approfondie des combes à neige en milieu forestier, réalisée à partir de données de terrain. Elle vise à explorer les différentes influences qu'une telle formation exerce sur son environnement, notamment d'un point de vue thermique, climatique, biologique et hydraulique.

Dans un premier temps, les méthodes d'analyse des caractéristiques des combes à neige seront présentées. Ensuite, seront exposées les méthodes d'observation des combes à neige en milieu forestier, ainsi que les techniques d'acquisition et d'analyse des données.

### 3.1 Principe de l'analyse spatiale des combes à neige

La littérature scientifique souligne que les combes à neige peuvent exister dans divers milieux et contextes géographiques (sur un substrat rocheux ou végétal) (Lewis, 1939 ; Thorn, 1979, Thorn et al., 1988 ; Campbell et al., 2025), sous des climats variés, et adopter différentes formes (transversales, longitudinales, circulaires). Leurs conditions de formation, et les impacts et les interactions avec l'environnement adjacent étant étroitement liés aux caractéristiques du milieu, il est essentiel de distinguer les différentes catégories de combes à neige afin de mieux les comprendre.

Dans le parc de la Gaspésie, une classification des combes à neige a été réalisée à partir d'images satellite afin d'englober le plus grand nombre de combes. Ces combes ont ensuite été décrites selon différents paramètres topographiques, géomorphologiques, climatiques et biologiques. Ces paramètres, détaillés à la sous-section 3.3 et utilisés pour l'analyse multicritère de la sous-section 3.3.5 incluent la pente, l'orientation, l'insolation, la géomorphologie et l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI). L'étude spatiale a été réalisée sur ArcGIS à partir d'images satellites en date du 8 juin 2021. Cette date a été retenue en raison de son caractère récent, de la qualité des images disponibles et des conditions d'enneigement favorables permettant de distinguer aisément les combes à neige. À cette période, les combes à neige sont encore enneigées mais suffisamment individualisées pour en permettre la reconnaissance et la cartographie. L'ensemble des *rasters* créés via Google Earth Engine (GEE) et modifiés avec ArcGIS ont été projetés dans le système de coordonnées UTM, zone 20N, NAD 83 de l'Amérique du Nord.

#### 3.1.1 Classification des combes à neige

Pour réaliser l'analyse spatiale des combes à neige dans les Chic-Chocs, une classification supervisée a été effectuée sur Google Earth Engine (GEE) à partir d'images satellites Sentinel-2.

Ces images offrent une résolution spatiale de 10 mètres pour les bandes multispectrales (Ecosystem C. D. S., 2024). Le satellite est équipé de 12 capteurs dans plusieurs bandes spectrales (USGS, 2024). Sa couverture globale et régulière en fait une ressource précieuse pour le suivi des changements environnementaux à grande échelle, notamment l'évolution des couverts nivaux. L'image utilisée pour l'analyse spatiale principale a été prise le 8 juin 2021. Cette date a été retenue en raison de l'absence d'une couverture nuageuse, permettant ainsi une détection précise des combes à neige via les bandes spectrales visibles (RGB). À cette période, la majorité du couvert nival du parc de la Gaspésie a fondu, mais certaines combes à neige persistent encore, offrant un échantillon pertinent pour cette étude. Une seconde image, en date du 3 juillet 2021, a également été utilisée pour observer l'évolution estivale des combes à neige. Cependant, la présence de quelques nuages a nécessité l'utilisation d'une combinaison de bandes spectrales visibles et de l'infrarouge à courte longueur d'onde (SWIR) afin d'améliorer la classification.

La classification supervisée comprend cinq classes: 1) la neige; 2) le substrat rocheux; 3) la végétation; 4) l'eau; et 5) les nuages. La neige absorbe les courtes longueurs d'onde dans l'infrarouge tout en réfléchissant les ondes du spectre visible, tandis que les nuages réfléchissent les deux types d'ondes. Cette différence spectrale permet de les distinguer efficacement. De même, la combinaison des bandes permet de séparer la végétation du substrat rocheux, garantissant une classification optimale des éléments du paysage. Le détail des bandes spectrales utilisées est indiqué ci-dessous (USGS, 2024) :

- B11 SWIR 2 (1610 nm) ; résolution : 20 m
- B3 Visible Green (560 nm) ; résolution : 10 m
- B5 VNIR (705 nm) ; résolution : 20 m

Le modèle d'entraînement repose sur un échantillon de 30 à 50 points pour chacune des classes. Il utilise un algorithme d'apprentissage automatique *random forest classifier* avec GEE. Cet algorithme s'appuie sur un ensemble d'arbres de décision, où chaque arbre effectue une classification individuelle des pixels des images satellitaires. La classe finale attribuée à un pixel est déterminée par un vote majoritaire parmi les arbres du modèle. Pour évaluer la performance du modèle, une matrice de confusion a été générée en fin de programme pour comparer les prédictions du modèle aux valeurs réelles. La classification obtenue présente une précision finale de 96 %, ce qui est très satisfaisant et témoigne de la fiabilité du modèle.

### 3.2 Analyse des paramètres morphoclimatiques des combes à neige

Les caractéristiques des différents paramètres influençant la présence des combes à neige, utilisées pour l'analyse multicritère, sont détaillées ci-après. L'étude repose sur une approche comparative en trois étapes : 1) comparaison de chaque paramètre entre les zones occupées par les combes à neige et le reste de la région; 2) comparaison entre les deux principales zones étudiées, à savoir le mont Albert et les monts McGerrigle; 3) analyse des combes à neige en fonction de la déclivité des pentes.

En juin 2021, les combes à neige occupaient une surface de 56.21 ha sur le mont Albert, et 246.87 ha sur les monts McGerrigle, pour un total de 303.8 hectares. Le nombre total d'objets segmentés représentant des accumulations de neige est de 4090, soit 235 sur le mont Albert et 3855 dans les monts McGerrigle. Un seuil de 5 m<sup>2</sup> a été appliqué comme taille minimale des combes à neige. Les formations plus petites ont été exclues afin d'éviter toute confusion avec des résidus de couvert nival tardif ou du bruit lié à la résolution des images satellites.

### 3.2.1 Pente

L'inclinaison de la surface sur laquelle la neige se dépose est un paramètre clé pour comprendre la formation et la dynamique des combes à neige (Lewis, 1939 ; Thorn, 1979 ; Brown et Ward, 1996). La pente influence directement le dépôt de la neige, son accumulation et sa fonte jouant ainsi un rôle essentiel dans la pérennité du couvert nival. De plus, l'inclinaison des pentes est souvent associée à des milieux écologiques distincts. Watson (1966) souligne que la distinction entre une combe située sur une pente douce et une pente forte est arbitraire. Il propose néanmoins un seuil à  $13^\circ$  correspondant à celui reporté à Cwmdu (Pays de Galle), à l'angle maximal permettant aux dépôts de gélifluxion de recouvrir d'une épaisse couche le sol des niches de nivation. Toutefois, une pente deux fois plus inclinée a été rapportée près du '*protalus ramparts Tinwen*' (Watson, 1956, p. 152). Afin d'évaluer l'influence de la pente sur la répartition des combes à neige, celle-ci a été catégorisée en trois classes:

- Inférieure à  $15^\circ$  : la combe à neige repose sur pente douce
- Entre  $15^\circ$  et  $30^\circ$  : la combe à neige repose sur une pente moyenne
- Supérieure à  $30^\circ$  : la combe à neige repose sur pente forte

Ces classes ont été définies de manière à inclure les combes à neige observées sur le terrain en tenant compte de l'environnement dans lequel elles se situent (Figure 20). L'outil *slope* a été utilisé pour calculer les valeurs moyennes de pente de chaque combe, permettant ainsi d'affiner l'analyse de leur répartition et de leur dynamique en fonction de l'inclinaison du terrain.

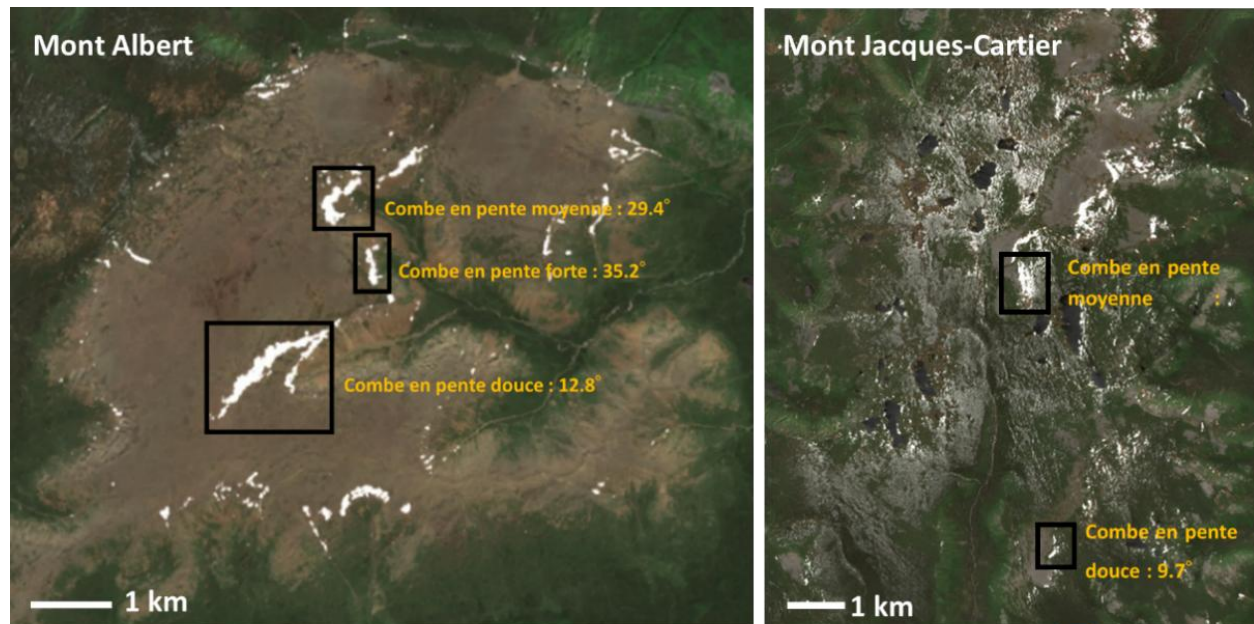


Figure 20. Combes à neige de référence pour la classification selon la pente.

### 3.2.2 Géomorphologie

Les différentes formes géomorphologiques proposées par l'outil *Geomorphon Forms*, dans ArcGIS ont été comparées entre les combes et la région d'étude, puis entre les combes elles-mêmes, suivant leur pente. Cette application permet de classer la morphologie locale dans une catégorie de formes du relief. Les formes géomorphologiques recensées sont les suivantes :

- *Flat* : Surfaces planes avec peu de variation d'altitude
- *Peak* : Sommets isolés
- *Ridge* : Crêtes linéaires
- *Shoulder* : Pentes convexes
- *Spur* : Éperons ou crêtes secondaires
- *Slope* : Pentes régulières

- *Hollow* : Dépressions ou creux
- *Footslope* : Pieds de pente
- *Valley* : Vallées linéaires
- *Pit* : Dépressions fermées

Pour déterminer l'appartenance à chacune des formes, l'outil a été paramétré avec un rayon de recherche de 1500 m autour de chaque pixel analysé.

### 3.2.3 Insolation et ombrage

L'effet de l'insolation a été comparé entre les combes à neige et leur environnement, puis entre les combes à neige situées sur différentes pentes. L'analyse a été réalisée à l'aide de l'outil *Area Solar Radiation* dans ArcGIS, qui calcule une valeur d'énergie solaire incidente en Wh/m<sup>2</sup> sur une période donnée pour une latitude de 48.55 ° N. L'étude couvre la période du 1<sup>er</sup> novembre 2023 au 1<sup>er</sup> août 2024, correspondant au début de l'enneigement jusqu'à la disparition des dernières neiges estivales. Cette période a été choisie sur la base des images satellites disponibles, qui indiquent que les dernières combes ont fondues au cours du mois de juillet. Les mesures ont été prises toutes les 1.5 heures, à un intervalle de 14 jours de novembre 2023 à août 2024. L'outil *Area Solar Radiation* calcule automatiquement l'azimut du soleil et la radiation potentielle à la surface, en fonction de la topographie fournie par le raster d'entrée.

L'ombrage auquel est exposée la région d'étude et les combes à neige a été évalué afin de compléter l'analyse de l'insolation. Pour l'ensemble de la région d'étude (plateaux séparés et combes à neige), la méthode utilisée est la suivante : l'ombrage est calculé selon trois azimuts, soit le matin (90 °), le midi (180 °) et le soir (270 °). Pour représenter différentes périodes de l'année, deux altitudes solaires ont été retenues : 20 ° en hiver et 45 ° au printemps. L'ombrage est exprimé sous une échelle sans unité de 0 à 254, ce qui ne nécessite pas de reclassement des rasters obtenus. Le calcul de la moyenne des rasters d'ombrage pour une altitude donnée et trois azimuts solaires différents a été effectué avec l'outil *Raster Calculator*, selon la formule suivante :

$$(ombrage\_matin \cdot (1.5 \cdot ombrage\_midi) \cdot ombrage\_soir) / 3$$

L'ombrage calculé à l'azimut 180 ° (midi) a été pondéré par un coefficient de 1,5 car cette période de la journée correspond à l'insolation maximale, et joue donc un rôle crucial dans la dynamique de fonte de la neige.

### 3.2.4 Orientation

L'orientation est un paramètre clé pour comprendre la distribution spatio-temporelle des combes à neige car elle est reliée à l'ombrage et au vent. Selon Boucher et al. (2023) et Davesne (2015), c'est un facteur primordial pour comprendre la répartition de la neige et du pergélisol sur le mont Jacques-Cartier, le sommet étant soumis à des vents d'ouest déposant la neige sur les versants sous le vent orientés est-sud-est. Pour déterminer l'orientation préférentielle des pentes associées aux combes à neige en Gaspésie et vérifier les hypothèses avancées par Boucher et al. (2023) et Davesne (2015), les combes à neige ont été organisées en 10 classes (Figure 21). Cette classification est réalisée avec l'outil *Aspect* dans ArcGIS qui attribue à chaque cellule des rasters d'élévation des combes à neige une direction de pente, de -1 (surface plane) à 360 °, suivant une méthode géodésique qui prend en compte la courbure de la Terre, préférable à cette échelle spatiale.

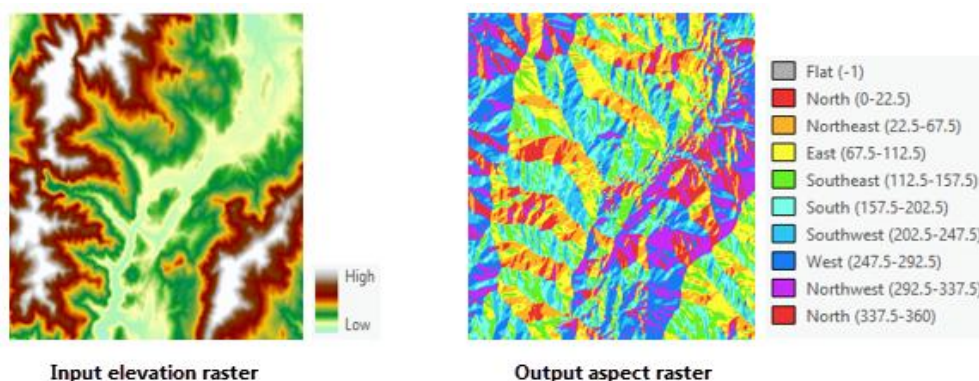


Figure 21. Figure d'entrée et de sortie de l'outil Aspect de ArcGIS, avec le détail des classes d'orientation, d'après ESRI (2024).

### 3.2.5 NDVI

Le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) est un indice de végétation utilisé pour évaluer l'état et la densité de la couverture végétale. Il varie de -1 à 1, où des valeurs proches de 1 indiquent une végétation saine et dense, des valeurs proches de 0 correspondant à des sols nus ou à une végétation très clairsemée. Les valeurs négatives représentent des surfaces non végétalisées, telles que l'eau et la neige. Le NDVI est calculé à partir de l'absorption de la lumière rouge visible et de la forte réflectance du proche infrarouge (*NIR*) par la végétation, selon la formule suivante :

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$$

Le NDVI a été comparé entre les deux plateaux étudiés (mont Albert et monts McGerrigle) et entre les différentes classes de pente des combes à neige. Les valeurs du NDVI ont été obtenues à partir d'images satellites datées du 7 août 2021, date où la totalité des combes de la région d'étude étaient dépourvues de neige. L'analyse a été réalisée en comparant le NDVI à l'emplacement exact des combes après leur disparition. Le NDVI moyen a été calculé pour chaque configuration étudiée. Cette approche permet d'identifier quels paramètres topographiques et géologiques favorisent le développement de la végétation sous les combes.

### 3.3 Analyse multicritère de distribution des combes à neige

Pour évaluer la distribution des combes à neige dans le parc national de la Gaspésie et déterminer l'influence des facteurs topo-climatiques, un modèle basé sur une analyse multicritère utilisant l'algorithme *Random Forest* a été développé (voir Annexe A). L'objectif de ce modèle est triple : 1) attribuer un poids à chacun des paramètres influençant la présence de combes à neige, séparément pour le mont Albert et les monts McGerrigle; 2) prédire les zones potentielles de distribution du couvert nival dans les secteurs étudiés; et 3) évaluer la dépendance des combes à neige à ces paramètres.

Les paramètres d'entrée utilisés dans le modèle sont l'élévation, la pente, l'orientation, la courbure des pentes (profile et plane), l'ombrage, les formes géomorphologiques et le NDVI. Pour chaque paramètre, un raster a été généré pour la région d'intérêt (ROI) et pour les combes à neige. Ces rasters ont été reprojétés dans le système de coordonnées WGS\_1984\_UTM\_Zone\_20N (EPSG :32620). Les rasters de la ROI ont été classifiés en 7 classes, selon la méthode des ruptures naturelles (*Natural Breaks*), en cohérence avec les classes prédéfinies pour les combes à neige. La classification permet principalement de standardiser les variables très différentes les unes des autres, et simplifie la visualisation et l'interprétation des relations entre les classes de paramètre. L'utilisation de la méthode des ruptures naturelles permet quant à elle d'optimiser la classification en minimisant la variance intra-classe et en maximisant la variance interclasse, plus adapté ici aux données spatiales continues comme l'élévation et la pente, où les transitions entre classes peuvent correspondre à des changements de processus géomorphologiques ou climatiques. Cette approche propose en effet une segmentation basée sur la structure statistique des données, ce qui limite le biais subjectif. Enfin, un raster de référence a été créé pour distinguer les combes à neige (valeur 1) du reste de la région (valeur 0).

Le modèle *Random Forest* a été implémenté en Python 3.11, à l'aide de Spyder 5.x. L'algorithme a été importé depuis la bibliothèque *sklearn.ensemble*. Étant donné le déséquilibre numérique entre les deux classes (0 = absence de combe; et 1 = présence de combe), un rééchantillonnage SMOTE (*Synthetic Minority Over-sampling Technique*) a été utilisé. Cette méthode permet de générer artificiellement des échantillons supplémentaires pour la classe minoritaire (1 = combes à neige) afin d'améliorer la robustesse du modèle. La validité du modèle a été évaluée à l'aide de la fonction *classification\_report* de *sklearn.metrics*, permettant de mesurer la précision, le rappel et le score F1 (Tableaux 5 et 6).

Pour représenter la pondération des paramètres sur une carte, les 7 classes de chaque paramètre ont été triées par importance, selon les résultats du modèle (Tableaux 3 et 4). Cette classification a été corroborée par l'analyse indépendante du ratio de combes à neige pour chaque classe. Les résultats sont illustrés dans les Tableaux 3 et 4, où chaque classe est représentée par une échelle de couleur. Enfin, les rasters reclassifiés selon ce tri ont été pondérés par les coefficients de l'analyse *Random Forest*, puis combinés à l'aide de l'outil *Raster Calculator* dans ArcGIS pour obtenir une carte finale de probabilité de présence des combes à neige (Figure 22).

L'algorithme *Random Forest* pouvant très bien gérer les variables continues, son utilisation sans passer par une classification pourrait être envisagée dans le cas où l'étude se concentrerait uniquement sur la prédiction et l'optimisation des performances du modèle, sans nécessiter une interprétation visuelle ou une comparaison directe entre des classes de paramètres standardisées.

Pente	Orientation	Ombre	NDVI	Courbure	Élévation	Geomorphon.
≤ 7.99	≤ 45.55	≤ 34	≤ -0.15	≤ -384.08	≤ 776.5	≤ 1
≤ 18.97	≤ 103.38	≤ 69	≤ -0.04	≤ -150.09	≤ 853.8	≤ 3
≤ 27.96	≤ 145.69	≤ 102	≤ 0.05	≤ -78.1	≤ 919.8	≤ 5
≤ 35.95	≤ 186.6	≤ 145	≤ 0.15	≤ -6.1	≤ 961.3	≤ 6
≤ 44.26	≤ 233.15	≤ 190	≤ 0.27	≤ 83.89	≤ 1008.5	≤ 7
≤ 55.25	≤ 290.98	≤ 225	≤ 0.40	≤ 227.89	≤ 1061.3	≤ 9
≤ 84.87	≤ 358.68	≤ 254	≤ 0.77	≤ 2333.77	≤ 1133	≤ 10

Tableau 3. Classes des paramètres appliqués pour le modèle de distribution des combes pour le mont Albert. La couleur représente l'importance de chaque classe, de la plus importante (rouge) à la moins importante (vert). La classe NDVI apparaît en blanc car aucune des combes à neige présente sur le plateau ne repose sur un couvert végétal, rendant la catégorie obsolète pour l'étude sur cette zone.

Pente	Orientation	Ombrage	NDVI	Courbure	Élévation	Geomorphon.
≤ 15.73	≤ 96.15	≤ 86	≤ 0.14	≤ -126.65	≤ 976.3	≤ 4
≤ 24.48	≤ 142.61	≤ 128	≤ 0.27	≤ -63.33	≤ 1026.9	≤ 5
≤ 31.76	≤ 191.89	≤ 163	≤ 0.39	≤ -9E-06	≤ 1072.1	≤ 6
≤ 39.05	≤ 248.2	≤ 193	≤ 0.47	≤ 63.33	≤ 1113.7	≤ 7
≤ 46.62	≤ 300.3	≤ 222	≤ 0.56	≤ 189.98	≤ 1162.5	≤ 9
≤ 74.30	≤ 358.03	≤ 254	≤ 0.76	≤ 569.94	≤ 1233	≤ 10

Tableau 4. Classes des paramètres appliqués pour le modèle de distribution des combes pour les monts McGerrigle. La couleur représente l'importance de chaque classe, de la plus importante (rouge) à la moins importante (verte).

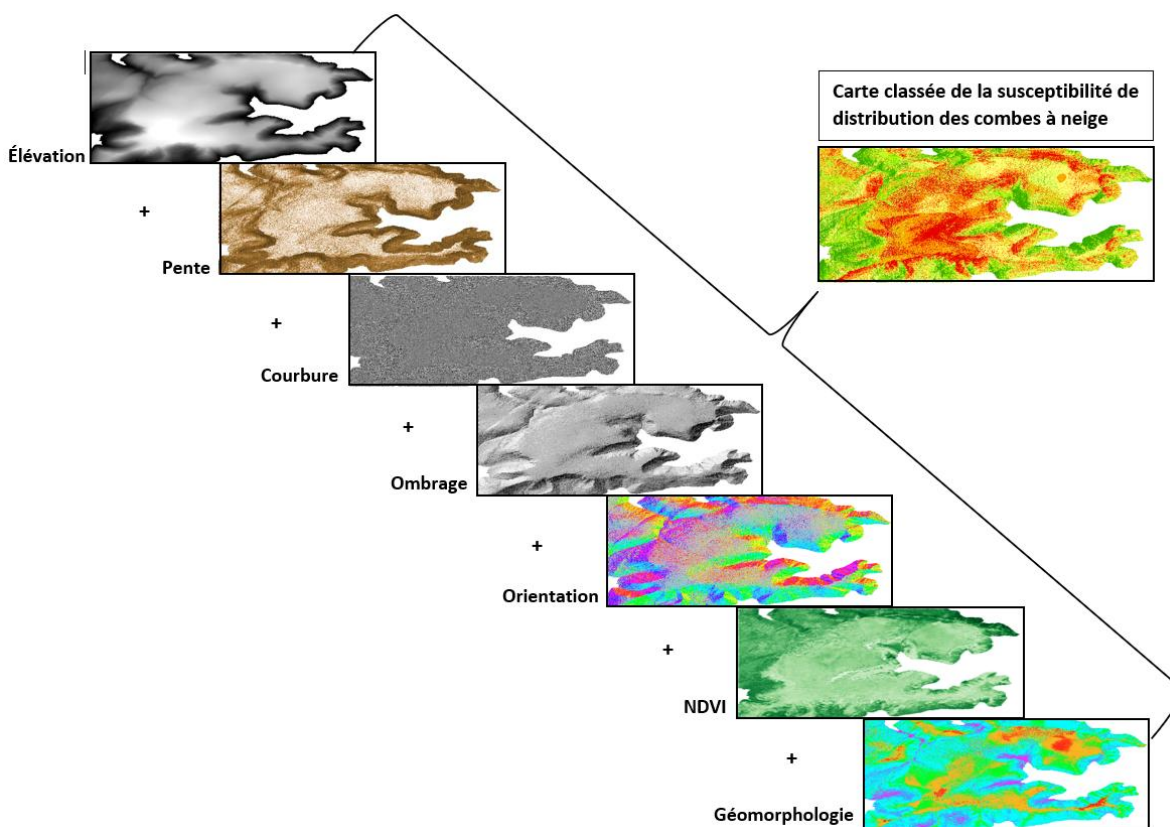


Figure 22. Visualisation des couches d'entrées utilisées pour le modèle de distribution des combes.

	<i>Precision</i>	<i>Recall</i>	<i>F1-score</i>	<i>Support</i>
<b>0</b>	0.99	0.89	0.93	10730
<b>1</b>	0.07	0.72	0.52	214
<i>Accuracy</i>			0.90	19400
<i>Macro avg</i>	0.53	80.5	72.5	19400
<i>Weighted avg</i>	0.97	0.90	0.95	19400

Tableau 5. Précision du modèle de distribution pour le mont Albert : la précision de la classe 1 est faible mais relevée (*Recall*) après l'utilisation du SMOTE pour surreprésenter la classe 1.

	<i>Precision</i>	<i>Recall</i>	<i>F1-score</i>	<i>Support</i>
<b>0</b>	0.99	0.92	0.95	9425
<b>1</b>	0.03	0.43	0.25	73
<i>Accuracy</i>			0.94	9498
<i>Macro avg</i>	0.51	72.5	60	9498
<i>Weighted avg</i>	0.99	0.90	0.97	9498

Tableau 6. Précision du modèle de distribution pour les monts McGerrigle : la précision de la classe 1 est faible mais relevée (*Recall*) après l'utilisation du SMOTE pour surreprésenter la classe 1.

### 3.4 Évaluation de l'albédo

L'albédo est défini comme le rapport entre la lumière réfléchiée par une surface et la lumière incidente. L'analyse de l'albédo a été réalisée pour une période spécifique, allant du 8 juin au 25 août 2021, afin de mesurer les variations liées à la présence des combes à neige (voir Annexe B). Les données satellitaires utilisées proviennent de Landsat-9 et les images ont été filtrées afin de conserver uniquement celles qui

présentent une couverture nuageuse inférieure à 20 %. Pour chaque image conservée, la valeur des bandes spectrales a été normalisée en la divisant par 10 000 afin d'obtenir une échelle cohérente pour l'analyse. L'albédo a été estimé à l'aide d'une moyenne pondérée des bandes spectrales, à partir des bandes suivantes :

- B2 (bleu)
- B3 (vert)
- B4 (rouge)
- B6 (SWIR – *Short-Wave Infrared*)
- B7 (SWIR – *Short-Wave Infrared*)

Le calcul de l'albédo a été réalisé à l'aide de la fonction *calculateAlbedo*, qui applique un réducteur de moyenne aux bandes sélectionnées. Le résultat a ensuite été intégré comme nouvelle bande d'albédo à chaque image de la collection. Une fois l'albédo estimé pour l'ensemble des images, l'albédo moyen de la période d'analyse a été obtenu en calculant la moyenne des valeurs sur toute la collection. Cette démarche a permis de produire une carte synthétique de l'albédo, mettant en évidence ses variations spatiales dans la zone d'étude. Afin de faciliter l'interprétation, deux types de visualisations complémentaires ont été générés : 1) une image RGB moyenne construite à partir des bandes rouge, verte et bleue de Landsat-9, permettant de représenter les principales caractéristiques de surface; 2) une carte de l'albédo moyen, illustrée par un dégradé de couleur allant du bleu (albédo faible) au vert (albédo élevé), permettant d'identifier les zones à forte réflectance, souvent associées aux combes à neige.

### 3.5 Modélisation prospective de la fonte jusqu'en 2100

Afin de mieux appréhender la fragilité des couverts nivaux en milieu de montagnes, un modèle de projection de la surface enneigée du parc national de la Gaspésie a été élaboré. Ce modèle repose sur des données historiques (période allant de 2000 à 2022) de surface d'enneigement, de température, de précipitations neigeuses et de jours cumulés avec une température au-dessus de 0 °C. Le modèle intègre donc des projections jusqu'en 2100 pour ces mêmes paramètres, lesquels jouent un rôle clé dans la dynamique de fonte des combes à neige (Musselman et al., 2017). L'application du modèle à l'échelle régionale permet alors d'estimer la pérennité future des combes à neige gaspésiennes avec une résolution plus fine que les projections d'épaisseur de neige proposées par le programme CMIP6. En effet, ce dernier couvrant l'ensemble du globe offre une précision limitée pour des études à l'échelle locale et régionale.

Les données de couverture nivale utilisées proviennent des Fractions de Couverts Nivaux (SCF) obtenues par MODIS et corrigées par le Centre des Analyses des Données Environnementales (CEDA) (CEDA, 2024). Ces données, issues d'imageries satellitaires MODIS, sont journalières et offrent une résolution de 100 m. La période d'étude retenue s'étend du 22 au 24 mai pour les années 2000 à 2022. Cette période a été retenue compte tenu de l'absence d'une couverture nuageuse, permettant ainsi des comparaisons interannuelles. De plus, la fin du mois de mai correspond généralement à la fin de la période de fonte du couvert nival hivernal, permettant ainsi d'identifier distinctement les combes à neige. Une alternative pour obtenir des données de couvert nival consiste à segmenter des surfaces de neige à partir d'images satellites à haute résolution, à l'aide de modèles de segmentation. Cependant, la fréquence irrégulière de ces images limite la précision et la fiabilité du modèle pour analyser la dynamique interannuelle de fonte du couvert nival saisonnier. Les données climatiques historiques (température, précipitations neigeuses et jours cumulés avec une température supérieure à 0 °C) proviennent du programme Climatedata.ca (2024). Quant aux

projections climatiques, elles sont issues des bases de données CanDCS-M6, lesquelles fournissent des simulations climatiques régulières à haute résolution. Ces projections sont calibrées à l'échelle canadienne à partir des résultats des modèles climatiques globaux (MCG) des projets internationaux CMIP5 et CMIP6. Afin d'affiner la résolution spatiale de ces projections climatiques, une réduction d'échelle statistique a été appliquée. Cette méthode permet de convertir les résultats des modèles globaux, généralement limités par une résolution spatiale allant de 100 à 200 km, en données plus détaillées à une échelle de 10 à 20 km (ClimateData, 2024), plus adaptées à l'échelle spatiale de cette étude. Trois scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (GES) fournis par CanDCS-M6 sont pris en compte dans cette analyse : RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5.

Les modèles statistiques de prédiction multivariée sont des outils analytiques pertinents pour projeter des données climatiques en examinant les relations entre plusieurs variables indépendantes et une ou plusieurs variables dépendantes, telles que la température ou les précipitations (Hastie & Tibshirani, 1990 ; Kavindra et al., 2019 ; Jian et al., 2025) Cette approche de modélisation est particulièrement pertinente en climatologie et météorologie car elle permet d'obtenir des projections nuancées des systèmes climatiques complexes en intégrant divers facteurs influents, comme les émissions de gaz à effet de serre et les différents scénarios d'émission associés (Wood, 2017 ; Kavindra et al., 2019).

Pour estimer la surface enneigée à la mi-mai de 2025 à 2100, un modèle de prédiction statistique a été élaboré. Il repose sur un Modèle Additif Généralisé (GAM), une méthode non linéaire permettant de représenter de façon flexible les relations entre le couvert nival et trois variables climatiques clés. À partir des données historiques, des fonctions lissées (*splines*) ont été estimées afin de décrire la réponse du couvert nival à chaque variable climatique. La relation mathématique entre les variables indépendantes ( $X_n$  : 1 = température, 2 = précipitations neigeuses, 3 = jours chauds > 0 °C) et la variable dépendante ( $Y$  = couvert nival) s'écrit alors :

$$Y = \beta_0 + s_1(X_1) + s_2(X_2) + s_3(X_3) + \varepsilon$$

où  $\beta_0$  représente l'ordonnée à l'origine (terme constant), et où  $s_1$ ,  $s_2$  et  $s_3$  désignent des fonctions lissées estimées à partir des données, permettant de capturer des effets non linéaires ou des seuils entre les variables climatiques et la couverture nivale. Le terme  $\varepsilon$  représente l'erreur résiduelle. Ces fonctions ne produisent pas de coefficients simples à interpréter (Hastie & Tibshirani, 1990), mais montrent la forme exacte des relations entre les variables climatiques et la surface enneigée.

L'analyse des fonctions lissées identifie les plages d'effet significatif des variables climatiques et celles où leur impact se stabilise, ce qui permet de représenter des comportements complexes, comme des effets de seuil de la température, des diminutions non linéaires liées aux jours chauds ou des variations d'influence des précipitations neigeuses selon les années. Elles mettent en avant comment chaque facteur influence le couvert neigeux et facilitent l'application du modèle aux projections futures tout en conservant la cohérence des relations historiques (Wood, 2017 ; Ravindra et al., 2019).

Une fois le modèle ajusté, différents indicateurs permettent d'évaluer sa performance. Le coefficient de détermination ajusté (pseudo- $R^2$ ), fourni par *statsmodels*, renseigne sur la proportion de la variabilité du couvert nival expliquée par l'ensemble des fonctions lissées (Hastie & Tibshirani, 1990 ; Wood, 2017). La significativité statistique des effets est évaluée par des tests de pénalisation et de degrés de liberté effectifs, dont les résultats (p-values associées aux *splines*) sont automatiquement fournis dans un tableau récapitulatif appelé *model.summary* lorsque le programme est effectué. Ces éléments permettent d'identifier quelles variables climatiques exercent une influence significative sur la couverture nivale, même lorsque cette influence n'est pas linéaire (Wood, 2017). Les résultats du coefficient pseudo- $R^2$  sont fournis dans le chapitre 4.4.

Les fonctions de lissage calibrées à partir des données historiques ont ensuite été appliquées aux projections climatiques futures ( $X_{n, future}$ ) afin d'estimer la surface enneigée future ( $Y_{future}$ ) (Wood, 2017). Les valeurs projetées ont été intégrées aux observations historiques, ce qui permet d'avoir une vision continue de l'évolution de la couverture nivale jusqu'en 2100. L'ensemble des composantes du modèle, leur rôle et leur paramétrisation sont synthétisés dans le Tableau 7.

Les résultats sont affichés sur trois graphiques représentant chacun un des scénarios climatiques utilisés. Une droite coupant la courbe de régression lorsqu'elle franchit  $y=0$  est tracée et accompagnée d'une zone dite tampon (*buffer*), pour visualiser la période potentielle de disparition du couvert nival pour chaque scénario. La zone tampon utilisée ici est de  $\pm 5$  ans, pour garder une marge d'erreur tolérable, compte tenu des incertitudes des projections climatiques utilisées.

L'un des principaux avantages de cette approche est sa capacité à représenter fidèlement des relations complexes entre les différentes variables utilisées ici, possiblement modélisables avec des régressions linéaires, mais avec une moindre précision (Renoult et al., 2020). L'évaluation de plusieurs scénarios d'émissions de GES, permet quant à elle d'obtenir des résultats plus nuancés de l'avenir des combes à neige. Cependant, ce modèle comporte aussi certaines limites. D'abord, les projections climatiques utilisées comportent des incertitudes propres aux modèles climatiques du CMIP6. D'autre part, certaines variables importantes pour la dynamique de la fonte, comme le vent ou l'ensoleillement, ne sont pas intégrées ici. L'impact potentiel de ces omissions peut être examiné avec le coefficient de détermination du modèle (pseudo- $R^2$ ), qui reflète la capacité du modèle à expliquer la variabilité observée du couvert nival. Enfin, la plage temporelle des données de couvertures nivales, étant limitée de 2000 à 2024 par la difficulté à trouver des données antérieures, affaiblit la précision d'un modèle ayant pour objectif de déterminer des trajectoires sur des décennies.

Le script réalisé pour ce modèle est disponible en Annexe C.

Élément	Détail	Rôle dans le modèle
<b>Données de surface enneigée</b>	Fractions de Couverts Niveaux (SCF) – MODIS / CEDA, 2000–2022, résolution 100 m, période 22–24 mai	Variable dépendante (Y)
<b>Température moyenne (°C)</b>	Données historiques ClimateData.ca + projections CanDCS-M6 (réduites à 10–20 km)	Variable explicative (X <sub>1</sub> ) – facteur de fonte
<b>Précipitations neigeuses (mm)</b>	ClimateData.ca (2000–2022) et projections CanDCS-M6 (2025–2100)	Variable explicative (X <sub>2</sub> ) – facteur d’accumulation
<b>Jours chauds (&gt; 0 °C)</b>	Calculés à partir des données climatiques historiques et projetées	Variation explicatives (X <sub>3</sub> ) – indice de durée de fonte
<b>Scénarios climatiques</b>	RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 (issus de CanDCS-M6, calibrés sur CMIP5–6)	Exploration de différents futurs possibles
<b>Méthode statistique</b>	Modèle Additif Généralisé (GAM) avec fonctions de lissage <i>spline</i> ( <i>BSplines</i> , <i>Gaussian family</i> )	Modélisation flexible des relations non linéaires entre variables climatiques et couvert nival
<b>Validation</b>	Pseudo-R <sup>2</sup> , significativité des fonctions lissées, analyse des résidus ( <i>statsmodels.GLMGam</i> )	Évaluation de la robustesse, du pouvoir prédictif et de la pertinence des effets
<b>Résultats attendus</b>	Estimation de la surface enneigée à la mi-mai de 2025 à 2100	Projection de l’évolution future des combes à neige

Tableau 7. Résumé des éléments du modèle statistique : variables, détails et rôles.

### 3.6 Modélisation 3D de la fonte

Afin de mettre en évidence l'influence du vent et de la pente sur la disposition des combes à neige, un modèle de fonte basé sur des critères topographiques a été développé (voir Annexe D). La comparaison entre les résultats de ce modèle avec la localisation réelle des combes permet de confirmer le rôle déterminant de ces paramètres externes au terrain. Ce modèle est également confronté aux résultats de l'analyse multicritère, qui prédit la position des combes à neige selon des critères topographiques, climatiques et biologiques. Il constitue le dernier objectif de cette recherche et introduit une démarche de modélisation tridimensionnelle et dynamique des couverts nivaux, encore inexistante dans la région.

La première étape a consisté à recréer un volume de neige réaliste à partir des segmentations issues de la classification (section 3.2.1). Chaque forme nivale, incluant les combes à neige, a été reconstruite en 3D à partir de ses contours : une parabole inversée à sommet doux a été générée pour représenter la stabilité et la répartition de l'accumulation neigeuse en conditions réelles. Cette surface est obtenue en calculant la distance euclidienne entre chaque pixel et le bord du polygone (via *dist\_transform\_edt*), puis en normalisant la distance maximale afin de moduler l'accumulation interne. La topographie du polygone est extraite des altitudes LiDAR correspondantes. Le profil d'accumulation est ensuite appliqué du centre vers les marges, modélisé comme une décroissance exponentielle de type gamma simplifiée, avec une accumulation maximale au centre :

$$decay\_profil = 1 - exp(-k \cdot d_{norm})$$

où  $d_{norm}$  est la distance normalisée (0 au bord, 1 au centre) et  $k$  un coefficient d'amortissement vaux entre 1 et 2 (suivant le réalisme du résultat) pour reproduire une décroissance réaliste (Stomakhin et al., 2013 ; Nicot, 2004). La hauteur de neige est calculée en multipliant ce profil par une hauteur maximale ajustable, correspondant à

différents scénarios d'enneigement et donc de fonte. Cette hauteur est ensuite ajoutée à l'altitude du sol pour générer une surface 3D continue à l'aide d'un maillage de type Delaunay (*delaunay\_2d*) (Stomakhin et al., 2023).

La seconde étape consiste à simuler la fonte par rétraction verticale et horizontale. La rétraction verticale s'effectue depuis les points les plus hauts vers la base du volume, tandis que la rétraction horizontale suit une « colonne vertébrale » alignée sur l'axe central des formes, reproduisant un effet de glissement naturel de la neige. Chaque itération de fonte applique un *buffer* négatif à la géométrie, réduisant progressivement la surface. Le facteur *frac\_h* quantifie le niveau d'érosion en proportion du diamètre maximal *D\_max*, évalué via la transformée de distance (*distance\_transform\_edt*) (Vionnet et al., 2021). L'épaisseur restante est calculée à chaque itération en fonction de la distance normalisée au centre, selon une loi d'atténuation exponentielle :

$$decay\_profile = 1 - np.exp(-2 \cdot norm\_d)$$

Cette combinaison de retractions verticales et horizontales, pondérées respectivement à 0.6 et 0.4 (pondérations variables suivant le réalisme du modèle), simule une fonte plus marquée au sommet du couvert (fortement exposé au soleil et au vent) et plus progressivement au centre.

Un critère de pente, calculé à partir du MNT lissé par filtre gaussien (*gaussian\_filter*) est intégré pour simuler une rétention moindre sur les fortes pentes (fonte accélérée) et plus importante sur les faibles pentes. L'effet du vent est également ajouté : la direction du vent est convertie en vecteur unitaire, servant à décaler le centre d'accumulation sous le vent, simulant une redistribution de la neige. La distance normalisée des points est recalculée par rapport à ce nouveau centre. En parallèle, un facteur de modulation est estimé via le produit scalaire entre les coordonnées des points et le vecteur du vent :

$$wind\_factor = 0.5 + 0.5 \cdot (1 - (wind\_proj - wind\_proj.min()) / (np.ptp(wind\_proj) + 1e-6))$$

Ce facteur varie entre 0.5 et 1 : les zones exposées au vent subissent une réduction d'épaisseur, tandis que les zones sous le vent conservent une accumulation plus importante (Marsh et al, 2020 ; Hinks et Museth, 2009)

L'épaisseur finale de neige est alors définie par:

$$snow\_h = max\_snow\_height \cdot decay\_profile \cdot slope\_factor \cdot wind\_factor \cdot (1 - frac\_v)$$

Le modèle est implémenté sur une maille 3D intégrant l'ombrage du relief (issu d'un DEM et transformé avec *rasterio.transform*). Les volumes sont visualisés avec *Pyvista* et exportés sous forme d'animation GIF, chaque itération indiquant la hauteur maximale et le volume total (m<sup>3</sup>) restant. L'étude a été appliquée au mont Albert, les dimensions plus importantes des monts McGerrigle ayant limité l'efficacité du modèle. L'angle de caméra est ajustable afin de mettre en évidence les zones d'intérêt.

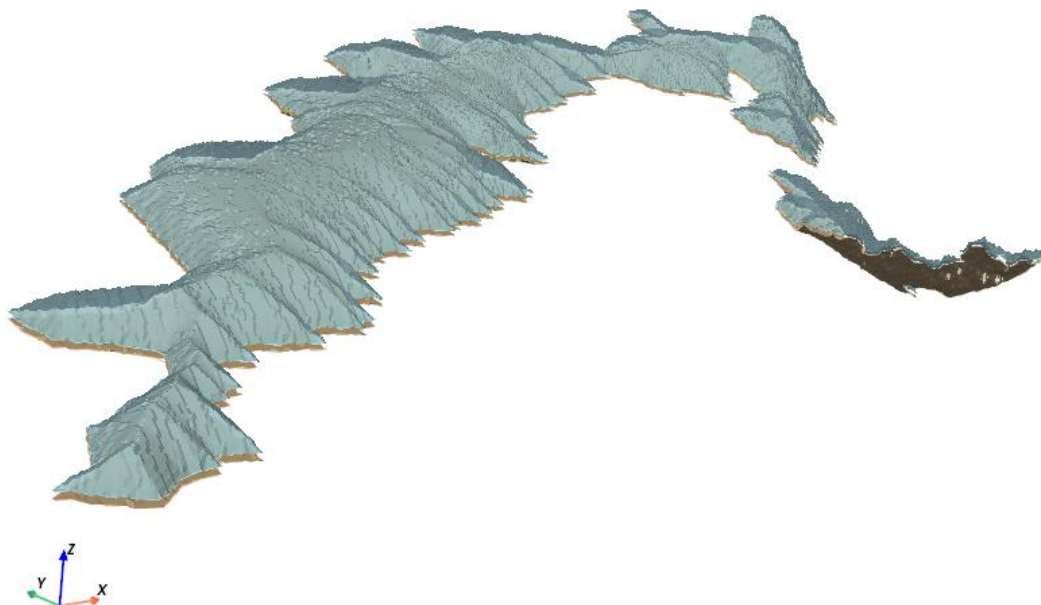


Figure 23. Aperçu de la modélisation d'une combe à neige. Le volume de neige (en bleu) est restreint à une surface déterminée par les surfaces issues des segmentations de couvert nival réalisé depuis les images satellites.

### 3.7 Analyse détaillée des combes à neige en milieu forestier

Une analyse des combes à neige réalisée sur le versant Ouest de la mine Madeleine a été menée pour étudier leur influence microclimatique, un aspect encore peu documenté dans la littérature scientifique (Mott et al., 2017).

Un premier travail de terrain, réalisé le 12 juin 2024, a permis d'identifier plusieurs combes à neige en milieu forestier, propices à l'installation de sondes de mesure (Onset HOBO U23 Pro v2 Temperature / Relative Humidity Data Logger) afin d'acquérir des données de température et d'humidité en surface et au sein des combes à neige. La température (°C) permet de quantifier les différences microclimatiques induites par la présence des combes à neige dans leur environnement immédiat. L'humidité relative (%) est quant à elle utilisée pour évaluer le rôle des combes à neige dans l'humidification de l'air ambiant et pour analyser l'évolution de l'humidité pendant et après la période de fonte, afin de caractériser les processus de fonte dominants en fonction des conditions thermiques (sublimation ou fusion).

Un second travail de terrain, effectué le 10 mai 2025, a permis d'installer huit sondes et quatre caméras sur deux sites de combes à neige encore fortement enneigés. La première combe (48°59'50''N, 65°59'32 O) a été équipée de trois sondes HOBO, dont deux positionnées au sommet du couvert nival au moment de l'installation (à 1,30 m et 2,60 m du sol), et une placée 1,50 m sous le sommet du couvert nival, soit à 0,90 m du sol. La seconde combe à neige (48°59'39''N, 65°59'31 O) a également été instrumentée avec trois sondes, installées au niveau du couvert nival, dont deux à 2,00 m du sol et une à 1,20 m du sol. Pour chaque combe instrumentée, une sonde de référence a été installée en retrait, en hauteur sur un arbre, de manière à être représentative des conditions environnementales générales du secteur d'étude, hors de l'influence directe des combes à neige. Cette configuration permet de quantifier les différences de conditions climatiques entre les zones influencées par les combes à neige

et leur environnement. Les caméras, installées sur deux points de vue opposés pour chaque combe, permettent de documenter visuellement la fonte du couvert nival et la persistance des combes à neige, ainsi que de corrélérer les données numériques acquises par les sondes avec des états d'enneigement caractéristiques. Les données de température et d'humidité sont acquises toutes les 15 minutes, les caméras installées prennent une photo par heure.

Enfin, un dernier travail de terrain a été réalisé à la fin du mois de juin 2025 afin de récupérer les données enregistrées sur une période de 55 jours, après la fonte complète de la neige. Les données ont été extraites au format .csv, puis traitées afin d'éliminer les valeurs aberrantes et manquantes, en vue de leur analyse et de leur interprétation.

## CHAPITRE IV

### RÉSULTATS

#### 4.1 Paramètres morphoclimatiques associés aux combes à neige

##### 4.1.1 Importance de la pente dans le contrôle des combes à neige

Le mont Albert présente une proportion plus élevée de combes en pente forte que les monts McGerrigle, malgré une superficie totale plus réduite. La majorité de sa surface est toutefois occupée par des combes en pente moyenne, bien que leur nombre soit limité. Leur grande dimension leur confère une importance spatiale marquée, clairement visible sur les images satellites. En revanche, les combes en pente douce y sont rares et couvrent une surface très limitée (0.97 ha, soit 1.7 % de la surface totale des combes du mont Albert). À l'inverse, les monts McGerrigle se caractérisent par une forte prédominance de combes en pente douce, qui représentent 128.48 ha, contre seulement 18.83 ha de combes en pente forte (soit 7.7 % de leur surface totale en combes) (Tableau 8, Figure 24). Cette comparaison met en évidence une répartition contrastée : les combes en pente forte se concentrent sur le mont Albert, celles en pente douce dominant sur les sommets nord et ouest des monts McGerrigle, tandis que les combes en pente moyenne constituent une catégorie intermédiaire, caractérisée par de faibles effectifs mais une empreinte spatiale importante.

	< 15 °	15 ° < 30 °	>30 °	Surface totale (ha)
<b>Mt. Albert</b>	2.07	30.57	23.67	56.21
<b>Mt. McGerrigle</b>	128.48	99.56	18.83	246.87
<b>Surface totale (% par pente)</b>	42.7 %	42.9 %	14.4 %	303.08 / 100 %

Tableau 8. Surface (ha) couverte par les combes à neiges du parc national de la Gaspésie le 8 juin 2021, suivant la pente.

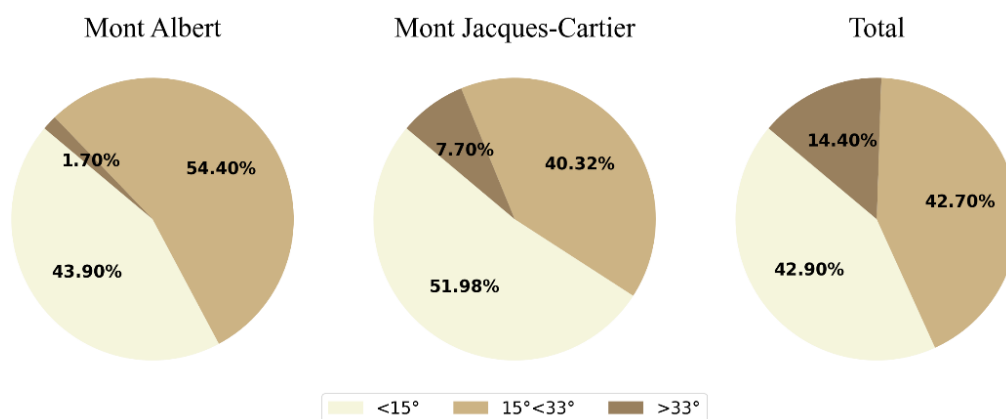


Figure 24. Distribution des combes à neige selon leur pente moyenne sur le mont Albert, les monts McGerrigle et l'ensemble de la zone d'étude.

À l'échelle régionale, les surfaces de combes en pente douce et moyenne apparaissent relativement équivalentes, résultat de la forte densité de combes en pente douce sur les versants ouest des monts McGerrigle. Les combes sur pente forte, plus rares, se concentrent quant à elles presque exclusivement sur le mont Albert.

#### 4.1.2 Orientation

L'orientation des combes à neige du parc national de la Gaspésie varie principalement entre le sud-sud-est et le nord-nord-est. Le 8 juin 2021, lorsque leur nombre est maximal, l'orientation moyenne pour l'ensemble du parc est est-sud-est ( $94^\circ$ ) (Figure 25). Sur le mont Albert, 14 combes sur 16 sont orientées à l'est et au sud-sud-est ( $60^\circ$  à  $170^\circ$ ), tandis que seules deux combes sont exposées à l'ouest (une nord-nord-ouest et une sud-sud-ouest). Sur les monts McGerrigle, deux grandes catégories se distinguent :

Les plus grandes combes, situées en altitude et sur un substrat rocheux, sont orientées du nord-est au sud-est ( $25^\circ$  à  $150^\circ$ ). Elles se trouvent principalement sur les versants est du mont Jacques-Cartier, du mont Compte, du Dos-de-Baleine, de la Passe et du mont Rolland-Germain. Les petites combes, situées plus bas en altitude et sur un substrat végétal, sont principalement orientées vers l'ouest-nord-ouest (certaines sans orientation nette, en pente quasi nulle) (Figure 25). Elles occupent surtout les versants ouest du mont Jacques-Cartier, du mont Compte et du Dos-de-Baleine. Ces combes bordent fréquemment les lacs de ce secteur (Lac Paré, Tanguay, Turgio, Lichens, Élement, Riffou) ainsi que plusieurs lacs des vallées à l'est du mont Jacques-Cartier (Vieillard, Charles-Côté, Dolbeau). Cette distribution particulière au-dessus des lacs reste difficile à expliquer, mais ces combes figurent parmi les premières à disparaître au printemps.

Le 2 juillet 2021, lorsque seules subsistent les combes les plus persistantes, l'orientation moyenne demeure est-sud-est ( $98^\circ$ ) (Figure 25). À ce stade de fonte, aucune combe n'est plus exposée vers l'ouest, ni sur le mont Albert ni sur les monts McGerrigle. Sur le mont Albert, deux combes persistent avec une orientation sud-est et une orientée est. Sur le mont Jacques-Cartier, une combe à neige est exposée à l'est et une autre est exposée au sud-est (Figure 25).

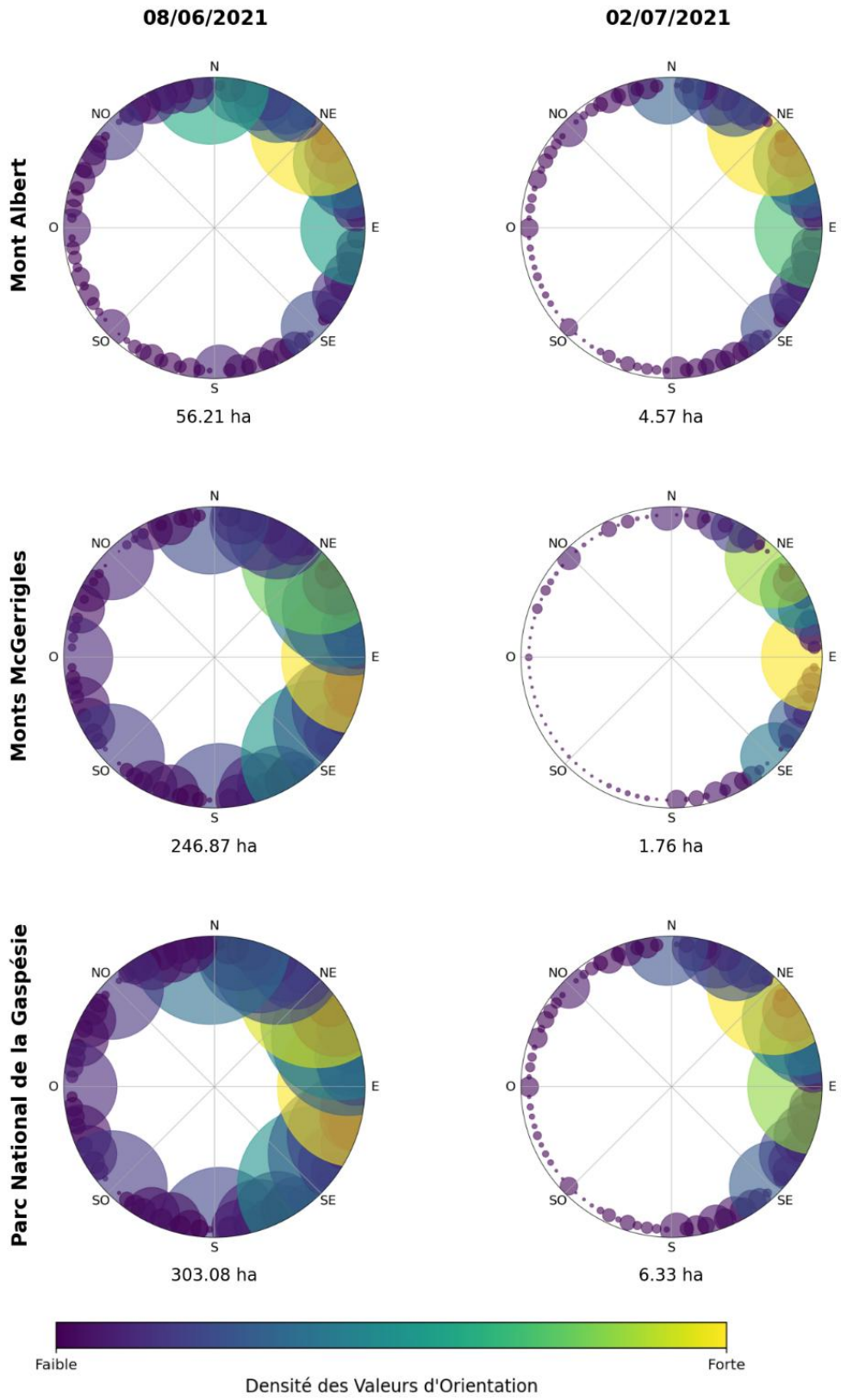


Figure 25. Stéréogrammes d'orientation des combes à neige du parc national de la Gaspésie le 08 juin 2021 et, un mois plus tard, le 03 juillet 2021. On remarque la tendance d'orientation vers l'est avec les sphères jaunes et vertes.

#### 4.1.3 Influence de la géomorphologie

La comparaison entre les combes à neige et le reste de la région d'étude (zones de combes exclues) révèle plusieurs différences notables. Dans toutes les zones, la forme géomorphologique dominante est la catégorie « pente », ce qui s'explique par le contexte montagnard escarpé de la zone d'étude. Pour l'ensemble du mont Albert, les formes les plus présentes sont, par ordre décroissant (Figure 26):

- 1 - Pente
- 2 - Éperon
- 3 - Crête
- 4 - Dépression
- 5 - Vallée

Pour les combes à neige des monts McGerrigle, l'ordre diffère légèrement (Figure 26):

- 1 - Pente
- 2 - Dépression
- 3 - Éperon
- 4 - Vallée
- 5 – Crête

Ainsi, les combes à neige présentent une proportion accrue de dépressions (*hollow*) par rapport au reste du mont Albert. Ce résultat confirme les définitions classiques des combes à neige, qui les associent à des niches de nivation localisées dans des dépressions. Toutefois, la catégorie « pente » reste dominante dans les combes, en cohérence avec les résultats précédents montrant une forte proportion de combes en pente moyenne et forte. La comparaison entre les combes à neige selon leur pente met

en évidence des nuances supplémentaires. Les combes en pente moyenne et forte, les formes dominantes sont les pentes, les éperons, puis les dépressions, sans différence majeure entre les deux catégories. Pour les combes en pente douce, la répartition diffère, avec une plus forte représentation des dépressions. Les formes les plus fréquentes sont les pentes, les dépressions, puis les éperons. Cela indique que les combes en pente douce se situent davantage dans des niches de nivation que celles développées sur des pentes plus fortes.

Ces résultats rejoignent les observations issues d'autres environnements de prairies à pente douce, où les combes à neige sont également décrites comme occupant des dépressions de typiques de niches de nivation (Filion et Payette, 1982 ; Pickering et al., 2014 ; Verrall et al., 2023 ; Campbell et al., 2025).

En résumé, les combes à neige se développent principalement sur des pentes et dans des niches de nivation, tandis que leur environnement immédiat est surtout constitué de pentes et d'éperons. Les combes en pente moyenne et forte sont associées aux pentes et aux éperons. Les combes en pente douce, plus nombreuses et plus étendues dans les monts McGerrigle, sont davantage liées aux dépressions, confirmant le rôle fondamental des niches dans leur développement. Enfin, la dominance des pentes, combinée à l'orientation est-nord-est (section 4.1.2), souligne l'importance du transport nivéo-éolien : la neige s'accumule et persiste préférentiellement sur ces pentes ombragées, ce qui favorise la longévité des combes.

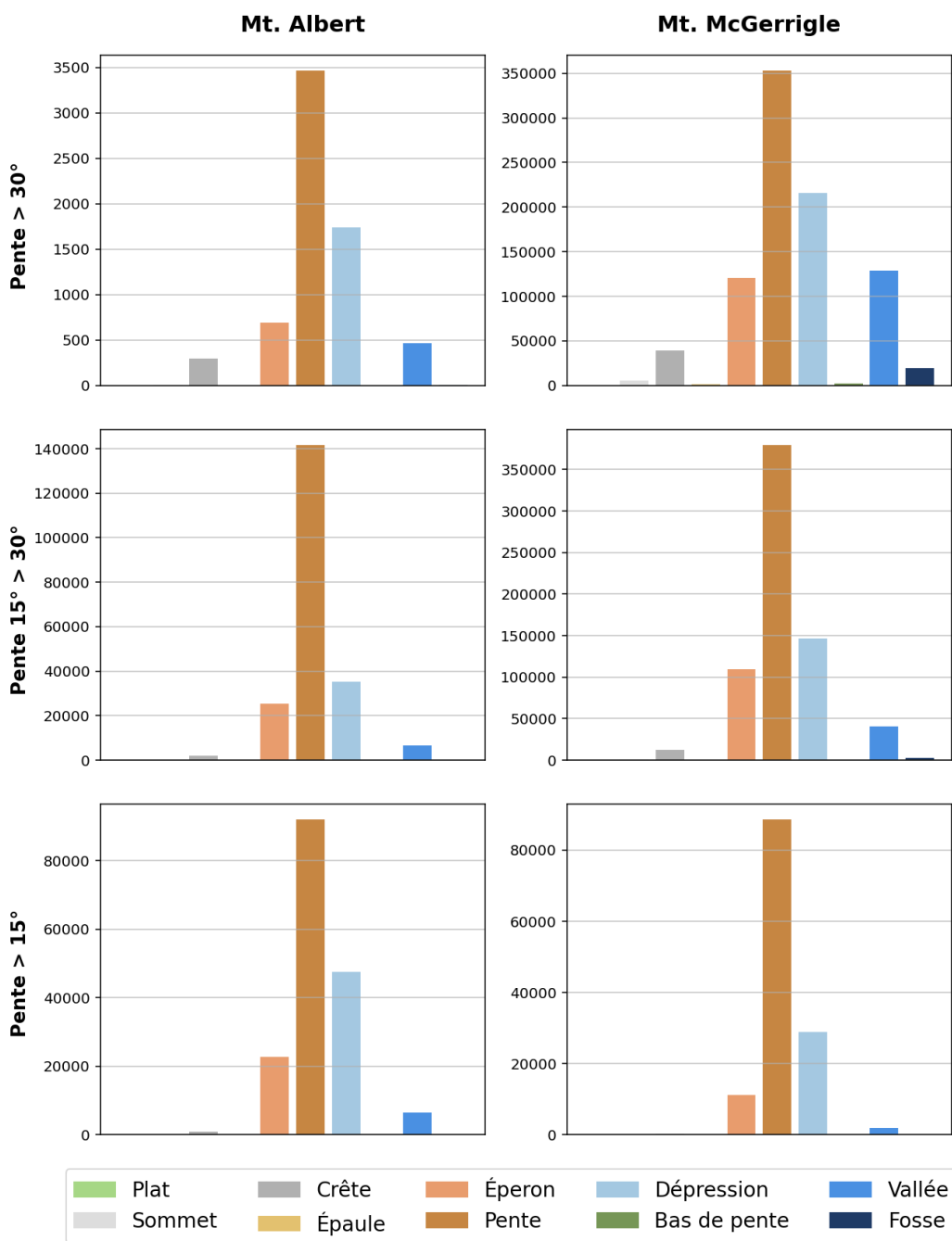


Figure 26. Distribution des formes géomorphologiques associées aux combes du mont Albert et des monts McGerrigle, selon différentes catégories de pente. La catégorie « pente » domine, suivie par les catégories « dépression », « éperon » et « vallée ».

#### 4.1.4 Influence de l'insolation et de l'ombrage

Les valeurs d'insolation obtenues pour le mont Albert montrent que la radiation totale reçue par les combes est légèrement supérieure à celle mesurée pour le plateau. Cette différence s'explique par le fait que la zone de référence inclue non seulement le plateau, mais aussi les flancs du mont Albert, dont les pentes marquées génèrent un fort ombrage annuel. Par conséquent, la valeur d'ombrage du plateau seul est probablement sous-estimée et ce résultat ne sera pas retenu dans l'interprétation.

La comparaison entre les différentes catégories de pentes fournit des résultats plus pertinents. L'insolation moyenne calculée est de : 796,6 kWh/m<sup>2</sup> pour les combes en pente douce, 770,7 kWh/m<sup>2</sup> pour les combes en pente moyenne, et 722.5 kWh/m<sup>2</sup> pour les combes en pente forte (Figure 27). Ces valeurs révèlent une différence nette entre chaque classe, avec un contraste particulièrement marqué au-delà de 30 ° de pente. Les combes en pente douce, moins enclavées, reçoivent davantage de rayonnement direct, tandis que celles en pente forte bénéficient d'un ombrage plus prononcé, variable selon leur exposition. L'écart de 74 kWh/m<sup>2</sup> entre les pentes douces et fortes montre l'importance de ce facteur. Ce contraste peut en partie expliquer pourquoi les combes en pente douce sont plus petites, bien qu'elles soient plus nombreuses que celles en pente forte. La tendance est encore plus marquée sur les monts McGerrigle. À l'échelle globale, l'insolation moyenne des combes (764 kWh/m<sup>2</sup>) est très proche de celle du plateau (769 kWh/m<sup>2</sup>). Toutefois, les différences internes entre ces catégories sont accentuées : 787 kWh/m<sup>2</sup> pour les combes en pente douce, 757 kWh/m<sup>2</sup> pour les combes en pente moyenne, et 646 kWh/m<sup>2</sup> pour les combes en pente forte (Figure 27). Ainsi, l'écart atteint 141 kWh/m<sup>2</sup> entre les pentes douces et fortes dans ce secteur. Comme au mont Albert, ces résultats confirment que les conditions d'insolation et d'ombrage varient fortement selon la morphologie des combes, avec des implications directes sur leur taille et leur persistance.

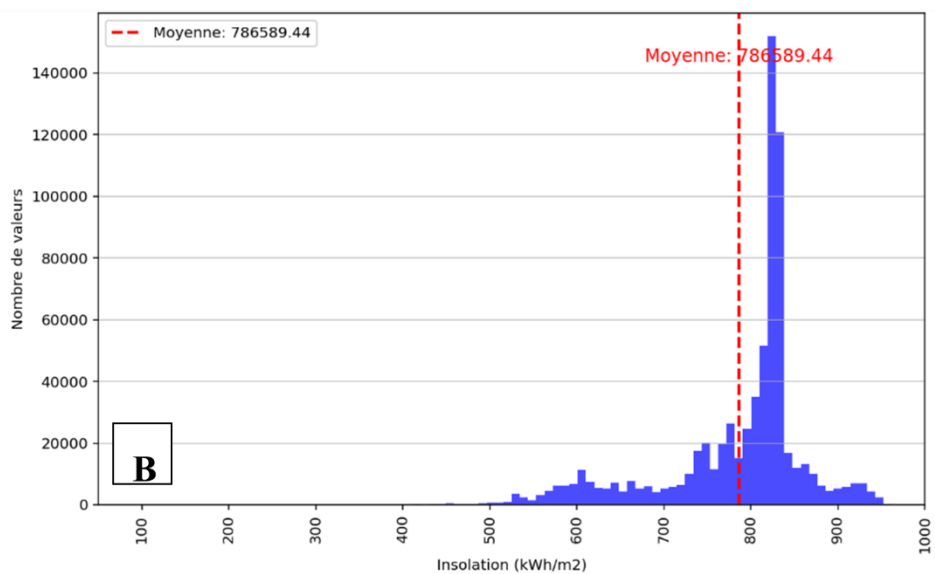
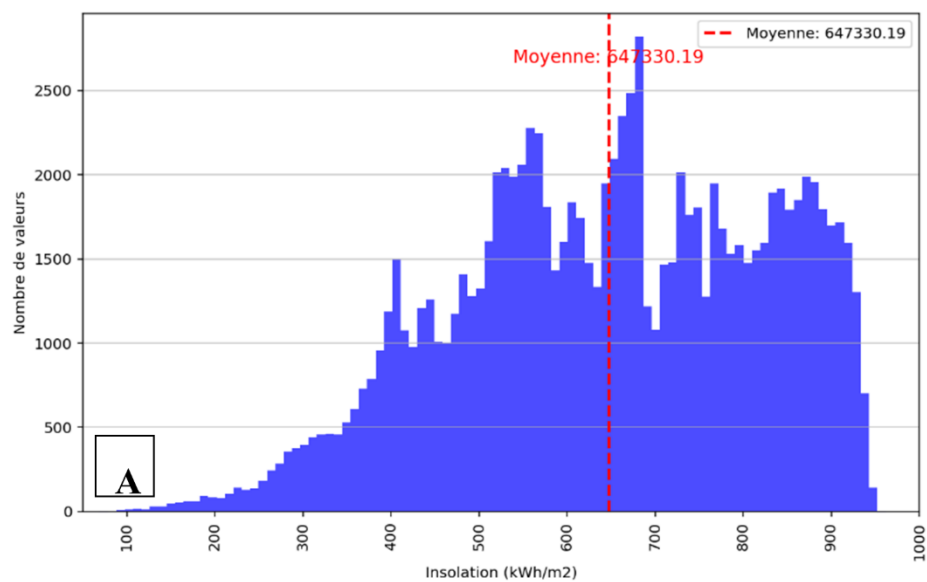


Figure 27. A) Insolation sur les combes en pente douce des monts McGerrigle de novembre 2023 à août 2024 et B) insolation sur les combes en pente forte des monts McGerrigle de novembre 2023 à août 2024.

#### 4.1.5 Influence du NDVI

La différence de NDVI entre les deux plateaux étudiés est marquée. Il est faible pour le mont Albert, mais moyen à fort sur les monts McGerrigle. Cette disparité s'explique en partie par la géologie et l'altitude des zones : le mont Albert correspond à un plateau essentiellement rocheux, tandis que les monts McGerrigle regroupent plusieurs plateaux, dont certains sont végétalisés à plus basse altitude.

La relation entre le NDVI et la pente des combes diffère également selon les plateaux (Tableau 9 et 10). Sur le mont Albert, le NDVI moyen sous les combes diminue avec l'augmentation de la pente. La distribution des valeurs y est plus large (écart-type plus élevé), reflétant une forte variabilité. À l'inverse, sur les monts McGerrigle, le NDVI moyen est similaire pour les combes en pente douce et en pente forte, mais la médiane est plus élevée pour ces dernières (Figure 29 et Tableau 10). Cela suggère que, dans ce secteur, les pentes fortes favorisent davantage le développement de la végétation sous les combes. Les combes en pente moyenne présentent des valeurs de NDVI légèrement plus faibles. La distribution est plus resserrée (écart-type plus faible), ce qui reflète la grande taille de l'échantillon disponible pour ce plateau.

	< 15 °	15 ° < 30 °	> 30 °
Mt. Albert	33 ; 34	24 ; 22	20 ; 19
Mt. McGerrigle	45 ; 46	40 ; 46	47 ; 54

'X ; Y' : X = moyenne, Y = médiane

Tableau 9. Valeurs du NDVI dans le parc national de la Gaspésie en août 2021.

Ces différences se traduisent également dans la répartition spatiale. Sur les monts McGerrigle, la végétation joue un rôle majeur dans le développement des combes à neige. Contrairement au mont Albert, les combes y sont presque absentes des hauts

plateaux rocheux, à l'exception de celles du mont Jacques Cartier et du mont Comte, qui abritent les trois grandes combes orientées est-sud-est. La majorité des combes se concentre en contrebas des plateaux, là où la végétation est plus dense, notamment dans les forêts subalpines (Figure 28).

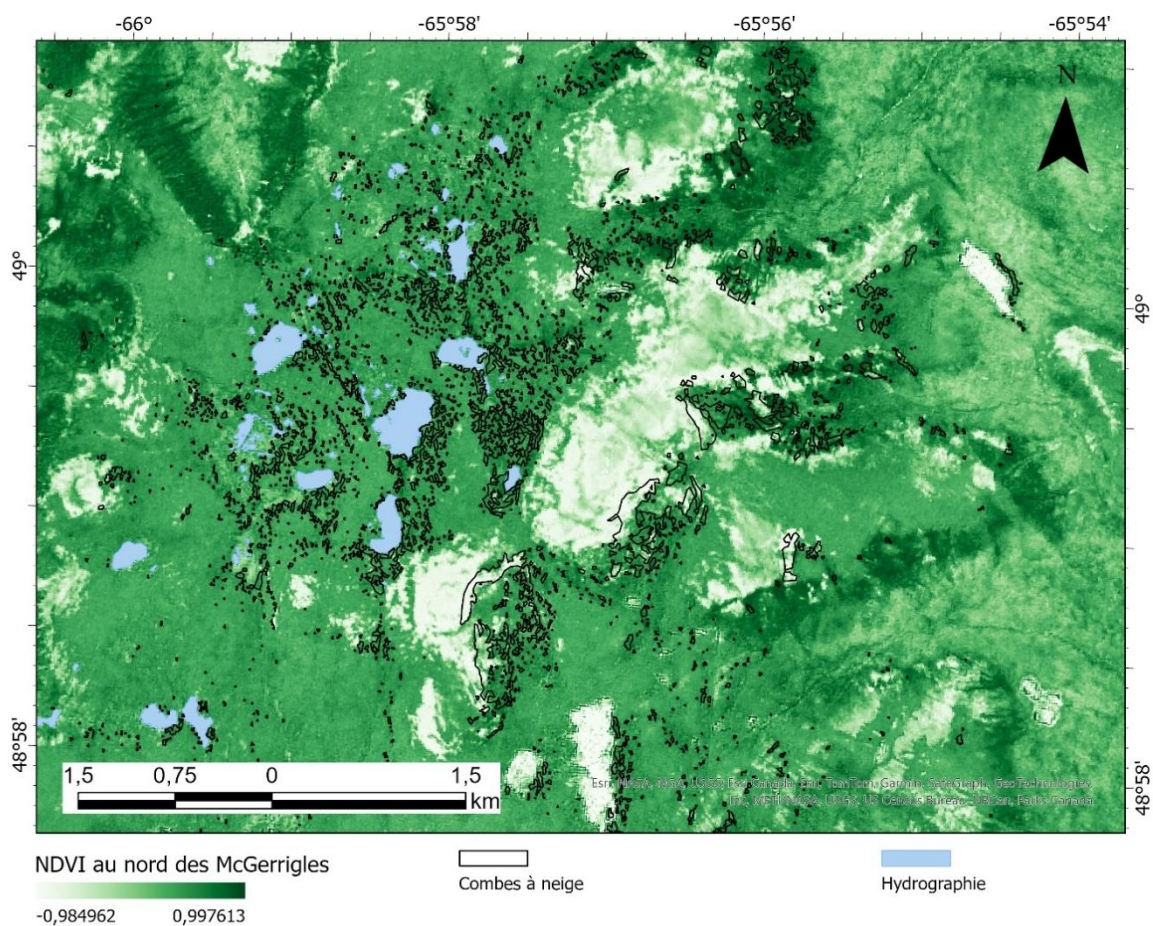


Figure 28. Distribution des combes à neige au nord des monts McGerrigle et carte du NDVI après la fonte (2021).

Indicateur	Valeur
Moyenne	0.438
Médiane	0.470
% NDVI > 0.5	28.22 %
% NDVI < 0.5	71.78 %
% NDVI > moyenne	32.42 %
% NDVI < moyenne	67.58 %

Tableau 10. Statistiques descriptives des valeurs NDVI pour les combes des monts McGerrigle.

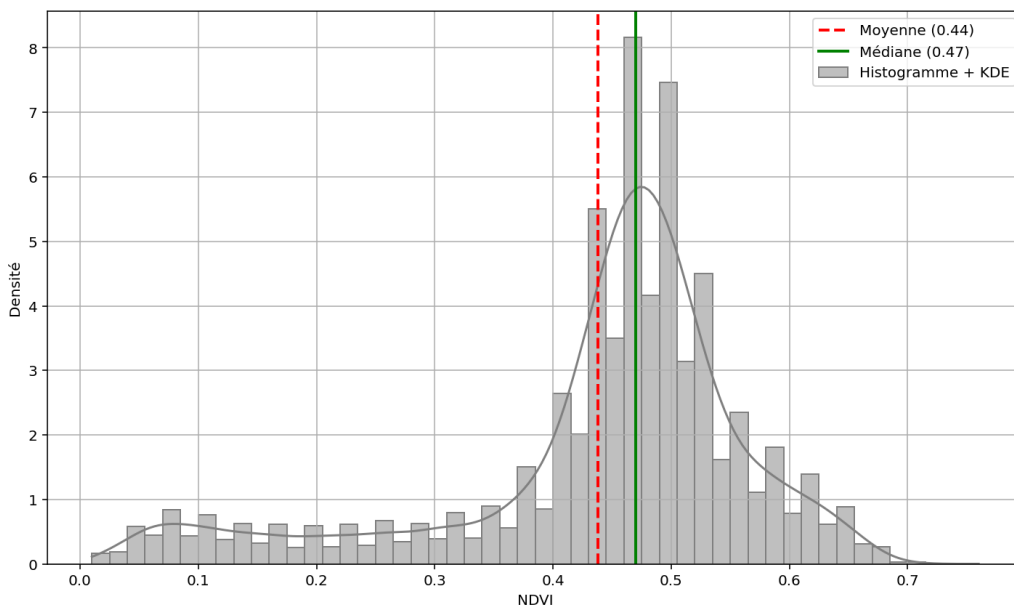


Figure 29. Histogramme montrant la distribution des valeurs de NDVI au niveau des combes à neige des monts McGerrigle, peu après leur fonte.

#### 4.1.6 Variations entre deux années consécutives

L'analyse précédente a porté sur les combes observées au 08 juin 2021. Pour approfondir la compréhension des paramètres contrôlant leur disposition et leur

persistance, une analyse complémentaire a été réalisée au 03 juillet 2021, soit 25 jours plus tard, à l'aide d'images Sentinel-2. À cette date, il ne reste plus que 6.03 ha de neige, contre 303.08 ha un mois plus tôt. Les combes restantes correspondent donc aux plus pérennes de la saison.

Le contraste entre les deux plateaux est marqué. Au 08 juin 2021, le mont Albert abritait 56.2 ha de neige (19 % du total), tandis que les monts McGerrigle en concentraient 246.8 ha (81 %) (Tableau 11). Au 03 juillet 2021, la tendance s'inverse : le mont Albert conserve 4.57 ha (72 % du total), alors que les monts McGerrigle n'en conservent que 1.76 ha (28 %) (Tableau 12). Ces résultats montrent que ce sont les conditions topo-climatiques du mont Albert qui favorisent la persistance la plus longue des combes dans les reliefs gaspésiens. Un exemple illustre la variabilité de la classification : la grande combe du mont Albert (Figure 20) présentait une pente moyenne de 12.8 ° au 08 juin (catégorie pente douce). Après la fonte partielle, sa pente moyenne est passée à 16 ° en juillet, ce qui la reclassait en pente moyenne. Cela montre que la classification selon la pente peut évoluer durant la saison de fonte, en fonction de la topographie locale et du retrait progressif de la neige.

La comparaison entre les deux dates ne révèle que peu de différences notables pour les critères géomorphologiques et d'insolation. Cela suggère que les conditions observées au 8 juin (formes de niche de nivation, exposition réduite au rayonnement) constituaient déjà les paramètres favorables à la persistance des combes à neige jusqu'à la fin de la saison.

Toutes les combes restantes en juillet reposent sur un substrat rocheux. Les combes en pente douce avaient entièrement disparu, et 86 % de la neige persistante se situait dans des niches de nivation en pente moyenne (~23 °). Ces caractéristiques correspondent principalement au mont Albert, où les combes en pente moyenne sont les plus pérennes (ex : grande combe en pente moyenne, Figures 13 et 14), qui peuvent parfois persister jusqu'en septembre lors d'années exceptionnellement neigeuses.

	< 15 °	15 ° < 30 °	> 30 °	Surface totale (ha)
<b>Mt. Albert</b>	2.07	30.57	23.67	56.21
<b>Mt. McGerrigle</b>	128.48	99.56	18.83	246.87
<b>Surface totale (% par pente)</b>	42.7 %	42.9 %	14.4 %	303.08 / 100 %

Tableau 11. Surfaces occupées par les combes à neige suivant leur pente le 8 juin 2021.

	< 15 °	15 ° < 30 °	> 30 °	Surface totale (ha)
<b>Mt. Albert</b>		4.01	0.56	4.57
<b>Mt. McGerrigle</b>		1.47	0.29	1.76
<b>Surface totale (% par pente)</b>		86.5 %	13.5 %	6.03 / 100 %

Tableau 12. Surfaces occupées par les combes à neige suivant leur pente le 3 juillet 2021.

#### 4.2 Albédo

Sur la parcelle étudiée, l'albédo moyen mesuré le 8 juin 2021 est de 0.30, contre 0.21 le 25 août 2021 (Figure 30). La présence des combes forestières en juin augmente significativement l'albédo du site par rapport à une période sans neige, avec une différence de +42.8 %. Une comparaison locale confirme cette tendance : sur une surface d'un km<sup>2</sup> située au-dessus de la mine Madeleine, à deux kilomètres en contrebas du site enneigé, l'albédo calculé est également de 0.21 (Figure 30). Ainsi, les zones de combes à neige présentent un albédo supérieur de 42.8 % par rapport aux surfaces voisines non enneigées à la même date.

À une échelle plus large (20 km<sup>2</sup>), incluant les sommets nord des monts McGerrigle (Mont Jacques-Cartier, Dos-de-Baleine, mont de la Passe, mont Compte et mont Rolland-Germain), les résultats montrent une dynamique similaire. L'albédo est de 0.22 le 8 juin 2021. La fonte des neiges entraîne donc une diminution de 22.2 % de

l'albédo sur cette portion du massif. Ces résultats indiquent que les combes à neige contribuent de manière significative à l'augmentation de l'albédo régional en début d'été, tant à l'échelle locale (par ex. au niveau du lac Élément, comparé à un site en contrebas) qu'à l'échelle plus large des monts McGerrigle. Ils mettent également en évidence une variabilité spatiale et temporelle marquée de l'albédo entre sites avec ou sans combes à neige (Figure 31).

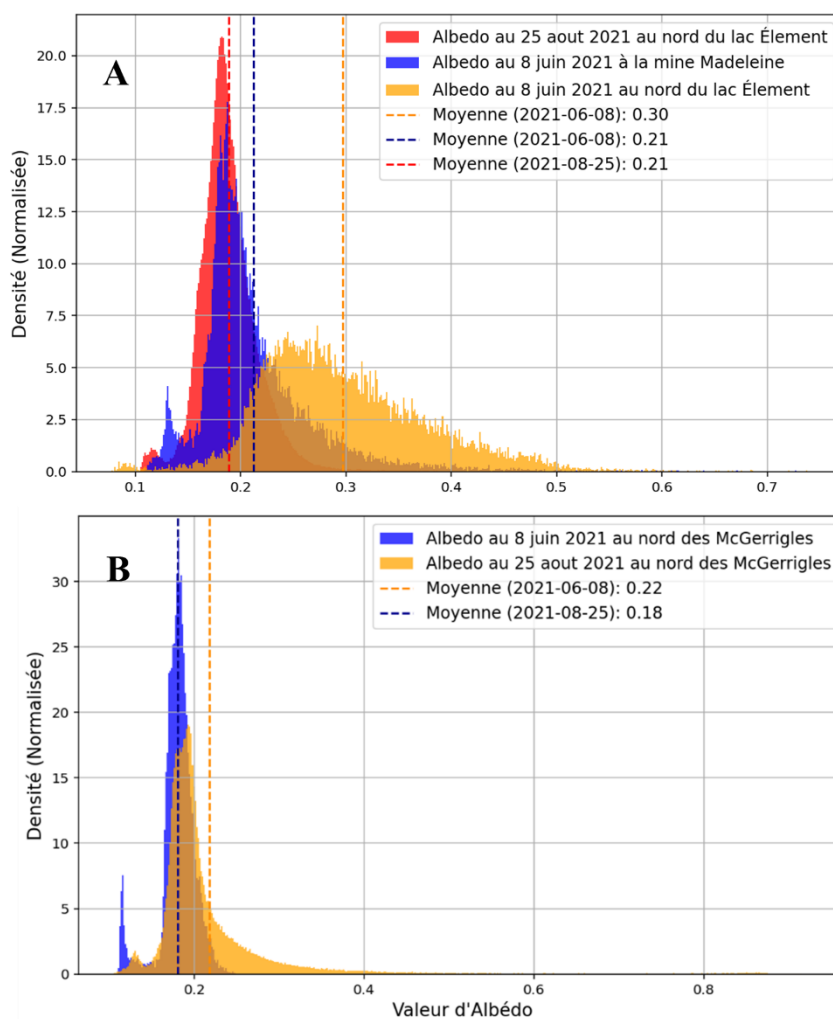


Figure 30. Différence d'albédo A) entre la mine Madeleine et le nord du lac Élément (sur deux dates) et, B) dans le nord des monts McGerrigle entre le 8 juin 2021 et le 25 août 2021.

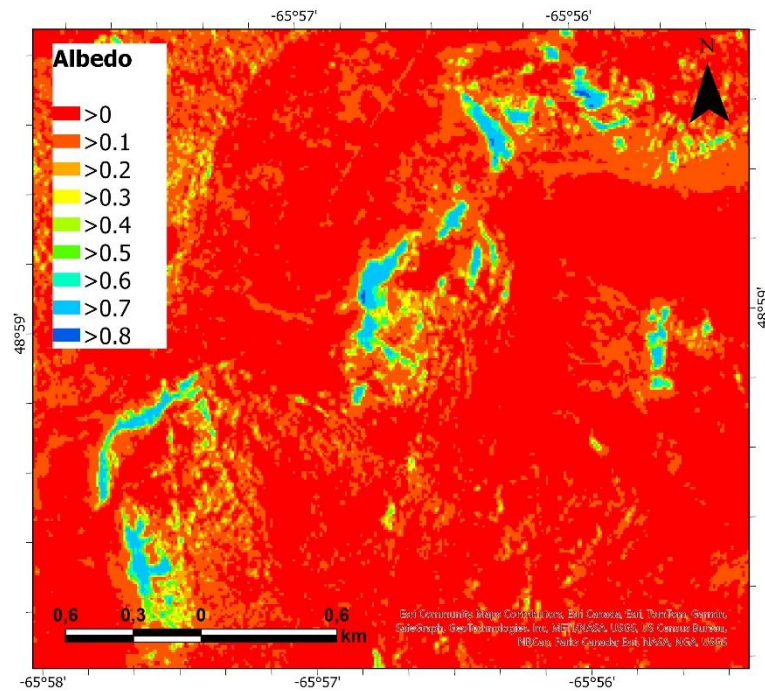


Figure 31. Albédo au nord des monts McGerrigle le 8 juin 2021.

#### 4.3 Résultats de l'analyse multicritère

Les scénarios de coefficients obtenus pour chaque variable diffèrent entre les deux secteurs étudiés, ce qui montre que les paramètres topoclimatiques qui influencent la distribution des combes à neige ne sont pas uniformes à l'échelle régionale. Les pondérations détaillées sont présentées dans les Tableaux 13 et 14.

##### Mont Albert

Le raster utilisé inclut à la fois le haut plateau et ses pentes, où se concentrent de nombreuses combes. Aucune limite inférieure d'élévation n'a été fixée pour ce modèle, ce qui tend à surestimer ce facteur. En effet, l'échantillon intègre à la fois les zones du plateau et les ruptures de pente en altitude, où les combes sont abondantes. Les

paramètres les plus pertinents sont : l'élévation (23 %), l'ombrage (19 %), les formes géomorphologiques (18 %), la pente (15 %), l'orientation (15 %) et enfin la courbure de la pente (10 %). Le modèle (Figure 32) indique que les zones favorables à la persistance de la neige se trouvent sur les versants orientés vers l'est et le sud du plateau, où l'altitude est la plus élevée. C'est également dans ce secteur que se localise la plus grande combe du parc. Les conditions sont en revanche défavorables, voire nulles, sous 700 m d'altitude et sur les versants exposés à l'ouest (Figure 32).

### Monts McGerrigle

Pour limiter une surestimation de l'altitude, l'analyse a été restreinte aux secteurs situés au-dessus de 800 m. Malgré cette correction, l'élévation demeure le facteur le plus critique (Figure 33). Les paramètres dominants sont, par ordre d'importance : l'élévation (31 %), le NDVI (17 %), la courbure des pentes (12 %), l'orientation (11 %), les formes géomorphologiques (10 %), l'ombrage (9 %) et enfin la pente (9 %). La forte pondération du NDVI illustre l'importance de la végétation dans la distribution des combes (Figure 33). Les nombreuses petites combes localisées au nord-est des monts McGerrigle, notamment autour des lacs Paré, Riffou, Tanguay et Élement, témoignent du rôle protecteur des couverts forestiers face au vent et à l'insolation. Ces combes, bien que peu visibles sur les images satellites en raison de leur taille, forment un réseau dense. À l'opposé, les plus grandes combes se situent sur les flancs Est dénudés des monts Jacques Cartier, Compte et Dos de Baleine.

Les différences observées entre les modèles s'expliquent principalement par la végétation et la structure du relief. La végétation, absente sur le plateau du mont Albert, mais abondante dans les monts McGerrigle, favorise la mise en place et la persistance de petites combes. La structure du relief, elle, au mont Albert est constituée d'un haut plateau massif aux parois abruptes, tandis que les monts McGerrigle forment une succession de petits plateaux séparés par des reliefs intermédiaires. Cette morphologie

influence directement l'importance relative des pentes dans le modèle (plus élevé au mont Albert, plus faible dans les monts McGerrigle).

<b>N°</b>	<b>Paramètre</b>	<b>Poids</b>
1	Élévation	0.2298
2	Ombrage	0.1922
3	Formes géomorphologiques	0.1799
4	Pente	0.1520
5	Orientation	0.1442
6	Courbure	0.1016
7	NDVI	0

Tableau 13. Pondérations pour les paramètres associés au mont Albert.

<b>N°</b>	<b>Paramètre</b>	<b>Poids</b>
1	Élévation	0.3101
2	NDVI	0.1734
3	Courbure	0.1185
4	Orientation	0.1090
5	Formes géomorphologiques	0.1047
6	Ombrage	0.0926
7	Pente	0.0913

Tableau 14. Pondérations pour les paramètres associés aux monts McGerrigle.

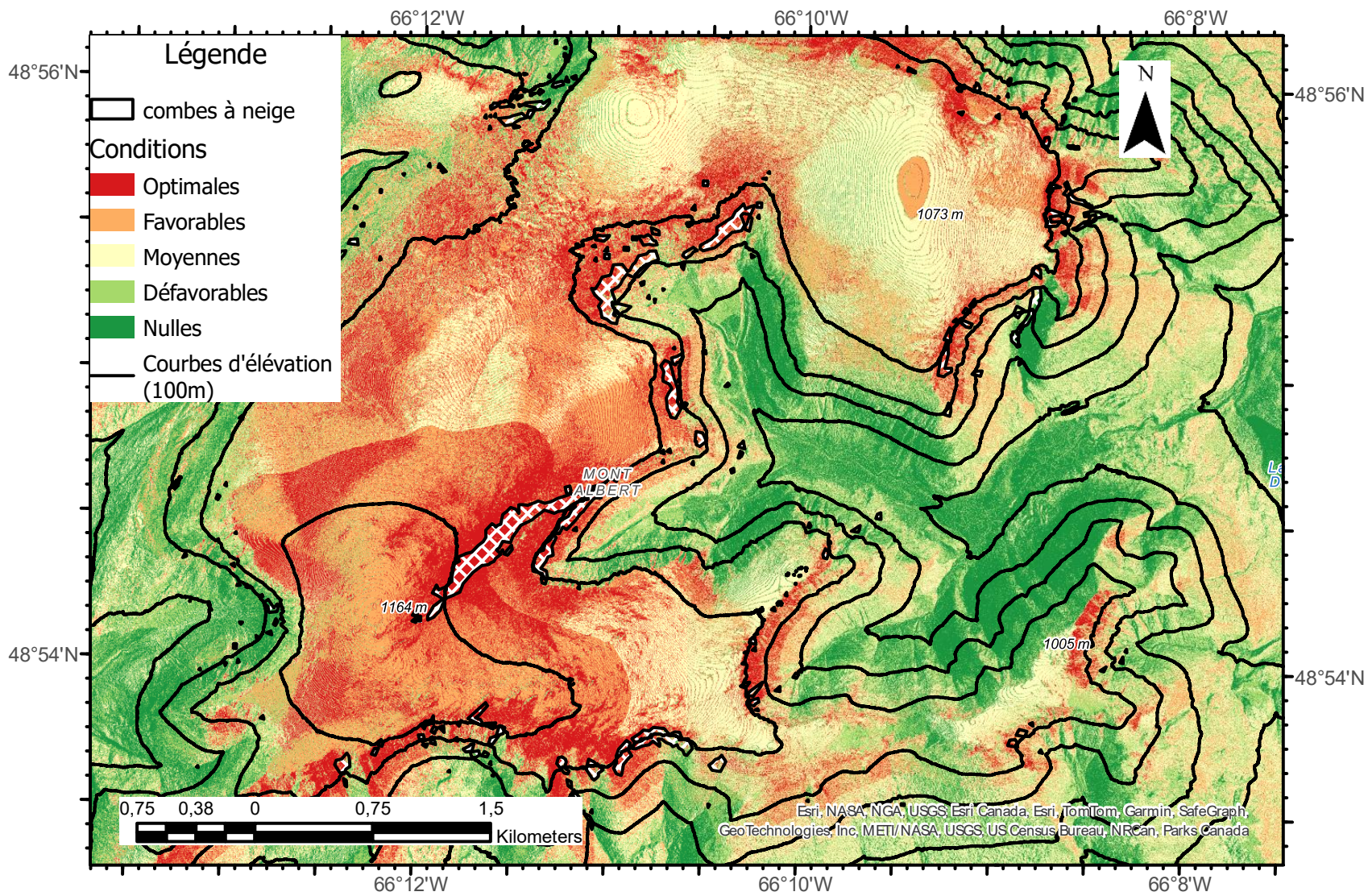


Figure 32. Carte de distribution des combes à neige prédite par le modèle de susceptibilité pour le mont Albert.

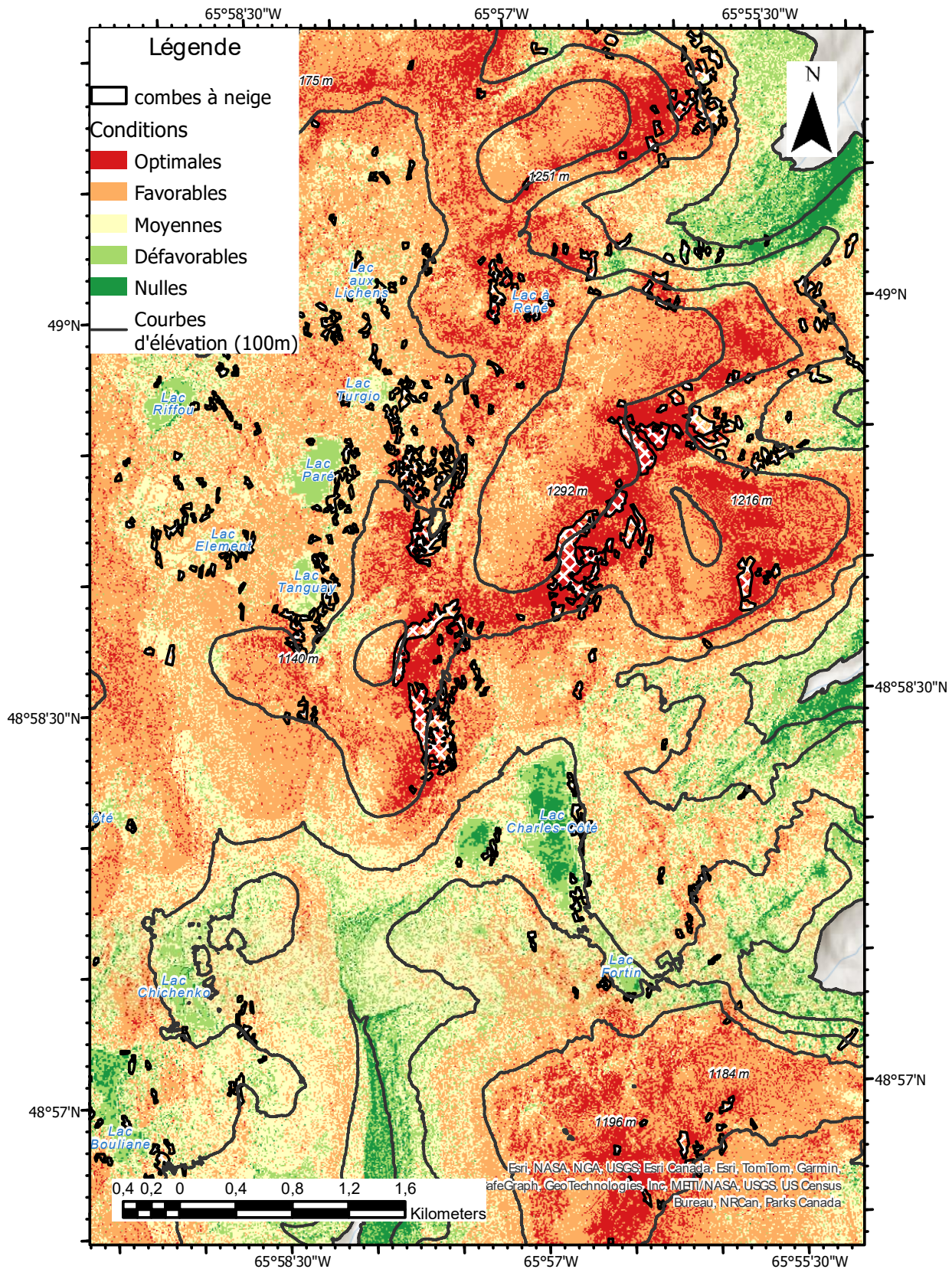


Figure 33. Carte de distribution des combes à neige prédite par le modèle de susceptibilité pour les monts McGerrigle.

#### 4.4 Résultats de la modélisation prospective de la fonte

Les trois scénarios d'émission de GES utilisés pour modéliser l'évolution future du couvert nival montrent trois trajectoires contrastées (Figures 34 et 35).

Le scénario SSP1-2.6 correspond à une stabilisation du réchauffement climatique à 2.6 °C par rapport à l'ère préindustrielle, il projette une régression lente de la surface enneigée. La disparition complète de couvert nival à la fin mai est estimée autour de 2060, suivie d'une réapparition temporaire jusqu'au début des années 2090, attribuable à une augmentation des chutes de neige et à une baisse des températures au cours des années 2070. Un nouvel épisode de disparition est ensuite anticipé à la fin du siècle, vers 2090.

Le scénario SSP2-4.5 montre que la surface enneigée régresse rapidement, menant à une disparition complète du couvert nival à la mi-mai, à la fin des années 2030 (2037-2038). Ces résultats sont proches de ceux obtenus avec le scénario SSP5-8.5, qui montre une régression légèrement plus marquée, avec une disparition complète du couvert nival à la fin mai autour de l'année 2035.

La tendance négative de la régression résulte en grande partie de la différence marquée de surface enneigée à la mi-mai entre le début des années 2000 et la fin des années 2010. Cet intervalle illustre une chute rapide du couvert nival, passant de plus de 1000 km<sup>2</sup> en 2004 à moins de 200 km<sup>2</sup> à la mi-mai en 2017 et 2019. Cette évolution est associée à une baisse significative des précipitations neigeuses moyennes (41 mm en 2000 contre 35 mm en 2017), à une hausse des températures moyennes (de -2.3 °C en 2000 à -1.1 °C en 2020) et à une augmentation du nombre de jours chauds cumulés (50 en 2000 contre 57 en 2019) (Figures 34 et 35).

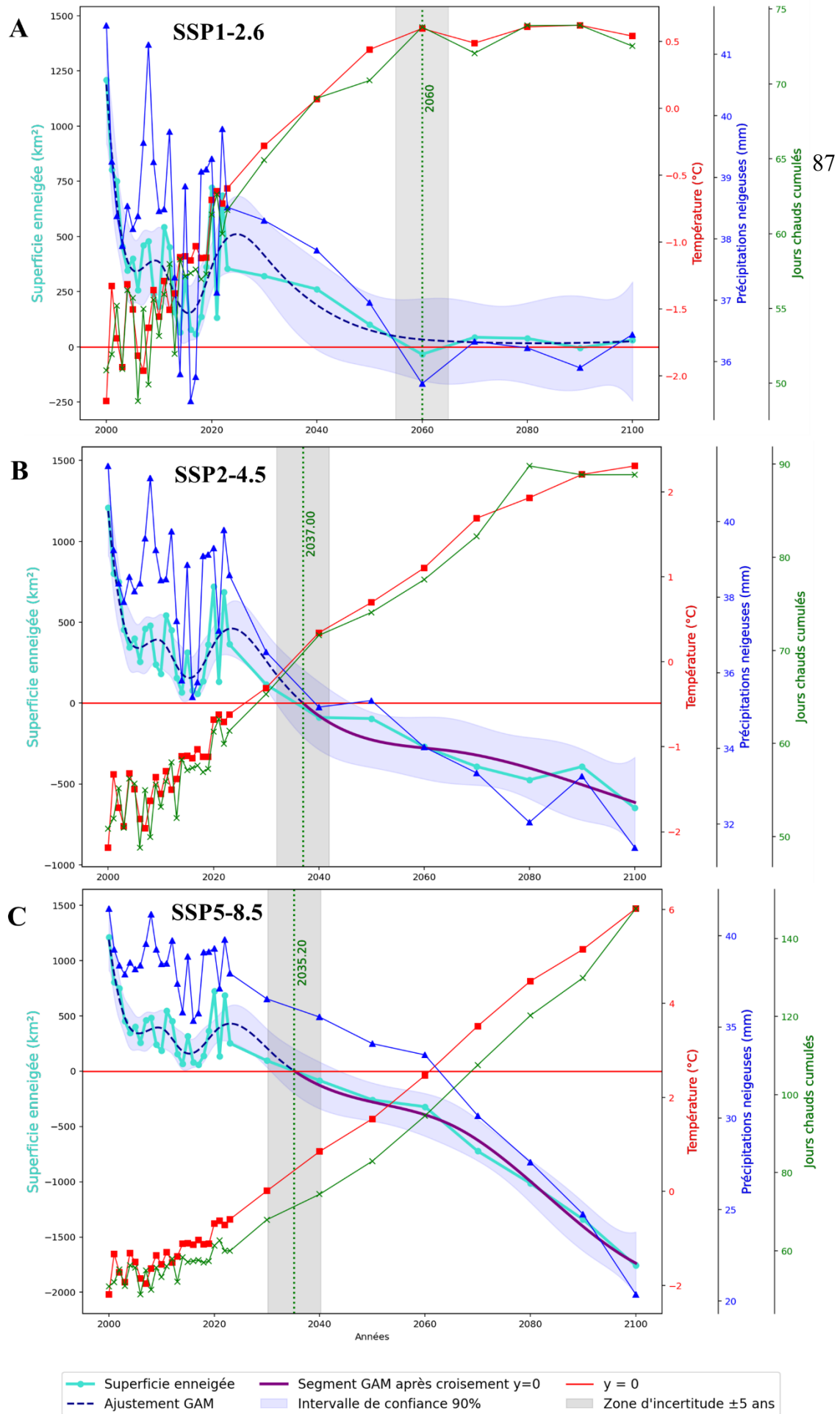


Figure 34. Projections des variables indépendantes (température, précipitations neigeuses et jours chauds) et de la variable dépendante (couvert nival) de 2000 à 2100 suivant les trois scénarios de réchauffements du CMIP6 : A) SSP1-2.6, B) SSP2-4.5, C) SSP5-8.5.

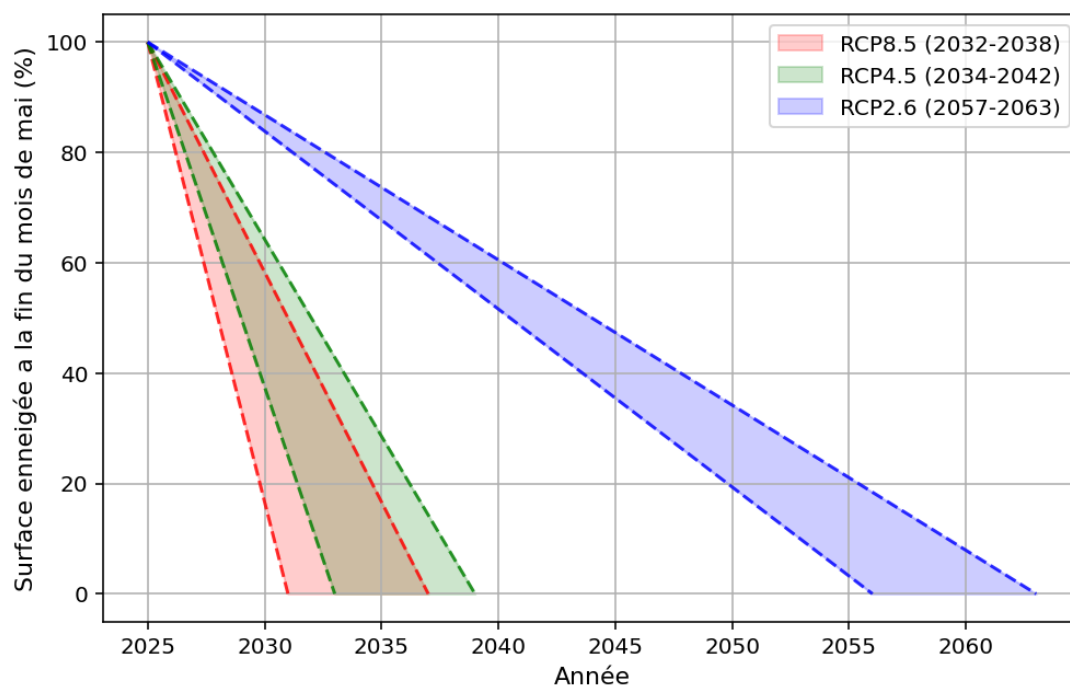


Figure 35. Projection de la couverture nivale (en % par rapport à 2024) à la fin-mai selon 3 scénarios climatiques. L'amplitude de chaque projection correspond à la valeur pour laquelle la courbe de régression de chaque modèle coupe  $y = 0, \pm 3$  ans.

Enfin, l'interprétation d'un résultat négatif du couvert nival correspond à une disparition encore plus précoce dans l'année. Dans l'ensemble, les trois scénarios révèlent une relation plus forte entre la surface enneigée et la quantité de précipitations hivernales qu'avec les autres variables, bien que la réactivité et donc l'amplitude de cette relation demeure moindre. En d'autres termes, les données historiques indiquent que la variation de la surface d'enneigement dépend davantage de la quantité de neige tombée entre décembre et mai que des autres paramètres climatiques.

Les valeurs du coefficient de détermination ajusté (pseudo- $R^2$ ) varient de 0.89 (SSP1) à 0.98 (SSP2, SSP5), indiquant que le modèle explique entre 90 et 98 % de la variance du couvert nival, soit un ajustement très satisfaisant.

#### 4.5 Résultats de la modélisation 3D de la fonte

L'objectif premier de ce modèle était de tester un algorithme capable de simuler les volumes de neige présents dans la région et leur fonte progressive, en fonction de différents volumes initiaux et en intégrant les effets de la pente et du vent.

La comparaison entre les fractions de fonte simulées et les segmentations de combes issues d'images satellites montre que le modèle prédit convenablement la localisation générale des combes à neige. Toutefois, des divergences notables apparaissent dans la représentation des volumes. L'exemple de la plus grande combe de la région (Figure 37), qui dépasse 1000 m de longueur en juin, au cours de plusieurs années récentes, illustre cette limite. Dans la réalité, le volume est fragmenté en plusieurs amas distincts, bien conservés le long des pentes de la vallée; dans le modèle, le volume apparaît comme une masse quasi-continue, qui tend à disparaître plus rapidement sur les pentes fortes après plusieurs itérations de fonte.

Le modèle permet de simuler jusqu'à près de 3 000 000 m<sup>3</sup> de neige en 45 à 50 secondes, sur une maille (simulation 3D du relief) à haute résolution (basée sur la résolution du raster) (Figure 36). Le nombre d'itérations illimité permet de visualiser une simulation de fonte réaliste, prenant en compte les effets du vent et de la pente.

Le script est fourni en Annexe E et en accès libre depuis l'adresse : <https://vriva10.github.io/model-3D-snow/>.

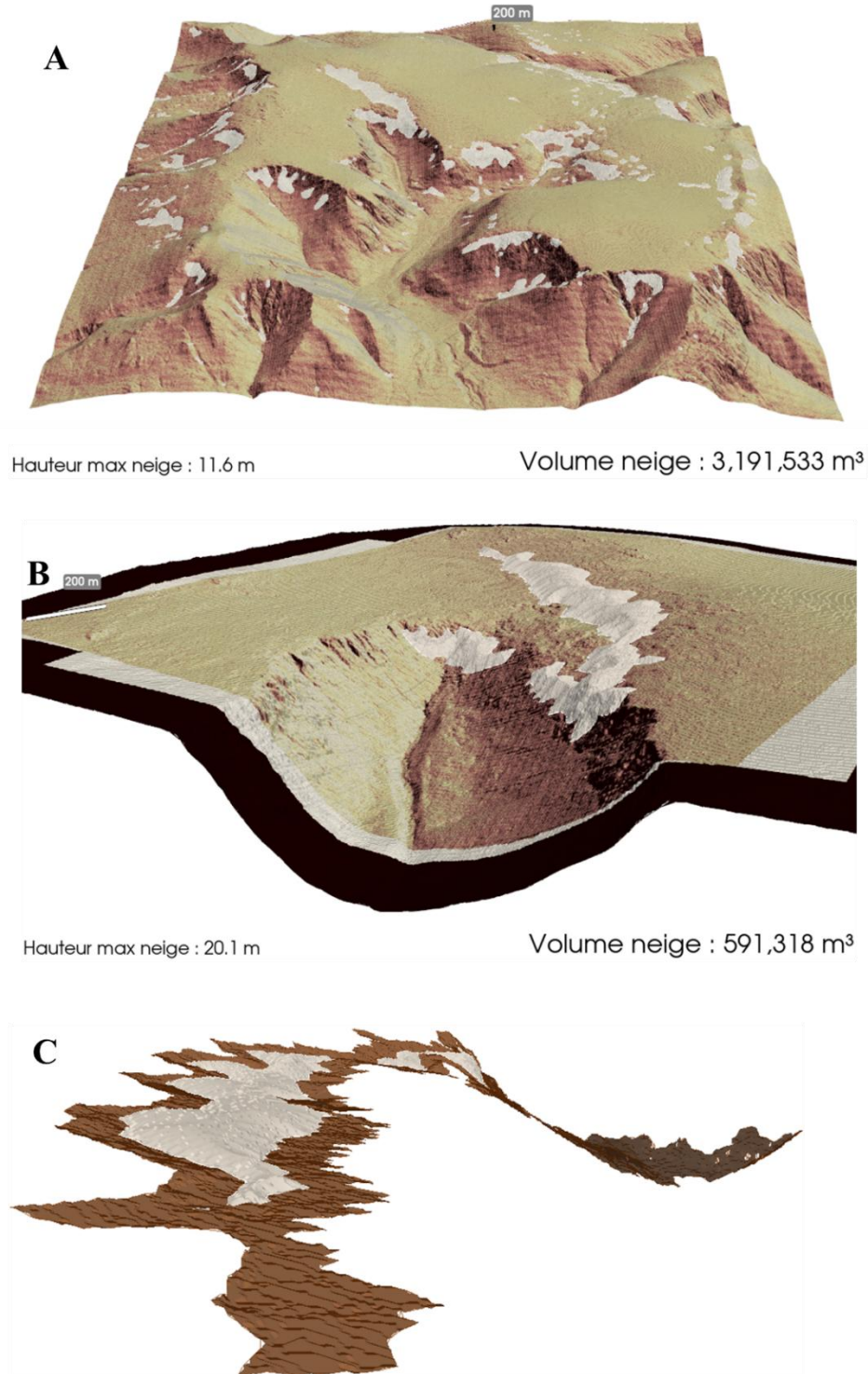

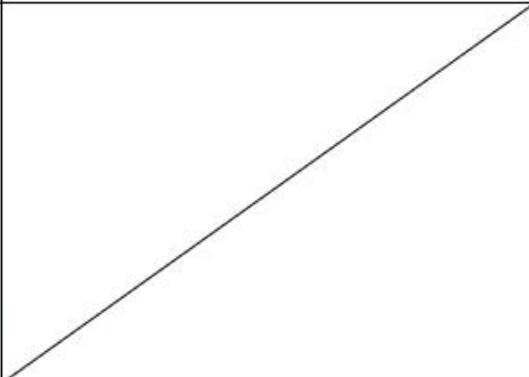
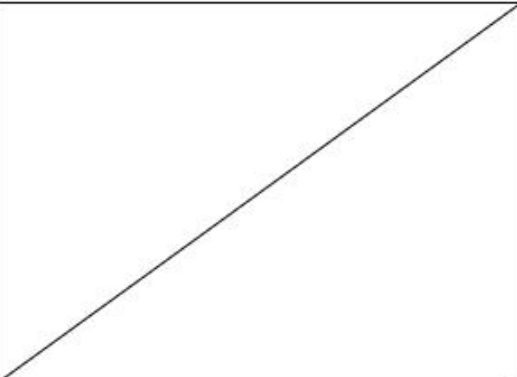
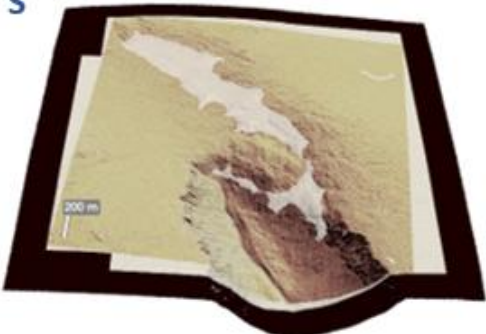
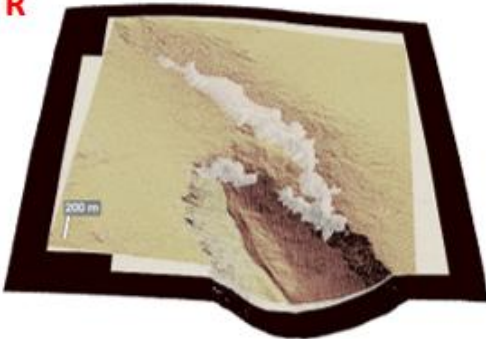
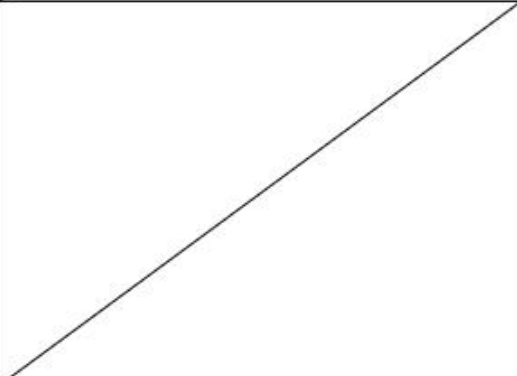
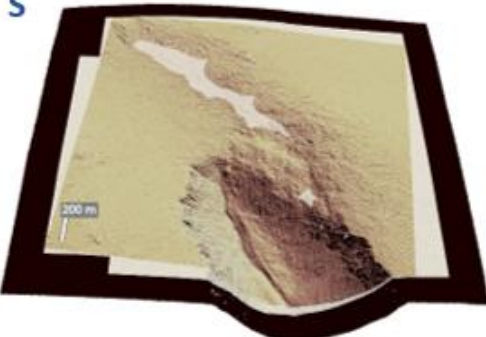
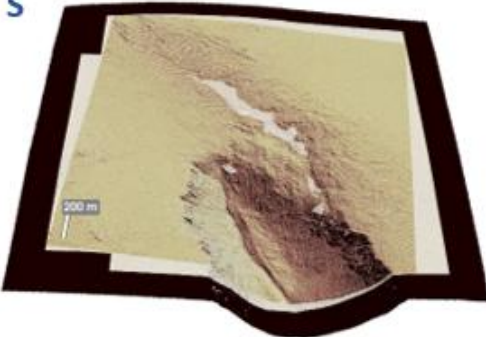
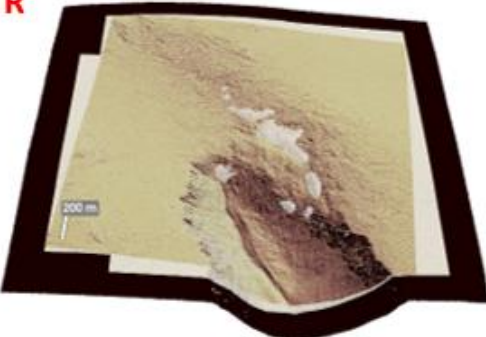


Figure 36. Représentation du modèle : A) sur l'ensemble du mont Albert, B) vue rapprochée d'une combe à neige et C) visualisation d'une fraction de fonte simulée, la surface brune représente la surface que recouvrait originellement la combe à neige, avant la simulation.

Volume (m <sup>3</sup> ) Estimé	17/05/2021	08/06/2021	01/07/2021
≈ 3 000 000	<b>R</b> 		
≈ 500 000	<b>S</b> 	<b>R</b> 	
≈ 40 000	<b>S</b> 	<b>S</b> 	<b>R</b> 

**R** = volume réelle, issu d'une segmentation d'image satellite **S** = volume simulé par le modèle, après différents fractionnements

Figure 37. Tableau de comparaison de différentes fractions de fonte de la neige sur le mont Albert, suivant des volumes réels (R) et simulés (S).

#### 4.6 Régimes thermiques des combes à neige

Les données de température récoltées sur deux sites équipés de capteurs (SP1 et SP2) révèlent des comportements distincts selon les conditions locales.

La zone SP1 comprenait trois capteurs installés dans la combe : deux dans un même arbre en contrebas (A1\_a à 1 m et A1\_b à 2.50 m) et un en amont de la zone (A2, à 1.5 m). Un capteur représentatif (REP) a été placé en surplomb de la zone, à trois m de hauteur. Comme les données de A1\_b étaient proches de celles du REP, ce capteur n'a pas été retenu dans les analyses.

Deux périodes principales ont été identifiées : du 10-19 mai et du 19 mai au 23 juin.

Pour la période du 10 au 19 mai : les capteurs les plus bas (A1\_a, A2) montrent une stabilité thermique, largement indépendante des variations atmosphériques, traduisant l'influence directe du couvert de neige (Figure 39).

Pour la période du 19 au 23 juin : tous les capteurs suivent les tendances du REP, mais avec des amplitudes réduites au début de la période, jusqu'à rejoindre progressivement les valeurs atmosphériques (Figure 39).

Le seuil du 19 mai correspond à un refroidissement marqué suivant un réchauffement important le 17 mai, moment où les capteurs commencent à sortir de l'influence directe de la neige. Durant la période du 10 au 19 mai, le REP affiche une moyenne de 0.47 °C, (min. -10.88 °C; max. 13.13 °C), contre -0.01 °C pour A1\_a et 1.75 °C pour A2. Les extrêmes sont beaucoup plus marqués pour le REP : moyenne sous 0 °C (-3.31 °C REP vs -0.87 °C A1\_a), moyenne au-dessus 0 °C (5.52 °C REP vs 1.07 °C A1\_a). La variance confirme cette différence d'amplitude (26.25 pour le REP contre 2.23 pour A1\_a). A2 présente des valeurs intermédiaires, marquant une sortie progressive de l'influence du couvert neigeux autour du 14 mai (Figure 39).

Une période clé survient du 17 au 19 mai : l'air se réchauffe brutalement (de -10 à 10 °C), déclenchant une fonte rapide. C'est la première fois qu'A1\_a enregistre une température positive, mais son réchauffement est trois fois plus lent que celui du REP, malgré une sortie apparente du couvert nival. Cet écart, (de 2 à 8 °C entre A1\_a et REP) traduit un effet d'isolation thermique lié à la sublimation de la neige, ralentissant la fonte en périphérie de la combe.

Les capteurs de SP2, installés plus haut, présentent une variance de 16.60 (capteur le plus bas) contre 40.94 (REP) pour la période du 10 au 19 mai. La température moyenne est de 2.99 °C (bas) contre 4.68 °C (REP). Contrairement à SP1, les capteurs sortent plus rapidement de l'influence nivale, soit dès le 14 mai. Néanmoins, l'amplitude reste nettement plus faible pour les capteurs proches du sol durant toute cette période (Figure 41)

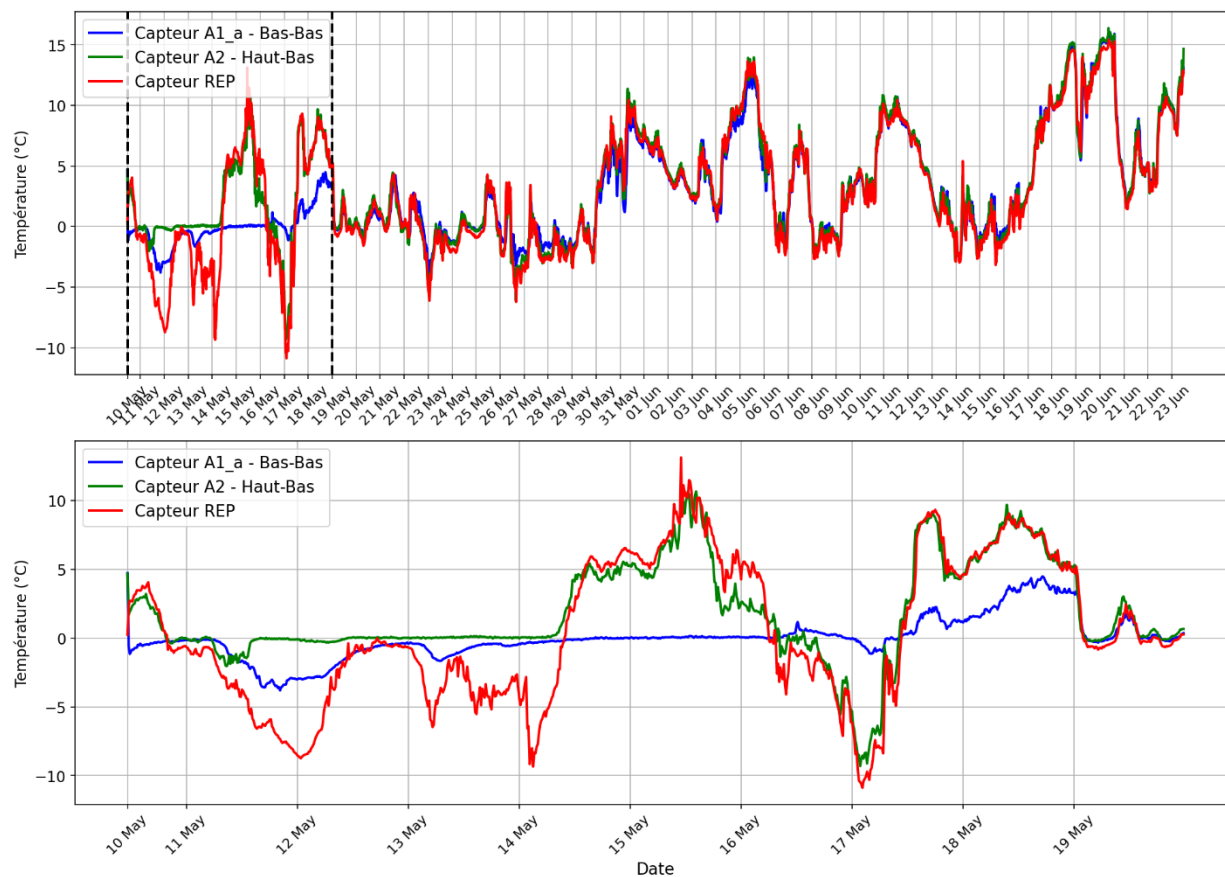
Les données d'humidité sont inverses à celles de température : lorsque la température augmente, l'humidité diminue. Les capteurs proches du couvert neigeux enregistrent des valeurs beaucoup plus stables et élevées que les REP. À SP1, A1\_a affiche une humidité de 100 % du 10 au 21 mai, malgré plus de 55 heures cumulées sous les 0 °C et sans nouvelles précipitations neigeuses. Sur cette période, son humidité minimale à 94.41 %, contre seulement 29.94 % pour le REP. La variance est également très contrastée : 1.01 (A1\_a) contre 440 (REP) (Figures 40 et 42).

Ces résultats confirment que les combes saturent leur environnement immédiat en humidité jusqu'à la fonte complète, créant une atmosphère quasi stable et humide. L'air ambiant sort de cette influence thermique au fur et à mesure que la sublimation cesse, suivant un gradient d'humidité. L'isolation thermique est ainsi totale jusqu'au 17 mai, et partielle jusqu'au 19 mai, et faible jusqu'au 6 juin, avant de disparaître (Figures 40 et 42). Les caméras montrent une fonte totale le 15 juin pour SP1 et le 12 juin pour SP2, bien que quelques combes subsistent au-delà du 22 juin.

Malgré leur proximité (1.6 km et 10 m d'écart d'altitude), les capteurs représentatifs des deux sites montrent une forte différence de température moyenne 2.9 °C à SP1 contre 8.0 °C à SP2, soit un écart de 5.1 °C. Cette différence s'explique en partie par la persistance plus longue de la neige à SP1, confirmée par les images issues des caméras installées sur les sites (Figure 38). En effet, le 9 juin, SP1 présente encore une couverture neigeuse importante, alors que SP2 est pratiquement déneigé dès le 8 juin. Entre le 13 mai et le 23 juin, SP2 enregistre 22 jours avec une température supérieure à 15 °C (dont 9 jours au-dessus de 20 °C), alors que SP1 ne dépasse les 15 °C qu'une seule journée (20 juin) (Figures 39 et 41). Ce contraste illustre l'effet refroidissement des combes sur les flux thermiques de surface, tel que discuté en section 2.2.5. L'humidité, en revanche, reste comparable entre les deux zones, avec des moyennes similaires (74.5 % à SP1 et 75.0 % à SP2).

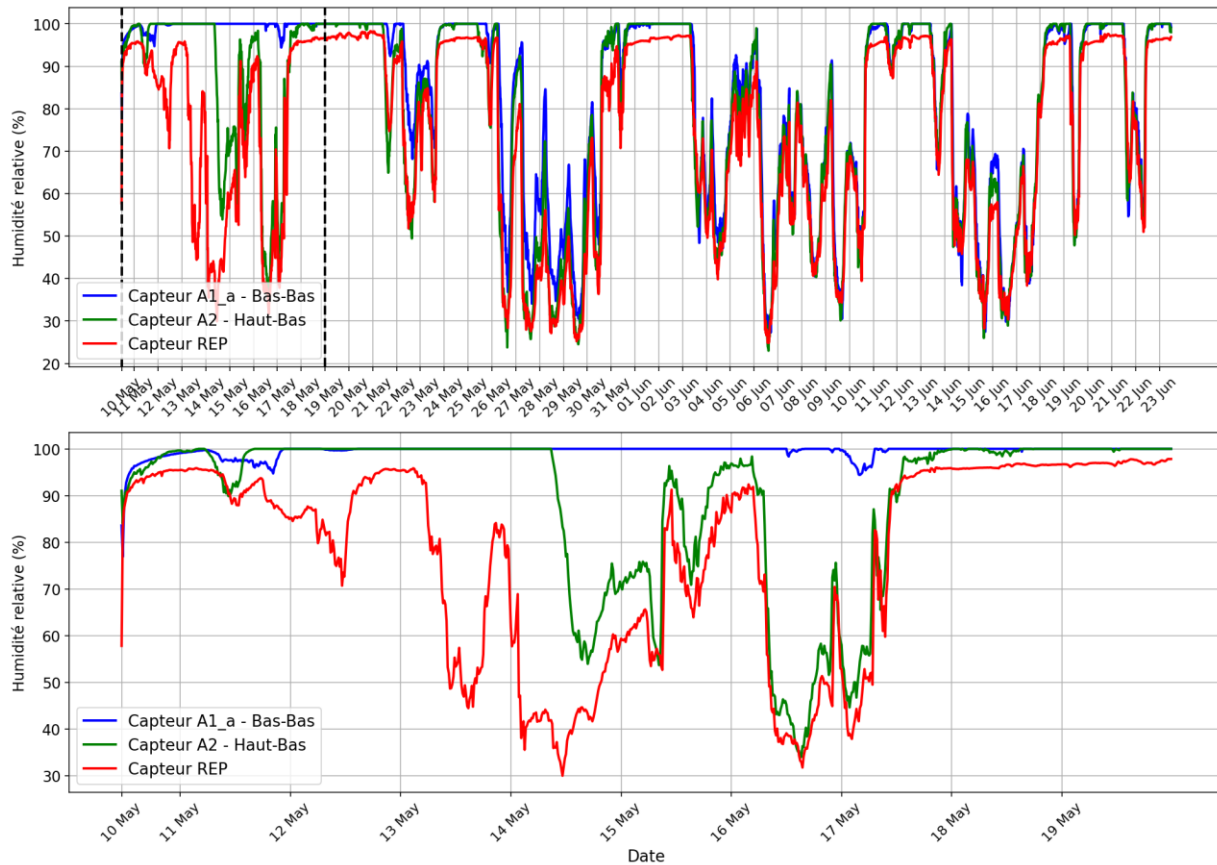


Figure 38. Différence d'enneigement entre la zone SP1 (en haut) et SP2 (en bas). On remarque un couvert nival encore important le 09/06 dans la zone SP1 alors qu'il est pratiquement nul dans la zone SP2 le 08/06.



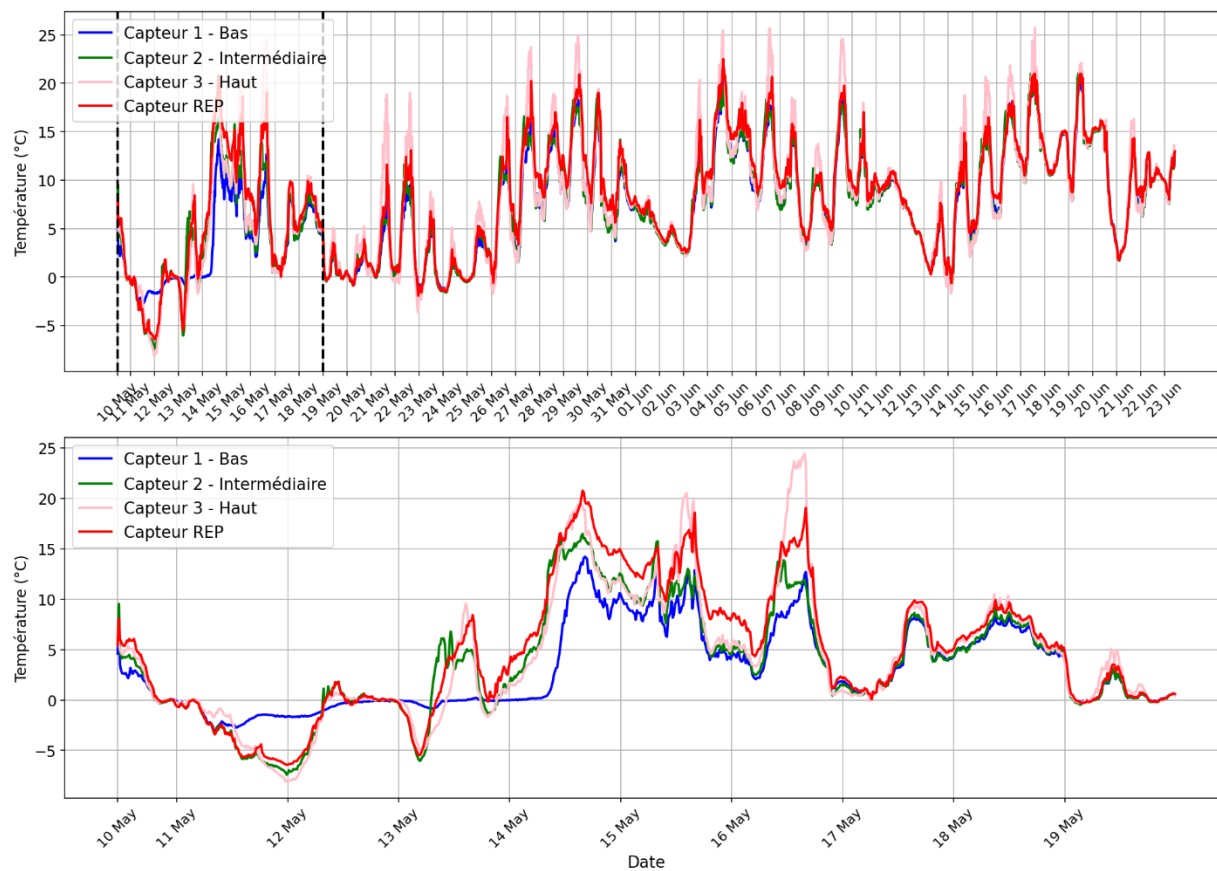
	Capteur A1 <sub>a</sub>	Capteur A1 <sub>b</sub>	Capteur A2	REF
Min	-10.09	-3.80	-9.31	-10.88
Max	11.17	4.48	10.66	13.13
Moyenne	0.58	-0.01	1.75	0.47
Moyenne > 0	4.84	1.07	3.19	5.52
Moyenne < 0	-3.30	-0.87	-1.42	-3.31
Écart-type	4.98	1.49	3.58	5.12
Variance	24.78	2.23	12.84	26.25

Figure 39. Graphiques et statistiques pour les températures de la zone SP1. Les statistiques correspondent à celles des dates du 2e graphiques.



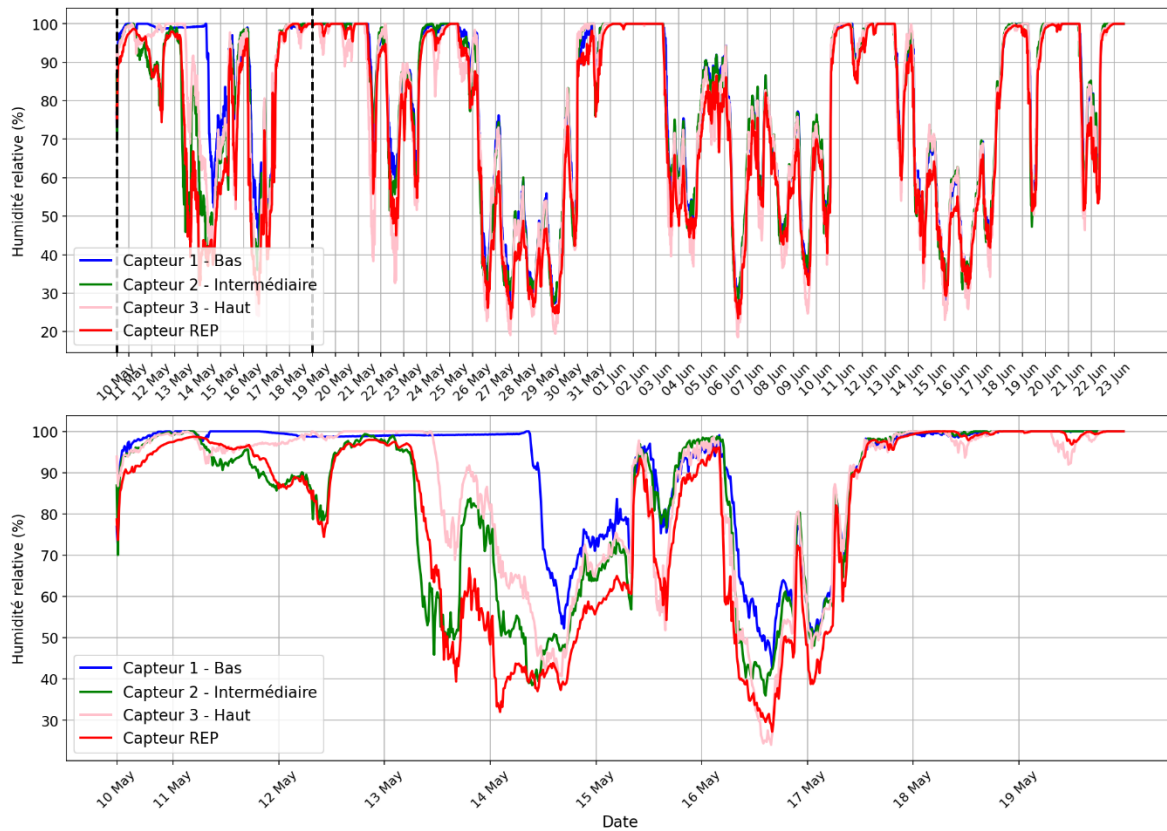
	Capteur A1 <sub>a</sub>	Capteur A1 <sub>b</sub>	Capteur A2	REF
Min	30.53	94.41	33.87	29.94
Max	100.00	100.00	100.00	97.90
Moyenne	81.86	99.59	89.88	78.26
Écart-type	20.89	1.00	17.08	20.98
Variance	436.31	1.01	291.80	440.02

Figure 40. Graphiques et statistiques pour les données d'humidité de la zone SP1. Les statistiques correspondent à celles des dates du 2<sup>e</sup> graphiques.



	Capteur A	Capteur B	Capteur C	REF
Min	-6.42	-3.03	-7.40	-8.09
Max	20.78	14.22	16.49	24.43
Moyenne	4.68	2.99	3.58	4.17
Moyenne > 0	6.93	4.84	5.72	6.33
Moyenne < 0	-2.71	-0.80	-2.76	-2.81
Écart-type	6.33	4.07	5.47	6.40
Variance	40.03	16.60	29.92	40.94

Figure 41. Graphiques et statistiques pour les températures de la zone SP2. Les statistiques correspondent à celles des dates du 2e graphiques.



	Capteur A	Capteur B	Capteur C	REF
Min	42.64	36.02	24.08	27.28
Max	100.00	100.00	100.00	100.00
Moyenne	91.24	83.47	85.86	79.69
Écart-type	14.38	19.39	19.08	22.77
Variance	206.85	375.89	363.98	518.31

Figure 42. Graphiques et statistiques pour les données d'humidité de la zone SP2. Les statistiques correspondent à celles des dates du 2e graphiques.

## CHAPITRE V

## DISCUSSION

L'analyse indépendante des paramètres morphoclimatiques réalisée dans cette étude confirme, pour la plupart, les théories scientifiques connues, avec cependant certaines nuances. Premièrement, l'importance des paramètres dans la préservation de la neige, tels que la pente, le NDVI et la géomorphologie est démontrée, en accord avec la littérature scientifique mondiale.

Les résultats concernant l'importance de la pente confirment les observations de Davesne (2015), selon lesquelles les combes à neige les plus persistantes de la région sont orientées entre le nord-est et le sud-est. L'hypothèse retenue est que les vents dominants en provenance de l'ouest, en hiver, balayent la neige des versants exposés et du plateau sommital, puis la redéposent sur les versants sous le vent orientés vers le sud-est. Nos résultats corroborent ainsi les travaux de Boucher et al. (2003) et de Davesne (2015) sur la répartition du pergélisol alpin au mont Jacques-Cartier. *'The snow swept away by the wind from the W slope of the mountain and the bare ground plateau is redeposited on the leeward SE slope where the wind slows down in the eddy zone. The convex-concave profile of the slope to the SE of the summit creates a topographic depression filled by several meters of drifting snow through the winter. The resulting niveo-aeolian snow mantle extends from the leeward side 74 of the summit ridge to the upper alpine forest limit. This long-lasting snow patch generally melts late in the summer but occasionally persists through the summer season (e.g. in 1977) following a particularly snowy winter as reported by Gray and Brown (1982).*

*Other major drifting snow deposits are present in the form of cornices on the high leeward edges of a small cirque on the SE slope.* (Davesne, 2015, p. 73-74)

La forte représentation des valeurs du NDVI (proche de 1 : Figures 28 et 29, Tableau 8) dans la distribution des combes sur les monts McGerrigle peut également s'expliquer par les conditions de vent décrites par Davesne (2015) et Boucher et al. (2003). Le transport nivéo-éolien déplace la neige vers les zones forestières (Figure 43), où elle est protégée du vent et de l'ablation, contrairement au mont Albert. Cette théorie s'accorde avec les observations de Baldwin (1956) sur l'influence des forêts dans la conservation des couverts nivaux. Toutefois, la dynamique de fonte nuance les rôles : les petites combes forestières disparaissent plus tôt que les grandes combes des hauts plateaux, en raison de leur basse altitude. Une fois cette première phase de fonte achevée, le NDVI ne reflète plus la persistance des combes, car seules subsistent celles situées sur un substrat rocheux dénudé.



Figure 43. Combes à neige en milieu forestier sur le flanc ouest du sommet Madeleine, dans les monts McGerrigle.

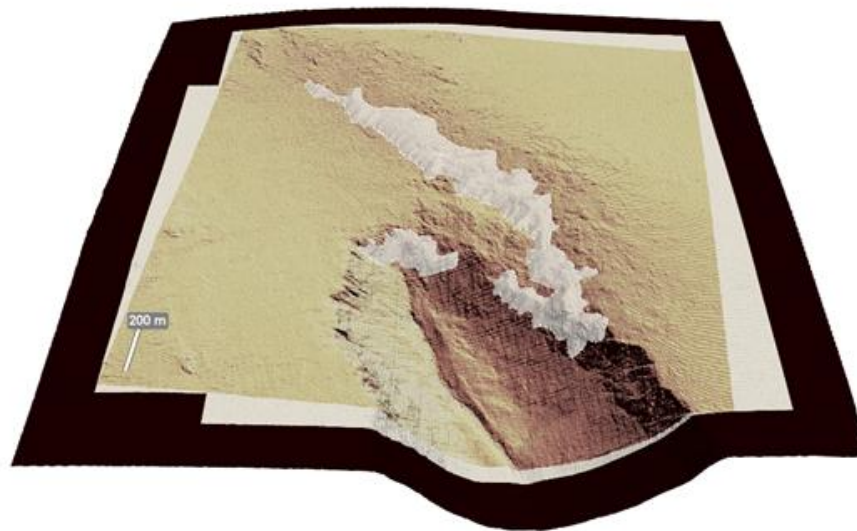
Quelques nuances sont cependant à faire pour l'influence de l'ombrage. Les résultats obtenus pour le mont Albert soulignent l'importance de l'échelle spatiale et du contexte topographique. Ici, les combes à neige sont plus exposées au soleil que l'ensemble du mont Albert, car ce résultat prend en compte les pentes du plateau. Sur une étude plus localisée, les combes à neige du mont Albert pourraient être moins exposées au soleil que le reste du plateau, ce qui n'a pas encore été prouvé. L'ombrage demeure l'un des facteurs les plus déterminants pour la pérennité de la neige en montagne, y compris pour les combes à neige, comme observé pour les monts McGerrigle. Ce résultat confirme les études de Boyle (2011) et d'Arie et al. (2025) qui soulignent que les combes à neige se concentrent souvent dans des vallées ombragées une grande partie de l'année, voire en permanence.

L'analyse des paramètres morphoclimatiques révèle également des différences marquées entre le mont Albert et les monts McGerrigle. Cette complexité confirme que les combes à neige en Gaspésie ne peuvent pas être réduites à un schéma unique, qu'il soit topographique, géologique ou climatique. Les conditions d'enneigement et de persistance de la neige varient spatialement, ce qui montre que l'étude d'un seul secteur ne suffit pas pour comprendre la dynamique régionale.

Un résultat majeur est que les combes les plus pérennes se situent sur le mont Albert, pourtant plus bas en altitude qu'une grande partie des monts McGerrigle. Trois combes en particulier, orientées à l'est et au sud-est, illustrent cette persistance : deux se trouvent sur des pentes relativement fortes, tandis que la troisième, la plus grande de la région, repose sur une pente douce ( $< 15^\circ$ ). Les images LiDAR montrent qu'elle se situe dans une dépression topographique d'origine probablement hydrique, qui favorise l'accumulation et la protection de la neige. Selon le modèle dynamique, son volume excédait  $500\,000\text{ m}^3$  le 8 juin 2021 (voir Figure 44), tandis que l'ensemble du mont Albert contenait plus de  $3\,000\,000\text{ m}^3$  de neige à la même date, en considérant une épaisseur maximale de 10 m dans les combes profondes.

Vent depuis 135°

Vue caméra : (20, 0, 15)



Hauteur max neige : 15.1 m

Volume neige : 591,318 m<sup>3</sup>

Figure 44. Modélisation de la grande combe du plateau du mont Albert le 8 juin 2021.

Sur les monts McGerrigle, les combes les plus persistantes sont également orientées à l'est et au sud-est, sur un substrat rocheux et principalement sur les sommets du mont Jacques-Cartier et du mont Dos de Baleine. Ces combes, parfois encore présentes en juillet et août lors d'hiver neigeux, se caractérisent par une exposition est, un substrat rocheux, un ombrage supérieur à celui de leur environnement adjacent, et une localisation en creux de pente ou dans des niches de nivation. Les premières combes à fondre sont au contraire celles exposées à l'ouest et en pente forte sur le mont Albert, ou celles situées en pente douce sur un substrat végétal du mont Jacques-Cartier à plus basse altitude. Une grande combe en pente forte du mont Albert présente par ailleurs des traces de gélifluxion, visibles sur les images satellites, phénomène déjà décrit par Davesne (2015) et Paquette (2018) (Figures 13 et 14). La taille et la longévité de cette

combe pourraient générer un apport en eau suffisant pour déclencher ce type de processus géomorphologique.

Le modèle multicritère permet de résumer les paramètres favorables à leur présence, de confirmer leur dépendance à ces facteurs, et de mettre en évidence la variabilité spatiale de leur distribution selon la géologie, la végétation et la morphologie des sites. Toutefois, ces résultats soulignent aussi les limites de ce type de modélisation : les paramètres essentiels à la formation des combes (température et précipitations neigeuses) expliquent la faible proportion de combes réellement présentes dans les zones identifiées comme favorables. Leur extension varie fortement selon les conditions annuelles : certaines années de fort enneigement, le plateau du mont Albert est encore largement recouvert de neige à la mi-juin (Figure 17). Le modèle ne peut donc pas être interprété comme une projection fixe, mais comme une approximation des conditions favorables.

Ces résultats démontrent que les combes à neige sont des formes prévisibles, dont la distribution peut être anticipée à partir de paramètres topo-climatiques (altitude, pente, orientation, ombrage, végétation, morphologie locale) (Campbell et al., 2025). Elles s'installent à moyen terme (à l'échelle pluriannuelle à décennale), jouent un rôle actif dans la mise en forme du relief (érosion, transport sédimentaire, gélifluxion, solifluxion) et modifient durablement les conditions microclimatiques et biogéochimiques des sols.

Les projections climatiques réalisées soulignent un avenir préoccupant pour les combes à neige du parc national de la Gaspésie si la région suit les trajectoires climatiques issues du CMIP6. À court terme, soit d'ici 2035, la diminution marquée du couvert nival semble déjà amorcée (Figure 35) en cohérence avec des observations récentes rapportées dans d'autres régions de moyenne latitude, notamment en Écosse (Cameron et Kish, 2025) et dans plusieurs massifs montagnards étudiés par Hoad et al. (2025), qui rapportent une régression rapide de la superficie des combes à neige et une

raréfaction des combes pérennes. Les résultats mettent également en lumière le rôle déterminant de la température dans la dynamique des autres paramètres climatiques. Dans le scénario SSP1-2.6, l'évolution des précipitations neigeuses suit une tendance globalement inverse à celle de la température, mais avec un décalage temporel. Alors que la hausse rapide des températures entre 2030 et 2050 précède une phase de stabilisation, les précipitations neigeuses diminuent d'abord faiblement entre 2030 et 2040, puis de façon plus marquée entre 2040 et 2060, suggérant une réponse différée du régime nival au réchauffement régional.

L'analyse thermique des combes à neige confirme leur rôle d'isolation thermique en limitant les variations de la température près du sol, et que cet effet s'atténue progressivement avec la fonte. La comparaison entre les secteurs SP1 et SP2 montre que, malgré des dynamiques similaires, la persistance plus longue des combes à neige à SP1 entraîne un refroidissement plus marqué, soulignant leur influence différée sur les flux thermiques de surface. L'analyse hygrométrique suggère également que le maintien d'un air saturé après la fonte visible du manteau neigeux résulte probablement d'un processus d'évaporation, renforçant l'idée que le découplage thermique est étroitement lié aux conditions d'humidité locale.

Ces observations soulignent l'importance des combes à neige dans la régulation microclimatique locale (Ménard et al., 2014 ; Mott et al., 2015), mais leur portée reste limitée par le faible nombre de sites étudiés, la durée restreinte de l'expérimentation et l'absence de données à différentes altitudes. Des mesures supplémentaires et des images d'une meilleure qualité sont nécessaires pour affiner ces interprétations et mieux relier la dynamique de fonte aux signaux thermiques et hygrométriques.

Pour compléter et affiner les résultats obtenus dans cette étude, de nombreuses améliorations sont nécessaires pour le modèle de projection climatique, le modèle de dynamique de fonte et les résultats de l'analyse de terrain.

Pour compléter et affiner les résultats obtenus lors de cette étude, de nombreuses améliorations sont nécessaires pour le modèle de projection climatique, le modèle dynamique de fonte et les résultats de l'analyse de terrain.

Premièrement, le modèle de projection climatique requiert une étendue de données plus large dans le temps afin d'améliorer la précision de la régression qui repose sur un algorithme *random forest*, lequel s'améliore avec le nombre de données disponibles. De plus, l'intégration de paramètres supplémentaires comme les précipitations liquides serait envisageable, celles-ci pouvant influencer significativement la fonte de la neige. La résolution spatiale grossière des données du CMIP6 et CEDA rend l'étude d'une zone précise difficile, comme pour un sommet ou une chaîne de sommets, et sont plus adaptées à des études régionales à nationales. Ensuite, l'intégration de plus de critères dans le modèle dynamique de fonte est envisageable, notamment les paramètres d'insolation, d'ombrage et de courbure qui, comme exposés au chapitre 4.4, influencent la persistance de la neige. Les écarts observés entre les résultats du modèle et la couverture nivale réelle (Figure 37) appuient ce constat. Il convient néanmoins de rappeler qu'un modèle reproduisant fidèlement la réalité demeure difficile à concevoir en raison de la variabilité interannuelle et aléatoire des vents et de la complexité des interactions entre les paramètres morphologiques et climatiques. Malgré ces limites, le modèle élaboré s'avère néanmoins satisfaisant. Il permet de visualiser la dynamique de fonte et d'obtenir une estimation des volumes de neige présents à différents stades de la saison, en fonction des hauteurs de neige initiales ajustables.

Enfin, des données de terrain à haute précision sont nécessaires pour comprendre en profondeur l'influence des combes à neige et leurs régimes thermiques. Les données de température du sol sous les combes pourraient renseigner sur la réactivité thermique et hygrométrique des sols face à la disparition des combes.

Les limites évoquées précédemment traduisent un manque probant de données climatiques et nivologiques sur les combes à neige au Québec et plus largement au

Canada, malgré leur rôle important dans les dynamiques bio-morpho-climatiques des environnements de montagne. L'approche adoptée ici, en croisant modélisation, analyse spatiale et données de terrain, vise donc moins à fournir une validation exhaustive qu'à ouvrir de nouvelles perspectives de recherche sur ces formes nivales complexes et encore peu documentées.

L'ensemble de ces résultats s'inscrit dans les tendances observées à l'échelle internationale. Les travaux récents au Japon, en Australie et au Royaume-Uni notamment, montrent en effet que la persistance des combes à neige dépend fortement de facteurs topographiques similaires à ceux mis en avant dans cette étude (dépressions, niches de nivation, ombrage, orientation favorable) ainsi que des processus d'accumulation nivéo-éolienne, comme décrit en Écosse (Boyle, 2013) et dans les Alpes japonaises pour les très petits glaciers (Arie et al., 2025). De même, la régression récente et rapide des combes pérennes rapportée en Écosse et dans les Alpes australes confirme la forte sensibilité de ces formes à l'augmentation des températures rapportée dans le chapitre 4.4 (Verrall et al., 2023; Cameron et Kish, 2025). Enfin, les changements rapides observés dans les communautés végétales des combes à neige en Australie et au Royaume-Uni (Pickering et al., 2014; Good et al., 2019) concordent avec les contrastes relevés ici entre combes forestières et combes de hauts plateaux, ce qui appuie l'idée que la dynamique de fonte influence directement l'évolution des habitats associés. Les combes à neige de la Gaspésie semblent ainsi relever des mêmes mécanismes généraux que ceux décrits ailleurs dans le monde, tout en reflétant des dynamiques propres aux conditions climatiques, géologiques et morphologiques de la région.

## CONCLUSION

L'étude des combes à neige dans le monde regroupe une grande variété de domaines scientifiques, et ce, avec plusieurs objectifs. La recension littéraire effectuée tout au long de l'introduction et du chapitre 1 montre la facette d'influences des combes à neige sur leur environnement dans les domaines de la géomorphologie, de la climatologie, de la biologie et de la cryologie. L'étude de ces influences a évolué dans le temps, passant d'un intérêt fort pour les impacts géomorphologiques comme l'érosion et le transport sédimentaire associé aux combes à neige et à leur fonte, à un fort intérêt dans l'étude des populations végétales associées aux conditions créées par ces dernières. Ceci peut s'expliquer par les effets visibles et documentés du réchauffement climatique, particulièrement visibles en milieu alpin, qui menace à court et moyen termes la pérennité des combes à neige et leurs communautés végétales spécifiques. Ce constat, appuyé par plusieurs études en climatologie, semble entraîner depuis le XXI<sup>e</sup> siècle un regain d'intérêt pour ces formes. Malgré cela les études sur le régime thermique, la distribution et l'origine sont moins nombreuses et le sujet semble encore aujourd'hui mal compris, avec notamment l'absence d'étude mettant en lumière l'origine potentielle de ces formes.

Dans sa première partie, cette recherche met en avant les paramètres qui favorisent la présence de combes à neige dans le monde, et les principaux impacts de celles-ci sur leur environnement. Cette partie évoque également la fragilité de ces formes nivales face au réchauffement climatique et pose la question de leur devenir, notamment en Gaspésie. Pour répondre à ce dernier état, un modèle de projection des couverts nivaux basé sur la projection de différentes variables climatiques a mis en avant la réactivité des combes à neige face à la hausse des températures à venir. Pour chacun des trois

scénarios climatiques étudiés, le modèle prévoit une disparition complète du couvert nival à la fin mai, et par conséquent, des combes à neige. Cette disparition pourrait survenir dès 2035 avec le scénario pessimiste de réchauffement et vers les années 2060 avec le scénario optimiste, évoquant une stabilisation des températures et une diminution des émissions de gaz à effet de serre. En complément à cette étude climatique, l'albédo des sites avec des combes à neige a été évalué depuis des images satellites. Cette analyse a mis en évidence le rôle des combes à neige dans l'albédo à l'échelle locale et régionale et par conséquent, le rôle potentiel de combes sur la température atmosphérique de la région, la réflexion des rayons solaires pouvant impacter le climat à toutes les échelles. Un pic de différence a été mesuré entre un site avec et sans combes à neige pour une même date, ayant respectivement une valeur de 0.21 (albédo sans combe) et 0.30 (albédo avec combes), soit une augmentation de l'albédo de 42.8 % pour le site avec combes à neige. Cependant, davantage d'études sont nécessaires pour mieux comprendre l'effet des combes à neige et d'autres couverts nivaux hétérogènes sur l'albédo.

Pour mieux comprendre la répartition et la pérennité des combes à neige en Gaspésie, une analyse de plusieurs paramètres contrôlant la distribution de la neige a été réalisée, d'abord en étudiant chaque paramètre indépendamment, puis en les associant dans une analyse multicritère. Cette étude a mis en lumière le rôle majeur de la pente dans la formation des combes à neige. Ce critère a été classé en trois catégories (combes en pente faible, moyenne et forte). Par la suite, chaque catégorie a été utilisée pour comparer les résultats des analyses des autres paramètres, démontrant que la variation de ces paramètres est fortement reliée à la pente. L'analyse des paramètres ombrage/insolation et orientation du terrain démontre sans surprise que les combes à neige se concentrent sur les terrains bénéficiant d'un fort ombrage et d'une faible insolation, et sur les pentes orientées sous le vent, avec de fortes accumulations nivales. L'analyse des formes géomorphologiques démontre quant à elle que les combes à neige de la région occupent en grande partie des pentes (correspondant aux flancs des

sommets), puis dans une moindre mesure des niches de nivation (*hollows*) et les bas de vallées. Enfin, l'analyse du NDVI suppose que la présence de végétation joue un rôle important dans la formation des combes à neige, essentiellement dans les monts McGerrigle, où une grande partie des combes à neige niche dans des zones végétalisées (forêts et prairies alpines). L'hypothèse postulée ici est que la végétation permettrait de fixer plus facilement la neige qu'un sol nu, facilitant son accumulation. Plus d'études sont nécessaires pour comprendre le rôle de la végétation et son importance dans la formation des combes à neige. L'analyse multicritère réalisée après ces analyses propose différentes explications suivant le terrain concerné. Au mont Albert, le paramètre contrôlant le plus la présence des combes à neige est l'élévation, suivie de l'ombrage et des formes géomorphologiques. Dans les monts McGerrigle, le paramètre contrôlant le plus la présence des combes à neige est également l'élévation, suivie du NDVI et de la courbure du terrain. Les figures 32 et 33 représentent les zones préférentielles pour les combes à neige. Les Tableaux 3 et 12 résument les résultats pour chaque paramètre analysé en fonction de leur importance.

En complément à ces analyses, un modèle 3D et dynamique pour représenter la forme des combes à neige et leur fonte a été développé. Il indique le volume de neige à chaque fraction de pente et prend en compte les effets du vent et de la pente lors de la fonte. Ce modèle a pour but d'être intégré à de futures études demandant une surveillance et une modélisation des couverts nivaux (études hydrologiques, climatiques, météorologiques, géomorphologiques), le modèle pouvant s'intégrer sur tous les terrains.

Cette étude montre que les combes à neige jouent un rôle significatif d'isolation thermique et hygrométrique du sol. Elles permettent de maintenir des températures plus stables et un air saturé d'humidité plus longtemps que dans les zones de référence, prolongeant ainsi l'influence de la neige après sa disparition physique. Ces résultats mettent en évidence l'importance des combes à neige dans la régulation

microclimatique locale et constituent une première étape vers une meilleure compréhension de leurs effets sur les dynamiques thermiques et hydriques de surface.

De nombreux aspects des combes à neige restent encore à explorer, notamment ceux de leur transition avec d'autres formes comme les glacierettes, et les implications géomorphologiques qui en dépendent, mais aussi celui de l'influence des combes à neige sur les régimes hydriques des régions qui les abritent. Davantage de recherches sont nécessaires pour approfondir ces sujets et mieux comprendre l'influence et la portée des combes à neige en milieu alpin. L'approfondissement des connaissances ainsi que la mise en place d'une surveillance systématique de la dynamique des combes constituent des éléments essentiels pour s'assurer de la conservation et de la gestion de ces microrefuges climatiques dans un contexte de réchauffement climatique accéléré.

## ANNEXE A

### SCRIPT DE L'ANALYSE MULTICRITÈRE DE LA DISTRIBUTION SPATIALE DES COMBES À NEIGE

```
import numpy as np
import rasterio
from rasterio.warp import calculate_default_transform, reproject, Resampling
from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.metrics import classification_report
from imblearn.over_sampling import SMOTE
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

# Function to load raster data
def load_raster(file_path):
    with rasterio.open(file_path) as src:
        return src.read(1), src.profile

# Function to reproject and clip a raster to match the dimensions of a reference raster
def reproject_and_clip_raster(input_path, output_path, reference_path, target_crs):
    with rasterio.open(reference_path) as reference:
        reference_transform = reference.transform
        reference_width = reference.width
        reference_height = reference.height
        reference_crs = reference.crs
        reference_bounds = reference.bounds

    with rasterio.open(input_path) as src:
        transform, width, height = calculate_default_transform(
            src.crs, target_crs, src.width, src.height, *reference_bounds, resolution=reference_transform[0]
        )
        kwargs = src.meta.copy()
        kwargs.update({
            'crs': target_crs,
```

```

        'transform': transform,
        'width': reference_width,
        'height': reference_height,
        'nodata': src.nodata
    })

with rasterio.open(output_path, 'w', **kwargs) as dst:
    for i in range(1, src.count + 1):
        reproject(
            source=rasterio.band(src, i),
            destination=rasterio.band(dst, i),
            src_transform=src.transform,
            src_crs=src.crs,
            dst_transform=transform,
            dst_crs=target_crs,
            resampling=Resampling.nearest
        )

# Paths to your input rasters
input_raster_paths = [
    'C:/Users/ck291981/Desktop/RFg/elevation.tif',
    'C:/Users/ck291981/Desktop/RFg/slope.tif',
    'C:/Users/ck291981/Desktop/RFg/aspect.tif',
    'C:/Users/ck291981/Desktop/RFg/hillshade.tif',
    'C:/Users/ck291981/Desktop/RFg/geomorphon.tif',
    'C:/Users/ck291981/Desktop/RFg/curvature.tif',
    'C:/Users/ck291981/Desktop/RFg/NDVI.tif',
    'C:/Users/ck291981/Desktop/RFg/raster_SP.tif'
]

# Paths to your output rasters
output_raster_paths = [
    'C:/Users/ck291981/Desktop/RFg/reprojected_elevation.tif',
    'C:/Users/ck291981/Desktop/RFg/reprojected_slope.tif',
    'C:/Users/ck291981/Desktop/RFg/reprojected_aspect.tif',
    'C:/Users/ck291981/Desktop/RFg/reprojected_hillshade.tif',
    'C:/Users/ck291981/Desktop/RFg/reprojected_geomorphon.tif',
    'C:/Users/ck291981/Desktop/RFg/reprojected_curvature.tif',
    'C:/Users/ck291981/Desktop/RFg/reprojected_NDVI.tif',
    'C:/Users/ck291981/Desktop/RFg/reprojected_raster_SP.tif'
]

# Target CRS (WGS_1984_UTM_Zone_20N)
target_crs = 'EPSG:32620'

# Use the snowpatch raster as the reference for spatial extent and resolution
reference_raster_path = 'C:/Users/ck291981/Desktop/RFg/raster_SP.tif'

# Reproject and clip all input rasters to match the snowpatch raster dimensions
for input_path, output_path in zip(input_raster_paths, output_raster_paths):
    reproject_and_clip_raster(input_path, output_path, reference_raster_path, target_crs)

```

```

# Load your 7 layers
layer1, _ = load_raster(output_raster_paths[0])
layer2, _ = load_raster(output_raster_paths[1])
layer3, _ = load_raster(output_raster_paths[2])
layer4, _ = load_raster(output_raster_paths[3])
layer5, _ = load_raster(output_raster_paths[4])
layer6, _ = load_raster(output_raster_paths[5])
layer7, _ = load_raster(output_raster_paths[6])

# Stack the layers into a single 3D array
X = np.stack((layer1, layer2, layer3, layer4, layer5, layer6, layer7), axis=-1)

# Load your target variable (snow patches)
y, _ = load_raster(output_raster_paths[7])

# Flatten the arrays for input into the Random Forest model
X_flat = X.reshape(-1, X.shape[-1])
y_flat = y.flatten()

# Verify the presence of both classes in the target variable
unique_classes = np.unique(y_flat)
print("Unique classes in y_flat before splitting:", unique_classes)

# Split the data into training and testing sets
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X_flat, y_flat, test_size=0.2, random_state=42)

# Verify the presence of both classes in the training and testing sets
print("Unique classes in y_train:", np.unique(y_train))
print("Unique classes in y_test:", np.unique(y_test))

# Apply SMOTE to the training data with adjusted parameters
smote = SMOTE(sampling_strategy={0: 40000, 1: 40000}, k_neighbors=3, random_state=100)
X_train_resampled, y_train_resampled = smote.fit_resample(X_train, y_train)

# Verify the presence of both classes after resampling
unique_classes_resampled = np.unique(y_train_resampled)
print("Unique classes in y_train_resampled:", unique_classes_resampled)

# Train the Random Forest model with the resampled data
RFms = RandomForestClassifier(n_estimators=40000, random_state=100)
RFms.fit(X_train_resampled, y_train_resampled)

# Predict and evaluate
y_pred = RFms.predict(X_test)
print(classification_report(y_test, y_pred))

# Determine feature importances
importances = RFms.feature_importances_
feature_names = ['elevation', 'slope', 'aspect', 'hillshade', 'geomorphon', 'curvature', 'NDVI']

```

```
# Create a DataFrame for better visualization
feature_importances = pd.DataFrame({'Feature': feature_names, 'Importance': importances})
feature_importances = feature_importances.sort_values(by='Importance', ascending=False)

print(feature_importances)

# Visualize feature importances
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.barh(feature_importances['Feature'], feature_importances['Importance'])
plt.xlabel('Importance')
plt.ylabel('Feature')
plt.title('Feature Importances')
plt.gca().invert_yaxis()
plt.show()
```

## ANNEXE B

### SCRIPT DE L'ÉVALUATION DE L'ALBÉDO SUR GEE

```
var startDate = '2020-08-20';
var endDate = '2020-08-30';

var s2Collection = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR')
  .filterBounds(roi)
  .filterDate(startDate, endDate)
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 20)) // Filtrer pour les images peu nuageuses
  .map(function(image) {
    // Diviser les valeurs des bandes par 10000 pour normaliser
    return image.divide(10000).copyProperties(image, image.propertyNames());
  });

function calculateAlbedo(image) {
  // Moyenne pondérée des bandes pour estimer l'albedo (approximation)
  var albedo = image.select(['B2', 'B3', 'B4', 'B8']) // Bleu, Vert, Rouge, NIR
    .reduce(ee.Reducer.mean()) // Moyenne des bandes
    .rename('albedo');
  return image.addBands(albedo); // Ajouter la bande d'albedo à l'image
}

var s2WithAlbedo = s2Collection.map(calculateAlbedo);

var meanAlbedo = s2WithAlbedo.select('albedo').mean();

var meanRGB = s2Collection.select(['B4', 'B3', 'B2']).mean();

var rgbVis = {
  min: 0.0,
  max: 0.3,
  bands: ['B4', 'B3', 'B2'], // Rouge, Vert, Bleu
};
```

```
var albedoVis = {  
  min: 0,  
  max: 0.3,  
  palette: ['blue', 'white', 'green']  
};  
  
Map.centerObject(roi, 10);  
Map.addLayer(meanRGB, rgbVis, 'Image RGB moyenne');  
Map.addLayer(meanAlbedo, albedoVis, 'Albedo moyen');  
  
Export.image.toDrive({  
  image: meanAlbedo.clip(roi),  
  description: 'Albedo_2020-08-25',  
  region: roi,  
  scale: 10,  
  crs: 'EPSG:32198',  
  maxPixels: 1e13  
});
```

## ANNEXE C

## SCRIPT DU MODÈLE DE PROJECTION DU COUVERT NIVAL

```

import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.path_effects import withStroke

# GAM avec statsmodels
from statsmodels.gam.api import GLMGam, BSplines
import statsmodels.api as sm

chemin_fichier = "C:/Users/ck291981/Desktop/recherche2/modele_climatique_vrac/datas_finales/snowcover_prediction_s_SSP5.xlsx"
donnees = pd.read_excel(chemin_fichier)

print(donnees.head())

effets_contour = [withStroke(linewidth=0.2, foreground="black")]

# variables
annees = donnees['year']
neige = donnees['snowcover']
temperature = donnees['tpt']
precip_neige = donnees['prsn']
jours_chauds = donnees['hotdays']

if np.issubdtype(annees.dtype, np.datetime64):
    annees = pd.to_datetime(annees).dt.year

annees = annees.values
neige = neige.values

# GAM
X = annees.reshape(-1, 1)
splines = BSplines(X, df=[12], degree=[3])

gam = GLMGam(
    neige,

```

```

    exog=np.ones(len(X)), # intercept
    smoother=splines,
    family=sm.families.Gaussian()
).fit()

# prédictions sur grille fine
annee_min = int(annees.min())
annee_max = int(annees.max())

grille_x = np.linspace(annee_min, annee_max, 1000).reshape(-1, 1)
prediction = gam.predict(exog=np.ones(len(grille_x)), exog_smooth=grille_x)

# Intervalle de confiance avec get_prediction()
niveau_confiance = 0.90 # 80%, 90%, 95%, 99%
alpha = 1 - niveau_confiance

pred = gam.get_prediction(exog=np.ones(len(grille_x)), exog_smooth=grille_x)
ic = pred.conf_int(alpha=alpha)
borne_inf = ic[:,0]
borne_sup = ic[:,1]

# GAM coupe y=0
annee_croisement = None
index_croisement = None

for i in range(len(grille_x) - 1):
    if prediction[i] >= 0 and prediction[i + 1] < 0:
        x0, x1 = grille_x[i][0], grille_x[i + 1][0]
        y0, y1 = prediction[i], prediction[i + 1]

        if y1 != y0:
            t = -y0 / (y1 - y0)
            annee_c = x0 + t * (x1 - x0)
        else:
            annee_c = x0

        if annee_min <= annee_c <= annee_max:
            annee_croisement = float(annee_c)
            index_croisement = i
            break

# incertitude
tampon = 5

if annee_croisement is not None:
    zone_debut = max(annee_croisement - tampon, annee_min)
    zone_fin = min(annee_croisement + tampon, annee_max)
else:
    zone_debut = zone_fin = None

# graph

```

```

fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(12, 7))

# data obs
ax1.set_xlabel('Années')
ax1.set_ylabel('Superficie enneigée (km²)', color='turquoise',
              fontsize=15, path_effects=effets_contour)
ax1.plot(annees, neige, color='turquoise', label="Superficie enneigée",
        marker='o', linewidth=3)

# courbe GAM
ax1.plot(grille_x, prediction, color='darkblue', linestyle='--', linewidth=2,
        label='Ajustement GAM')

# portion après croisement GAM
if annee_croisement is not None:
    ax1.plot(
        grille_x[index_croisement:],
        prediction[index_croisement:],
        color='purple', linestyle='-', linewidth=3,
        label='Segment GAM après croisement y=0'
    )

# intervalle de confiance
ax1.fill_between(
    grille_x.flatten(), borne_inf, borne_sup,
    color='blue', alpha=0.10,
    label=f'Intervalle de confiance {int(niveau_confiance*100)}%'
)

# y=0 horizontale
ax1.axhline(0, color='red', linestyle='-', linewidth=1.5, label='y = 0')

# croisement GAM
if annee_croisement is not None:
    ax1.axvline(
        annee_croisement, color='green', linestyle='-',
        linewidth=2
    )

    ax1.text(
        annee_croisement + 0.5,
        max(prediction),
        f'{annee_croisement:.2f}',
        color='green',
        fontsize=12,
        rotation=90,
        va='top',
        ha='left',
        path_effects=effets_contour
    )

```

```

# tampon
if zone_debut is not None:
    ax1.axvspan(zone_debut, zone_fin, color='gray', alpha=0.25,
               label=f"Zone d'incertitude  $\pm$ {tampon} ans")

# verticale man
annee_manuelle = 2060
ax1.axvline(
    annee_manuelle, color='green', linestyle=':',
    linewidth=2, label=f"Droite manuelle : {annee_manuelle}"
)

# txt vert man
ax1.text(
    annee_manuelle + 0.5,
    max(prediction),
    f" {annee_manuelle}",
    color='green',
    fontsize=12,
    rotation=90,
    va='top',
    ha='left',
    path_effects=effets_contour
)

# tampon 2
ax1.axvspan(annee_manuelle - tampon, annee_manuelle + tampon,
           color='grey', alpha=0.2)

# var sup
ax2 = ax1.twinx()
ax2.set_ylabel("Température (°C)", color='red', fontsize=13,
              path_effects=effets_contour)
ax2.plot(annees, temperature, color='red', marker='s', linewidth=1)
ax2.tick_params(axis='y', labelcolor='red')

ax3 = ax1.twinx()
ax3.spines['right'].set_position(('outward', 60))
ax3.set_ylabel("Précipitations neigeuses (mm)", color='blue', fontsize=13,
              path_effects=effets_contour)
ax3.plot(annees, precip_neige, color='blue', marker='^', linewidth=1)
ax3.tick_params(axis='y', labelcolor='blue')

ax4 = ax1.twinx()
ax4.spines['right'].set_position(('outward', 120))
ax4.set_ylabel("Jours chauds cumulés", color='green', fontsize=13,
              path_effects=effets_contour)
ax4.plot(annees, jours_chauds, color='green', marker='x', linewidth=1)
ax4.tick_params(axis='y', labelcolor='green')

```

```
# legende
fig.tight_layout()
fig.legend(
    loc="lower center",
    bbox_to_anchor=(0.5, -0.15),
    ncol=3,
    fontsize=14
)

plt.show()

print(gam.summary())
```

## ANNEXE D

### SCRIPT DU MODÈLE DE FONTE - CODE

```
import numpy as np
import geopandas as gpd
import rasterio
from rasterio.enums import Resampling
from matplotlib.colors import LightSource
from shapely.geometry import mapping, box
from scipy.ndimage import distance_transform_edt, gaussian_filter
import pyvista as pv
import os
from rasterio.features import geometry_mask
from rasterio.transform import Affine
from rasterio.warp import reproject
from shapely.geometry import box, Polygon, MultiPolygon
from shapely.errors import TopologicalError

# choix mode de visualisation
mode = input("Choisir le mode de rendu (1 pour enregistrer les images, 2 pour visualisation PyVista): ")
while mode not in ['1', '2']:
    print("Mode invalide. Choisir 1 ou 2.")
    mode = input("Choisir le mode de rendu (1 pour enregistrer les images, 2 pour visualisation PyVista): ")
")

# paramètres d'entrée
shapefile_path = 'chemin d'accès shapefiles combes'
raster_path = 'chemin d'accès raster'
out_dir = 'chemin d'accès pour enregistrement résultats'
max_snow_height = 15.0
view_vector = (5, 1, 2)
ground_color = 'saddlebrown'
snow_color = 'white'
fractions = [0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1]
fps = 0.5
vertical_weight = 0.6
```

```

horizontal_weight = 0.6
compression_factor = 1

assert abs(vertical_weight + horizontal_weight - 1.0) < 1e-6
os.makedirs(out_dir, exist_ok=True)

# 1-Charger + réparer shapefile
gdf = gpd.read_file(shapefile_path)

# réparation géométries invalides
def make_valid_safe(geom):
    try:
        if not geom.is_valid:
            geom = geom.buffer(0)
        if isinstance(geom, (Polygon, MultiPolygon)):
            return geom
    except TopologicalError:
        return None
    return geom if geom.is_valid else None

gdf["geometry"] = gdf["geometry"].apply(make_valid_safe)
gdf = gdf[~gdf["geometry"].isna() & ~gdf["geometry"].is_empty]

# lecture raster pour récupérer paramètres
with rasterio.open(raster_path) as src:
    lidar = src.read(1)
    transform = src.transform
    res_x, res_y = src.res
    nodata = src.nodata
    bounds_raster = box(*src.bounds)

# clip sécu : conserve géométries qui touchent/chevauchent raster
gdf_clipped = gpd.clip(gdf, bounds_raster)

# validation après clip
gdf_clipped["geometry"] = gdf_clipped["geometry"].apply(make_valid_safe)
gdf = gdf_clipped[~gdf_clipped["geometry"].isna() & ~gdf_clipped["geometry"].is_empty]

if gdf.empty:
    raise ValueError("Aucune géométrie valide n'intersecte le raster. Vérifier raster")

# union toutes géométries en un polygone (pour traitement ultérieur)
poly = gdf.geometry.unary_union

# 2-Générer et compresser hillshade à partir du DEM
ls = LightSource(azdeg=315, altdeg=45)
hillshade_fullres = ls.hillshade(lidar, vert_exag=1, dx=res_x, dy=res_y)

# compression (resampling)
new_width = int(hillshade_fullres.shape[1] * compression_factor)
new_height = int(hillshade_fullres.shape[0] * compression_factor)

```

```

hillshade_resampled = np.empty((new_height, new_width), dtype=np.float32)

scale_x = hillshade_fullres.shape[1] / new_width
scale_y = hillshade_fullres.shape[0] / new_height
transform_hs = transform * Affine.scale(scale_x, scale_y)

reproject(
    source=hillshade_fullres,
    destination=hillshade_resampled,
    src_transform=transform,
    src_crs=src.crs,
    dst_transform=transform_hs,
    dst_crs=src.crs,
    resampling=Resampling.bilinear
)

nodata_hs = -9999
res_x_hs, res_y_hs = res_x / compression_factor, res_y / compression_factor

# 3-Préparation cloud Hillshade
rows_hs, cols_hs = np.where(hillshade_resampled != nodata_hs)
if len(rows_hs) == 0:
    raise ValueError("Aucun pixel valide dans le hillshade compressé. Essaie un facteur de compression plus grand.")

xs_hs, ys_hs = rasterio.transform.xy(transform_hs, rows_hs, cols_hs)
xs_hs, ys_hs = np.array(xs_hs), np.array(ys_hs)

rows_idx = np.clip(((ys_hs - transform[5]) / transform[4]).astype(int), 0, lidar.shape[0] - 1)
cols_idx = np.clip(((xs_hs - transform[2]) / transform[0]).astype(int), 0, lidar.shape[1] - 1)
zs_hs = lidar[rows_idx, cols_idx]

minx, miny, maxx, maxy = poly.bounds
buffer = 50
bbox = box(minx - buffer, miny - buffer, maxx + buffer, maxy + buffer)

inside_bbox = (
    (xs_hs >= bbox.bounds[0]) & (xs_hs <= bbox.bounds[2]) &
    (ys_hs >= bbox.bounds[1]) & (ys_hs <= bbox.bounds[3])
)

xs_hs = xs_hs[inside_bbox]
ys_hs = ys_hs[inside_bbox]
rows_idx = rows_idx[inside_bbox]
cols_idx = cols_idx[inside_bbox]
zs_hs = zs_hs[inside_bbox]
intensity_vals = hillshade_resampled[rows_hs, cols_hs][inside_bbox]

cloud_hs = pv.PolyData(np.c_[xs_hs, ys_hs, zs_hs])
surf_hs = cloud_hs.delaunay_2d(alpha=np.hypot(res_x_hs, res_y_hs) * 15)

```

```

surf_hs["intensity"] = intensity_vals

# 4-Calcul D_max
mask0 = geometry_mask([mapping(poly)], invert=True, transform=transform, out_shape=lidar.shape)
dist_pix = distance_transform_edt(mask0)
D_max = np.nanmax(dist_pix) * res_x

# 5-Sol fixe
mask_bool0 = mask0 & (lidar != nodata)
rows0, cols0 = np.where(mask_bool0)
xs0, ys0 = rasterio.transform.xy(transform, rows0, cols0)
zs0 = lidar[rows0, cols0]
cloud_ground = pv.PolyData(np.c_[xs0, ys0, zs0])
surf_ground = cloud_ground.delaunay_2d(alpha=np.hypot(res_x, res_y) * 1.5)

# 6-Fonte neige
# paramètres globaux : direction du vent
wind_dir_deg = 270 # 0=N, 90=E, 180=S, 270=O
wind_rad = np.deg2rad(wind_dir_deg)
wind_vector = np.array([np.cos(wind_rad), np.sin(wind_rad)]) # Unité : vecteur horizontal

for frac in fractions:
    print(f"\n Fonte pour fraction = {frac:.2f}")

    # calcul poids horizontaux et verticaux
    frac_h = frac * horizontal_weight
    frac_v = frac * vertical_weight

    # distance d'érosion pour simuler retrait
    d = frac_h * D_max

    try:
        # érosion polygone (retrait progressif)
        poly_eroded = poly.buffer(-d)
    except Exception as e:
        print(f"Échec buffer à frac={frac:.2f}: {e}")
        continue

    if poly_eroded.is_empty or not poly_eroded.is_valid:
        print(f"Polygone érodé vide/invalidé à frac={frac:.2f}")
        continue

    # création du mask raster pour zone érodée
    mask_e = geometry_mask(
        [mapping(poly_eroded)],
        invert=True,
        transform=transform,
        out_shape=lidar.shape
    )

    # mask final : zone valide + sans nodata

```

```

mask_bool = mask_e & (lidar != nodata)
rows, cols = np.where(mask_bool)
if rows.size == 0:
    print("Aucun pixel valide trouvé dans la zone érodée")
    continue

# coordonnées XY et Z depuis lidar
xs, ys = rasterio.transform.xy(transform, rows, cols)
zs_ground = lidar[rows, cols]

# distance au bord pour moduler fonte
dist_e = distance_transform_edt(mask_e)
D_max_e = np.nanmax(dist_e) * res_x
norm_d = dist_e[rows, cols] * res_x / D_max_e

# loi de fonte par décroissance exponentielle
decay = 1 - np.exp(-2 * norm_d)
snow_h = max_snow_height * decay * (1 - frac_v)

# calcul pente pour moduler hauteur de neige
lidar_smoothed = gaussian_filter(lidar, sigma=1)
grad_y, grad_x = np.gradient(lidar_smoothed, res_y, res_x)
slope = np.sqrt(grad_x**2 + grad_y**2)
slope_percent = slope * 100
slope_factor = np.exp(-0.05 * slope_percent[rows, cols])

# appliquer facteur pente à snow_h si voulu
# snow_h *= slope_factor

# initialisation des coordonnées ajustées (pour vent)
adjusted_xs, adjusted_ys = np.array(xs), np.array(ys)

if frac > 0:
    # déplacement selon vent (pour visualisation redistribution)
    center_x, center_y = np.mean(xs), np.mean(ys)
    rel_coords = np.stack([xs - center_x, ys - center_y], axis=1)
    wind_proj = np.dot(rel_coords, wind_vector)

    # facteur vent : déplacement plus fort côté sous le vent
    wind_factor = 1 + 3 * (wind_proj - wind_proj.min()) / (np.ptp(wind_proj) + 1e-6)
    wind_factor = wind_factor / np.mean(wind_factor) # Conserve le volume total

    snow_h *= wind_factor

    adjusted_xs += wind_vector[0] * wind_factor * 10
    adjusted_ys += wind_vector[1] * wind_factor * 10

# création nuage de points neige et surface
cloud_snow = pv.PolyData(np.c_[adjusted_xs, adjusted_ys, zs_ground + snow_h])
surf_snow = cloud_snow.delaunay_2d(alpha=np.hypot(res_x, res_y) * 5)

```

```

    # Affichage
if mode == '1':
    plotter = pv.Plotter(off_screen=True)
else:
    plotter = pv.Plotter()

plotter.add_mesh(surf_hs, scalars='intensity', cmap='pink', opacity=1, show_scalar_bar=False)

plotter.add_mesh(surf_ground, color=ground_color, opacity=0.9, show_edges=False)
plotter.add_mesh(surf_snow, color=snow_color, opacity=1, show_edges=False)

plotter.camera.zoom(1) # zoom (ajustable)

scale_len = 200 # Longueur de la barre (ajustable)

x_min, x_max = np.min(xs_hs), np.max(xs_hs)
y_min, y_max = np.min(ys_hs), np.max(ys_hs)

x_start = x_min + 300
y_start = y_min + 3500

row_idx = np.clip(int((y_start - transform[5]) / transform[4]), 0, lidar.shape[0]-1)
col_idx = np.clip(int((x_start - transform[2]) / transform[0]), 0, lidar.shape[1]-1)
z_start = lidar[row_idx, col_idx]
z_elev = z_start + 5 # Légèrement au-dessus du terrain

p_start = [x_start, y_start, z_elev]
p_end = [x_start + scale_len, y_start, z_elev]
# Créer la ligne de fond (contour noir, légèrement plus large)
scale_bar_outline = pv.Line(p_start, p_end)
plotter.add_mesh(scale_bar_outline, color='black', line_width=5)

scale_bar = pv.Line(p_start, p_end)
plotter.add_mesh(scale_bar, color='black', line_width=4)

label_pos = [(p_start[0] + p_end[0]) / 2, y_start, z_elev + 200]
plotter.add_point_labels([label_pos], ["200 m"], text_color='white', font_size=14, point_size=0)

view_label = f"Vue caméra : {view_vector}"
plotter.add_text(
    view_label,
    position='upper_right', # coin supérieur droit
    font_size=12,
    color='black',
    shadow=True
)

wind_label = f"Vent depuis {wind_dir_deg}°"
plotter.add_text(
    wind_label,

```

```

position='upper_left',
font_size=12,
color='black',
shadow=True
)

max_snow_display = np.max(snow_h) if np.any(snow_h) else 0
plotter.add_text(
f'Hauteur max neige : {max_snow_display:.1f} m",
position="lower_left",
font_size=10,
color='black',
shadow=True
)

pixel_area = res_x * res_y
volume_total = max(np.sum(snow_h) * pixel_area, 0)
plotter.add_text(f'Volume neige : {volume_total:,.0f} m³", position='lower_right', font_size=14,
color='black')

bounds = surf_hs.bounds
center = [
(bounds[0] + bounds[1]) / 2,
(bounds[2] + bounds[3]) / 2,
(bounds[4] + bounds[5]) / 2,
]

vv = np.array(view_vector)
norm_vv = vv / np.linalg.norm(vv) # direction unitaire

distance = max(bounds[1] - bounds[0], bounds[3] - bounds[2]) * 2 # 2x largeur max

camera_position = center + norm_vv * distance

plotter.camera_position = [camera_position.tolist(), center, (0, 0, 1)]
arrow_len = 1000

arrow_vec_world = np.array([np.cos(wind_rad), np.sin(wind_rad), 0])
arrow_vec_world /= np.linalg.norm(arrow_vec_world)

# Position de départ de la flèche dans la scène
bounds = surf_hs.bounds
x0 = bounds[0] + 000
y0 = bounds[3] - 1100
z0 = bounds[5] + 200

arrow_start = np.array([x0, y0, z0])
arrow_end = arrow_start + arrow_vec_world * 500

arrow = pv.Arrow(start=arrow_start, direction=arrow_vec_world, scale=100,
tip_length=10, tip_radius=0.5, shaft_radius=0.1)

```

```
plotter.add_mesh(arrow, color='red')

plotter.show(auto_close=False)

if mode == '1':
    out_path = os.path.join(out_dir, f'melt4_{int(frac*100)}.png')
else:
    out_path = os.path.join(out_dir, f'melt_{int(frac*100)}.png')

plotter.screenshot(out_path)
plotter.close()
print(f"Image générée : {out_path}")
```

## ANNEXE E

## SCRIPT DU MODÈLE DE FONTE - LIEN

L'adresse suivante est destinée à héberger le code du modèle de fonte de neige décrit à la section 3.6, ainsi que des animations illustrant son fonctionnement. L'accès à cette ressource est libre et permet de consulter, télécharger et exécuter le script :

<https://vriva10.github.io/model-3D-snow/>

## BIBLIOGRAPHIE

- Arie, K., Narama, C., Fukui, K., et Iida, H. (2025). Identification and persistence mechanism of very small glaciers and perennial snow patches in the northern Japanese Alps, *Frontiers in Earth Science*, 13, 1442884. <https://doi.org/10.3389/feart.2025.1442884>
- Baldwin H. I. (1956). The Effect of forest on Snow Cover. *New Hampshire forestry and recreation commission. Presented at the 13<sup>th</sup> eastern Snow Conference*, (Hanover, 9 février 1956)
- Beniston, M., Farinotti, D., Stoffel, M., Andreassen, L. M., Coppola, E. et al. (2018). The European Mountain cryosphere: a review of its current state, trends, and future challenges. *The Cryosphere*, 12, 759-794. <https://doi.org/10.5194/tc-12-759-2018>
- Boucher, D., Filion, L., et Héту, B. (2003). Reconstitution dendrochronologique et fréquence des grosses avalanches de neige dans un couloir subalpin du mont Hog's Back, Gaspésie centrale (Québec). *Géographie physique et Quaternaire*, 57, 159–168. <https://doi.org/10.7202/011311ar>
- Boyle, E. (2013) Perennial snow. EdwardBoyle.com [En ligne]. [https://www.edwardboyle.com/drupal/perennial\\_snow](https://www.edwardboyle.com/drupal/perennial_snow) (consulté le 04 avril 2024)
- Brouillet, L., Hay, S., Turcotte, P. et Bouchard, A. (1998). La flore vasculaire alpine du plateau Big Level, au parc national du Gros-Morne, Terre-Neuve. *Géographie physique et Quaternaire*, 52, 2, 175-194.
- Brown, I. et Ward, R. (1996). Influence of Topography on Snowpatch Distribution in Southern Iceland: A New Hypothesis for Glacier Formation? *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography*, 78, 4, 197-207. <https://doi.org/10.2307/521040>
- Cameron, I. et Kish, A. (2025). No Scottish snow patches survive until winter 2024/2025. *Weather*, 80, 3, 76-78. <https://doi.org/10.1002/wea.7671>

- Cameron, I., Fyffe, B. et Kish, A. (2024). No Scottish snow patches survive until winter 2023/2024. *Weather*, 79, 4, 129-131. <https://doi.org/10.1002/wea.4533>
- Campbell, P., White, D., Dyer, F. et Gachev, E. (2025). Snowpatch nomenclature and definitions for a changing climate. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 0, 0. <https://doi.org/10.1177/03091333251360390>
- Christiansen, H. H. (1998). Nivation forms and processes in unconsolidated sediments, NE Greenland. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, 8, 751-760. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199808\)23:8<751::AID-ESP886>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199808)23:8<751::AID-ESP886>3.0.CO;2-A)
- ClimateData.ca. (2024). CanDCS-M6: Multivariate Canadian Downscaled Climate Scenarios for CMIP6 [En ligne]. <https://climatedata.ca> (consulté le 04 décembre 2024)
- Commission de toponymie, (2015). *Banque de noms de lieux du Québec* [En ligne]. <https://toponymie.gouv.qc.ca/> (consulté le 20 avril 2025).
- Costin, A. B., Jennings J. N., Bautovich B. C. et Wimbush, D. J. (1973). Forces Developed by Snowpatch Action, Mt. Twynam, Snowy Mountains, Australia. *Arctic and Alpine Research*, 5, 2, 121-126. <https://doi.org/10.2307/1550253>
- Daimaru, H., Ohtani, Y., Ikeda, S., Okamoto, T. et Kajimoto, T. (2002). Paleoclimatic implication of buried peat layers in a subalpine snowpatch grassland on Mt. Zarumori, northern Japan. *Catena*, 48, 1-2, 53-65. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00009-7](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00009-7)
- Davesne, G. (2015). Évolution spatio-temporelle du pergélisol alpin marginal au mont Jacques-Cartier, massif des Chic-Chocs, Gaspésie (Qc). Mémoire de maîtrise, Département de géographie, Université de Montréal.
- Davesne, G., Domine, F. et Fortier, D. (2022) Properties and stratigraphy of polar ice patches in the Canadian High Arctic reveal their current resilience to warm summers. *Arctic Science* 8, 2, 414–449. <https://doi.org/10.1139/as-2021-0011>
- Dineley, D. L. (1954). Investigations in Vestspitsbergen. *Journal of Glaciology*, 2, 16, 379-383. <https://doi.org/10.3189/002214354793702452>
- Embleton, C. E. et King, C. A. M. (1975). *Periglacial Geomorphology*. Edward Arnold, London.
- Énergie et ressources naturelles Québec (ERNQ). (2000). [En ligne] <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/examine/DV9121/DV9121PLAN.pdf>

depuis <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/examine/DV9121/> (consulté le 15 mars 2024).

- Environment and Climate Change Canada (ECCC). (2022). Snow cover – Canadian environmental sustainability indicators [En ligne]. <https://www.canada.ca/content/dam/eccc/documents/pdf/cesindicators/snow-cover/2022/snow-cover-en.pdf> (consulté le 20 septembre 2024)
- Filion, L., et Payette, S. (1982). Régime nival et végétation chionophile à Poste-de-la-Baleine, Nouveau-Québec. *Naturaliste canadien*, 109, 557-571.
- Gardner, J. (1969). Snowpatches: their influence on mountain wall temperatures and their geomorphic implications. *Geografiska Annaler*, 51A, 114-120. <https://doi.org/10.1080/04353676.1969.11879796>
- Good, M., Morgan, J. W., Venn, S. et Green, P. (2019). Timing of snowmelt affects species composition via plant strategy filtering. *Basic and Applied Ecology*, 35, 54-62. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2019.01.004>
- Gooseff, M. N., Barrett, J. E., Doran, P. T., Fountain, A. G., Lyons, W. B. et al. (2003). Snow-Patch Influence on Soil Biogeochemical Processes and Invertebrate Distribution in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 35, 1, 91-99. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2003\)035\[0091:SPIOSB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(2003)035[0091:SPIOSB]2.0.CO;2)
- Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles et des Forêts. (2024). *SIGÉOM – Geoscience Database* [En ligne]. <https://sigeom.mines.gouv.qc.ca> (consulté le 12 juin 2024)
- Google™ Earth (2013). Mont Jacques-Cartier. 48.988°N;65.938 W. altitude 2.75 km. Digital Globe 2015 [En ligne]. <https://earth.google.com/web> (consulté le 20 février 2024).
- Goudie, A. (1994). *The encyclopedic dictionary of physical geography* (2nd ed.). Oxford, UK: Basil Blackwell.
- Gray, J. T. et Brown, R. J. E. (1982). The influence of terrain factors on the distribution of permafrost bodies in the Chic-Chocs Mountains, Gaspésie, Quebec. *Proceedings of the 4th Canadian Permafrost Conference*, Calgary, Alberta. <http://pubs.aina.ucalgary.ca>
- Green, K. et Pickering, C. M. (2009). The Decline of Snowpatches in the Snowy Mountains of Australia: Importance of Climate Warming, Variable Snow, and

- Wind. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 41, 2, 212-218.  
<https://doi.org/10.1657/1938-4246-41.2.212>
- Grünewald, T., Wolfspergerb, F. et Lehning, M. (2018). Snow farming: conserving snow over the summer season. *The Cryosphere*, 12, 1, 385-400.  
<https://doi.org/10.5194/tc-12-385-2018>
- Groom, G. E. (1959). Niche glaciers in Bünsow Land, Vestspitsbergen. *Journal of Glaciology*, 3, 25, 368-376. <https://doi.org/10.1017/s0022143000017068>
- Hall, K., Thorn, C. E., Matsuoka, N. et Prick, A. (2002). Weathering in cold regions: some thoughts and perspectives. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 26, 4, 577-603. <https://doi.org/10.1191/0309133302pp353ra>
- Hastie, T., et Tibshirani, R. (1990). *Generalized additive models*. Chapman & Hall.
- Hemlet, A. F. et Lettenmaier, D. P. (2007). Effects of 20th century warming and climate variability on flood risk in the western U.S. *Water Resources Research*, 43, 6, 1-17. <https://doi.org/10.1029/2006WR005099>
- Henderson, E. P (1956). Large Nivation Hollows near Knob Lake, Quebec. *The Journal of Geology*, 54, 6, 607-616. <https://doi.org/10.1086/626394>
- Hinks, T., et Museth, K. (2009). Wind-driven snow buildup using a level set approach. *Eurographics Ireland Workshop Series*, 9, 1-8.
- Hoad, C. G., Myers-Smith, I. H., Kerby, J. T., Colesie, C. et Assman, J. J. (2025). Snow persistence lowers and delays peak NDVI, the vegetation index that underpins Arctic greening analyses. *Environmental Research*, 20, 3, 1-14.  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/adacff>
- Jian, X., Li, Y., et Zhang, Q. (2025). Climate adaptive energy efficiency modeling using a generalized additive approach to optimize building performance across Chinese climate zones. *Journal of Building Performance*, 16, 2, 45-60.  
<https://doi.org/10.1016/j.jobpe.2025.02.001>
- Kariya, Y. (2002). Geomorphic processes at a snowpatch hollow on Gassan volcano, northern Japan. *Permafrost and Periglacial Processes*, 13, 2, 107-116.
- Kawashima, K., Yamada, T. et Wakahama, G. (1993). Investigations of internal structure and transformational processes from firn to ice in a perennial snow patch. *Annals of Glaciology* 18, 117-122.  
<https://doi.org/10.3189/S0260305500011368>

- Kňažková, M., Nývlt, D. et Hrbáček, F. (2021). Slope processes connected with snow patches in semi-arid ice-free areas of James Ross Island, Antarctic Peninsula, *Geomorphology*, 373, 1, 10, 107479. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107479>
- Lafortune, V., Filion, L. et Hétu, B. (2006). Impacts of Holocene climatic variations on alluvial fan activity below snowpatches in subarctic Québec. *Geomorphology*, 76, 3-4, 375-391. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.12.004>
- Lehning, M. (2013). Snow-atmosphere interactions and hydrological consequences, *Advances in Water Resources*, Volume 55, 1-3. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.02.001>
- Lewis, W. V. (1939). Snow-patch erosion in Iceland. *The Geographical Journal*, 94, 2.
- Lewkowicz A. G. et Harry D. G. (1991) Internal structure and environmental significance of a perennial snowbank, Melville Island, N.W.T. *Arctic*, 44, 1, 74–82. <https://doi.org/10.14430/arctic1521>
- Margold, M., Treml, V., Petr, L. et Nyplova, P. (2011). Snowpatch hollows and pronival ramparts in the Krkonoše Mountains, Czech Republic: Distribution, morphology and chronology of formation. *Geografiska Annaler Series A Physical Geography*, 93, 2, 137-150. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2011.00422.x>
- Marsh, C. B., Pomeroy, J. W., Spiteri, R. J. et Wheeler, H. S. (2020). A finite volume blowing snow model for use with variable resolution meshes. *Water Resources Research*. 56, 2, 1-28. <https://doi.org/10.1029/2019WR025307>
- Mathieu, C., Payette, S. et Morin, H. (1987). Chronologie <sup>14</sup>C et développement des combes à neige du lac à l'Eau Claire, Québec nordique. *Géographie Physique du Quaternaire*, 41, 1, 97-108. <https://doi.org/10.7202/032668ar>
- McCabe, L. H. (1939). Nivation and Collie Erosion in West Spitsbergen. *Geographical Journal*, 94, 76, 447-65. <https://doi.org/10.2307/1787294>
- Morgan, J. et Walker, Z. (2023). Early-melting snowpatch plant communities are transitioning into novel states. *Scientific Reports*, 13, 16520. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42808-5>
- Mott, R., Schögl, S., Dirks, L. et Lehning, M. (2017). Impact of Extreme Land Surface Heterogeneity on Micrometeorology over Spring Snow Cover. *Journal of Hydrometeorology*, 18, 10, 2705-2722. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0074.1>

- Mott, R., Vionnet, V. et Grünewald, T. (2018). The Seasonal Snow Cover Dynamics: Review on Wind-Driven Coupling Processes. *Frontiers in Earth Science*, 6, 197, 1-25. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00197>
- Musselman, K. N., Clark, M. P., Liu, C., Ikeda, K. et Rasmussen, R. (2017). Slower snowmelt in a warmer world. *Nature Climate Change*, 7, 214-219. <https://doi.org/10.1038/nclimate3225>
- Natek, K. (2007). Periglacialne oblike na Pohorju. *Dela*, 27, 247-263. <https://doi.org/10.4312/dela.27.247-263>
- National Snow and Ice Data Center. (n.d.). Why snow matters. NSIDC [En ligne]. <https://nsidc.org/learn/parts-cryosphere/snow/why-snow-matters> (consulté le 04 février 2024)
- Nicot, F. (2004). Constitutive modelling of snow as a cohesive granular material. *Granular Matter* 6, 1, 47–60. <https://doi.org/10.1007/s10035-004-0159-9>
- Nyberg, R. (1986). Freeze-Thaw Activity at Snowpatch Sites. A Progress Report of Studies in N. and S. Sweden. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, 68, 3, 207-211. <https://doi.org/10.2307/521460>
- Paquette, M. (2018). Le rôle des formes périglaciaires dans l'hydrologie et l'évolution des pentes d'un désert polaire dans le Haut-Arctique canadien. Thèse de doctorat, Université de Montréal.
- Payette, S. et Lajeunesse, R. (1980). Les combes à neige de la rivière aux Feuilles (Nouveau-Québec) : indicateurs paléoclimatiques holocènes. *Géographie et physique Quaternaire*, 34, 2, 209-220. <https://doi.org/10.7202/1000398ar>
- Payette, S., et Boudreau, F. (1984). Évolution postglaciaire des hauts sommets alpins et subalpins de la Gaspésie. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 21, 3, 319-335. <https://doi.org/10.1139/e84-034>
- Pedersen, A. Ø., Speed, J. D. M. et Tombre, I. M. (2013). Prevalence of grubbing in the arctic tundra increases with the pink-footed goose population expansion. *Polar Biology*, 36, 1569-1575. <https://doi.org/10.1007/s00300-013-1374-9>
- Perennial snow. (n.d.). EdwardBoyle.com [En ligne]. [https://www.edwardboyle.com/drupal/perennial\\_snow](https://www.edwardboyle.com/drupal/perennial_snow) (consulté le 30 mars 2024)

- Petraglia, A., et Tomaselli, M. (2007). Phytosociological study of the snowbed vegetation in the Northern Apennines (Northern Italy). *Phytocoenologia*, 37, 1, 67.
- Pickering, C. M., Green, K., Barros, A. et Venn, S. (2014). A resurvey of late lying snowpatches reveals changes in both species and functional composition across snowmelt zones. *Alpine Botany*, 124, 2, 93-103. [10.1007/s00035-014-0140-0](https://doi.org/10.1007/s00035-014-0140-0)
- Ravindra, K., Reddy, V. S., et Rani, S. (2019). Generalized additive models: Building evidence of air pollution, climate change and human health. *Environmental Research*, 176, 108539. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108539>
- Ren, D. et Leslie, L. M. (2011). Three positive feedback mechanisms for ice-sheet melting in a warming climate. *Journal of Glaciology*, 57, 206, 1057-1066. <https://doi.org/10.3189/002214311798843250>
- Renoult, M., Annan, J. D., Hargreaves, J. C., Sahoo, N., Flynn, C. et al. (2020). A Bayesian framework for emergent constraints: case studies of climate sensitivity with PMIP. *Climat of the Past*, 16, 1715-1735, <https://doi.org/10.5194/cp-16-1715-2020>
- Robinson, D.A., Dewey K. F. et Heim Jr. R. R. (1993). Global Snow Cover Monitoring: An Update. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74, 9, 1689-1696. [https://doi.org/10.1175/15200477\(1993\)074<1689:GSCMAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200477(1993)074<1689:GSCMAU>2.0.CO;2)
- Robinson, D.A., Frei A. et Serreze M. C. (2017). Recent variation and regional relationships in Northern Hemisphere snow cover. *Annals of Glaciology*, 21, 71-76. [10.3189/s0260305500015627](https://doi.org/10.3189/s0260305500015627)
- Schwaizer, G., Nagler, T., Hetzenecker, M., Heinrich, M., Mölg, N. et al. (2024). ESA Snow Climate Change Initiative (Snow\_cci): Daily global Snow Cover Fraction – snow on ground (SCFG) from MODIS (2000-2022), version 4.0. *NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis* [En ligne]. <https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/375ffdb8f0a445e380b4b9548655f5f9> (Consulté le 20 novembre 2024)
- Sirois, L., Lutzoni, F. et Grandtner, M. M. (1988). Les lichens sur serpentine et amphibolite du plateau du mont Albert, Gaspésie, Québec. *Canadian Journal of Botany*, 66, 5. <https://doi.org/10.1139/b88-124>

- Stomakhin, A., Schroeder, C., Chai, L., Teran, J. et Selle, A. (2013). A material point method for snow simulation. *ACM Transactions on Graphics*, 32, 4, 102, 1-10. <https://doi.org/10.1145/2461912.2461948>
- Sturm, M., Goldstein, M. A. et Parr, C. (2017). Water and life from snow: A trillion-dollar science question. *Water Resources Research*, 53, 5, 3534-3544. <https://doi.org/10.1002/2017WR020840>
- Tebaldi, C., & Arblaster, J. M. (2014). Pattern scaling: Its strengths and limitations, and an update on the latest model simulations. *Climatic Change*, 122, 3, 459–471. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-1032-9>
- Thorn, C. E. (1979). Ground Temperatures and Surficial Transport in Colluvium during Snowpatch Meltout; Colorado Front Range. *Arctic and Alpine Research*, 11, 1, 41-52. <https://doi.org/10.1080/00040851.1979.12004116>
- Thorn, C. E. (1988). Nivation: A geomorphic chimera. In M. J. Clark (Ed.). *Advances in periglacial geomorphology*, 3–31. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Thorn, C. E. et Hall, K. (2002). Nivation and cryoplanation: the case for scrutiny and integration. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 26, 4, 533-550. <https://doi.org/10.1191/0309133302pp351ra>
- Verrall, B., Green, K. et Pickering, C. M. (2023). Temporal dynamics in alpine snowpatch plants along a snowmelt gradient explained by functional traits and strategies. *Community Ecology*, 201, 155-171. [10.1007/s00442-022-05297-3](https://doi.org/10.1007/s00442-022-05297-3)
- Vionnet, V., Marsh, C. B., Menounos, B., Gascoïn, S., Wayand, N. E. et al. (2021). Multi-scale snowdrift-permitting modelling of mountain snowpack. *The Cryosphere*, 15, 2, 743–769. <https://doi.org/10.5194/tc-15-743-2021>
- Watson, A., Davison, R. W. et French, D. D. (1994). Summer snow patches and climate in northeast Scotland, U.K. *Arctic and Alpine Research*, 26, 2, 141-151. <https://doi.org/10.1080/00040851.1994.12003050>
- Wheeler, J. A., Cortés, A. J., Sedlacek, J., Karrenberg, S., Van Kleunen, M. et al. (2016). The snow and the willows: earlier spring snowmelt reduces performance in the low-lying alpine shrub *Salix herbacea*. *Journal of Ecology*, 104, 1041-1050. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12579>
- Wilson, J. W. (1958). Dirt on Snow Patches. *Journal of Ecology*, 46, 1, 191-198. <https://doi.org/10.2307/2256913>

- Woo, M. K., Heron, R. et Marsh, P. (1982). Basal ice in high Arctic snow patches. *Arctic and Alpine Research*, 14, 3, 251-260. <https://doi.org/10.2307/1551157>
- Wood, S. N. (2017). Chapitre 3, Generalized Linear Model. In *Generalized additive models: An introduction with R*, 101-160. Chapman & Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781315370279>