







Université du Québec  
à Rimouski

**CO-PRODUCTION DE CONNAISSANCES, CRÉATION DE  
CAPITAL SOCIAL ET REPRÉSENTATION DU SAVOIR  
LOCAL DANS LE SUIVI D'UN SOCIO-ÉCOSYSTÈME  
HUMAINS-RANGIFER**

Thèse présentée

dans le cadre du programme de doctorat en sciences de l'environnement

en vue de l'obtention du grade de *Philosophiae doctor*, Ph.D

PAR

© CATHERINE ALEXANDRA GAGNON

Décembre 2018



**Composition du jury :**

**William Vickery, président du jury, Université du Québec à Montréal**

**Dominique Berteaux, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski**

**Murray M. Humphries, examinateur externe, Université McGill**

**Guillaume de Lafontaine, examinateur interne, Université du Québec à Rimouski**

Dépôt initial le 22 mai 2018

Dépôt final le 14 décembre 2018



UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI  
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski 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 Rimouski 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.





À mes magnifiques enfants, Élie,  
Ambroise et Blanche, qui chaque jour  
me ramènent à l'essentiel.

À mon Ludo, évidemment, dont  
l'amour m'a permis de compléter cette  
aventure à ma façon.



## REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier du fond du cœur ma chère Sandra Hamel, qui est depuis maintenant près de vingt ans une amie inestimable et une profonde source d'inspiration. Merci Sandra pour ton amitié, d'abord, et pour ta rigueur scientifique et ta détermination sans faille ! Sandra, tu as été à mes côtés tout au long de mon aventure doctorale, et ce malgré le tumulte des dernières années. Sans toi, ce projet n'aurait certainement jamais eu la même ampleur et la même qualité. Je dirais même que sans toi, ce projet n'aurait probablement pas abouti ! Malgré les obstacles, tu n'as jamais lâché le cap. Nos nombreux après-midis passés à programmer dans R, au Yukon, à la maison, écrasées dans le divan, resteront à jamais marqués dans ma mémoire ! Merci Sandra pour ton intégrité, ta loyauté, ton intelligence et ta sensibilité. J'espère que les années à venir me donneront l'occasion de te voir plus souvent.

Je tiens aussi à remercier profondément et sincèrement celui qui au cours de la dernière décennie a contribué à forger la *socio-biologiste* et la personne que je suis maintenant. Merci cher Dominique Berteaux de m'avoir acceptée dans ton labo en 2004, alors que je te proposais de sortir des sentiers battus en élaborant un projet sur les connaissances autochtones. Chaque échange que nous avons eu depuis m'a toujours enrichie, au plan professionnel et personnel. Merci de m'avoir aidée à me dépasser, à toujours viser plus haut, à voir les obstacles sous différents angles, à croire en mes capacités. Enfin, je ne te serai jamais assez reconnaissante pour ta patience, ta grande sensibilité et ta délicatesse qui m'ont permis de vivre et de profiter de deux grandes aventures en simultané, sans compromis : la maternité et le doctorat. Je reste à ce jour convaincue que cela aurait été impossible sans toi. Peu nombreux sont les directeurs de doctorat si compréhensifs. En espérant avoir finalement la chance de déguster un bon chocolat en ta compagnie !

Un grand merci également à tous les membres du labo Bêty-Berteaux, ainsi qu'à certains membres du département de biologie de l'UQAR pour leur soutien amical, intellectuel, et/ou logistique. Merci d'abord aux membres du labo pour les réunions gastronomiques et intellectuellement stimulantes, notamment Arnaud Tarroux, Sandra Lai, Daniel Gallant, Peter Fast, Andréanne Beardsell, Yanick Gendreau, Clément Chevallier, Marie-Jeanne Rioux, Florence Lapierre-Poulain et Lorelei Guéry. J'envoie des remerciements particuliers à Élise Bolduc pour sa présence rassurante et les discussions passionnantes. Merci aussi à Nicolas Casajus, celui qui programme plus vite que l'éclair, sans qui plusieurs de mes analyses n'auraient été complétées ! Merci Jean-François Lamarre, Vincent L'Hérault et Marie-Hélène Truchon pour les échanges amicaux et enrichissants en lien avec les communautés nordiques. Merci aussi à Louise Amyot pour les discussions musicales et pour m'avoir permis d'appivoiser la complexité administrative du doctorat en sciences de l'environnement. Merci à Édith Plourde pour le soutien administratif et à Mélanie Potvin pour ta gentillesse. Merci enfin à tous les autres membres du labo d'avoir partagé le même bateau que moi et d'avoir été les compagnons agréables des jours plus et moins productifs.

Tout au long de mon cheminement de maîtrise et de doctorat, j'ai aussi eu l'occasion de croiser des femmes autochtones qui m'ont marquée, transformée. C'est en grande partie pour vous que j'ai eu envie de poursuivre ce travail. Je vous salue Leslie Pewatoalook, Ruth Sangoya, Agnaowak Kilukisak, Elisapee Ootova, Paingut Peterloosie, Theresa Mucktar, Angootainook Katsak et May André ! Qujanamiraalu! Masi Cho !

Dans la même ligne de pensée, je tiens à remercier la Dr. Eva Fuglei, du Norwegian Polar Institute, qui sans le savoir m'a encouragée à poursuivre mon doctorat alors que je jonglais entre les études et l'envie de fonder une famille. C'est elle qui m'a convaincue que nous avons besoins de femmes chercheuses faisant les choses différemment.

Merci maintenant à ces chercheuses (s) d'exception qui ont influencé mon travail, ma manière d'écrire et mon envie de me dépasser intellectuellement. Merci Joël Bêty. Je te donne la palme du chercheur performant - zen par excellence. Merci pour ton calme, ta rigueur, et

les bons jours de chasse ! Merci Pierre Legagneux, pour ta folie, ta spontanéité et ton petit côté scientifico-kamikaze. Merci au Dr. Fikret Berkes pour son érudition et ses bons conseils. Merci au Dr. Terry Chapin III qui a mon entière admiration, dont les articles m'inspirent toujours, et avec qui j'espère encore partager des discussions passionnantes sur la musique traditionnelle ! Merci à l'inspirante Elinor Ostrom, prix nobel d'économie, pour l'entièreté de son œuvre et en particulier pour son travail sur la gestion des communaux et le capital social. Merci également à Brigitte Engerer, pour sa recherche et sa maîtrise musicale inégalées. Son interprétation céleste des Nocturnes de Chopin a bercé et adouci mes derniers mois d'écriture.

I would also like to fondly thank all the people who have participated close and far to the ABEKS since 1994, and who have let me entering this circle and analyse the data. Thanks to all the experts who have participated to the ABEKS monitoring program. Thanks also to the monitors who have collected the data over the years and to the coop Board members for their dedication. In particular, I acknowledge the dedication of J. Eamer, G. Kofinas, M. Allen, J. Andre, M. Andre, E. Arey, C. Arey, R. Buckle, R. Charlie, B. Smith, M. Gill, S. Gilbert, S. Cockney, S.DeBastien, J. Edwards, A. Firth, M. Gilbert, A. B. Gordon, J. Gordon, B. Greenland, D. Greenland, C. Angun Gruben, B. Iglangasak, V. Josie, B. Kaglik, S. Kakfwi, L. Kayotuk, R. Koe, A. May McLeod, E. Pascal, F. Rexford, E. Sam, T. Semple, M. Sharpe, A. Snowshoe, C. Stewart, R. Tetlich and J. Tritt. J'aimerais particulièrement remercier Michael Svoboda pour son soutien malgré la longue durée de cette étude. Merci aussi d'avoir facilité mes interactions avec l'ABEKS. Thanks also to Don Russell, Dorothy Cooley and Todd Powell for your precious advices and comments. Your experience with caribou, the ABEKS and the entire Arctic Borderlands area has been of immense help.

Je suis également redevable à tous les organismes dont le soutien logistique et financier ont permis la réalisation de cette thèse de doctorat : le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG), l'Université du Québec à Rimouski (UQAR), le programme de formation FONCER du CRSNG en sciences environnementales nordiques EnviroNord, le programme de l'Année Polaire Internationale 2007-2008 du ministères des

Affaires autochtones et du Nord Canada, le CircumArctic Rangifer Monitoring and Assessment Network (CARMA), le Centre d'études nordiques (CEN), Environnement Canada (Whitehorse), le programme de formation scientifique dans le Nord (savoir polaire Canada), le réseau de centres d'excellence du Canada ArcticNet et l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society. Je remercie aussi l'Aurora Research Institute de m'avoir permis de faire mes recherches sur son territoire.

Après ces remerciements essentiels, viennent les remerciements à celles et ceux qui m'ont toujours aimée et supportée, inconditionnellement. Tous ces êtres qui de leur présence, de leur confiance en moi, de leur complicité, de leurs sourires font de moi une personne multiple, équilibrée et foncièrement heureuse. Vous êtes mes racines, la source de mon énergie et de mes ambitions. Toutes les fibres de mon cœur sont imprégnées de vous.

Merci à mes amis (es) de longue date, celles qui connaissent mes doutes et mes contradictions : Marie-Claire, Déline, Annie, Baptiste, Anna, Sandra, Laurence, Yanick, Marie-Julie. La vie est tellement plus belle à vos côtés ! Merci pour votre support ! Merci d'avoir accepté sans reproches ma vie d'ermite durant la dernière année de ce doc. Malgré la distance, je pensais toujours à vous.

Merci aussi à mes mères d'exception, mères de jour et de nuit, mères douces et parfois impatientes, mères souvent inquiètes, mères qui m'ont confortée dans mon désir de profiter au maximum de mes enfants tout en étant une doctorante : ma sœur Julie Anne, Julie Roberge, Nathalie Chamberland, Diane Leclerc, Marie-Claire Bédard, Marie-José Naud, Élise Bolduc, Naomi Samuel, Évelyne, Shannon, Maman, Matante. Vous êtes inspirantes et comptez beaucoup pour moi.

Les musiciens de ma vie : Charles Tremblay, Mathieu Fournier, Éric Beaudry, François Villeneuve, Sarah Desjardins, Lise Bonneau, Carole Mercure, Robin Servant, Ginette Langlois, Yoland Henry, Pascal Gemme, Bérengère, Guillaume, Pierre et tous les copains de la Marée Montante. Sans votre musique enivrante, mes années doctorales auraient été beaucoup moins supportables !

Maintenant, je voudrais, remercier mon extraordinaire famille. Malgré la distance physique qui nous sépare, vous êtes cette force tranquille, cette base sur laquelle je peux me poser. C'est vous qui m'avez transmis cette force unique qui m'inspire et me pousse à toujours regarder vers l'avant. Je vous suis foncièrement redevable d'avoir toujours été là pour moi. À vous ma famille : maman, papa, Julie Anne, Vanessa, Louise, Pierre, Claude, Pierre-Luc, Matante, Mononcle, mamie Thérèse. Je sais que sans vous, je ne serais pas là où je suis maintenant ! Et sans oublier tous ces merveilleux tannants qui égayent notre vie ! Merci aussi à ma famille élargie, tantes, oncles, cousins, cousines et à mes beaux-parents, Maurice et Rachel. Et aussi ceux qui se bercent maintenant sur un croissant de lune : papi Roméo, mamie Jeannine, tante Jocelyne et papi Conrad.

Du bout de la Pointe-aux-Anglais, je remercie finalement ma petite famille à moi, mes amours, mes adorables coquins, ma fierté. Chaque jour, vous m'inspirez à devenir une meilleure personne, à mettre de l'avant mes valeurs. C'est pour vous que j'ai eu envie de finaliser mon doctorat, de montrer que tout est possible. Oui je sais, votre maman a été ô combien occupée cette dernière année ! C'est vous, après tout, qui avez été à l'avant-garde de cette aventure ! Merci pour votre patience.... je vous promets de me rattraper ! Un petit mot spécial pour mon Ludo, l'amour de ma vie : ce doctorat a été un travail d'équipe, définitivement ! Merci de m'avoir toujours appuyée dans mes décisions, accueillie dans mes questionnements, poussée lorsque je me décourageais. Merci pour ton amour inconditionnel. Merci d'avoir été le gardien du phare, celui qui sait toujours pourquoi il fait les choses, celui qui ne regrette jamais. J'apprécierai toujours ta grande sagesse. Tu as raison : faire les choses pour être heureuse, c'est déjà une grande contribution !

## AVANT-PROPOS

Ma thèse comprend trois chapitres, de même qu'une introduction générale et une conclusion. L'introduction et la conclusion ont été rédigées en français et les trois chapitres, écrits sous forme d'articles scientifiques pour publication, ont été rédigés en anglais. Bien que plusieurs co-auteurs aient participé à l'élaboration des manuscrits, j'en suis l'auteure principale, ayant été responsable de la planification, de l'acquisition des données, des analyses et de la rédaction de ces articles. Le docteur Dominique Berteaux, mon directeur de thèse, est co-auteur sur tous les articles inclus dans cette thèse, de par ses conseils dans l'élaboration de mon projet, de même que par sa supervision et sa révision essentielle des manuscrits. Sandra Hamel, professeure associée à l'Arctic University of Norway, est deuxième auteure de deux articles de cette thèse (chapitres 1 et 2) pour son implication indispensable dans la conception et l'élaboration des analyses statistiques, de même que pour son étroite implication dans la révision des manuscrits. La contribution des autres co-auteurs se limite à la révision des manuscrits.

Cette thèse est le fruit d'un labeur qui dura presque 10 ans, le fruit d'une démarche scientifique et personnelle. Elle résulte d'un pari fait en 2008 : qu'il serait possible de faire de la recherche et de voir grandir ses enfants. Mon doctorat aura donc été influencé par trois grossesses, interrompu par trois accouchements et congés de maternité, ralenti par un travail à temps partiel me permettant de profiter de mes enfants. Or, la réflexion et la science ont souvent besoin de temps. J'ose croire que le temps pris pour réaliser mon doctorat m'aura permis d'en accroître la qualité.

Le grade associé au doctorat est celui de *Philosophiæ doctor*. Le dictionnaire Larousse définit la philosophie comme une « manière de voir, de comprendre, d'interpréter le monde, les choses de la vie, qui guide le comportement ». Cette thèse s'attarde exactement à la rencontre de différents angles par lesquels les êtres humains essaient de voir, comprendre et



interpréter le monde qui les entoure : celui de la science, et celui des peuples Gwich'in et Inuvialuit du Nord-Ouest canadien. L'étude d'un programme de suivi environnemental communautaire, mis en place il y a plus de 20 ans et dirigé à parts égales par des membres de communautés autochtones et des scientifiques, fut une opportunité unique et extraordinaire pour aborder ces différents angles.

J'ai eu la chance, au cours de mes études doctorales, d'évoluer au sein d'un programme favorisant l'approche multidisciplinaire. De par ma culture, j'ai abordé les questions de cette thèse par l'angle de la science. Or, les connaissances autochtones ne peuvent se résumer à de simples faits, et s'expriment parfois mieux par la parole, le récit, le conte, le chant, la poésie. C'est pour contrebalancer l'aspect factuel des articles de la thèse que je débute chacun des trois chapitres en faisant place à la « voix des autres » (Savard 1985), et en particulier à la voix puissante, mais souvent peu entendue, de femmes autochtones.

## RÉSUMÉ

L'étude et la gestion des socio-écosystèmes exigent une grande quantité d'informations. Elles nécessitent toutes les sources de connaissances valides disponibles, incluant la science et les cultures et pratiques autochtones. Dans l'Arctique canadien, l'étude et la gestion des socio-écosystèmes humains-*Rangifer* se situent dans un contexte intéressant. D'une part, on a besoin de mieux comprendre les facteurs qui influencent la démographie des troupeaux de caribous migrateurs, car la plupart sont en déclin alors que plusieurs communautés autochtones en dépendent et que les données scientifiques qui pourraient expliquer ces déclins sont rares. D'autre part, le contexte socio-politique de l'Arctique canadien favorise l'implication des communautés autochtones et l'utilisation de leurs connaissances dans la recherche et la gestion environnementales. Cette thèse porte sur les contributions et limites d'un programme à long terme de surveillance environnementale communautaire du socio-écosystème humains-*Rangifer* associé au troupeau de caribous migrateurs de la rivière Porcupine. Elle s'intéresse plus précisément au cas de l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society, une coopérative créée en 1994 qui implique 10 communautés autochtones au sein de son programme de surveillance environnementale communautaire. Les trois objectifs spécifiques de la thèse consistent à:

- 1) étudier comment la surveillance communautaire permet de mieux comprendre les facteurs environnementaux modulant la condition physique des caribous;
- 2) étudier comment la surveillance communautaire permet d'établir des liens de cause à effet entre des variables environnementales, la distribution des caribous et la capacité des chasseurs autochtones à chasser et satisfaire leurs besoins en caribou;
- 3) étudier comment un programme de surveillance environnementale communautaire favorise la construction de capital social entre ses participants et permet une plus grande utilisation des connaissances locales autochtones dans la gestion environnementale.

Le premier chapitre de cette thèse (objectif 1) s'appuie sur 11 années d'observations locales autochtones et montre l'amélioration de la condition physique des caribous au printemps et à l'automne durant la décennie 2000-2010, malgré une augmentation constante de la taille du troupeau. Nos analyses identifient aussi les facteurs climatiques ayant le plus d'influence sur la condition physique des caribous au printemps et à l'automne, notamment les conditions de neige et les températures printanières. D'après nos résultats, l'amélioration des conditions nivales et des températures printanières, de 2000 à 2010, aurait contribué à l'augmentation du troupeau observée durant cette période. Le second chapitre de la thèse (objectif 2) permet de mieux comprendre les liens unissant le climat, les caribous et les humains. Il s'attarde aux facteurs climatiques ayant le plus d'influence sur la capacité des

chasseurs autochtones à satisfaire leurs besoins en caribou dans le socio-écosystème humains-*Rangifer* étudié. Il met en évidence le rôle essentiel de la neige et de la température dans la pratique de la chasse et dans la satisfaction des besoins en caribou. Ce chapitre montre aussi que de 2000 à 2008, les chasseurs ont pu accroître la satisfaction de leurs besoins en caribou malgré une diminution des activités de chasse, probablement à cause de l'augmentation de la population de caribous. Le troisième chapitre de la thèse (objectif 3) identifie les retombées sociales du programme de surveillance environnementale communautaire étudié. Nos résultats montrent que malgré un haut niveau de capital social au sein de l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society, les connaissances autochtones provenant de ce programme sont encore très peu utilisées par les gestionnaires. Nous identifions plusieurs freins à l'utilisation de ces connaissances et montrons que l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society a su faire preuve d'une grande capacité d'apprentissage et d'adaptation pour faire face à ces barrières. En conclusion, cette thèse améliore notre compréhension des facteurs environnementaux influençant la condition physique du caribou et de manière plus générale le socio-écosystème humains-*Rangifer*. Elle montre ainsi que la surveillance environnementale communautaire autochtone peut grandement contribuer à notre compréhension des socio-écosystèmes arctiques. La thèse montre aussi que cette approche peut avoir des retombées sociales dépassant la collecte des données. Ainsi, notre étude contribue à mieux cerner comment la surveillance environnementale communautaire favorise les ponts entre les connaissances autochtones et scientifiques, et permet la rencontre d'humains qui doivent s'entendre et innover pour gérer de manière durable les ressources dont ils dépendent.

*Mots clés:* caribou; *Rangifer tarandus*; condition physique; climat; surveillance environnementale communautaire; capital social; besoins humains; apprentissage social; co-production de connaissances

## ABSTRACT

Studying and managing social-ecological systems are information intensive endeavours. They necessitate every source of valid knowledge available, including science and local indigenous culture and practice. In the Canadian Arctic, the study and management of human-*Rangifer* social-ecological systems occur in an interesting setting. First, the socio-political context in northern Canada promotes a broader involvement of indigenous communities and their knowledge within environmental research and management processes. Second, there is an urgent need to improve our understanding of the environmental factors influencing caribou demography, because most large migratory herds are declining and this compromises the culture and livelihoods of several indigenous communities. Finally, scientific data is often scarce regarding caribou ecology. This thesis investigates the contributions and limits of a long-term community-based monitoring program of the human-*Rangifer* social-ecological system associated with the Porcupine caribou herd. More precisely, it investigates the case of the Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society, a cooperative institution established in 1994 and involving 10 indigenous communities within its community-based environmental monitoring program. Three specific objectives structured the chapters of the thesis:

- 1) to investigate how community-based monitoring allows a better understanding of the environmental factors influencing caribou body condition;
- 2) to investigate how community-based monitoring allows a better understanding of the mechanisms linking environmental variables, caribou distribution and the capacity for northern indigenous hunters to satisfy their needs in caribou;
- 3) to investigate how a community-based monitoring program contributes to build social capital among its participants, and favours the use of local indigenous knowledge within environmental management processes.

The first chapter of the thesis (objective 1) is based on 11 years of recording of indigenous observations and shows that both spring and fall caribou body condition improved from 2000 to 2008, despite a continuous increase of the Porcupine caribou population. Our analysis revealed that spring and fall caribou body conditions were mostly influenced by weather on the winter and spring ranges, in particular by snow conditions and spring temperatures. We found that the amelioration of snow and temperature conditions from 2000 to 2010 likely contributed to the caribou population increase during the same period. The second chapter of the thesis (objective 2) focused on the climatic factors influencing the capacity of indigenous hunters to satisfy their needs in caribou within the studied human-*Rangifer* social-ecological system. It underscores the strong influence of snow conditions

and temperature on hunting activities and the capacity of hunters to satisfy their needs in caribou. This chapter also demonstrates that from 2000 to 2008, hunters increasingly met their needs in caribou despite a decrease in hunting activities, which may have been caused by the caribou population increase. The third chapter of the thesis (objective 3) identified some of the social outcomes of the studied community-based monitoring program. Our results show that in spite of a high level of social capital within the Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society, indigenous knowledge collected through the program barely contributed to management decisions. We identified several barriers limiting the contribution of this knowledge but showed that the Arctic Borderlands demonstrated learning and adaptive capacities to overcome these barriers. This thesis advances our understanding of the environmental factors influencing caribou body condition and, more generally, the human-*Rangifer* social-ecological system. We thus demonstrate that indigenous community-based monitoring can improve our understanding of arctic social-ecosystems. This thesis also shows that a community-based approach can produce social outcomes that go beyond the primary benefits of data collection. Finally, this study shows how environmental community-based monitoring bridges indigenous and scientific knowledge and fosters communication between people who need to meet and innovate to manage sustainably the resources on which they depend.

*Keywords:* caribou; *Rangifer tarandus*; body condition; climate; community-based monitoring; social capital; human needs; social learning; knowledge co-production

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	IX
AVANT-PROPOS .....	XIV
RÉSUMÉ.....	XVI
ABSTRACT .....	XVIII
TABLE DES MATIÈRES .....	XX
LISTE DES TABLEAUX.....	XXIII
LISTE DES FIGURES.....	XXIV
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES .....	XXVII
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CONTEXTE GÉNÉRAL.....	1
PROBLÉMATIQUE .....	14
OBJECTIFS DE LA THÈSE .....	17
MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE.....	21
STRUCTURE DE LA THÈSE.....	29
CHAPITRE 1 POURQUOI UNE POPULATION DE CARIBOUS MIGRATEURS CROIT-ELLE ET AMÉLIORE-T-ELLE SA CONDITION PHYSIQUE DANS UN CONTEXTE GÉNÉRAL DE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE ET DE DECLIN DU CARIBOU ? .....	31
1.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE .....	32
1.2 WHY A LARGE MIGRATORY CARIBOU POPULATION GREW AND IMPROVED BODY CONDITION IN A GLOBAL CONTEXT OF CARIBOU DECLINE AND CLIMATE WARMING .....	34
1.3 ABSTRACT .....	34
1.4 INTRODUCTION.....	36
1.5 MATERIALS AND METHODS.....	40
1.6 RESULTS.....	47

1.7	DISCUSSION .....	54
1.8	CONCLUSION.....	58
1.9	ACKNOWLEDGEMENTS .....	59
CHAPITRE 2 CLIMAT, BIODIVERSITE ET BIEN-ETRE HUMAIN : COMBINER LES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES ET AUTOCHTONES .....		60
2.1	RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU DEUXIÈME ARTICLE .....	61
2.2	CLIMATE, BIODIVERSITY, AND HUMAN WELL-BEING: MERGING SCIENTIFIC AND INDIGENOUS KNOWLEDGE .....	63
2.3	ABSTRACT .....	63
2.4	TEXT .....	65
2.5	METHODS.....	73
2.6	ACKNOWLEDGEMENTS .....	82
CHAPITRE 3 SURVEILLANCE ENVIRONNEMENTALE COMMUNAUTAIRE DANS L'ARCTIQUE : CAPITAL SOCIAL, UTILISATION DES CONNAISSANCES LOCALES DANS LES PROCESSUS DÉCISIONNELS ET APPRENTISSAGE.....		84
3.1	RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU TROISIÈME ARTICLE.....	85
3.2	COMMUNITY-BASED MONITORING IN THE ARCTIC: SOCIAL CAPITAL, USE OF LOCAL KNOWLEDGE IN DECISION-MAKING, AND LEARNING .....	87
3.3	ABSTRACT .....	87
3.4	INTRODUCTION .....	88
3.5	METHODS.....	92
3.6	RESULTS .....	101
3.7	DISCUSSION .....	108
3.8	CONCLUSION.....	113
3.9	ACKNOWLEDGEMENTS.....	113
CONCLUSION GÉNÉRALE.....		115
L'ORIGINALITÉ ET L'IMPORTANCE DE L'ÉTUDE .....		115
RETOUR SUR LES PRINCIPAUX RÉSULTATS DE LA THÈSE .....		122
IMPLICATIONS ET PERSPECTIVES FUTURES.....		131

LES LIMITES DE L'ÉTUDE.....	139
MOT DE LA FIN.....	142
ANNEXE I.....	143
ANNEXE II.....	144
ANNEXE III.....	146
ANNEXE IV.....	147
ANNEXE V.....	148
ANNEXE VI.....	150
ANNEXE VII.....	152
ANNEXE VIII.....	153
ANNEXE IX.....	154
ANNEXE X.....	155
ANNEXE XI.....	157
ANNEXE XII.....	158
ANNEXE XIII.....	160
ANNEXE XIV.....	161
ANNEXE XV.....	162
ANNEXE XVI.....	164
ANNEXE XVII.....	166
ANNEXE XVIII.....	167
ANNEXE XIX.....	169
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	170



## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1.</b> Objectifs principaux de l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society. ....	24
<b>Tableau 2.</b> Model selection for the influence of large-scale and local-scale weather conditions, proxies of vegetation productivity, and insect harassment, on the spring body condition of the Porcupine Caribou Herd, during 2000-2010. ....	49
<b>Tableau 3.</b> Model selection for the influence of large-scale and local-scale weather conditions, proxies of vegetation productivity, and insect harassment, on the fall body condition of the Porcupine Caribou Herd, during 2000-2010. ....	52
<b>Tableau 4.</b> Median, interquartile range (IQR) and sample size (n) for responses to a web survey conducted in 2017 about social capital within the Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society. Responses indicated a level of agreement with statements along a 5-point scale: 1 = not at all, 2 = no, 3 = undecided, 4 = yes, 5 = yes, definitively. ....	102
<b>Tableau 5.</b> Median and interquartile range (IQR) for responses to a web survey conducted in 2017 about the contributions of the Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society regarding the inclusion of local knowledge in environmental management processes and learning about ecosystems and ecological issues. A comparison between members most active at the local scale (L) and members most active in regional and national organizations (R) is also presented. Responses indicated a level of agreement with statements along a 5-point scale: 1 = not at all, 2 = no, 3 = undecided, 4 = yes, 5 = yes, definitively. Significant differences (Wilcoxon rank sum test) between answers of local and regional groups of respondents are in bold. ....	104

## LISTE DES FIGURES

- Figure 1.** Différents angles par lesquels cette thèse aborde le socio-écosystème humains-Rangifer. Nous considérons le socio-écosystème humains-*Rangifer* comme un système où les aspects sociaux et écologiques d'un système sont interreliés..... 20
- Figure 2.** Aire annuelle de répartition du troupeau de caribous migrateurs de la rivière Porcupine, et localisation des villages Gwich'in et Inuvialuit qui y sont associés, au Yukon et dans les Territoires du Nord-Ouest (Canada) ainsi qu'en Alaska (USA). Les communautés identifiées sur la carte font toutes partie de l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society. .... 22
- Figure 3.** Range of the Porcupine caribou herd (top), and annual range use, reproductive cycle, and environmental factors affecting body condition of migratory caribou (bottom). During fall, winter, and early spring (blue), ice and snow impact body condition through their effects on thermoregulation, locomotion, and access to forage. During late spring and summer (green), vegetation productivity and insect harassment impact body condition through energy availability and expenditures, respectively. .... 39
- Figure 4.** Changes in the average body condition of caribou from the Porcupine caribou herd in Alaska (USA) and the Yukon and Northwest Territories (Canada) between 2000-2010 during spring and fall. .... 47
- Figure 5.** Relationship between weather conditions (including a proxy of insect harassment) occurring on the winter and spring ranges of the Porcupine caribou herd and the probability for local experts to consider caribou as being in excellent, average or poor condition during spring in the Yukon and Northwest Territories (Canada), and Alaska (USA) during 2000-2010. Panels **a-c** show the cumulative probabilities (proportion) for experts to perceive caribou as being in excellent body condition (blue), average body condition (green) or in poor condition (grey) in relation to the insect harassment index (**a**), cumulative snow depth on the spring range, melt date and temperature (**b**) and variation in snow depth and cumulative snow depth on the winter range (**c**)..... 50

**Figure 6.** Relationship between weather conditions occurring on the winter and spring ranges of the Porcupine caribou herd and the probability for local experts to consider caribou as being in excellent, average or poor condition during fall in the Yukon and Northwest Territories (Canada), and Alaska (USA) during 2000-2010. Panels **a-c** show the cumulative probabilities (proportion) for experts to perceive caribou as being in excellent body condition (blue), average body condition (green) or in poor condition (grey) in relation to number of days with freeze-thaw events over the winter range and quantity of ground ice (mm, **a**), cumulative snow depth on the spring range, melt date and temperature (**b**), variation in snow depth and cumulative snow depth on the winter range (**c**) and cumulative growing degree-days above 5°C in May (GDD, **d**). .....53

**Figure 7.** Relationships between climate, biodiversity, and human well-being in the human-caribou system. Hypothesized causal relationships between climate, caribou distribution, hunters' perceptions of caribou availability, hunting activities, and meeting needs. Climate is expected to influence hunter's perceptions of caribou availability both directly, through interpretations of how climate impacts caribou and access to them (**a**), and indirectly, through its influence on caribou distribution (**b**). Climate, through its effect on hunter's perceptions, can have indirect consequences on hunting activities (**c**). Climate may also directly affect hunting activities (e.g. impeding travel; **d**). Through these direct and indirect effects, climate can indirectly impact hunter's capacity to meet their needs in caribou, thus impacting their well-being (**e**). Green circles: data available through meteorological instruments and satellite collars (scientific knowledge). Blue circles: data available from interviews with hunters (indigenous knowledge). Caribou drawings: Late Elder Cornelius Nutarak Sr. ....67

**Figure 8.** Path diagram of the relationship between climate, time (years), caribou, and indigenous hunters. Final model for how the capacity of hunters to meet their needs in caribou during fall is directly and indirectly affected by climate and time (model fit:  $C = 27.2$ ,  $k = 28$ ,  $P = 0.5$ ). Each line represents a direct path, with black/red solid lines indicating good evidence of a positive/negative effect (95% confidence interval, CI, excludes 0), and the grey dotted line indicating lack of evidence for a clear relationship. Parameter estimates (path coefficients) are given with their associated 95% CIs, and are presented as odds ratios (OR) for the ordinal and binary response variables (in blue). All continuous variables (in green) were standardized, meaning parameters are standardized and can be compared to assess their relative influence (Annexe XIII). Green: data generated through meteorological instruments and satellite collars. Blue: data generated through interviews with hunters. Letters inserted in arrows identify relationships displayed in Figure 9. ....69

**Figure 9.** Effects of climate and time (years) on indigenous hunters' perceptions, hunting activities, and capacity to meet needs in caribou during fall. Panels **a-d** show the cumulative probabilities (proportion) for hunters to perceive caribou as being close (blue), far (green), or not available (grey), in relation to snow depth, date of snow arrival, and temperature (**a**), number of days with rain on snow and quantity of freezing rain (**b**), number of days with freeze-thaw events and quantity of ground ice (**c**), and years (**d**). For these four panels, an increase in the size of a coloured area represents an increase in proportion. Panels **e-f** show the effects of time (years) on the probabilities for indigenous hunter to go hunting (**e**), and to meeting their needs in caribou during the fall (**f**). Solid lines represent the estimated probability and coloured zones the 95% confidence intervals (CI), according to a specific class of perceived caribou availability. Panel **g** shows the relationships between hunters' perception of caribou availability and the probability to meet their needs in caribou depending on whether or not they went hunting. Each dot represents the estimated probability and error bars represent the 95% CIs. .... 71

**Figure 10.** The area covered by the Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society encompasses the annual range of the Porcupine caribou herd and adjacent marine and coastal areas. All communities located on the map have been involved in the Society. These communities include Inupiat (Kaktovik), Gwich'in (Arctic Village, Old Crow, Fort McPherson, Tsiigehtchic, Inuvik and Aklavik) and Inuvialuit (Aklavik, Inuvik and Tuktoyaktuk) cultural groups. Inuvik and Aklavik include both Inuvialuit and Gwich'in cultural groups and these have been involved separately in the Society. .... 93

**Figure 11.** The membership of the Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society comprises individuals and organizations operating at various geographical and jurisdictional scales. The Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society is a bridging organization which facilitates collaboration across scales and promotes the co-production of local and scientific knowledge. .... 95

**Figure 12.** Agencement des principaux résultats des chapitres de la thèse. Les rectangles présentent, pour chaque chapitre, le titre succinct (gras) et les principaux résultats. Les flèches indiquent que la surveillance environnementale communautaire peut contribuer à notre compréhension des différents aspects (social, écologique, socio-écologique) du socio-écosystème humains-*Rangifer*. .... 130

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

<b>ABEKS</b>	Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society
<b>AIC</b>	Akaike Information Criterion
<b>AO</b>	Arctic Oscillation
<b>AOw</b>	Arctic Oscillation in winter (janvier à mars)
<b>CARMA</b>	CircumArctic Rangifer Monitoring and Assessment.
<b>CBM</b>	Community-based Monitoring
<b>CI</b>	Confidence Interval
<b>CLMM</b>	Cumulative Link Mixed Models
<b>GDD</b>	Growing Degree Days
<b>GIEC</b>	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
<b>GLMM</b>	Generalized Linear Mixed Models
<b>IHI</b>	Insect Harassment Index
<b>ILK</b>	Indigenous and Local Knowledge
<b>IPBES</b>	Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change.
<b>MERRA</b>	Modern Era Retrospective Analysis for Research and Applications project

<b>NASA</b>	National Aeronautics and Space Administration
<b>OECD</b>	The Organisation for Economic Co-operation and Development
<b>PC</b>	Principal Component
<b>PCA</b>	Principal Component Analysis
<b>PCH</b>	Porcupine Caribou Herd
<b>PCMB</b>	Porcupine Caribou Management Board
<b>PCTC</b>	Porcupine Caribou Technical Committee
<b>SEC</b>	Surveillance environnementale communautaire
<b>SEM</b>	Structural Equation Modelling
<b>SES</b>	Social-Ecological System
<b>SIG</b>	Système d'information géographique

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

### CONTEXTE GÉNÉRAL

Depuis des millénaires, *Homo sapiens* (L. 1758) forge sa perception du monde et adapte ses comportements selon les observations qu'il fait de son environnement. Des peintures rupestres de la grotte de Lascaux, l'on apprend que dès le Paléolithique, l'homme de Cro-Magnon avait développé une relation spirituelle envers les espèces qu'il côtoyait, et une conception précise de leur distribution (d'Huy 2011). Puis au fil du temps, la civilisation humaine a développé une grande diversité de cultures aux dimensions matérielle et spirituelle, chacune influencée par les systèmes géophysiques et écologiques environnants.

Ainsi, l'Histoire a évolué de manière bien distincte pour les différents peuples de la planète. À l'aube du vingtième siècle, les Inuits du Nord de la Terre de Baffin occupaient leur territoire d'une manière assez similaire à celle de leurs ancêtres, qui depuis 3000 ans avaient chassé phoques et baleines en ces régions glacées (Mary-Rousselière 1984-1985; McGhee 2006). Leur mythologie et leur spiritualité, bien qu'influencées par les missionnaires, étaient encore imprégnées de *Sedna* et *Qallupilluk*<sup>1</sup>(Boas 1877; Qiqiktani Inuit Association 2017), et leur vie et survie étroitement liées aux écosystèmes arctiques. Pendant ce temps dans les sociétés occidentales, on pensait à ériger les premiers gratte-ciels, et l'on élaborait un mode de vie qui allait tranquillement affaiblir notre lien immédiat avec la nature.

---

<sup>1</sup> *Sedna* est considérée comme la Déesse de la mer, alors que les *Qallupilluit* sont des créatures marines qui enlèvent les enfants en apparaissant par les fissures dans la glace de mer.

## **Retour vers le futur : gestion de l'Anthropocène et connaissances autochtones**

Depuis le début du vingtième siècle, les humains ont modifié les écosystèmes de la Terre avec une ampleur sans précédent (Millenium Ecosystem Assessment 2005), marquant une nouvelle ère géologique dument nommée Anthropocène (Crutzen & Steffen 2003). Les grands changements systémiques dont sont responsables les humains sont en grande partie dus au fait que les société modernes exploitent les ressources naturelles avec une intensité jusqu'alors inégalée (Chapin III *et al.* 2010). D'une part, l'exploitation massive des ressources naturelles a contribué à accroître le développement économique et le bien-être humain (Millenium Ecosystem Assessment 2005). En contrepartie, la diminution de la biodiversité à l'échelle planétaire a rendu les écosystèmes plus vulnérables aux changements globaux, avec pour conséquence une réduction des bénéfices que les humains en retirent (Chapin III *et al.* 2010; Stuart Chapin III *et al.* 2000).

La trajectoire actuelle vers plusieurs culs-de-sac socio-écologiques (Berkes *et al.* 2003) requiert un profond changement de mentalité quant à la relation que les humains entretiennent avec l'environnement (Millenium Ecosystem Assessment 2005). Pour modifier les paradigmes actuels et favoriser la résilience et la capacité d'adaptation des socio-écosystèmes face aux changements globaux, les humains doivent ainsi faire appel à toutes les sources de connaissances disponibles (Berkes 1999; Berkes *et al.* 2003; Tengö *et al.* 2014). Ces connaissances incluent les observations et perspectives découlant de la méthode scientifique, de même que celles découlant d'autres méthodes et provenant par exemple des Peuples autochtones (Berkes *et al.* 2003; Folke *et al.* 2002).

Développées sur de longues périodes d'expérimentation et de coévolution avec l'environnement, les connaissances locales et autochtones constituent en effet des savoirs détaillés et ont la capacité d'offrir des perspectives alternatives sur la gestion des écosystèmes (Berkes 1999). Combinées aux connaissances provenant des sciences sociales et naturelles, elles peuvent offrir de nouvelles solutions de gouvernance aux problèmes environnementaux (Nakashima *et al.* 2012; Rathwell *et al.* 2015; Reid *et al.* 2006; Tengö *et al.* 2014). Dans



certaines régions du monde par ailleurs, les seules connaissances disponibles proviennent des utilisateurs locaux des ressources naturelles (Tengö *et al.* 2014). Les systèmes de gestion en place ne peuvent se permettre d'ignorer ces connaissances.

C'est en 1987 que la Commission mondiale pour l'environnement et le développement reconnaissait pour la première fois, dans sa publication phare « Notre avenir à tous », la nécessité d'impliquer les Peuples autochtones dans la gestion environnementale (World Commission on Environment and Development 1987). Puis, en 1993, les Nations Unies réitéraient cette nécessité en signant la Convention sur la biodiversité à l'intérieure de laquelle on stipulait que :

Chaque Partie contractante, dans la mesure du possible et selon qu'il conviendra [...] sous réserve des dispositions de sa législation nationale, respecte, préserve et maintient les connaissances, innovations et pratiques des communautés autochtones et locales qui incarnent des modes de vie traditionnels présentant un intérêt pour la conservation et l'utilisation durable de la diversité biologique et en favorise l'application sur une plus grande échelle, avec l'accord et la participation des dépositaires de ces connaissances [ ... ] (Nations Unies 1992, article 8, p.7).

Depuis le début des années 2000, ce sont les initiatives internationales en lien avec la gouvernance des changements globaux, telles le Millennium Ecosystem Assessment (MEA), le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et la Plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES), qui reconnaissent la nécessité d'incorporer les connaissances locales et autochtones dans leurs évaluations (Nakashima *et al.* 2012; Turnhout *et al.* 2012). Les engagements de l'IPBES (créée en 2012) à cet égard se définissent comme suit :

« Recognize and respect the contribution of indigenous and local knowledge to the conservation and sustainable use of biodiversity and ecosystems » (United Nations Environment Programme 2012, Appendix 1, para. 2[d]).

« Explore ways and means to bring different knowledge systems, including indigenous knowledge systems, into the science-policy interface » (United Nations Environment Programme 2012, Appendix 1, para. 15[g]).

Depuis les années 1990, l'intérêt des scientifiques envers les connaissances locales et autochtones s'est accru rapidement. On a ainsi vu se multiplier le nombre de publications scientifiques exposant les mérites de ces connaissances et les avantages de les considérer dans la recherche environnementale. Les connaissances locales et autochtones ont ainsi contribué à l'étude de l'écologie des populations animales (Gagnon & Berteaux 2009; Lyver *et al.* 1999; Mallory *et al.* 2003; Moller *et al.* 2004), de la gestion des ressources naturelles (Fernandez-Gimenez 2000; Gadgil *et al.* 2003; Gilchrist *et al.* 2005; Kendrick 2003; Zamparo 1996) et des changements environnementaux (Chapin III *et al.* 2004; Fox 2002; Krupnik & Jolly 2002; Laidler 2006; Riedlinger & Berkes 2001). Ceci dit, de nombreuses publications ont aussi fait état des limites de ces connaissances et des difficultés de les combiner de manière concrète avec les connaissances scientifiques, en leur donnant un poids égal et en respectant leurs différences inhérentes (Mauro & Hardison 2000; Nadasdy 1999; Reid *et al.* 2006). Il subsiste encore effectivement de nombreuses barrières à une meilleure harmonisation de ces connaissances au sein de la recherche et de la gestion environnementale. En conséquence, les organisations telle l'IPBES ont grand besoin d'innover afin de « développer des mécanismes fonctionnels permettant de créer des synergies entre les différents systèmes de connaissances de manière légitime, transparente et constructive »<sup>2</sup> (Tengö *et al.* 2014).

### **Barrières à l'établissement de ponts entre connaissances locales et scientifiques**

Qui s'intéresse aux connaissances locales et autochtones est premièrement confronté à une panoplie de termes connexes tels les *connaissances écologiques traditionnelles*, les *connaissances traditionnelles*, les *connaissances locales*, ou les *connaissances autochtones*

---

<sup>2</sup> Citation originale: « to develop functioning mechanisms for legitimate, transparent, and constructive ways of creating synergies across knowledge systems » (Tengö *et al.* 2014, p. 580).

(Berkes 1999; Gilchrist *et al.* 2005; Nakashima & Roué 2002). Une définition largement acceptée décrit les *connaissances écologiques traditionnelles* comme :

un ensemble de connaissances, de pratiques et de croyances, évoluant par processus adaptatifs et transmis de générations en générations par voies culturelles, et traitant de la relation des êtres vivants (incluant les humains) entre eux et leur environnement <sup>3</sup> (Berkes 1999, p.8).

Comme toutes connaissances basées sur des expériences vécues, les connaissances écologiques traditionnelles sont à la fois dynamiques et adaptatives, tout en étant fondées sur une accumulation d'observations (Arctic Council 2015). Elles peuvent aussi inclure des perspectives spirituelles (Kliskey *et al.* 2009; Lynch & Hammer 2013). Les *connaissances traditionnelles* ont une définition similaire aux connaissances écologiques traditionnelles, mais font référence à un ensemble plus vaste de connaissances s'appliquant tant aux phénomènes écologiques, que physiques, culturels et linguistiques (Arctic Council 2015).

Les *connaissances locales*, elles, réfèrent aux connaissances détenues par les membres d'une communauté, souvent des utilisateurs des ressources environnantes (Johnson *et al.* 2015), tels des chasseurs, des pêcheurs ou des naturalistes. Par comparaison aux connaissances écologiques traditionnelles, les connaissances locales ne sont pas associées aux notions de croyance et de transmission intergénérationnelle (Kliskey *et al.* 2009). Les connaissances locales font plutôt référence à un savoir basé sur des observations récentes, accumulées au cours de la vie d'un individu (Gilchrist *et al.* 2005). Enfin, *connaissances autochtones* est un terme plus général qui fait référence aux connaissances écologiques traditionnelles, connaissances traditionnelles et connaissances locales provenant des membres de communautés autochtones (Berkes 1999). Dans cette étude, nous utilisons les termes *connaissances locales* et *connaissances locales autochtones* parce que les

---

<sup>3</sup> Citation originale: « cumulative body of knowledge, practice, and belief, evolving by adaptive processes and handed down through generations by cultural transmission, about the relationship of living beings (including humans) with one another and with their environment » (Berkes, 1999, p. 8).

connaissances étudiées sont basées sur des observations récentes et factuelles provenant de membres de communautés autochtones.

Outre cette complexité sémantique, la construction de ponts entre la science et les connaissances locales présente en elle-même son lot de défis. Selon Reid et al. (2006), ces défis se regroupent sous deux thèmes principaux et inter-reliés, que sont les notions d'échelle et d'épistémologie. La notion d'échelle est omniprésente lorsqu'il est question d'établir des ponts entre différents types de connaissances (Reid *et al.* 2006). Les connaissances scientifiques et locales sont, par exemple, souvent basées sur des observations effectuées à des échelles spatio-temporelles distinctes (Gagnon & Berteaux 2009; Reid *et al.* 2006). Ces différences peuvent être avantageuses, car elles offrent un grand potentiel de complémentarité entre les observations (Gagnon & Berteaux 2009; Tengö *et al.* 2014). Malgré cet avantage, les connaissances locales, de par leur étiquette, sont encore peu représentées dans les processus décisionnels à large échelle (Conrad & Hilchey 2011; Reid *et al.* 2006). À l'inverse, les décisions prises à large échelle, basées sur les connaissances scientifiques, trouvent parfois peu d'écho à l'échelle locale. La théorie des systèmes complexes montre que tout système (écologique, socio-écologique) est imbriqué politiquement, économiquement, écologiquement à l'intérieur de systèmes complexes plus larges, et que tous agissent comme des vases communicants (Berkes 2006; Holling & Gunderson 2002). À cet égard, un des grands défis auquel fait face la recherche sur les connaissances locales est de développer des moyens pour colliger, synthétiser et amalgamer ces connaissances de manière à ce qu'elles transcendent l'échelle décisionnelle locale (Berkes 2006).

Moins étudiée que la notion d'échelles (Rathwell *et al.* 2015), l'épistémologie des connaissances serait la source plus fondamentale des barrières à l'établissement de ponts en la science et les connaissances locales (Reid *et al.* 2006). L'épistémologie, dans le monde anglo-saxon, réfère à la « théorie sur la nature et les fondements des connaissances,

particulièrement en lien avec leurs limites et validité »<sup>4</sup> (Merriam-Webster's collegiate dictionary 1998, p. 613). « L'épistémologie aborde des sujets en lien avec la nature des connaissances, la justification des croyances et la rationalité »<sup>5</sup> (Godfrey-Smith 2003, p.235). Elle s'attarde donc à des questions essentielles telles que:

- Que constitue un savoir légitime?
- Quel type de connaissances est le plus pertinent pour gérer les questions en lien avec les services écosystémiques et le bien-être humain?
- Comment et à quel niveau l'amalgame des connaissances est-il possible et désirable?

(Traduit de Berkes *et al.* 2006, p.316)

L'établissement de ponts entre les connaissances scientifiques et locales est ainsi truffé de difficultés qui découlent des différences inhérentes à chaque type de connaissances. Les barrières qui émergent de ces différences fondamentales incluent, par exemple, le manque de langage commun entre scientifiques et communautés locales, le manque de respect et de confiance envers différentes observations et croyances, le manque de moyens universellement acceptés permettant de valider les connaissances, la centralisation des prises de décisions et l'inégalité du pouvoir entre la culture dominante et les cultures marginales (Nadasdy 1999; Rathwell *et al.* 2015; Reid *et al.* 2006).

Ces barrières sont si importantes que certains chercheurs pensent qu'il est simplement indésirable de vouloir rapprocher les connaissances autochtones et les connaissances scientifiques, puisque cette entreprise ne contribue qu'à perpétrer la marginalisation des Peuples autochtones (Nadasdy 1999, 2003). Selon leurs arguments, les organismes de cogestion actuels, par exemple, ne remettraient pas en cause les dimensions politiques sous-

---

<sup>4</sup> Citation originale : « theory of the nature and grounds of knowledge, especially with reference to its limits and validity » (Merriam-Webster's collegiate dictionary 1998, p. 613).

<sup>5</sup> Citation originale : « Epistemology deals with questions involving the nature of knowledge, the justification of beliefs, and rationality » (Godfrey-Smith 2003, p.295).

jaçentes à leur structure. Dès lors, l'intégration des connaissances écologiques traditionnelles au sein de ces organismes ne ferait que perpétuer les relations de pouvoir inégales entre les Autochtones et l'État (Nadasdy 2003), un point de vue partagé par certains représentants de communautés autochtones (Indigenous Knowledge and Peoples 2004). Néanmoins, une proportion importante d'arguments subsiste en faveur de la collecte de tous les types de connaissances afin de favoriser une gestion environnementale plus éclairée et démocratique, en autant que les mécanismes mis en place prennent en compte la problématique des pouvoirs (Rathwell *et al.* 2015; Tengö *et al.* 2014).

### **Co-production de connaissances : une piste de solutions**

Les approches collaboratives au sein desquelles scientifiques et membres des communautés locales sont conjointement impliqués font l'objet d'un grand intérêt depuis les années 2000, particulièrement en Amérique du Nord (Conrad & Hilchey 2011). Puisqu'elles intègrent différentes sources d'observations et de perspectives, ces initiatives sont considérées comme des approches de co-production de connaissances (Briley *et al.* 2015; Kofinas *et al.* 2002). Selon ces approches, les connaissances scientifiques et locales, malgré leurs divergences, devraient être vues comme différentes sources d'évidences. De même, une grande multiplicité d'évidences contribuerait à une meilleure compréhension des socio-écosystèmes actuels (Tengö *et al.* 2014; Thaman *et al.* 2013). Les programmes de surveillance environnementale communautaire sont des exemples concrets par lesquels la co-production de connaissances peut être mise en place. Dans cette optique, la surveillance environnementale communautaire est définie comme :

Un processus par lequel les citoyens intéressés, les organismes gouvernementaux, l'industrie, les établissements d'enseignement, les groupes communautaires et les institutions locales collaborent à la surveillance de préoccupations communes, au suivi de ces questions ainsi qu'à la prise de mesures d'intervention (Environment Canada 2003, p.4).

Toutes les initiatives de surveillance environnementale communautaire ne présentent pas le même niveau d'implication des acteurs locaux (Gofman 2010). Dans les programmes les plus démocratiques, les membres des communautés locales sont impliqués dans tous les aspects de son organisation, de l'élaboration des objectifs à la mise en place des méthodes et jusqu'à l'interprétation, le partage et l'application des résultats (Danielsen *et al.* 2010). Des études démontrent en fait que le succès des initiatives de surveillance environnementale communautaire dépend largement du niveau d'implication des communautés (Danielsen *et al.* 2014).

La surveillance environnementale communautaire est vue comme une méthode pouvant servir à faire tomber certaines des barrières mentionnées ci-dessus (Danielsen *et al.* 2007; Danielsen *et al.* 2014). Les bénéfices documentés de cette méthode incluent l'augmentation du pouvoir décisionnel des acteurs locaux, la résolution de conflits et l'amélioration du niveau de respect et des liens de confiance entre les différentes parties impliquées (Conrad & Daoust 2008; Fernandez-Gimenez *et al.* 2008). À l'échelle locale, une grande implication des membres des communautés conduirait à des changements de politiques plus rapides que lorsque le suivi est fait par des scientifiques uniquement (Danielsen *et al.* 2010). Finalement, la surveillance environnementale communautaire contribuerait à rendre la science environnementale plus accessible au public et améliorerait nos connaissances générales sur les écosystèmes (Conrad & Hilchey 2011). Cependant, la littérature manque d'exemples concrets de programmes de surveillance environnementale communautaire dont les données ont été utilisées par des instances décisionnelles (Conrad & Hilchey 2011).

### ***Rangifer* : un ongulé emblématique**

*Rangifer tarandus* (L., 1758) est une espèce d'ongulé appartenant à la famille des Cervidés et qui regroupe tous les caribous et les rennes sauvages ou semi-domestiques de la planète (Russell *et al.* 2015). *Rangifer tarandus* a une distribution circumpolaire et est considéré comme une espèce clé dans les écosystèmes arctiques et subarctiques. En 2010, on

estimait à environ 3.8 millions le nombre total de caribous et rennes sauvage, et à 2 millions le nombre de rennes semi-domestiques (Barry *et al.* 2010). Puisque *Rangifer tarandus* est la seule espèce du genre *Rangifer*, nous utilisons dans cette thèse le terme *Rangifer* pour faire référence à tous les caribous et rennes (même espèce).

En Amérique du Nord comme en Eurasie, *Rangifer* est au centre de la culture de plusieurs peuples autochtones. Les caribous et les rennes ont été exploités par les humains comme nourriture et autres commodités depuis la préhistoire (Kofinas *et al.* 2000) et la diversité des systèmes humains-*Rangifer* qui subsistent à travers le Nord est impressionnante (Forbes 2008a). En Amérique du Nord, ces systèmes sont dominés par des cultures associées à la chasse aux caribous sauvages (Kendrick *et al.* 2005; Kendrick & Manseau 2008), alors qu'en Eurasie coexistent des cultures autochtones centrées sur la chasse et l'élevage de troupeaux de rennes (CARMA 2017a; Forbes *et al.* 2009; Williams 2003).

Écologiquement parlant, *Rangifer tarandus* est une espèce complexe (Forbes 2008b; Russell *et al.* 2015). Elle occupe des habitats aussi différents que la forêt boréale et les déserts polaires (Festa-Bianchet *et al.* 2011). Certaines sous-espèces, telles le caribou des bois et le caribou de Svalbard (e.g. *Rangifer tarandus caribou* et *Rangifer tarandus platyrhynchus*) ont des aires de répartition assez circonscrites (Albon *et al.* 2017; Festa-Bianchet *et al.* 2011), alors que le caribou migrateur (*Rangifer tarandus groenlandicus* et *Rangifer tarandus grantii*) parcourt des centaines, voire milliers de kilomètres lors de ses migrations saisonnières (Griffith *et al.* 2002; Le Corre *et al.* 2017; Taillon 2013). Le broutage et le piétinement par le caribou migrateur, dont les populations sont parfois très abondantes, est reconnu comme ayant des effets sur la végétation toundrique (Crête & Huot 1993). *Rangifer* est d'ailleurs considéré comme ayant le potentiel de freiner l'expansion arbustive dans l'Arctique, un phénomène associé au réchauffement climatique (Post & Pedersen 2008). Les populations de caribous migrateurs, par ailleurs, supportent aussi plusieurs populations de prédateurs (Mowat & Heard 2006; Musiani *et al.* 2007). Une excellente compréhension des facteurs influençant les populations de *Rangifer* est donc nécessaire considérant l'importance écologique et culturelle de cette espèce (CARMA 2017b; Uboni *et al.* 2016).



## **Facteurs influençant les populations de caribous migrants**

Les populations de caribous migrants subissent d'impressionnantes fluctuations d'abondance (Gunn *et al.* 2009; Morneau & Payette 1998, 2000; Zalatan *et al.* 2006). Ces cycles d'abondance ont une durée typique de 40 à 60 ans (Gunn 2003) et seraient dus à des facteurs dépendants et indépendants de la densité (Gaillard *et al.* 2000; Gaillard *et al.* 1998). Par exemple, la disponibilité des ressources végétales durant et après la mise-bas jouerait un rôle clé dans la dynamique des populations de certains troupeaux (Crête & Huot 1993; Messier *et al.* 1988). Une forte densité de population conduirait à une dégradation des ressources végétales en été et, en conséquence, à une diminution de la fécondité des femelles et de la survie des faons (Couturier *et al.* 1990; Crête & Huot 1993; Manseau *et al.* 1996). Chez certaines populations, ce serait plutôt une dégradation des ressources hivernales, à forte densité, qui augmenterait la mortalité des juvéniles (Skogland 1985). Dans les deux cas, ces relations pourraient être affectées par les variations climatiques à grande échelle, puisque le climat influence la disponibilité, la quantité et la qualité des ressources végétales (Griffith *et al.* 2002; Lenart *et al.* 2002; Post & Forchhammer 2002).

Le climat influencerait aussi les populations de caribous en faisant varier les coûts de déplacement et de thermorégulation des individus. Durant l'hiver et le printemps, l'épaisseur de la neige et les épisodes d'englacement (ex. pluie verglaçante) augmenteraient les coûts de déplacement et diminueraient l'accès aux ressources alimentaires, occasionnant une réduction de la survie et de la fécondité (Adams 2005; Fancy & White 1987; Hansen *et al.* 2011; Solberg *et al.* 2001). Durant l'été, le dérangement par les insectes, lui-même modulé par la température, la vitesse du vent et la densité de population, augmenterait les dépenses énergétiques des caribous qui, pour se protéger, adoptent des comportements d'évitement (Griffith *et al.* 2002; Morschel 1999; Russell *et al.* 1993; Weladji *et al.* 2003). Ces dépenses énergétiques diminueraient la survie des faons (Weladji *et al.* 2003). Enfin, la prédation et la chasse ont des effets directs sur les populations, puisqu'elles augmentent les taux de mortalité. Toutefois, leur impact serait plus prononcé à faibles tailles de populations (Adamczewski *et al.* 2009; Ballard *et al.* 1997).

Force est donc de constater que les populations de caribous sont influencées par une combinaison complexe de facteurs (Festa-Bianchet *et al.* 2011). Parce que les troupeaux évoluent au sein de conditions écologiques parfois très différentes, ces facteurs varient en importance d'un troupeau à l'autre (Gunn *et al.* 2009). De plus, les facteurs qui initient la transition entre une forte abondance de caribous et une phase de déclin sont probablement différents des facteurs qui maintiennent le déclin ou qui favorisent la reprise de la croissance des populations (Festa-Bianchet *et al.* 2011). La résilience des caribous face à la diversité et à l'imprévisibilité des facteurs qui les affectent est entre autre attribuable à leur grande mobilité (Gunn *et al.* 2009). Or à l'heure actuelle, les aires d'utilisation des caribous sont soumises à de si grands changements que la résilience des troupeaux est sérieusement mise en jeu (Vors & Boyce 2009).

### **La condition physique : un proxy pour l'étude des populations de caribous**

La condition physique est un outil important pour identifier les facteurs influençant les variations démographiques des troupeaux de caribous. De manière générale, la condition physique réfère à la quantité de réserves énergétiques qu'un individu possède pour soutenir son métabolisme et ses activités journalières et saisonnières (Barboza *et al.* 2009; Schulte-Hostedde *et al.* 2005). Plusieurs études montrent que la condition physique serait le mécanisme principal via lequel les facteurs environnementaux et la densité ont des effets sur les composantes biodémographiques des populations d'ongulés nordiques (ex. survie et succès reproducteur, Albon *et al.* 2017; Pachkowski *et al.* 2013; Simard *et al.* 2010). En effet, la plupart des facteurs dépendants et indépendants de la densité mentionnés ci-haut ont des impacts sur la démographie des populations de caribous via leurs effets sur la condition physique individuelle. En résumé, la condition physique des caribous peut être directement influencée par le climat via les coûts de thermorégulation et de locomotion (Adams 2005; Fancy & White 1987). Elle peut aussi être indirectement influencée par le climat via une modification de la qualité, de la quantité et de l'accès aux ressources alimentaires (Griffith *et al.* 2002; Lenart *et al.* 2002), de même que par l'augmentation des dépenses énergétiques et l'utilisation d'habitats sub-optimaux lors de périodes de fort harcèlement par les insectes

(Griffith *et al.* 2002; Weladji *et al.* 2003). En plus du climat, la densité de la population peut réduire la condition physique des individus en augmentant la compétition pour les ressources (Crête & Huot 1993; Manseau *et al.* 1996).

### **Indices de condition physique**

Plusieurs mesures ou indices peuvent être utilisés pour décrire les variations de condition physique individuelle des caribous, sans qu'un consensus soit établi sur la mesure à privilégier (Taillon 2013). Ces différentes mesures incluent la masse corporelle, la masse musculaire, les mesures de taille corporelle et des indices sur les réserves de gras ou de protéines (Taillon *et al.* 2011). Entre toutes, la masse corporelle est la mesure la plus fréquemment utilisée car elle permet, entre autres, d'évaluer l'effet des variations climatiques annuelles sur la condition des individus (Barboza *et al.* 2009). Taillon *et al.* (2011) ont toutefois démontré que la condition physique des individus serait mieux décrite par un « indice de corpulence départageant les femelles lourdes, longues et rondes avec des réserves protéiques élevées, aux femelles légères, courtes et minces avec de faibles réserves protéiques »<sup>6</sup> (Taillon *et al.* 2011, p. 295).

Cet indice n'est pas étranger à l'évaluation de la condition physique des caribous faite par certains chasseurs autochtones (Lyver & Lutsël K'é dene first nation 2005). Lyver et Gunn (2004) ont en effet démontré que les évaluations qualitatives de la condition physique des caribous, faites par des chasseurs autochtones, étaient significativement reliées aux indices développés par les biologistes. Les chasseurs autochtones ont en effet de grandes connaissances à propos de la condition physique des caribous, puisque cette condition est directement liée à la qualité de la viande consommée et, plus généralement, à la santé du troupeau (Kofinas *et al.* 2003). L'importance des observations liées à la condition physique des caribous se reflète d'ailleurs dans les termes très détaillés que possèdent plusieurs langues autochtones pour en décrire les différents états (Kofinas *et al.* 2003).

---

<sup>6</sup> Citation originale : « body bulkiness index opposing heavy and long/round-bodied females with high body protein reserves to light and short/slender-bodied females with low body protein reserves » (Taillon *et al.* 2011, p. 295).

## PROBLÉMATIQUE

### Connaissances autochtones et recherche dans l'Arctique canadien

Dans l'Arctique canadien, comme ailleurs dans le monde, les études sur les connaissances locales ou écologiques traditionnelles des Peuples autochtones se sont grandement multipliées. Cette tendance est due à un intérêt accru de la part des chercheurs envers les connaissances écologiques traditionnelles, lui-même influencé par un environnement politique en évolution. En effet, des ententes territoriales ont changé les codes de conduite pour la recherche dans le Nord (Gearheard & Shirley 2007). À titre d'exemple, les connaissances écologiques traditionnelles inuites (Inuit Qaujimajatuqangit [IQ]) font maintenant partie des principes directeurs du gouvernement du Nunavut (Wenzel 2004), et la consultation et la communication avec les communautés sont des prérequis pour l'obtention d'un permis de recherche dans ce territoire (Gearheard & Shirley 2007; Gilchrist & Mallory 2007; ITK & NRI 2007).

Un changement de paradigme a eu lieu dans l'Arctique canadien et une transition a été amorcée vers une plus grande implication des Autochtones au sein des programmes de recherche (Gearheard & Shirley 2007). Plusieurs études conduites dans le Nord se sont intéressées aux connaissances écologiques traditionnelles en lien avec l'écologie des espèces arctiques (Gagnon & Berteaux 2009; Gilchrist *et al.* 2006; Huntington *et al.* 2004; Mallory *et al.* 2006; Mallory *et al.* 2003), l'adaptation aux changements climatiques (Ford *et al.* 2016; Ford *et al.* 2006b; Pearce *et al.* 2015), et les relations entre les humains et la banquise (Gearheard *et al.* 2013; Laidler 2006). Toutefois, une étude récemment menée par Brunet *et al.* (2014) montre que le niveau d'implication des membres des communautés autochtones au sein de la recherche demeure limité, et qu'il varie énormément selon les disciplines.

À l'instar de la tendance observée en Amérique du Nord, la surveillance environnementale communautaire est un aspect de la recherche nordique qui reçoit de plus en plus d'appuis de la part des gestionnaires, des scientifiques et des membres des

communautés (Johnson *et al.* 2015). Un tel intérêt découle du fait que ce type d'organisation prend souvent mieux en compte les priorités de recherche des membres des communautés et qu'il repose sur les compétences et connaissances locales (Johnson *et al.* 2015). Actuellement, la surveillance environnementale communautaire est toutefois loin d'avoir atteint son plein potentiel dans l'Arctique canadien (Johnson *et al.* 2015). Les exemples de surveillance environnementale communautaire y sont encore peu nombreux, et la plupart des programmes ont été mis en place il y a moins de 10 ans (ICC *et al.* 2017). En conséquence, il y a beaucoup à apprendre des retombées, des succès et des limites des rares programmes mis en place depuis relativement longtemps dans le Nord canadien.

### **Les caribous migrants en déclin**

Au cours des dernières décennies, la plupart des troupeaux de caribous migrants ont subi un déclin, et ce à l'échelle circumpolaire (Festa-Bianchet *et al.* 2011; Russell *et al.* 2015; Vors & Boyce 2009). Comme indiqué plus haut, la taille des populations de caribous migrants fluctue grandement (Gunn *et al.* 2009; Morneau & Payette 1998, 2000). Or, le déclin actuel très prononcé de plusieurs hardes soulève des inquiétudes, considérant que les conditions dans lesquelles évoluent les troupeaux ont subi de grands changements au cours des dernières décennies (Festa-Bianchet *et al.* 2011; Vors & Boyce 2009). En effet, le développement industriel s'est accru sur les aires de répartition de la plupart des troupeaux, surtout à cause de l'exploitation minière et pétrolière (Gunn *et al.* 2009; Haskell *et al.* 2006). Or, la tendance des caribous migrants à être fidèles à leurs aires de mise bas les rend plus vulnérables au développement industriel dans ces régions (Boulet *et al.* 2007; Griffith *et al.* 2002). De plus, les changements climatiques, particulièrement prononcés dans l'Arctique (IPCC 2014), peuvent affecter les caribous en modifiant la qualité de la végétation disponible et en augmentant la sévérité et la fréquence des conditions météorologiques réduisant l'accès aux ressources alimentaires (Fauchald *et al.* 2017; Hansen *et al.* 2011).

Depuis l'Année Polaire Internationale de 2007-2008, des gestionnaires de l'environnement, des scientifiques et des membres de communautés autochtones se sont donc

regroupés sous l'égide du réseau CircumArctic Rangifer Monitoring Assessment (CARMA) afin d'agir de manière plus coordonnée pour assurer la conservation de l'espèce (CARMA 2017a; Russell *et al.* 2015). Le mandat de ce regroupement est d'augmenter les connaissances sur l'impact qu'ont les changements globaux sur les systèmes humains-*Rangifer*. La collaboration avec les membres des communautés autochtones, en particulier les chasseurs de caribous, fait d'ailleurs partie des priorités de ce regroupement (CARMA 2017b). À cet égard, le cas du caribou migrateur, particulièrement au Canada, est singulier. En effet, la plupart des grands troupeaux du Canada sont gérés depuis plusieurs années par des organismes de cogestion impliquant les communautés autochtones. De plus, certains troupeaux (ex. troupeau de la rivière Porcupine) sont à l'origine des plus vieux programmes de suivi environnemental communautaire de l'Arctique canadien (Eamer 2006).

Ainsi, l'étude des socio-écosystèmes humains-*Rangifer*, dans le Nord canadien, se situe à la jonction de deux problématiques. D'une part, nous avons un besoin urgent de mieux comprendre les facteurs influençant la démographie des troupeaux de caribous migrants, dans le contexte où la plupart des grands troupeaux sont en déclin, où plusieurs communautés autochtones dépendent du caribou, et où les données scientifiques sont souvent rares. D'autre part, nous avons besoin d'émerger de la rhétorique des vingt dernières années sur les définitions et valeurs des connaissances autochtones, et dont les résultats concrets restent limités. Ainsi, il est essentiel d'apprendre des rares programmes de suivi environnemental communautaire établis depuis longtemps dans l'Arctique canadien quant à leurs contributions ainsi que leurs limites en lien avec 1) notre compréhension des socio-écosystèmes arctiques, 2) la représentation des connaissances autochtones au sein de la gestion environnementale et 3) l'amélioration des liens de confiance entre les gestionnaires, les scientifiques et les membres des communautés. C'est à la lumière de cette double problématique qu'ont été développés les objectifs de cette thèse.

## OBJECTIFS DE LA THÈSE

### Objectif général

Cette thèse est une étude sur les contributions et limites d'un programme à long terme de surveillance environnementale communautaire d'un socio-écosystème humains-*Rangifer*. Plus spécifiquement, cette étude porte sur la co-production de connaissances au sein du programme de surveillance. L'étude cherche à voir si la co-production de connaissances au sein du programme de surveillance permet 1) d'explorer de nouvelles méthodes pour combiner les connaissances locales autochtones et les connaissances scientifiques et 2) de mieux comprendre les facteurs climatiques influençant le socio-écosystème humains-*Rangifer* à l'étude. Finalement, cette étude porte sur les retombées sociales du programme de surveillance, et en particulier la construction de liens de confiance entre les membres participant au programme et l'utilisation des connaissances locales autochtones dans la gestion environnementale (Figure 1). De l'objectif général de la thèse découlent les objectifs spécifiques suivants.

### Objectifs spécifiques

Objectif 1 (Chapitre 1): Étudier comment la surveillance environnementale communautaire permet de mieux comprendre les facteurs climatiques modulant la condition physique des caribous.

L'intérêt principal de cet objectif découle de l'urgence de mieux comprendre les facteurs pouvant influencer les populations de caribous, dans un contexte de changements globaux, de diminution de la plupart des troupeaux et de rareté des données scientifiques. Tel que mentionné plus haut, la condition physique individuelle est souvent utilisée dans les recherches scientifiques sur la dynamique des populations animales, car cet indice permet de mieux comprendre les effets des facteurs environnementaux sur les composantes biodémographiques telles la survie et le succès reproducteur (Albon *et al.* 2017; Pachkowski

*et al.* 2013). Le suivi de la condition physique des caribous, au printemps et à l'automne, est par ailleurs une partie importante du programme de surveillance environnementale communautaire étudié. Dans ce programme, les données sur la condition physique des caribous proviennent des observations de chasseurs autochtones. Dans ce contexte, nous voulions évaluer si les informations issues de la surveillance environnementale communautaire permettent d'établir des liens de cause à effet entre des données climatiques recueillies via des méthodes scientifiques et les observations des chasseurs récoltées sur plus d'une décennie.

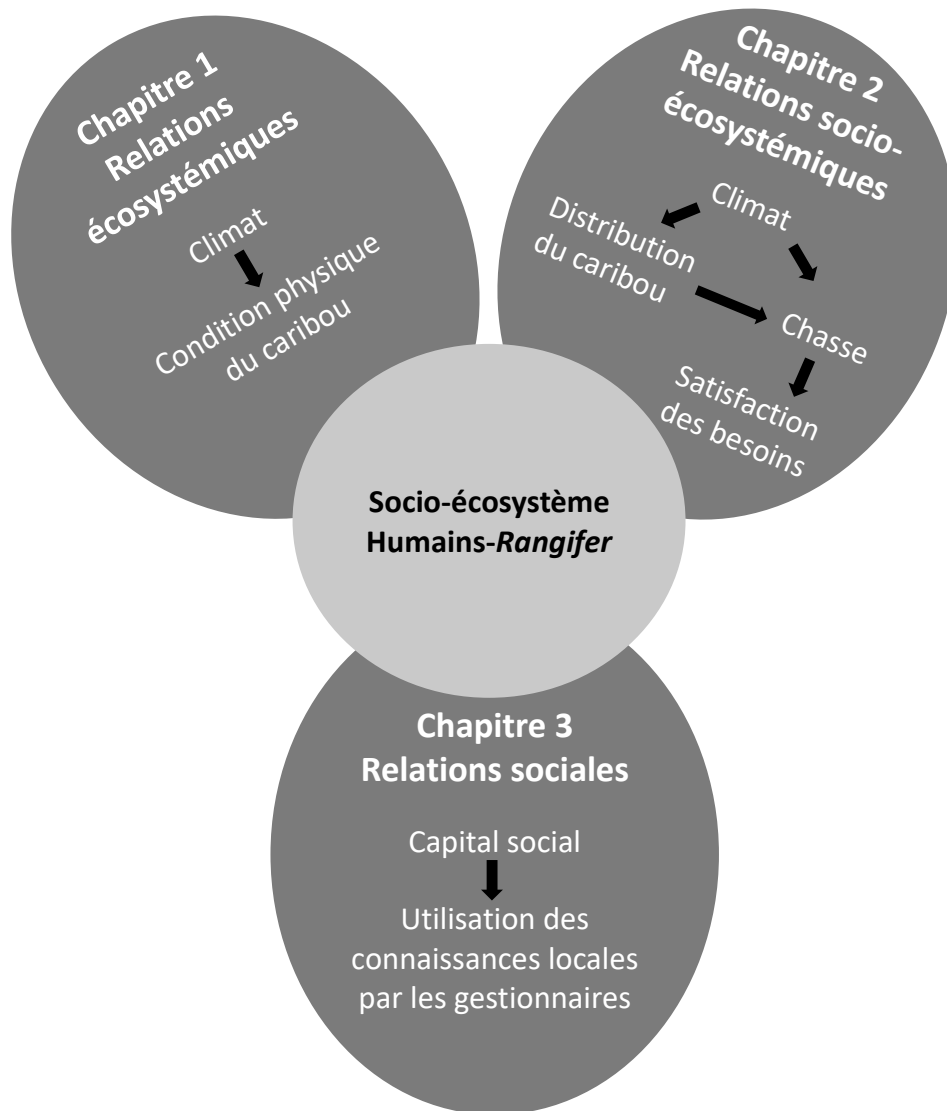
Objectif 2 (Chapitre 2): Étudier comment la surveillance environnementale communautaire permet d'établir des liens de cause à effet entre le climat, la distribution des caribous et la capacité des chasseurs autochtones à chasser et satisfaire leurs besoins en caribou.

Depuis des millénaires, le caribou est au centre de la culture, de la spiritualité et de l'alimentation des peuples autochtones du Nord-Ouest canadien (Bourgeon *et al.* 2017; Kendrick & Lyver 2005). Le programme de surveillance environnementale étudié s'attarde d'ailleurs à la question de la satisfaction des besoins en caribou. La satisfaction des besoins est un concept qui repose sur une évaluation personnelle et subjective. Ce concept n'est donc pas exprimable en termes de quantité de caribous récoltés. Annuellement, des dizaines de personnes sont donc interrogées et rapportent avoir ou non satisfait leurs besoins en caribou. Dans le contexte des changements globaux, cette question est primordiale, puisqu'elle touche à la sécurité alimentaire et au bien-être individuel. Dans ce chapitre, nous avons évalué s'il était possible de mieux comprendre les liens de cause à effet unissant le climat, les caribous et les humains. Plus précisément, nous visons à identifier quels facteurs climatiques ont le plus d'influence sur la capacité des chasseurs autochtones à satisfaire leurs besoins en caribou via leurs effets (directs ou indirects) sur la localisation des caribous, la perception des chasseurs envers la disponibilité des caribous, et enfin les activités de chasse.



Objectif 3 (Chapitre 3): Étudier comment un programme de surveillance environnementale communautaire favorise la construction de capital social entre ses participants et permet une plus grande utilisation des connaissances autochtones dans la gestion environnementale.

Le respect, la réciprocité et la compréhension mutuelle sont des notions que l'on peut regrouper sous le concept de capital social (Arnold & Fernandez-Gimenez 2007). Selon plusieurs études, le capital social serait un prérequis à l'action commune (Ostrom & Ahn 2001) et favoriserait l'établissement de ponts entre les connaissances scientifiques et les connaissances locales (Berkes 2009). En effet, un haut niveau de capital social favoriserait la communication et les échanges respectueux entre les scientifiques, les gestionnaires et les membres des communautés (Fernandez-Gimenez *et al.* 2008; Wagner & Fernandez-Gimenez 2008) ce qui contribuerait à surmonter les barrières susmentionnées et à accroître le niveau d'utilisation des connaissances locales par les gestionnaires de l'environnement (Armitage *et al.* 2011; Berkes 2009). Dans cette optique, nous visions d'abord à quantifier le niveau de capital social au sein des participants au programme de surveillance environnementale communautaire étudié. Ensuite, nous voulions évaluer si le niveau de capital social quantifié pouvait expliquer le niveau d'utilisation des connaissances locales par les gestionnaires de l'environnement gravitant autour du programme de surveillance étudié.



**Figure 1.** Différents angles par lesquels cette thèse aborde le socio-écosystème humains-Rangifer. Nous considérons le socio-écosystème humains-Rangifer comme un système où les aspects sociaux et écologiques d'un système sont interreliés.

## MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

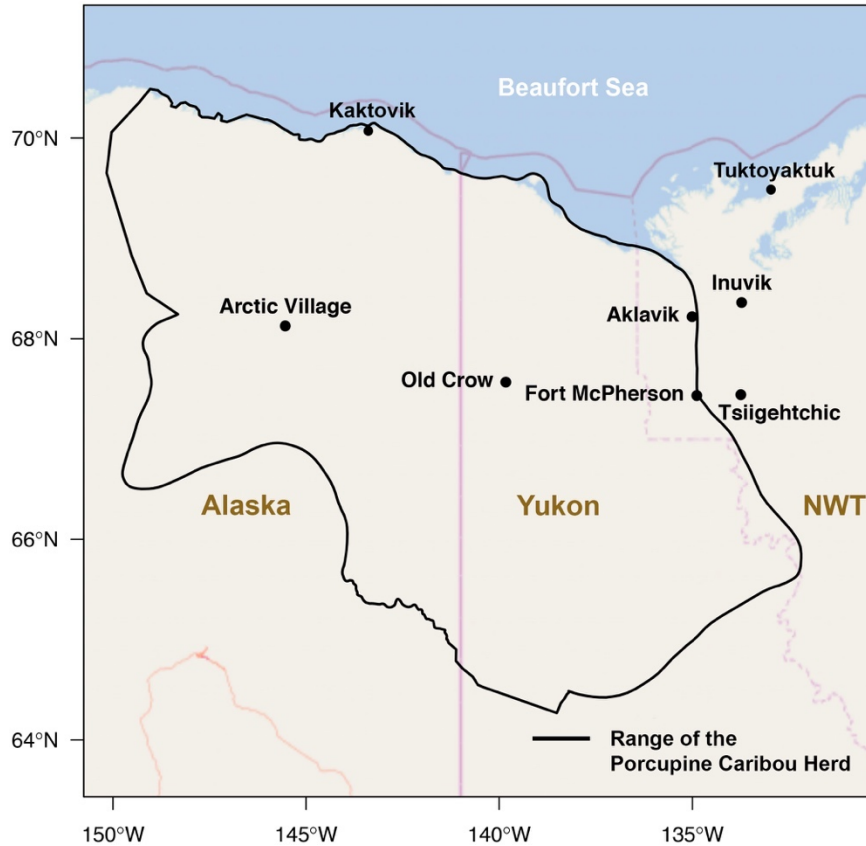
### Modèles et aire d'étude

#### Troupeau de caribous migrants de la rivière Porcupine

Cette étude couvre l'aire de répartition du troupeau de caribous migrants de la rivière Porcupine (Porcupine Caribou Herd), ainsi que le territoire utilisé par les communautés Inuvialuit et Gwich'in qui sont culturellement rattachées à ce troupeau. Le troupeau Porcupine appartient à la sous-espèce de Grant (*Rangifer tarandus grantii*), qui occupe une région de près de 250 000 km<sup>2</sup> située au nord du 64°N et s'étendant jusqu'à la mer de Beaufort (Figure 2). Cette aire de répartition recoupe plusieurs juridictions, incluant le Yukon et les Territoires du Nord-Ouest (Canada), de même que l'Alaska (USA), ce qui lui a valu le nom d'*Arctic Borderlands*.

Durant l'hiver, le troupeau Porcupine utilise typiquement la partie sud de son aire de répartition et occupe les vallées forestières et les plaines du centre du Yukon et de l'ouest de l'Alaska (Russell *et al.* 1993). Au printemps, le troupeau migre vers les plaines côtières du nord du Yukon et de l'Alaska où les femelles mettent bas vers la mi-juin (Griffith *et al.* 2002). Cette aire de mise bas semble caractérisée par une végétation abondante et de bonne qualité, ainsi que par un relativement faible niveau de harcèlement par les insectes (Griffith *et al.* 2002).

À l'instar des autres troupeaux de caribous migrants, le troupeau Porcupine a subi de grandes fluctuations d'abondance au cours des dernières décennies. Durant les années 1970 et 1980, il était en croissance, passant de 102 000 caribous en 1972 à 178 000 en 1989. Puis le troupeau a décliné jusqu'à 123 000 individus en 2001. De 2001 à 2013, le troupeau s'est remis à croître pour atteindre 169 000 individus en 2010 et 197 000 en 2013, date du dernier recensement.



**Figure 2.** Aire annuelle de répartition du troupeau de caribous migrateurs de la rivière Porcupine, et localisation des villages Gwich'in et Inuvialuit qui y sont associés, au Yukon et dans les Territoires du Nord-Ouest (Canada) ainsi qu'en Alaska (USA). Les communautés identifiées sur la carte font toutes partie de l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society.

Plusieurs communautés autochtones sont associées au troupeau Porcupine, ayant évolué en étroite relation avec les caribous de cette région depuis des centaines, voire des milliers d'années (Bourgeon *et al.* 2017; Le Blanc 2015). En effet, l'aire de répartition du troupeau Porcupine se situe dans la partie orientale de l'ancienne Béringie où des fouilles archéologiques indiquent qu'humains et caribous s'y sont côtoyés depuis quelques dizaines de milliers d'années (Bourgeon *et al.* 2017). Aujourd'hui, les communautés Gwich'in ou Inuvialuit de Old Crow, Fort McPherson, Tsiigehtchic, Aklavik, Inuvik, Arctic Village,

Kaktovik et Tuktoyaktok entretiennent toujours une relation étroite avec le troupeau Porcupine. La chasse aux caribous y revêt une grande importance culturelle, sans compter que la viande de caribou représente le principal apport en protéines et en fer dans certaines de ces communautés (Kuhnlein *et al.* 2009; Porcupine Caribou Management Board).

L'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society et son programme de suivi environnemental communautaire

Depuis 1977, le troupeau Porcupine est au centre d'une controverse concernant un possible développement pétrolier au sein de l'Arctic National Wildlife Refuge. Situé en Alaska, ce refuge arctique est la plus grande zone sauvage protégée aux États-Unis (U.S. Fish and Wildlife Service 2017). L'épicentre de la controverse concerne la *zone 1002* du refuge, objet de convoitise du parti républicain américain qui a essayé à 50 reprises de changer le règlement qui le protège afin d'y permettre l'exploration et l'exploitation pétrolière (Cornwall 2017). Or, la *zone 1002* couvre la majorité de l'aire de mise bas du troupeau Porcupine, et un développement dans cette zone pourrait considérablement réduire le taux de survie des faons, et ainsi compromettre le troupeau (Griffith *et al.* 2002). C'est dans ce contexte de controverse et de déclin du troupeau Porcupine dans les années 1990, que les communautés autochtones de la région, en collaboration avec des scientifiques et des gestionnaires de l'environnement, ont fondé l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society en 1994. Établie sous forme de coopérative à but non lucratif, cette société est supervisée par un comité de gestion élu par ses membres lors de chaque rassemblement annuel. Ce comité de gestion comprend des représentants gouvernementaux, des gestionnaires de l'environnement et des membres des communautés autochtones.

En 1994, peu de choses étaient connues au sujet des écosystèmes se trouvant dans l'aire de répartition du troupeau Porcupine. Il semblait donc essentiel d'y faire un suivi environnemental pour documenter les changements qui pourraient y survenir (Eamer 2006; Kofinas *et al.* 2002). D'emblée, l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society stipulait l'importance de la collaboration entre scientifiques et communautés locales pour faire ce suivi (Tableau 1). Un programme de surveillance environnementale basé sur les

connaissances des experts locaux allait d'ailleurs devenir un des aspects les plus importants de cette coopérative.

**Tableau 1.** Objectifs principaux de l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society.

---

### **Principaux objectifs**

---

- Faire le suivi et évaluer les changements dans les écosystèmes se trouvant à l'intérieur de l'aire de répartition du troupeau de caribous de la rivière Porcupine et dans les zones marines et côtières adjacentes.
  - Encourager l'utilisation des études basées sur la science et des études basées sur les connaissances locales et traditionnelles dans le suivi environnemental et la gestion des écosystèmes.
  - Améliorer la communication et promouvoir une meilleure compréhension entre les gouvernements, les communautés autochtones et non-autochtones et les scientifiques en ce qui a trait aux connaissances et à la gestion environnementale.
  - Promouvoir le renforcement des capacités et la formation dans les communautés nordiques dans le contexte des objectifs susmentionnés.
- 

### **Données utilisées pour les analyses**

Suivi environnemental communautaire de l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society

Depuis la fin des années 1990, la coopérative Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society a développé un suivi environnemental communautaire basé sur les observations des membres des communautés autochtones impliquées dans la coopérative. Ce suivi est effectué par des chercheurs communautaires, c'est-à-dire des membres de chaque communauté participante ayant reçu une formation de la part de la coopérative. À l'aide d'un questionnaire, les chercheurs communautaires interrogent annuellement 15-20 experts locaux de leur communauté, identifiés comme ayant été très actifs sur le territoire durant

l'année en cours. Les entrevues se déroulent en anglais puisque cette langue est la plus couramment parlée au sein des communautés impliquées. Les questionnaires comprennent des questions à réponses ouvertes et fermées, sur des sujets tels le caribou, les oiseaux, les poissons, les plantes et les baies, ainsi que la présence de prédateurs. Lorsqu'un expert local participe au suivi, il se fait attribuer un code personnel. Ce code permet de retracer les réponses d'un même individu au fil des ans, sans en dévoiler l'identité. Cet attribut permet de quantifier le biais associé à l'individu interrogé au sein des analyses statistiques.

Chaque année, les principaux résultats du suivi sont présentés aux membres de la coopérative lors de son assemblée annuelle. Les résultats y sont discutés, les suggestions entendues, et la pertinence des questions et des sujets couverts réévaluée. Le premier questionnaire du suivi a été élaboré par des scientifiques et des membres des communautés lors du premier rassemblement de la coopérative en 1994. Au fil des ans, le questionnaire a été peaufiné et adapté, mais la plupart des questions d'origine sont demeurées.

Dans le chapitre 1, nous avons utilisé les résultats d'une question du suivi environnemental communautaire dans laquelle les experts locaux devaient décrire la condition physique des caribous observés ou récoltés au cours des saisons d'automne, d'hiver et de printemps de l'année précédente. Pour chaque saison séparément, les experts locaux devaient classer la condition physique des caribous en « poor/skinny », « fair/mix of poor and fat », « good/excellent », ou « don't know ». Les données du printemps et de l'automne des années 2000-2010, provenant de 10 communautés autochtones, ont servi aux analyses du chapitre 1. Ces saisons ont été choisies car elles sont les plus importantes pour la chasse au caribou. Pour le printemps, 617 réponses ont servi aux analyses, et 711 réponses ont été analysées pour l'automne.

Dans le chapitre 2, les réponses à trois questions portant sur la disponibilité du caribou, la chasse et la satisfaction des besoins en caribou ont été utilisées. En réponse à la première question, les experts locaux devaient commenter la disponibilité des caribous pour leur communauté au cours de la dernière année, et ce séparément pour l'automne, l'hiver et le printemps. Pour décrire la disponibilité des caribous, les experts devaient choisir entre

« close » (les caribous se trouvaient à moins d'une journée de voyage et facilement repérables), « far » (trouvables en moins d'une semaine, beaucoup d'effort pour y accéder) et « not available ». Lorsque les experts locaux classaient les caribous comme « far » ou « not available » ils devaient expliquer leur choix.

Dans la deuxième question dont les réponses étaient utilisées pour nos recherches, les chercheurs communautaires avaient demandé aux experts locaux s'ils avaient chassé au cours de l'année, et ils devaient répondre par « oui » ou « non » séparément pour l'automne, l'hiver et le printemps. Lorsque la réponse était négative, l'expert local devait expliquer les raisons pour lesquelles il n'avait pas chassé. Finalement, en ce qui concerne la troisième question analysée, les chercheurs communautaires avaient demandé aux experts, pour chaque saison, s'ils avaient satisfait leurs besoins en caribou. Encore une fois, ils devaient répondre par « oui » ou « non » et expliquer la raison de leur choix. Nous avons utilisé les réponses obtenues à ces questions de 2000 à 2008. Des changements dans le questionnaire ont empêché l'utilisation des réponses au-delà de 2008. Nous avons analysé 688 réponses pour l'automne et 616 pour le printemps. Les réponses provenaient de 9 communautés autochtones.

### Données climatiques

Les données climatiques de qualité provenant de stations météorologiques sont peu disponibles pour notre aire d'étude. Afin de relier les observations des chasseurs au climat (chapitres 1 et 2), nous avons donc utilisé la base de données climatiques du réseau CARMA (CARMA 2017a; Russell *et al.* 2013b). Cette base de données a été construite à partir des données satellitaires quotidiennes du projet *Modern Era Retrospective Analysis for Research and Applications* de la NASA (NASA 2017), qui ont une résolution de 1/2 degré de latitude par 2/3 degré de longitude. Cai *et al.* (2011) décrivent en détails les calculs et algorithmes ayant servi à construire la base de données. Pour simplifier, les données climatiques géoréférencées du projet *Modern Era Retrospective Analysis for Research and Applications* ont été extraites dans les aires de répartition saisonnière du troupeau Porcupine (automne, hiver,



printemps, mise bas et été) afin qu'elles aient une pertinence écologique et un pouvoir explicatif aussi grands que possible du point de vue de ce troupeau.

À partir des données climatiques du réseau CARMA, nous avons extrait et calculé une série de variables climatiques d'intérêt pour nos analyses et correspondant aux conditions rencontrées par les caribous durant différentes saisons (voir méthodes chapitres 1 et 2). Comme il y avait souvent une corrélation importante entre les variables climatiques décrivant les conditions de neige (profondeur, variabilité du couvert neigeux, date de fonte, etc.), la température et les événements d'englacement (pluie sur neige, pluie verglaçante, etc.), nous avons utilisé des analyses en composantes principales (Jolliffe 1986, 2005) pour regrouper nos variables. Ce sont les composantes principales émergent de ces analyses que nous avons utilisées dans les analyses des chapitres 1 et 2.

#### Localisations de caribous

Depuis les années 1980, les agences gouvernementales du Canada et des États-Unis suivent les mouvements des caribous du troupeau Porcupine à l'aide de colliers satellitaires. Dans le chapitre 2, nous voulions comparer les localisations satellitaires avec les observations des experts locaux décrivant la disponibilité du caribou. Nous avons donc utilisé la base de données du Porcupine Caribou Technical Committee (Porcupine Caribou Technical Committee 2014), qui regroupe toutes les localisations satellitaires de caribous enregistrées entre 2000 et 2008, soit notre période d'étude. Durant cette période, 32 femelles ont été suivies et 7 428 localisations ont été enregistrées. Un collier satellitaire fournissait en moyenne des données durant trois ans et demi, mais certaines femelles ont été suivies pendant neuf ans. Annuellement, les individus étaient localisés environ tous les six jours, sauf de la mi-mai à la mi-juin quand les localisations étaient obtenues environ tous les deux jours. À partir des localisations satellitaires, nous avons calculé la distance médiane entre les caribous suivis et chaque communauté autochtone, au printemps et à l'automne de 2000 à 2008 (voir méthodes dans le chapitre 2).

## Capital social et utilisation du savoir local en gestion

Les données concernant la construction de capital social au sein de la coopérative étudiée, ainsi que celles sur l'utilisation de savoir local (chapitre 3), ont été obtenues par une revue de littérature, un questionnaire en ligne et la méthode d'observation participante (Creswell 1998). Pour la revue de littérature, nous avons consulté tous les documents traitant de la coopérative depuis sa création, ce qui inclut des rapports internes et externes, des études gouvernementales ayant utilisé les données de la coopérative, des comptes rendus de rencontres annuelles de la coopérative, des questionnaires de surveillance environnementale communautaire, des présentations publiques effectuées par des membres de la coopérative, des études de cas publiées dans des livres et des articles publiés dans des revues scientifiques.

Le questionnaire en ligne permettant de récolter des mesures précises sur le capital social et l'utilisation du savoir local comprenait 30 questions. Il couvrait les thèmes principaux du concept de capital social, soit les notions de respect, de confiance, d'apprentissage commun et de communauté (Arnold & Fernandez-Gimenez 2007; Wagner & Fernandez-Gimenez 2008). Une section du questionnaire concernait aussi l'utilisation du savoir local documenté via la coopérative (voir les méthodes du chapitre 3). La plupart des réponses aux questions étaient basées sur une échelle de Likert en cinq points, allant de 1 (non, pas du tout) à 5 (oui, définitivement). Cette échelle permet de mesurer la perception des répondants par rapport à chacun des énoncés. Nous avons envoyé les questionnaires à tous les membres de la coopérative ayant été actifs à titre de chercheurs communautaires, membres du comité de gestion ou conseillés entre 2006 et 2017. Cette liste était basée sur les informations fournies par la coordinatrice de la coopérative et sur la liste de personnes présentes aux rencontres annuelles de la coopérative. Au total, 50 questionnaires ont été envoyés.

Enfin, l'auteure de cette thèse a personnellement participé à plusieurs rencontres de la coopérative à titre de participante et d'observatrice. De 2009 à 2013, j'ai participé à trois rencontres annuelles de la coopérative et à une rencontre conjointe du Porcupine Caribou

Management Board. J'ai participé à une rencontre du comité de gestion de la coopérative visant à remanier le questionnaire et assisté à quatre rencontres téléphoniques trimestrielles du comité de gestion. En 2013, j'ai fait un séjour d'un mois et demi à titre de stagiaire au bureau de coordination de l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society à Whitehorse au Yukon. En 2017, j'ai aussi assisté à un séminaire en ligne regroupant plus de 40 participants pour discuter des orientations futures de la coopérative.

## **STRUCTURE DE LA THÈSE**

Outre cette introduction générale, la thèse comprend trois chapitres sous forme d'articles scientifiques ainsi qu'une conclusion générale.

Le premier chapitre répond à l'objectif 1 de la thèse. Il vise à expliquer quels facteurs climatiques ont le plus d'influence sur la condition physique des caribous migrateurs du troupeau Porcupine. Ce chapitre démontre que les données provenant des connaissances autochtones, récoltées via un programme de surveillance environnementale communautaire, sont utiles pour comprendre l'écologie des caribous migrateurs, dans un contexte où les données scientifiques sont rares. Le chapitre identifie aussi les facteurs climatiques ayant le plus d'influence sur la condition physique des caribous au printemps et à l'automne, notamment les conditions de neige, les épisodes d'englacement et le dérangement par les insectes. Il permet donc de mieux comprendre le rôle potentiel du climat sur la démographie de ce troupeau. Ce premier chapitre est un manuscrit préparé pour un numéro spécial de la revue *Journal of Applied Ecology*.

Le second chapitre répond à l'objectif 2 de la thèse. Il vise à mieux comprendre les liens unissant le climat, les caribous et les humains, et à identifier les facteurs climatiques ayant le plus d'influence sur la capacité des chasseurs autochtones à satisfaire leurs besoins en caribou dans ce socio-écosystème. Ce chapitre cerne le rôle essentiel de la neige dans la pratique de la chasse et dans la satisfaction des besoins en caribou chez les personnes vivant dans ce socio-écosystème. De manière plus générale, ce chapitre présente pour la première fois un modèle utilisant une combinaison de connaissances autochtones et scientifiques,

récoltées sur une longue durée et permettant d'établir des liens clairs entre le climat et les services environnementaux. Ce deuxième chapitre est un manuscrit préparé pour la revue *Science*.

Le troisième chapitre répond à l'objectif 3 de la thèse, qui vise à identifier les retombées sociales du programme de surveillance environnementale communautaire de l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society. Plus précisément, ce chapitre mesure le niveau de capital social parmi les membres de l'organisation, et évalue les contributions de la coopérative quant à l'utilisation des connaissances autochtones en gestion environnementale. Ce chapitre démontre que les initiatives de surveillance environnementale communautaire regroupant autochtones et scientifiques peuvent avoir des retombées qui dépassent largement la collecte des données. Notre étude démontre toutefois que malgré le haut niveau de capital social existant au sein de la coopérative, les connaissances autochtones provenant de ce programme de surveillance environnementale communautaire sont encore très peu utilisées par les gestionnaires. Nous amorçons dans ce chapitre une réflexion sur les causes freinant l'utilisation de ces connaissances. Ce troisième chapitre est un manuscrit préparé pour la revue *Ecology and Society*.

**CHAPITRE 1**  
**POURQUOI UNE POPULATION DE CARIBOUS MIGRATEURS CROIT-ELLE**  
**ET AMELIORE-T-ELLE SA CONDITION PHYSIQUE DANS UN CONTEXTE**  
**GENERAL DE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE ET DE DECLIN DU**  
**CARIBOU ?**

En septembre, le caribou se déplace en petits groupes. Les yeux d'Ishkuateu-Shushep perçaient l'horizon comme ceux d'un jeune chasseur. – Il y a six caribous là-bas! Je n'arrivais pas à les distinguer même avec des jumelles. – Si tu ne sais pas regarder, tu ne verras rien. Ça m'a pris un temps fou pour les voir. Ils étaient tout petits à l'horizon. Comment avait-il fait pour les voir sans jumelles? – Apprends à regarder! Finalement ils étaient là. Il s'est tourné vers moi et m'a désigné une grosse roche derrière laquelle nous irions nous cacher pour les attendre. Il savait combien de temps cela allait prendre aux caribous pour arriver là où nous étions cachés. Il connaissait la direction qu'ils allaient emprunter. Tout est arrivé exactement comme il l'avait prédit. Vingt minutes plus tard, les caribous étaient là. J'étais sans voix. Comment faisait-il pour les connaître si bien, pour être si précis? Il faut être proche de Papakassiku . Il avait sans doute sa façon de prier, de méditer. –Je vais tirer sur le jeune caribou pour honorer les aînés qui sont en visite chez nous. Ils ont besoin de manger de la viande tendre. Il n'a tiré que sur le jeune et l'a aussitôt dépecé et vidé.

Joséphine Bacon<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup> Joséphine Bacon. 2013. Extrait tiré du recueil « *Un thé dans la toundra* ». Montréal : Mémoire d'encrier, pp. 7-9.

## 1.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE

Comprendre l'influence du climat, de la météo et des variables dépendantes de la météo sur les populations animales est une question écologique fondamentale. Considérant que les changements climatiques ont opéré dans l'Arctique à une vitesse et des taux très prononcés, il est essentiel d'améliorer notre compréhension des effets directs et indirects de la météo sur les espèces clés qui sont au centre de l'économie de subsistance des communautés nordiques, tel le caribou (*Rangifer tarandus*). Parce que la condition physique est le mécanisme principal par lequel le climat et la météo affectent la démographie des populations, nous avons évalué l'influence de variables environnementales sur la condition physique printanière et automnale des caribous du troupeau de la rivière Porcupine. Le troupeau de la rivière Porcupine a une aire de répartition qui s'étend des Territoires du Nord-Ouest et du Yukon (Canada) à l'Alaska (É.-U.). C'est actuellement le plus grand troupeau de caribous migrateurs nord-américain et le seul dont la population n'a pas décliné depuis le début des années 2000. Nous avons utilisé les observations de chasseurs recueillies via un programme de surveillance environnementale communautaire autochtone entre 2000 et 2010 pour analyser les variations temporelles dans la condition physique des caribous de ce troupeau. Nous avons aussi quantifié l'influence de la météo et de variables importantes dépendantes de la météo (dérangement par les insectes et croissance végétale) sur la condition physique au printemps ( $n = 617$ ) et à l'automne ( $n = 711$ ). La condition physique des caribous au printemps et à l'automne s'est améliorée de 2000 à 2010, malgré une croissance continue de la population d'environ 3.6% par année. La condition physique au printemps et à l'automne est influencée par la météo sur les aires de répartition hivernales et printanières, et en particulier par les conditions de neige et la température au printemps. Les conditions de neige et les températures printanières se sont significativement adoucies durant notre période d'étude, ce qui a vraisemblablement contribué à la croissance de la population. La condition physique printanière était aussi négativement influencée par le niveau d'harcèlement par les insectes durant l'été précédent, alors que la condition physique automnale était négativement influencée par les épisodes d'englacement. Notre étude novatrice a trois implications

majeures. D'abord, elle montre que le fait de démêler l'influence relative des variables environnementales saisonnières permet de mieux comprendre les variations dans la condition physique de *Rangifer* à différentes saisons. Deuxièmement, elle dévoile le fait qu'une grande population de caribous peut croître et avoir des individus en bonne condition physique malgré un contexte de changements climatiques et de déclin des troupeaux, suggérant d'éviter les généralisations quant à l'influence du climat sur les populations de *Rangifer*. Finalement, cette étude montre que la surveillance environnementale communautaire peut fournir des données importantes qui contribuent à améliorer nos connaissances écologiques.

Ce premier article, intitulé « *Why a large migratory caribou population grew and improved body condition in a global context of caribou decline and climate warming* », fut corédigé par moi-même ainsi que par la professeure Sandra Hamel, mes collaborateurs. Ce chapitre est un manuscrit en préparation pour un numéro spécial de la revue *Journal of Applied Ecology*. En tant que première auteure, j'ai fourni l'idée originale de cette recherche et j'ai contribué à l'essentiel de la recherche, l'analyse des données, l'interprétation des résultats et la rédaction du manuscrit. La professeure Sandra Hamel, seconde auteure, a contribué à l'élaboration et l'exécution des analyses statistiques, l'interprétation des résultats ainsi qu'à la révision du manuscrit. Dominique Berteaux, dernier auteur, a contribué à l'interprétation des résultats et à la révision du manuscrit. La contribution des autres auteurs se limite à la révision du manuscrit. Une version abrégée de cet article sera présentée à la conférence 17th *North America Caribou Workshop* à Ottawa à l'automne 2018.

Mots-clés: caribou; démographie; *Rangifer tarandus*; connaissances autochtones; surveillance environnementale communautaire; condition physique; température; englacement; neige; météo

## **1.2 WHY A LARGE MIGRATORY CARIBOU POPULATION GREW AND IMPROVED BODY CONDITION IN A GLOBAL CONTEXT OF CARIBOU DECLINE AND CLIMATE WARMING**

### **1.3 ABSTRACT**

Understanding the influence of climate, weather, and weather-dependent variables on animal populations is a key ecological question. Given that climate change has occurred in the Arctic at higher rates than anywhere else in the world, it is crucial to improve our understanding of the direct and indirect effects of weather on keystone arctic species that are fundamental for subsistence in northern communities, such as caribou (*Rangifer tarandus*). Because body condition is the mechanism through which bottom-up environmental forces affect population demography, we assessed the influence of environmental variables on the spring and fall body condition of caribou from the Porcupine Caribou Herd. The Porcupine Caribou herd, ranging in Yukon and the Northwest Territories (Canada) and Alaska (USA), is the only large North American herd that has not declined since the 2000s. Using observations recorded through an indigenous community-based monitoring program between 2000-2010, we analyzed temporal trends in body condition for this herd and quantified the effects of weather and critical weather-dependent variables (insect harassment and vegetation growth), on spring (n = 617) and fall (n = 711) body condition. Both spring and fall body condition improved from 2000 to 2010, despite a continuous population increase of ca. 3.6% per year. Spring and fall body condition were influenced by weather on the winter and spring ranges, and in particular snow conditions and spring temperatures. Both snow conditions and spring temperatures improved during our study period, likely contributing to the observed caribou population increase. Insect harassment during the previous summer and the frequency of icing events also influenced body condition, in spring and fall, respectively. Our innovative study has three major implications. First, it shows how untangling the relative influences of seasonal weather variables allows a much better understanding of variation in seasonal body condition in *Rangifer* populations. Second, it indicates that a large migratory caribou population can grow and improve body condition in



a global context of caribou decline and climate warming, thereby warning against generalizations about the influence of climate on all *Rangifer* populations. Finally, it testifies how indigenous community-based monitoring can provide critical data to remarkably improve ecological understanding.

Key words: caribou; demography; *Rangifer tarandus*; indigenous knowledge; community-based monitoring; body condition; vegetation productivity; insect harassment; icing events; snow; weather

## 1.4 INTRODUCTION

The mechanisms influencing the abundance of species have received considerable attention from ecologists, and it is now generally accepted that population dynamics are driven by the co-occurrence and interaction between density-dependent and density-independent processes (Coulson *et al.* 2004; Gaillard *et al.* 2000; White 2008). Environmental variation, for instance, is considered an important density-independent driver of population ecology (e. g. Morrisette *et al.* 2010; Stenseth *et al.* 2003). Because climate change has occurred at an unprecedented rate in the circumpolar North (IPCC 2013), ecologists have been particularly interested in assessing how climate and weather affect the dynamics of animal populations in the Arctic over the last decades. Considering that arctic organisms are adapted to cold and short growing seasons (Berteaux *et al.* 2004), climate change is expected to greatly affect their population dynamics.

Due to its pan-Arctic distribution and high abundance, *Rangifer tarandus* (L., 1758; including caribou and reindeer) is a keystone species of terrestrial arctic ecosystems (COSEWIC 2016). It is also at the heart of the cultures and livelihoods of many arctic Indigenous Peoples (Kofinas *et al.* 2003). In North America, migratory caribou herds are known to undergo large-scale population fluctuations (Boudreau *et al.* 2003; Fauchald *et al.* 2017; Gunn 2003; Payette *et al.* 2004). The accelerated declines observed in most herds since 2000s (CARMA 2017a; Vors & Boyce 2009), however, have raised serious sustainability concerns (Festa-Bianchet *et al.* 2011). Climate change has been pointed out as a potential explanation for this quasi general decline (Vors & Boyce 2009) because it may indicate a trophic mismatch between plant phenology and caribou needs (Post & Forchhammer 2008) or an increased occurrence of ice-locked winter pastures (Hansen *et al.* 2011). More recently, Fauchald *et al.* (2017) suggested that decreased pasture quality, via climate-induced shrub expansion, may be the cause of migratory caribou declines in North America.

Due to the ecological and cultural importance of caribou, a detailed understanding of how environmental conditions affect their population dynamics is urgently needed. Body

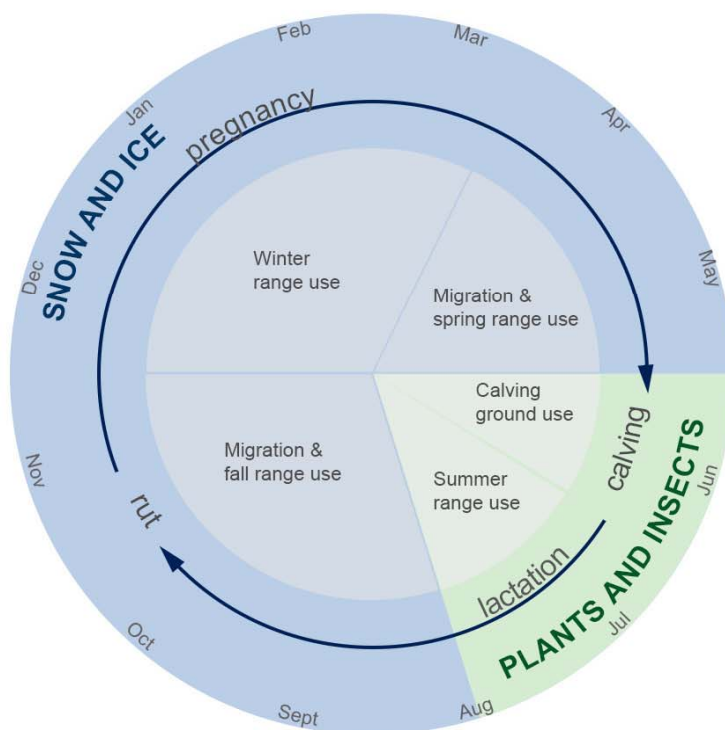
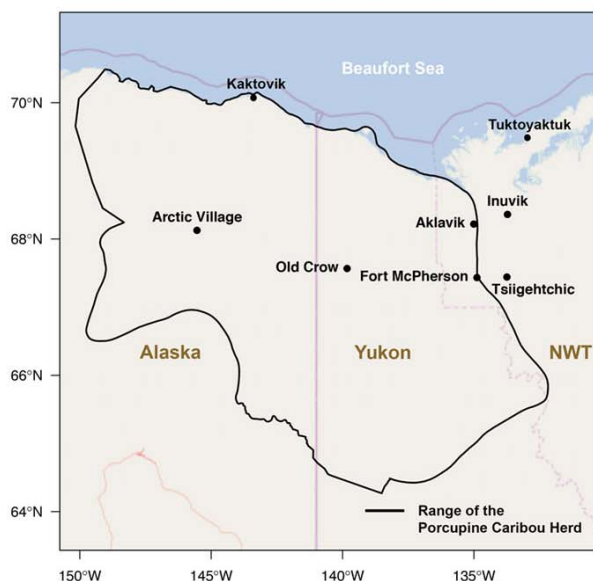
condition is a key variable to understand the links between the environment and the dynamics of large herbivores (Barboza *et al.* 2009). Body condition refers to the amount of energy reserves that an animal possesses to sustain metabolism and daily to seasonal activities (Barboza *et al.* 2009; Schulte-Hostedde *et al.* 2005), and it is correlated with survival and fitness in numerous species (Green 2001; Peig & Green 2009, 2010). In northern ungulates for instance, body condition correlates with over-winter survival (Festa-Bianchet *et al.* 1997; Parker *et al.* 2009), age at first reproduction (Adams & Dale 1998; Festa-Bianchet *et al.* 1998) and pregnancy probability (Pachkowski *et al.* 2013; Russell *et al.* 1998). Therefore, body condition is considered the ultimate mechanistic path through which environmental conditions impact caribou populations (Albon *et al.* 2017).

Climate change, through its influence on environmental conditions, can affect caribou body condition in various ways. During winter and spring, snow depth increases costs of locomotion and reduces access to forage (Adams 2005; Fancy & White 1987). Likewise, stochastic winter events such as freeze-thaw and rain-on-snow create ice layers and ground ice that impede access to forage (Locked pastures; Gunn *et al.* 2006; Hansen *et al.* 2011; Solberg *et al.* 2001). During summer, low winds and warm temperatures promote insect harassment, causing caribou to adopt insect avoidance behaviours that increase energy expenditure and reduce feeding time (Griffith *et al.* 2002; Morschel 1999; Russell *et al.* 1993; Weladji *et al.* 2003). On the contrary, high temperatures can enhance plant productivity and quality and thereby improve forage conditions (Lenart *et al.* 2002). Furthermore, global climate indices are sometimes better predictors of variations in body condition than local weather variables, likely because these “blend of weather features” represent more holistic accounts of climate conditions (Stenseth *et al.* 2003). Importantly, environmental variables affecting body condition in different seasons are likely to differ, and thereby have different consequences on demography (Albon *et al.* 2017; Figure 3).

Because investigating the effects of seasonal meteorological variables on caribou condition over different seasons requires long-term datasets, it has barely been investigated in North America (but see Couturier *et al.* 2009a). Due to the high costs of performing

research in the North American Arctic, long-term and uninterrupted scientific data about migratory caribou are mostly lacking (Festa-Bianchet *et al.* 2011; Kofinas *et al.* 2003). Monitoring programs involving local observations from indigenous hunters, however, hold a remarkable potential for generating highly relevant and abundant measurements. In these communities, hunters often live year-round in caribou habitat, spend months in direct contact with the herds, and have access to many carcasses during and after harvests (Kofinas *et al.* 2003; Lyver & Gunn 2004; Lyver & Lutsel K'E Dene First 2005). Hunters can thereby provide long-term, year-round observations on caribou populations, which would be very difficult and costly to obtain through scientific investigations on a large and varied temporal scale.

Here, we investigated how weather and other environmental variables influence body condition of caribou over a large temporal scale based on a unique long-term dataset from an indigenous community-based monitoring program that has documented spring and fall body condition annually since 2000 for the Porcupine Caribou Herd (PCH). The PCH (Alaska, Yukon, and Northwest Territories; *Rangifer tarandus granti*) is one of the largest migratory caribou populations in the world (CARMA 2017a). Interestingly, the PCH occupies a region experiencing amongst the most dramatic climatic changes on Earth (IPCC 2013). Paradoxically, the PCH is the only migratory caribou herd in North America that increased in size during the 2000's and early 2010's (CARMA 2017a). Although recent studies have looked for common climate drivers explaining global declines in caribou and reindeer populations (Fauchald *et al.* 2017), the growing PCH could help shed light on the factors explaining why declines are not universal. Most importantly, observations on body condition by indigenous hunters are extremely valuable because they provide a rare occasion to assess the mechanisms linking environmental variations to population growth. Therefore, our aim was first to analyse temporal variations



**Figure 3.** Range of the Porcupine caribou herd (top), and annual range use, reproductive cycle, and environmental factors affecting body condition of migratory caribou (bottom). During fall, winter, and early spring (blue), ice and snow impact body condition through their effects on thermoregulation, locomotion, and access to forage. During late spring and summer (green), vegetation productivity and insect harassment impact body condition through energy availability and expenditures, respectively.

in the annual spring and fall body condition of PCH caribou between 2000-2010, and then to quantify the influence of local seasonal environmental variables and large-scale climate proxies on spring and fall body condition over the same period. We anticipated that spring and fall body condition would decrease over time as a response to increase in caribou density (Bonenfant *et al.* 2009). We also expected spring body condition to be mostly influenced by winter precipitation (Fancy & White 1987; Hansen *et al.* 2011) and fall body condition by summer temperature (van der Wal & Stien 2014). Finally, we expected the Arctic Oscillation to correlate with body condition (Joly *et al.* 2011), but to a lesser degree than local weather variables.

## **1.5 MATERIALS AND METHODS**

### **1.5.1 Study area and caribou population**

The PCH ranges over ca. 250,000 km<sup>2</sup> in the northern Yukon and Northwest Territories (Canada) and northeast Alaska (USA). During winter, the herd uses the southern part of its range, where snow is shallower, thus providing easier locomotion and access to lichens, their primary winter forage (Russell *et al.* 1993). During spring, the herd migrates north towards the Beaufort sea to reach the calving grounds located on the arctic coastal plain of Alaska and northern Yukon (Russell *et al.* 1993). Common forage plants of the PCH during spring, calving and summer include mosses, graminoids (especially *Eriophorum* spp.) and deciduous shrubs (Russell *et al.* 1993). Several indigenous communities, belonging to the Inupiat, Inuvialuit and Gwich'in cultures, are located within or close to the PCH range. These include the communities of Kaktovik and Arctic Village (Alaska), Old Crow (Yukon), and Aklavik, Fort McPherson, Inuvik, Tsiigehtchic and Tuktoyaktuk (Northwest Territories). For thousands of years, the PCH has been a central component of the culture and diet of these communities (Pilon 2017).

According to aerial censuses, the PCH increased from approximately 102 000 individuals in 1972 to a peak of ca. 178,000 caribou in 1998. The herd then declined to a low

of ca. 123,000 individuals in 2001. Afterwards, the herd increased again to reach 169,000 individuals in 2010, 197,000 in 2013 and 219,000 in 2017 (Porcupine Caribou Management Board 2018b).

### **1.5.2 Hunters' monitoring of caribou body condition**

Seasonal body condition of PCH caribou was monitored through the annual community-based monitoring program of the Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society (ABEKS; Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society 2014a). The ABEKS is a non-profit organization that was established in the late 1990's to monitor ecological changes within the range of the PCH. An important goal of ABEKS is to merge scientific knowledge and indigenous knowledge to monitor the PCH and its range (Kofinas *et al.* 2002). Since 1998, ABEKS has conducted its community-based ecological monitoring program through a survey questionnaire covering topics such as caribou, berries, birds, weather and fish. This program involves annually 10 PCH user communities and is conducted by local indigenous monitors who have been trained by ABEKS staff. Monitors, with help from their local organizations, identify every year 15-20 local experts from their community who are active on the land (Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society 2014a). Each local expert is given a personal identity number which allows anonymous tracking of answers. To access the ABEKS database, we submitted a request containing letters of approval from every community involved in the program.

We analyzed answers to questions dealing with the body condition of caribou harvested or observed during the fall and spring, which are the most important hunting seasons. Respondents chose between "Poor/skinny", "Fair/mix of poor and fat", "Good/excellent", and "Don't know". In the following, we refer to these categories as poor (1), average (2) and excellent (3), respectively ("Don't know" answers were ignored). Lack of climate data from the CARMA dataset (see below) prohibited analysis beyond 2010, so we analyzed answers for 2000-2010, that is 711 answers for the fall and 617 answers for the spring, including 10 communities in both seasons.

The qualitative evaluations of caribou body condition done by northern indigenous hunters correlates with semi-objective body condition indices developed by biologists (Lyver & Gunn 2004). In addition, hunters' evaluations were shown to be consistent across years (Lyver & Gunn 2004) and hunter's evaluations collected during the hunting season did not differ from those obtained through interviews after the hunting seasons, indicating low recall bias (Lyver & Lutsel K'E Dene First 2005). Furthermore, the Porcupine Caribou Technical Committee (Porcupine Caribou Technical Committee 2016) has conducted a body condition survey of hunted caribou since the 2000's that included sporadic measures of back fat thickness (cm) and kidney fat (g). Although more precise than the qualitative evaluations of hunters, these scientific measures were about 10 times less frequent and extremely unbalanced across time and seasons. Nonetheless, we found a positive correlation between these scientific measurements and the evaluations of body condition obtained from the ABEKS monitoring (Spearman's  $r$  [95% CI]: back fat = 0.45 [0.32; 0.55],  $n=152$ ; kidney fat = 0.42 [0.25; 0.57],  $n = 88$ ), providing further evidence that hunters evaluations offer a reliable index of caribou condition.

### **1.5.3 Large-scale climate**

We used the Arctic Oscillation index (AO; National Weather Service 2017) to describe broad-scale climate. The AO expresses variation in sea-level pressures between 20° N and the North Pole and correlates with surface air temperature and precipitation over Alaska and arctic Canada (Thompson & Wallace 1998). In our study area, the "positive" phase of AO corresponds to warmer and wetter winters, as well as increased snow precipitations, whereas the "negative" phase corresponds to colder, drier, and less snowy winters (Thompson & Wallace 1998). We averaged the AO monthly values to obtain an annual AO index for 2000-2010. Because the AO index is most variable during winter (Zhou *et al.* 2001), we also calculated annual winter (January-March) averages (hereafter identified as AOW) using daily AO values for 2000-2010.



#### 1.5.4 Local weather over the winter and spring caribou ranges

Weather data from meteorological stations were sparse in our study area. We thus used the CircumArctic Rangifer Monitoring and Assessment (CARMA) network's caribou range climate database (Russell *et al.* 2013b) to describe weather conditions over the winter and spring ranges of the PCH. The CARMA database was developed using NASA's Modern Era Retrospective Analysis for Research and Applications (MERRA) database (NASA 2017). The MERRA dataset contains remotely sensed daily averaged climate data with a spatial resolution of  $0.50^{\circ}$  Lat. x  $0.66^{\circ}$  Long. To construct the CARMA caribou range database, shapefiles of seasonal PCH ranges, estimated through satellite collared animals, were overlapped with MERRA's gridded climate variables using ArcGIS version 10 (ESRI 2010; Russell *et al.* 2013b). This allowed calculating daily weather variables specific to the fall (16 August-30 November), winter (1 December-31 March), spring (1 April-31 May), calving (1 June-21 June) and summer (22 June-15 August) ranges of the PCH (Cai *et al.* 2011; Annexe I). Based on the CARMA database, we calculated a series of seasonal weather variables describing snow, temperature and icing conditions encountered from fall to spring and susceptible to impact PCH body condition (Annexes II and III).

The calculated variables were numerous and often correlated. We thus performed Principal Component Analysis (PCA; Jolliffe 2005) to transform correlated variables into new uncorrelated variables, the Principal Components (PCs). The first PC retains as much variation from the original variables as possible while the following PCs explain remaining variation. Because we had numerous climate variables compared with the number of years recorded ( $n=11$ ), we reduced the number of variables to ensure stability of the PCAs. We thus eliminated variables that were highly correlated ( $r > 0.7$ , Annexe II), and replaced them with one that provided similar climate information. We log-transformed the variable "freezing-rain falling on the ground on the winter range" to meet assumptions of normality and homogeneity of variance (Annexe II). We then pooled remaining variables according to two categories: 1-variables pertaining to snow and temperature, 2-variables pertaining to icing events. We performed a separate PCA for each category. For each PCA, we determined

the number of PCs to be used as final variables in our models based on the scree-test method (which relies on a sharp decline in consecutive eigenvalues (Cattell 1966) and a selection of PCs with eigenvalues  $> 1.0$  (Jolliffe 2005)). This resulted in two PCs describing snow/temperature conditions (“PCsnow1” and “PCsnow2”) and one PC describing icing events (“PCice1”). Annexe III gives PC scores from the PCA, whereas Annexe IV describes each of the three PCs used as climate indices in our models. For PCsnow1, greater scores represented years with deeper snow depth in winter and spring, and colder temperatures with late melting dates in spring. For PCsnow2, higher scores represented years with more variability in snow cover depth and shallower snow in winter. For PCice1, greater scores represented more icing events in general, and specifically more winter days with freeze-thaw events.

### **1.5.5 Proxies of vegetation and insect conditions on the calving and summer ranges**

Temperature is a strong driver of plant growth in the Arctic. We used effective growing degree-days (GDD; cumulative values above 5°C) from the CARMA dataset (Annexe I) as a proxy to capture variability in vegetation productivity and phenology (e.g. Albon *et al.* 2017). GDD is clearly associated with vegetation productivity in northern Alaska (Gamon *et al.* 2013). To reflect forage availability for the PCH at various times during the spring and summer, we used cumulative GDD on 31 May (when caribou leave the spring range; hereby GDDMay), GDD on 21 June (reflecting plant productivity on the calving range; hereby GDDJune), and GDD on 15 August (reflecting plant productivity over the entire summer; hereby GDD August). GDD were always cumulated from 1 January to each of the given dates. GDDJune and GDDAugust were strongly positively correlated ( $r = 0.86$ ), thus we only used GDDMay and GDDJune in further analyses.

To account for the level of insect harassment affecting the PCH in summer, we used the daily oestrid harassment index available through the CARMA dataset (Annexe I). Oestrid flies disturb caribou activity (Mörschel & Klein 1997) and their presence is affected by daytime temperature and wind speed (Mörschel 1999; Weladji *et al.* 2003). Hence, the daily

oestrid harassment index is a proxy of insect harassment calculated from temperature and wind data (Annexe I). We cumulated daily values of the CARMA oestrid harassment index from 1 June to 15 August to obtain an insect harassment index (IHI) during the calving and summer periods. Since this aggregated IHI was positively correlated with GDDJune ( $r = 0.77$ ), we never used both variables in the same model. Both GDD and IHI were measured in the summer prior to measures of body condition, meaning e.g. that GDD in summer 2004 was related to body condition in the fall 2004 and in the spring 2005, therefore at  $t-1$  for the spring condition (see Annexe V). To allow interpretation of the relative influence of the different continuous predictors on the responses, both GDD and IHI were standardized prior to analysis to be comparable with the PCs (Schielzeth 2010).

### **1.5.6 Statistical analyses**

We used R software version 3.4.2 (R Development Core Team 2017) for all analyses. To investigate temporal trends in the spring and fall body condition of PCH caribou, we used Pearson's product moment correlations for normally distributed samples (`cor.test` function in R) to test for association between years and both spring and fall annual average body condition. The annual average condition for both spring and fall were computed by giving a numerical value to each observation (poor condition = 1, average condition = 2, excellent condition = 3). To assess the effects of large-scale climate, local weather, vegetation productivity and insect harassment on spring and fall body condition, we used cumulative link mixed models (function `clmm2`, ordinal package in R; Christensen 2015b). Cumulative link mixed models (CLMM), also known as "ordinal regression models", allow for detailed analysis of ordered categorical response variables. CLMMs calculate the probability of an observation to fall into a certain category according to variations in explanatory variables, while considering the effects of random factors (Christensen 2015a, 2015c). In all our models, "community" was included as a random factor to control for repeated observations of body condition in a given community each year. A CLMM assumes proportional odds or equal slopes, which means that the slope estimate that represents the probability of passing from one category to another with changes in an explanatory variable does not vary according

to the different response categories of the dependent variable (Christensen 2015c). For some of our explanatory variables, this assumption was violated. In these cases, we modeled these variables using the “nominal” option, which relaxes this assumption and allows parameters to vary according to response categories (Christensen 2015c). Therefore, for a given explanatory variable following the proportional odds assumption, only one slope coefficient was estimated, being the same for the probability of changing from body condition category 1-poor to 2-average or from category 2-average to 3-excellent. With the nominal option, however, the model estimated two slopes, one for the probability of changing from body condition category 1-poor to 2-average, and one for the probability of changing from body condition category 2-average to 3-excellent. The nominal option therefore increased the number of parameters estimated, which can impact model selection (see below). Variables with a nominal effect are always identified by an asterisk (\*).

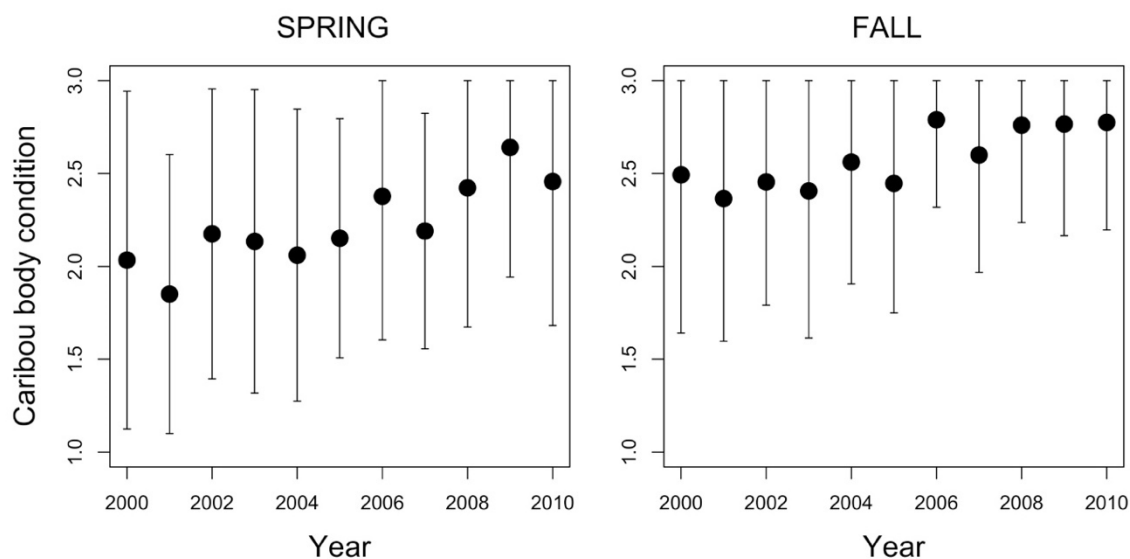
Because we were dealing with numerous and potentially correlated explanatory variables, we developed candidate models using a distinctive step approach (adapted from Hosmer & Lemeshow 2000), using four model selection steps for each spring and fall. In all steps, variable combinations that were highly correlated ( $r > 0.50$ ) were never included in the same models. In step I, we built a series of candidate models assessing the effect of large-scale climate on body condition (Annexes V and VI). In step II, we built models assessing the effect of local environmental conditions relating to the influence of locomotion and thermoregulation costs during winter/spring season on PCH body condition, i.e. PCsnow1, PCsnow2, and PCice1. In step III, we built models assessing the effects of local environmental conditions reflecting vegetation productivity and insect harassment during calving/summer season on PCH body condition, i.e. GDDMay, GDDJune, and IHI. For steps I to III separately, we ranked all models including a null model using the Akaike Information Criterion (AIC). We considered all models with  $\Delta AIC \leq 2$  as providing support (Burnham & Anderson 2002). In step IV, we build a series of final candidate models combining variables included in all supported models selected in step I-III. We ranked models in step IV including a null model using AIC and considering again models with  $\Delta AIC \leq 2$  as providing equivalent support. We report parameter estimates and 95% CI for all variables

included in the final equivalent models selected in step IV in Annexes VII and VIII, but we emphasize the presentation of results on the most parsimonious of the supported models. We calculated parameter estimates and 95% confidence intervals (CI) using the Laplace approximation, which is provided through the “summary” method of the ordinal package in R (Christensen 2015b).

## 1.6 RESULTS

### 1.6.1 Variation in caribou condition over time

Despite the increase in population size of the PCH with time, spring and fall body condition increased significantly during the study period (Pearson’s  $r$  [95% CI]: spring = 0.86 [0.54; 0.96],  $n=11$ ; fall = 0.84 [0.48; 0.96],  $n = 11$ ; Figure 4).



**Figure 4.** Changes in the average body condition of caribou from the Porcupine caribou herd in Alaska (USA) and the Yukon and Northwest Territories (Canada) between 2000-2010 during spring and fall.

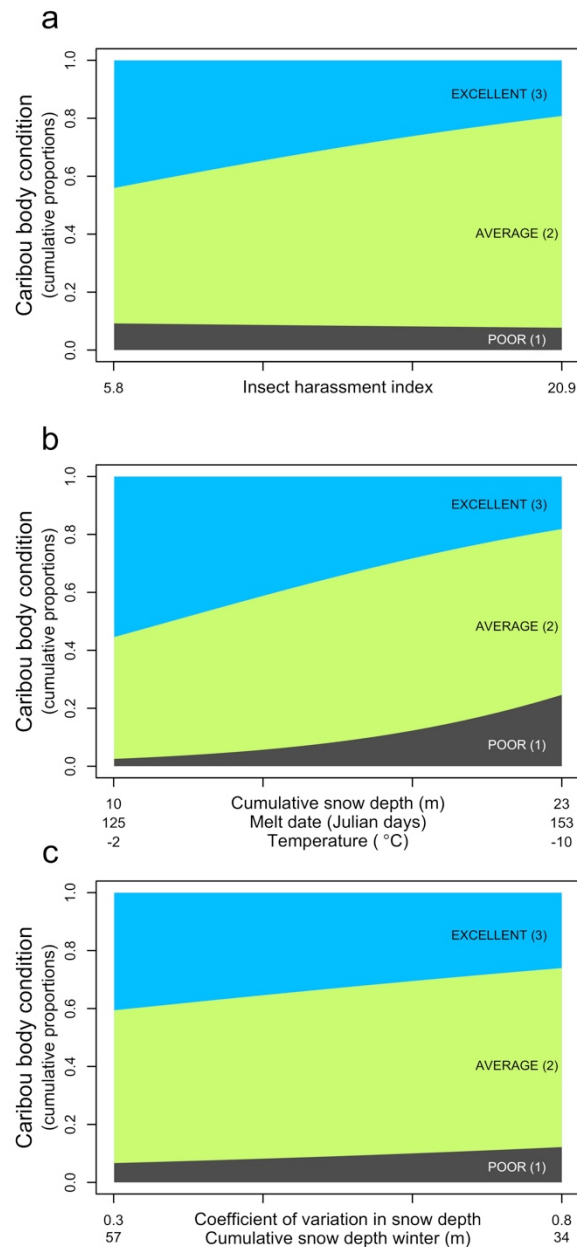
### 1.6.2 Spring body condition

According to the selected model (Tableau 2), spring body condition was correlated to our index of insect harassment during the previous summer (IHI yr-1) and winter severity (PCsnow1 and PCSnow2). High insect harassment reduced the probability that caribou were in excellent versus average condition but did not change the probability of caribou being in average versus poor condition (Figure 5a). When the insect harassment index doubled, the probability that hunters rated caribou as being in excellent condition declined by 44% (0.45 to 0.25), whereas the probability that caribou were rated in average condition increased by 44% (0.45 to 0.65), and the probability of caribou being rated in poor condition remained constant at about 0.10 (Figure 5a). Harsh winters, with deep snow, late melt date, and cold temperatures (high PCSnow1 scores) also reduced the probability of caribou being rated in good condition (Figure 5b). When cumulated snow doubled, average temperature in spring dropped from  $-2^{\circ}\text{C}$  to  $-10^{\circ}\text{C}$ , and spring was delayed by 28 days, the probability that caribou were rated in excellent condition decreased by 64% (0.55 to 0.20), whereas the probability that caribou were rated in average condition increased by 40% (0.43 to 0.60), and the probability that caribou were rated in poor condition rose by a factor 10 (from ca. 0.02 to 0.20). High variability in the snow cover during winter (high PCSnow2 scores) also reduced the probability of caribou being rated in good condition (Figure 5c), but to a lesser extent than insect harassment and harsh winters (Figure 5). When the coefficient of variation in winter snow cover almost tripled, the probability that caribou were rated in excellent condition declined by 25% (0.40 to 0.30), whereas the probability that caribou were rated in poor condition tripled (ca. 0.05 to 0.15), and the probability that caribou were rated in average condition remained relatively constant at 0.55 (Figure 5c). Equivalent but less parsimonious models identified icing events occurring during winter and spring (PCIce1) and the Arctic Oscillation has having a potential influence on spring body condition (Tableau 2), but these estimates were small and imprecise, with their 95% CI overlapping 0 (Annexe VII).

**Tableau 2.** Model selection for the influence of large-scale and local-scale weather conditions, proxies of vegetation productivity, and insect harassment, on the spring body condition of the Porcupine Caribou Herd, during 2000-2010.

	<b>Models</b>	<b>K</b>	<b>AIC</b>	<b>ΔAIC</b>	<b>AICWt</b>
1	<i>PCsnow1* + PCSnow2 + PCice1 + IHI yr-1*</i>	9	1096.91	0.00	0.32
2	<b>PCsnow1* + PCSnow2 + IHI yr-1*</b>	<b>8</b>	<b>1096.98</b>	<b>0.07</b>	<b>0.31</b>
3	<i>AO + PCSnow1* + PCSnow2 + PCice1 + IHI yr-1*</i>	10	1098.63	1.72	0.14
4	AO + PCSnow1* + PCSnow2 + IHI yr-1*	9	1098.96	2.05	0.12
5	AO + GDDMay yr-1 + PCSnow2 + PCice1 + IHI yr-1*	9	1100.47	3.56	0.05
6	AO + GDDMay yr-1 + PCSnow2 + IHI yr-1*	8	1101.46	4.55	0.03
7	GDDMay yr-1 + PCSnow2 + PCice1 + IHI yr-1*	8	1103.70	6.79	0.02
8	AO + GDDMay yr-1 + IHI yr-1*	7	1104.19	7.27	0.01
9	GDDMay yr-1 + PCSnow2 + IHI yr-1*	7	1105.79	8.88	0.00
10	GDDMay yr-1 + IHI yr-1*	6	1109.10	12.18	0.00
11	PCsnow1* + PCSnow2 + PCice1	7	1112.21	15.30	0.00
12	PCsnow1* + PCSnow2	6	1112.44	15.53	0.00
13	AO + PCSnow1* + PCSnow2 + PCice1	8	1114.21	17.29	0.00
14	AO + PCSnow1* + PCSnow2	7	1114.28	17.37	0.00
15	AO	4	1144.53	47.62	0.00
16	Null	3	1149.47	52.56	0.00

**Notes:** models in boldface were selected based on ΔAIC (difference in Akaike Information Criterion; see methods). Equivalently supported but less parsimonious models are in italic. AO: annual Arctic Oscillation index; AOw: Arctic Oscillation index for the winter months (January to March); PCSnow1: first principal component on snow and temperature variables, contrasting years with a longer snow season (late melting date), deeper snow in winter and spring, and colder temperatures and years with warmer springs, short snow season and shallower snow conditions (see methods and Annexes III and IV); PCSnow2: second principal component on snow and temperature variables, contrasting winters with high and low variability in the snow cover; PCice1: first principal component on icing variables contrasting years with high and low frequencies of icing events; GDDMay yr-1: cumulative growing degree-days (above 5°C) on the 31 of May the previous years; IHI yr-1: insect harassment index the previous years (see methods). Variables marked with an asterisk (\*) have a nominal effect. For these variables, the probability of caribou passing from the poor to average category (1 to 2) is not the same as the probability to pass from the average to good/ excellent category (2 to 3). For these variables, two parameter estimates are calculated instead of one regression coefficient, which increases K (see methods).



**Figure 5.** Relationship between weather conditions (including a proxy of insect harassment) occurring on the winter and spring ranges of the Porcupine caribou herd and the probability for local experts to consider caribou as being in excellent, average or poor condition during spring in the Yukon and Northwest Territories (Canada), and Alaska (USA) during 2000-2010. Panels **a-c** show the cumulative probabilities (proportion) for experts to perceive caribou as being in excellent body condition (blue), average body condition (green) or in poor condition (grey) in relation to the insect harassment index (**a**), cumulative snow depth on the spring range, melt date and temperature (**b**) and variation in snow depth and cumulative snow depth on the winter range (**c**).



### 1.6.3 Fall body condition

According to the most parsimonious model, fall body condition was also influenced by winter severity (Tableau 3). More precisely, the probability of caribou being rated in good condition was reduced with increase in the amounts of icing events occurring during previous winter and spring (PCice1), with greater snow depth, colder average temperature and late melting date in previous spring (PCsnow1), and with increase in the variability in the snow cover during the previous winter (PCsnow2s; Figure 6, Annexe VIII). When the number of days with freeze-thaw events increased from 12 to 34 on the winter range since the beginning of the fall season, the probability that caribou were rated in excellent condition declined by 25% (0.73 to 0.55), while the probability that caribou were rated in average and poor condition increased by 60% (0.25 to 0.40) and 150% (0.02 to 0.05), respectively (Figure 6a). Cumulated snow, cold temperatures and late melting dates had the same negative effects as icing events on caribou fall body condition. When cumulated snow doubled on the spring range, and when average temperatures in the spring dropped from  $-2^{\circ}\text{C}$  to  $-8^{\circ}\text{C}$ , the probability that caribou were rated in excellent condition declined by 25% (0.73 to 0.55) and the probability that caribou were rated in average and poor condition increased by 60% (0.25 to 0.40) and ca. 150% (0.02 to 0.05), respectively (Figure 6b). Finally, when the coefficient of variability in snow cover tripled over the previous winter, the probability that caribou were rated in excellent body condition decreased by 31% (from 0.75 to 0.52), whereas the probability that caribou were rated in average and in poor condition increased by 54% (0.24 to 0.37) and a factor 10 (0.01 to 0.11), respectively (Figure 6c).

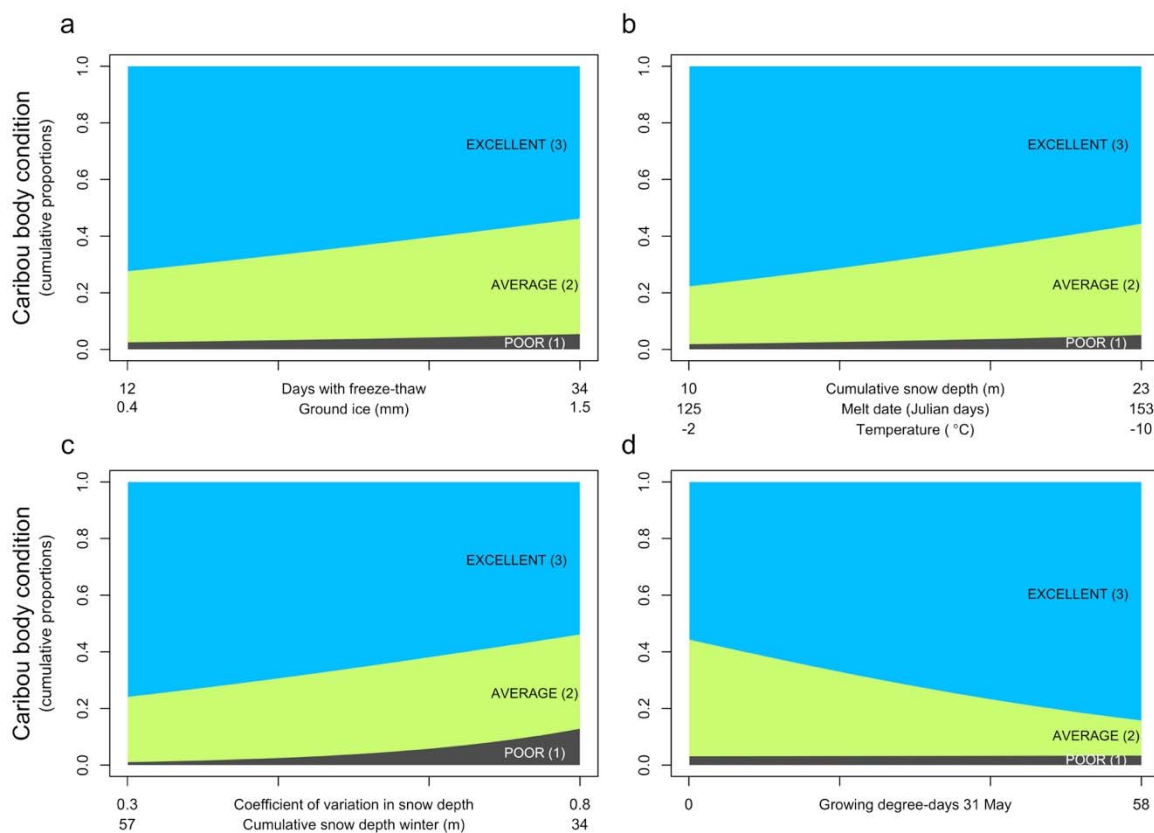
Two equivalent models also presented support to the data. Model 1 had an almost twice higher AIC weight than model 2 (0.40 versus 0.25, Tableau 3), but was less parsimonious because growing degree-days in May (GDDmay) had a nominal effect on caribou condition, which increased by 1 the number of parameters estimated for model 1 compared with model 2. Overview of parameter estimates and confidence intervals for model 1 showed that growing degree-days in May had a strong influence (Annexe VIII). With an increase of 58 growing degree-days in May, the probability that caribou were rated in excellent condition

increased by 55% (0.55 to 0.85), while the probability that caribou were rated in average condition decreased by 70% (0.43 to 0.13) and the probability that caribou were rated in poor condition remained relatively constant (0.02; Figure 6d). It is important to note that growing degree-days in May was highly negatively correlated with PCsnow1 ( $r = -0.90$ ), and the results suggest that these two variables have a similar influence on fall body condition.

**Tableau 3.** Model selection for the influence of large-scale and local-scale weather conditions, proxies of vegetation productivity, and insect harassment, on the fall body condition of the Porcupine Caribou Herd, during 2000-2010.

	<b>Models</b>	<b>K</b>	<b>AIC</b>	<b><math>\Delta</math>AIC</b>	<b>AICWt</b>
1	<i>GDDMay* + PCsnow2* + PCice1</i>	8	1020.30	0.00	0.40
2	<b>PCsnow1 + PCsnow2* + PCice1</b>	7	<b>1021.27</b>	<b>0.97</b>	<b>0.24</b>
3	AO + GDDMay* + PCsnow2* + PCice1	9	1021.70	1.40	0.20
4	AO + PCsnow1 + PCsnow2* + PCice1	8	1023.17	2.87	0.09
5	AO + GDDMay* + PCsnow2* + GDDJune	9	1025.69	5.39	0.03
6	GDDMay* + PCsnow2* + GDDJune	8	1025.85	5.55	0.03
7	PCsnow1 + PCsnow2* + GDDJune	7	1027.91	7.61	0.01
8	AO + PCsnow1 + PCsnow2* + GDDJune	8	1029.81	9.52	0.00
9	GDDMay* + GDDJune	6	1033.79	13.49	0.00
10	AO + GDDMay* + GDDJune	7	1035.43	15.14	0.00
11	AO	4	1048.86	28.56	0.00
12	Null model	3	1050.71	30.42	0.00

**Notes:** models in boldface were selected based on  $\Delta$ AIC (difference in Akaike Information Criterion; see methods). Equivalently supported but less parsimonious models are in italic. AO: annual Arctic Oscillation index; AOw: Arctic Oscillation index for the winter months (January to March); PCsnow1: first principal component on snow and temperature variables, contrasting years with a longer snow season (late melting date), deeper snow in winter and spring, and colder temperatures and years with warmer springs, short snow season and shallower snow conditions (see methods and Annexes III and IV); PCsnow2: second principal component on snow and temperature variables, contrasting winters with high and low variability in the snow cover; PCice1: first principal component on icing variables contrasting years with high and low frequencies of icing events; GDDMay: cumulative growing degree-days (above 5°C) on the 31 of May; GDDJune: cumulative growing degree-days (above 5°C) on the 21 of June. Variables marked with an asterisk (\*) have a nominal effect. For these variables, the probability of caribou passing from the poor to average category (1 to 2) is not the same as the probability to pass from the average to good/ excellent category (2 to 3). For these variables, two parameter estimates are calculated instead of one regression coefficient, which increases K (see methods).



**Figure 6.** Relationship between weather conditions occurring on the winter and spring ranges of the Porcupine caribou herd and the probability for local experts to consider caribou as being in excellent, average or poor condition during fall in the Yukon and Northwest Territories (Canada), and Alaska (USA) during 2000-2010. Panels **a-c** show the cumulative probabilities (proportion) for experts to perceive caribou as being in excellent body condition (blue), average body condition (green) or in poor condition (grey) in relation to number of days with freeze-thaw events over the winter range and quantity of ground ice (mm, **a**), cumulative snow depth on the spring range, melt date and temperature (**b**), variation in snow depth and cumulative snow depth on the winter range (**c**) and cumulative growing degree-days above 5°C in May (GDD, **d**).

## 1.7 DISCUSSION

Our findings of how spring and fall body condition varied in time and how weather influenced seasonal body condition considerably improved our understanding of the population ecology of a growing migratory caribou herd. Two results are of particular interest. First, even though we should expect body condition to decrease with increase in density (Bonenfant *et al.* 2009), we found that spring and fall body condition improved over time during a period of continuous population growth. Second, both spring and fall body condition were influenced by weather on the winter and spring ranges, and in particular snow conditions and spring temperatures. These results suggest that snow conditions and spring temperatures, both of which have improved from 2000-2010, have been the main determinants of body condition in the PCH over the last decade and are potentially the most important drivers of its population dynamics. Finally, our results highlight that indigenous knowledge can provide reliable information and data on caribou at temporal and spatial scales that are not easily monitored by scientists.

### 1.7.1 Body condition improved with increasing population density

Caribou body condition improved from 2000 to 2010, although the study population increased from 123,000 individuals in 2001 to 169,000 in 2010 (a 3.6% yearly increase; Figure 4) and to a peak of 219,000 in 2017. Earlier studies of the PCH have shown that parturition rate, calving rate and net calf production were not affected by population size, whether it was declining or increasing (Griffith *et al.* 2002). The PCH has a low growth rate compared to other migratory caribou herds (CARMA 2017a; Griffith *et al.* 2002), potentially because of low adult female survival (Bergerud 1980; Fancy *et al.* 1994). Winter weather conditions, rather than density, have thus long been suspected to limit this herd. Our result also suggests that density dependence might not be the main driving factor of body condition, at least at the population size encountered during the decade studied. This finding combined with the fact that the PCH inhabits one of the northernmost ranges occupied by large migratory caribou herds (CARMA 2017a) supports the suggestion that density dependence

declines with latitude (Bjørnstad *et al.* 1995; Post 2005; Stenseth 1999). Alternatively, improving winter and spring weather conditions during our study period (Annexe IX) may have compensated for density dependence, as was also suggested for other caribou herds (Albon *et al.* 2017).

### **1.7.2 Precipitations and temperatures during winter and spring impact caribou condition**

Our results suggest that snow depth, temperature, melt date and variations in snow cover are fundamental drivers of spring and fall caribou condition in the PCH. In caribou, calving dates, early calf survival and recruitment correlate to late winter females' body condition (Cameron *et al.* 1993; Veiberg *et al.* 2017). By increasing by as much as 10 times the probability of caribou being in poor condition in spring, harsh snow conditions may have large impacts on the PCH population, as reported in other northern ungulates (Adamczewski *et al.* 1987; Post & Stenseth 1999; Solberg *et al.* 2001; Tyler 2010; Weladji & Holand 2003). Deep snow, in particular, reduces access to forage while increasing costs of locomotion (Fancy & White 1987), sometimes causing drastic mortalities (Klein 1968). These negative effects may be particularly important in female caribou, considering the high energy requirements of late gestation in late winter and early spring (Weladji *et al.* 2002). Northern ungulates, including caribou, can compensate their overwinter loss in body condition by increasing summer foraging (Adamczewski *et al.* 1987; Renecker & Samuel 1991; Watkins *et al.* 1991). Our results rather suggested that the negative effects of a long snow season with deep snow during spring had a carry-over effect on the subsequent fall. This supports Russell and McNeil (2005) who found no evidence that females from the PCH could compensate during summer for poor body condition in June, with consequences on fecundity rates in fall (Russell *et al.* 1993).

By influencing both spring and fall body condition, and thus year-round fitness components, snow depth and spring temperatures can be considered as major weather drivers in the PCH population. Despite the relatively short duration of our time series (11 years), we observed strong temporal trends towards warmer springs, earlier snow melt and shallower

snow depths from 2000 to 2010 (Annexe IX). We believe these weather trends are, at least in part, responsible for the observed improvement in spring and fall body condition of caribou from the PCH during our study period, and perhaps its population growth. Recently, decline in pasture quality due to shrub expansion has been suggested as the plausible cause of diminishing migratory caribou herds in Arctic North America (Fauchald *et al.* 2017). Our results do not lend support to this hypothesis, since body condition improved in caribou from the PCH despite documented shrub expansion in the PCH range (Myers-Smith *et al.* 2011). In their analysis, Fauchald *et al.* (2017) used population models showing a PCH population decrease during the late 2000s, instead of the increasing trend observed in actual population data. Our results suggest their hypothesis does not fit the dynamic of the PCH.

While snow depth is a major determinant of caribou winter survival (Weladji *et al.* 2002), the density, layering and hardness of snow may also affect forage availability by impeding digging and changing diet composition (Tyler 2010). In our study, variability in the snow cover was one of the main weather variables affecting spring and fall body condition, and this variability was inversely correlated with cumulative snow depth in winter. Russell *et al.* (1993) also found a negative correlation between snow depth and snow hardness in the winter range of the PCH. In general, caribou tend to overwinter in areas with shallower snow depth (LaPerriere & Lent 1977), and the PCH is no exception (Russell *et al.* 1993). Even within shallow snow areas, however, habitat selection by caribou seems dictated by a combination of snow depth and hardness (LaPerriere & Lent 1977). We thus hypothesize that years with high snow variability represent years with hardest snow and perhaps higher snow density, resulting in a more difficult access to forage. More precise measurements of snow parameters are needed to test this hypothesis.

Events such as freeze-thaw and freezing rain, causing ice crusts on winter ranges, are a potential cause of decline in Rangifer populations around the globe (Hansen *et al.* 2011; Miller & Barry 2009; Vors & Boyce 2009). Icy conditions that reduce or impede access to forage may increase winter mortality and reduce fecundity (Hansen *et al.* 2011; Hansen *et al.* 2013; Solberg *et al.* 2001; Stien *et al.* 2010a). Although we expected icing events to reduce

both spring and fall condition of PCH caribou, icing events only impacted fall body condition, with condition being reduced mostly by an increase in the number of freeze-thaw events occurring over the winter and spring ranges and in the amount of ground ice before snow arrival. Our results suggest that the strong effects of snow condition over winter potentially override the influence of icing events on spring condition.

### **1.7.3 May temperatures and insect harassment influence body condition**

Conditions on the summer ranges affect body mass in many northern ungulates (Couturier *et al.* 2009b; Mysterud *et al.* 2008; Reimers 1983; Saether *et al.* 1996). In our study, GDD during summer (June and August) was never included in the supported models. GDD in May, however, was included in an equivalent model, suggesting that greater GDD in May increased the probability that caribou were in excellent condition in fall. GDD in May were highly negatively correlated with PCsnow1, the principal component representing snow depth, spring melting date and spring temperatures ( $r = -0.90$ ). Together, the influence of these two variables demonstrate that spring weather is a crucial determinant of fall body condition for the PCH, as was shown in other Rangifer populations (Couturier *et al.* 2009b; Pettorelli *et al.* 2005).

Moreover, Finstad and Prichard (2000) found that a combination of early spring and cool summer temperatures were optimal for reindeer juveniles as they increased vegetation quality and reduced insect harassment. High summer temperature increases insect harassment in reindeer (Hagemoen & Reimers 2002; Weladji *et al.* 2003), with negative impacts on body condition (Hegemoen & Reimers 2002; Morschel 1999; Walsh *et al.* 1992; Weladji *et al.* 2003). Increased insect harassment due to climate warming was suggested as a cause of the PCH decline in the 1990s (Griffith *et al.* 2002). Our results support this hypothesis because the insect harassment index considerably reduced the proportion of caribou found in excellent condition the following spring. Interestingly, the insect harassment index did not influence body condition in the fall. Insect harassment, however, has been shown to reduce mostly the fall body condition of reindeer calves (Weladji *et al.* 2003).

Because hunters do not target calves in their hunt, their evaluations of body condition were mostly focused on adult caribou. Therefore, calves were unlikely to be included in the fall data, but it is possible that they were partially included in the spring data because, by then, adults and almost-yearling calves are more similar in size and appearance.

## 1.8 CONCLUSION

Much remains to be explored to understand the direct and indirect effects of climate and weather on the dynamics of migratory caribou populations. Recent studies have focused on the influence of “single season” meteorological variables (e.g. rain-on-snow, summer temperature) to investigate the link between climate and the demography of caribou and reindeer. Our study further demonstrates the need to contrast the influences of weather on body condition at a seasonal scale, because this would provide a more mechanistic understanding of the links between weather and demography (Albon *et al.* 2017; Veiberg *et al.* 2017). A better understanding of the winter ecology of caribou, including the effects of weather conditions outside the growing season, would be greatly beneficial. This is a highly challenging task because the lack of consistent winter and early spring data on North American caribou ecology is notorious. As we have demonstrated, collaboration with northern communities can help overcome this challenge. We hope our study will trigger broader interest in community-based monitoring of caribou, as well as in developing new statistical tools to analyse indigenous knowledge alongside scientific data. In the North, engaging with indigenous communities has broader implications than data collection, as it also bears the potential to improve the contributions of local stakeholders in environmental management, an important aspect of northern wildlife conservation (Brook *et al.* 2009).

Finally, while climate change has been shown to have detrimental effects on *Rangifer* populations (e.g. increased frequencies of rain-on snow events; Hansen *et al.* 2013; Stien *et al.* 2012), our results suggest that these detrimental impacts may not be experienced by all *Rangifer* populations present in all ranges (see also Uboni *et al.* 2016). Climate changes will likely impact the populations of northern ungulates differently across spatial gradients



(Pettorelli *et al.* 2005). The PCH has benefited from warmer winters and springs from 2000 to 2010, while warmer winters have been detrimental to other herds. Research contrasting the influence of consistent weather variables such as cumulative snow depth and spring temperatures across the different populations is needed to improve our understanding of why caribou populations have not all declined in synchrony. Given that human disturbances may impact *Rangifer* populations more heavily than climate (Parlee *et al.* 2018; Uboni *et al.* 2016), population models including the cumulative impacts of weather and development on migratory caribou are also much needed.

## 1.9 ACKNOWLEDGEMENTS

We thank the Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society for access to its long-term ecological monitoring dataset, and all board members, monitors and local experts who have been dedicated to the long-term monitoring of caribou and other environmental indicators in the range of the PCH since the late 1990s. We thank the Porcupine Caribou Technical Committee for access to the Porcupine Caribou body condition dataset, and the CircumArctic Rangifer Monitoring and Assessment Network (CARMA) for access to its climate database. This research was funded by the Canada Research Chairs Program, the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC), the Northern Scientific Training Program (Polar Knowledge Canada), the Network of Centers of Excellence of Canada ArcticNet, the International Polar Year program of Indian and Northern Affairs Canada, and the NSERC CREATE Training Program in Northern Environmental Sciences (EnviroNorth). We are grateful to Sandra Lai, Nicolas Casajus, Andréanne Beardsell, and Joël Bêty for comments on earlier versions of the manuscript.

## CHAPITRE 2

### CLIMAT, BIODIVERSITE ET BIEN-ETRE HUMAIN : COMBINER LES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES ET AUTOCHTONES

Maïna avait allumé un feu. Elle coupait des tranches de caribou sur une grosse roche. Elle a pris une petite chaudière noircie par la suie et l'a remplie d'eau. Elle a jeté des sachets de thé dans l'eau. Elle a suspendu l'anse de la chaudière à un bâton planté en diagonale dans le sol, au-dessus du feu. Elle a fait cuire le caribou. Elle savait que le thé serait prêt au même moment que la viande. Avec la chaudière, elle a arrosé de thé les tranches de caribou dans le poêlon. Mon plus beau festin. Nous étions assis dans la toundra à déguster, à rendre grâce au Maître du Caribou. Après le repas, Maïna m'a demandé d'aller chercher une pierre que je devrais déposer sur la roche où elle avait tranché le caribou. Ainsi, chaque fois qu'elle reviendrait à cet endroit, cette pierre allait signifier ma présence. Depuis, Ishkuateu-Shushep nous a quittés. Je sais qu'il est devenu l'Esprit des chasseurs, c'est lui le caribou qui parfois s'approche la nuit près du village pour que le tambour de la parole n'oublie rien.

Joséphine Bacon<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> Joséphine Bacon. 2013. Extrait tiré du recueil « *Un thé dans la toundra* ». Montréal : Mémoire d'encrier, pp. 7-9.

## 2.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU DEUXIÈME ARTICLE

Afin de faire face aux défis écologiques et sociétaux occasionnés par l'Anthropocène, l'humanité doit puiser dans un bassin d'idées et d'information provenant de toutes les sources de connaissances. À l'échelle mondiale, les programmes tels le GIEC et l'IPBES ont mis en lumière l'importance de prendre en considération les connaissances locales et autochtones, aux côtés des connaissances provenant des sciences sociales et naturelles, afin d'améliorer notre compréhension des changements environnementaux, des interactions entre les humains et la biosphère, et de leurs répercussions sur le bien-être humain. Toutefois, le développement et la sélection de méthodes permettant de mettre en lien les connaissances autochtones et scientifiques demeure un défi et une priorité de recherche. Notre étude présente le premier exemple d'un modèle mettant en relation des séries temporelles de données provenant des connaissances autochtones et des connaissances scientifiques et permettant d'identifier les facteurs climatiques et non climatiques ayant un impact sur la capacité des chasseurs autochtones à satisfaire leurs besoins en caribou. Nos résultats démontrent que les conditions de neige, la température et les épisodes d'englacement ont un effet sur la distribution des caribous, sur la perception des chasseurs quant à la disponibilité des caribous et, ultimement, sur l'activité de chasse et la capacité des chasseurs à satisfaire leurs besoins. Prises isolément, ni les connaissances autochtones, ni les données scientifiques n'auraient permis d'identifier ces mécanismes. De 2000 à 2008, malgré une diminution de la chasse, une augmentation de la satisfaction des besoins en caribous a été observée. Cette tendance est probablement explicable par la croissance de la population de caribous durant la même période. Comprendre les liens complexes et étroits qui existent entre les humains, les composantes de la biodiversité et les facteurs non biotiques est primordial dans les régions où les caribous, ou autres espèces, sont à la base de la culture et des moyens de subsistance des collectivités autochtones. Cette nécessité est d'autant indispensable dans les régions telle l'Ouest de l'Arctique nord-américain, où les changements climatiques sont particulièrement prononcés. Notre étude démontre la nécessité et les avantages d'investir dans des programmes de surveillance environnementale communautaire à long-terme. Elle démontre aussi les résultats

positifs émergents de l'utilisation de méthodes novatrices permettant de mettre en lien les connaissances autochtones et scientifiques. Ceci est extrêmement important si nous voulons améliorer nos connaissances sur les mécanismes sous-jacents qui lient le climat, la biodiversité et le bien-être humain.

Ce deuxième article, intitulé « *Climate, biodiversity, and human well-being: merging scientific and indigenous knowledge* », fut corédigé par moi-même ainsi que par la professeure Sandra Hamel, mes collaborateurs Don E. Russell, Todd Powell et Michael Y. Svoboda et mon directeur de recherche Dominique Berteaux. Ce chapitre est un manuscrit en préparation pour la revue *Science*. En tant que première auteure, j'ai fourni l'idée originale de cette recherche et j'ai contribué à l'essentiel de la recherche, l'analyse des données, l'interprétation des résultats et la rédaction du manuscrit. La professeure Sandra Hamel, seconde auteure, a contribué à l'élaboration et l'exécution des analyses statistiques, l'interprétation des résultats ainsi qu'à la révision du manuscrit. Dominique Berteaux, dernier auteur, a contribué à l'interprétation des résultats et à la révision du manuscrit. La contribution des autres auteurs se limite à la révision du manuscrit. Une version abrégée de cet article a été présentée au 37<sup>ième</sup> colloque du Centre d'études nordiques à Québec en février 2017, à la conférence *Resilience 2017 : Resilience Frontiers for Global Sustainability* à Stockholm, Suède, en août 2017 et à la conférence *Arctic Change 2017* tenue à Québec en décembre 2017.

Mots-clés: caribou; distribution; *Rangifer tarandus*; connaissances autochtones; surveillance environnementale communautaire; bien-être humain; climat; besoins humains; services écosystémiques

## 2.2 CLIMATE, BIODIVERSITY, AND HUMAN WELL-BEING: MERGING SCIENTIFIC AND INDIGENOUS KNOWLEDGE

### 2.3 ABSTRACT

To face the ecological and societal challenges posed by the Anthropocene, humanity needs to draw insights and information from all sources of knowledge (Tengö *et al.* 2014). Global panels and monitoring programs have highlighted the importance of considering indigenous and local knowledge (ILK) alongside knowledge from natural and social sciences to enhance our understanding of environmental changes, human-biosphere interactions, and how these affect human well-being (Turnhout *et al.* 2012). Selecting and assessing the most appropriate methods and processes for linking indigenous and scientific knowledge, however, remains a challenge and a research priority (Rathwell *et al.* 2015). Here, we present the first example of a model integrating time series of ILK and scientific data to identify how climatic and non-climatic changes affect the capacity of indigenous caribou hunters to meet their needs. We demonstrate that snow conditions, cold temperatures, and icing events impact caribou distribution and indigenous hunters' perception of caribou availability, which ultimately affect hunting behaviour and hunters' capacity to meet their needs. Neither ILK nor scientific data would have allowed us to identify these mechanisms if taken alone. From 2000 to 2008, hunters increased their capacity to meet food harvest needs despite reducing hunting activity, probably because the caribou population increased. Understanding such intricate relations between humans, biodiversity components and the abiotic environment is crucial where caribou or other species are essential subsistence resources for indigenous communities. This is especially true where climate change is abrupt, such as in the western Arctic of North America (IPCC 2014). Our study demonstrates the requirement and benefits of engaging local people in long-term participatory projects and introduces new methods for bridging indigenous and scientific knowledge. This is of utmost importance to better understand the underlying mechanisms that intertwine climate, biodiversity, and human well-being.

Key words: caribou; distribution; *Rangifer tarandus*; Indigenous knowledge; community-based monitoring; human well-being; climate; human needs; ecosystems services

## 2.4 TEXT

Over the past 60 years, Earth's ecosystems have been altered by humans, with consequences for the goods and services that humans derive from the environment, and ultimately their well-being (IPCC 2014; Millenium Ecosystem Assessment 2005). A rapidly changing environment (Stuart Chapin III et al. 2000) is pressing humanity to utilize all sources of valid knowledge to enhance understanding of changing ecosystems and advance sustainable resources management (Tengö et al. 2014). Valid sources of knowledge are found within but also outside science (Reid et al. 2006; Tengö et al. 2014).

Built upon generations of observations and interactions with the local environment (Berkes 1999), indigenous and local knowledge (ILK) is receiving increased attention by scientists (Huntington 2011) because it can broaden observations related to global changes (Laidler 2006), wildlife species (Gagnon & Berteaux 2009; Moller et al. 2004) and biodiversity (Roué & Molnár 2016), and provide locally and culturally-based perspectives on resources management and biosphere stewardship (Berkes et al. 2000). ILK also often provides perspectives helping to identify human vulnerabilities and adaptation strategies to climate change (Ford *et al.* 2006a; Pearce *et al.* 2015). Importantly, knowledge generated locally is more likely to influence local environmental management decisions (Danielsen et al. 2010).

Nonetheless, while global assessments are committed to recognize and respect the contributions of ILK (Turnhout et al. 2012), fully mobilizing this knowledge remains complex (Huntington 2011; Rathwell et al. 2015; Reid et al. 2006; Roué & Molnár 2016; Tengö et al. 2014). Challenges include the development of appropriate methods to collect and bridge ILK and scientific knowledge (Agrawal 1995; Pierotti & Wildcat 2000; Reid et al. 2006; Turnhout et al. 2012), overlaid by a legacy of power asymmetries and sociocultural barriers among actors (Diver 2017; Reid et al. 2006). Consequently, although much has been written over the past decades regarding ILK, identifying novel methods to bridge ILK and science is still a priority (Huntington 2011; Rathwell et al. 2015), especially when one needs

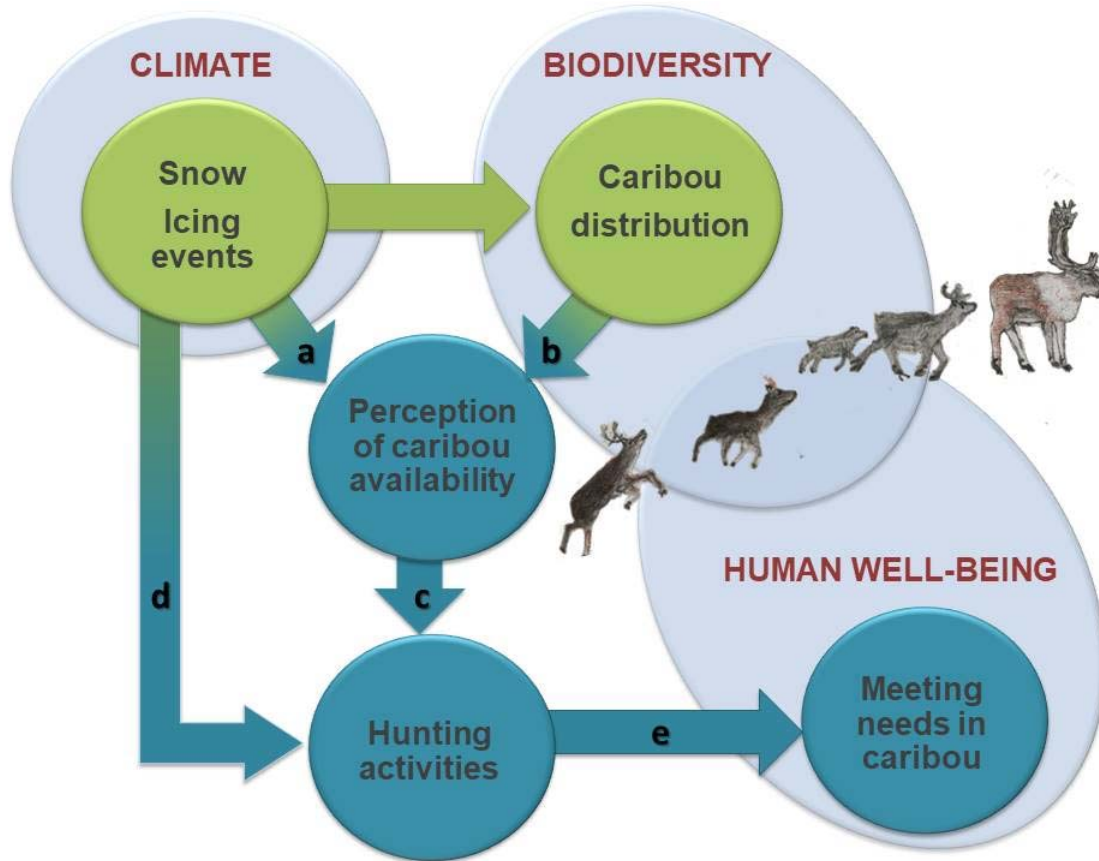
to move beyond short-term case studies. In particular, needed are clear results from long-term monitoring programs involving equally knowledge holders and bringing ILK and scientific knowledge together to provide an integrated understanding of social-ecological systems.

We present the first comprehensive model bridging long-term ILK and scientific knowledge to identify the mechanisms linking climate, time, and human capacity to satisfy cultural and subsistence needs, the latter being both precursors of human well-being. We worked with an arctic hunters-caribou system where indigenous hunters are still highly reliant on local environmental resources (ACIA 2005) and face rapid and significant climate change and socio-cultural transitions (IPCC 2014).

Across the circumpolar Arctic, migratory caribou and reindeer (*Rangifer* spp.) are critical to Indigenous Peoples (ACIA 2005), and climate has direct and indirect effects on ungulate performance and behavior (Fauchald et al. 2017; Mysterud et al. 2008; Post & Forchhammer 2002). Climate conditions are also critical to the travelling and hunting decisions made by arctic hunters (ACIA 2005). We evaluated the hypothesis that climate influences the ability of indigenous hunters to meet their caribou needs through direct and indirect effects linking temperature, snow conditions and icing events to caribou distribution and to the perceptions and behaviors of hunters (Figure 7). Both ILK and scientific knowledge were necessary to investigate this hypothesis because meeting needs in caribou is a cultural concept that refers to the ability to access cultural and subsistence services as well as to perceptions about personal fulfillment. Meeting needs is thus most efficiently monitored through documentation of ILK. In contrast, scientific tools allow for detailed records of climate and caribou distribution.

To assess our hypothesis, we analyzed 695 interviews conducted over 9 years (2000-2008) with 390 indigenous hunters from 9 communities located within the range of the Porcupine Caribou Herd, in Northern Alaska (USA), Yukon, and the Northwest Territories (Canada; see Methods and Annexe X). Interviews were performed through the community-based monitoring program of the Arctic Borderlands Ecological Knowledge





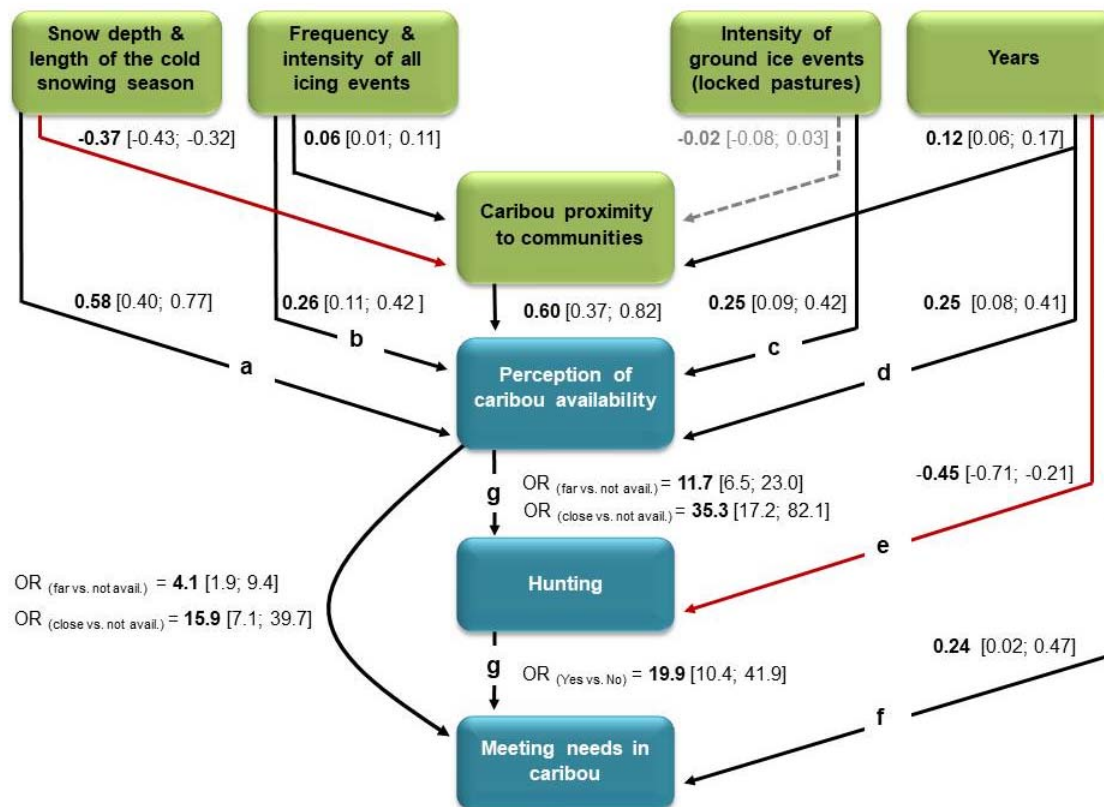
**Figure 7.** Relationships between climate, biodiversity, and human well-being in the human-caribou system. Hypothesized causal relationships between climate, caribou distribution, hunters' perceptions of caribou availability, hunting activities, and meeting needs. Climate is expected to influence hunter's perceptions of caribou availability both directly, through interpretations of how climate impacts caribou and access to them (**a**), and indirectly, through its influence on caribou distribution (**b**). Climate, through its effect on hunter's perceptions, can have indirect consequences on hunting activities (**c**). Climate may also directly affect hunting activities (e.g. impeding travel; **d**). Through these direct and indirect effects, climate can indirectly impact hunter's capacity to meet their needs in caribou, thus impacting their well-being (**e**). Green circles: data available through meteorological instruments and satellite collars (scientific knowledge). Blue circles: data available from interviews with hunters (indigenous knowledge). Caribou drawings: Late Elder Cornelius Nutarak Sr.

Society, a participatory research group designed and implemented by Indigenous Peoples and scientists since 1998 (Kofinas et al. 2002). We calculated seasonal composite climate variables for 2000-2008 using remotely-sensed daily climate averages covering the range of the Porcupine Caribou Herd (see Methods). We estimated caribou distribution, calculated as median proximity to the 9 involved communities, based on 7,428 caribou locations obtained via satellite monitoring of adult females. We then used piecewise structural equation modelling (SEM; Lefcheck 2016; Shipley 2000, 2009) to assess the causal relationships between climate, time (years), caribou distribution, hunters' perceptions of caribou availability, hunting activities and, ultimately, hunters' capacity to meet their caribou needs. Time was included as an explanatory variable to account for longer-term trends not explained by climate variation (e.g., changing caribou demography; see Methods). The fall hunt is critical to hunters, so we present results for the fall season (see Annexes XI and XII for results about the spring season).

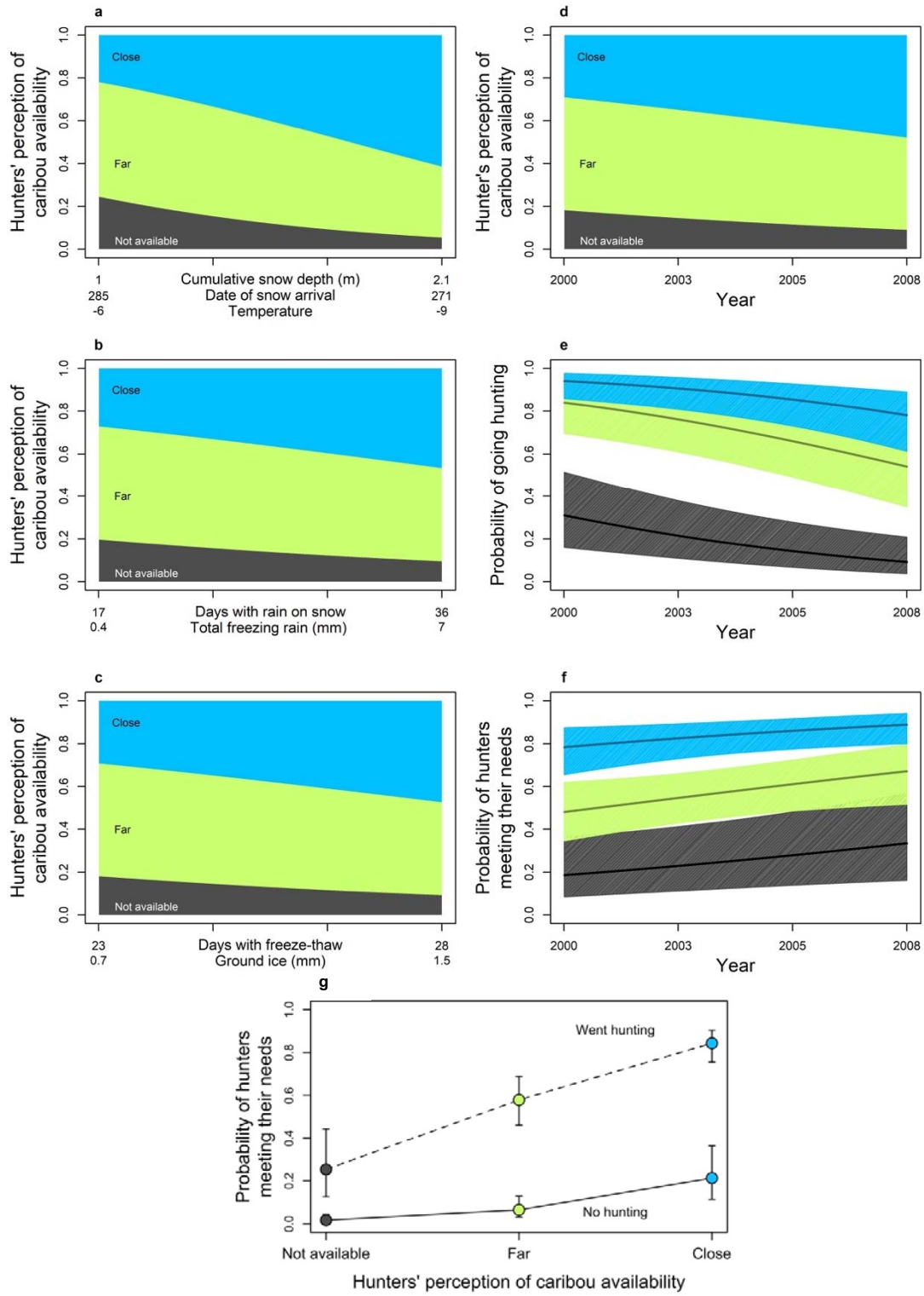
As predicted, climate conditions had direct influences on caribou distribution and hunters' perceptions of caribou availability (Figures 8, 9). These, ultimately, had indirect effects on hunters' decision to hunt or not and on their capacity to meet needs in caribou (Figures 8, 9). Snow depth, cold temperatures, and early snow arrival were the climate variables with the strongest effect on caribou distribution and perceptions about caribou availability (Figures 8, 9a). Interestingly, for an increase of  $\sim 1.1$  m of cumulated snow, caribou were  $\sim 107$  km further away from communities, yet hunters were more than three times more likely to consider caribou as being close to their community, and thus available (Figures 8, 9a). This paradox resolves when one considers that caribou availability depends both on caribou location and hunters' traveling and hunting capacities. Hunters travel with snowmobiles, thus poor snow cover can prevent traveling or impede the capacity to locate caribou tracks, even when caribou are relatively close to communities.

To a lesser extent, icing events also impacted caribou distribution and perception of caribou availability (Figures 8, 9). When frequency of rain-on-snow events increased from 17 to 36 days, caribou were  $\sim 19$  km closer to communities and hunters almost doubled their

probability to consider caribou as being available (Figure 9b-c). We hypothesize that caribou tend to shift away from severe icing conditions. Such shifts can be local when caribou shelter in valleys, where they become more accessible to hunters. Icing events, however, had no direct effect on hunters' decision to go hunting (Figure 8).



**Figure 8.** Path diagram of the relationship between climate, time (years), caribou, and indigenous hunters. Final model for how the capacity of hunters to meet their needs in caribou during fall is directly and indirectly affected by climate and time (model fit:  $C = 27.2$ ,  $k = 28$ ,  $P = 0.5$ ). Each line represents a direct path, with black/red solid lines indicating good evidence of a positive/negative effect (95% confidence interval, CI, excludes 0), and the grey dotted line indicating lack of evidence for a clear relationship. Parameter estimates (path coefficients) are given with their associated 95% CIs and are presented as odds ratios (OR) for the ordinal and binary response variables (in blue). All continuous variables (in green) were standardized, meaning parameters are standardized and can be compared to assess their relative influence (Annexe XIII). Green: data generated through meteorological instruments and satellite collars. Blue: data generated through interviews with hunters. Letters inserted in arrows identify relationships displayed in Figure 9.



**Figure 9.** Effects of climate and time (years) on indigenous hunters' perceptions, hunting activities, and capacity to meet needs in caribou during fall. Panels **a-d** show the cumulative probabilities (proportion) for hunters to perceive caribou as being close (blue), far (green), or not available (grey), in relation to snow depth, date of snow arrival, and temperature (**a**), number of days with rain on snow and quantity of freezing rain (**b**), number of days with freeze-thaw events and quantity of ground ice (**c**), and years (**d**). For these four panels, an increase in the size of a coloured area represents an increase in proportion. Panels **e-f** show the effects of time (years) on the probabilities for indigenous hunter to go hunting (**e**), and to meeting their needs in caribou during the fall (**f**). Solid lines represent the estimated probability and coloured zones the 95% confidence intervals (CI), according to a specific class of perceived caribou availability. Panel **g** shows the relationships between hunters' perception of caribou availability and the probability to meet their needs in caribou depending on whether or not they went hunting. Each dot represents the estimated probability and error bars represent the 95% CIs.

Ultimately, climate variables, especially snow depth and the length of the snow season, had indirect positive effects on the decision to go hunting and the capacity to meet needs in caribou. This is explained by positive relationships between caribou proximity to communities, perception of caribou availability, hunting activities, and meeting needs (Figures 8, 9g). For instance, when caribou were considered close versus not available, hunters were 35 times more likely to go hunting, which increased their ability to meet their needs by 20 folds (see odd ratios in Figure 8). When caribou were considered close, hunters were also 16 times more able to meet their needs (Figure 8) when they did not hunt. This disconnection between hunting and meeting needs can be explained by sharing, a cultural tradition allowing hunters unable to go hunting to still satisfy their needs via gifts from other hunters (ACIA 2005).

From 2000 to 2008, time had a positive effect on caribou proximity to communities as well as on perception of caribou availability (Figures 8, 9d). Moreover, although hunting became less frequent (Figures 8, 9e), the capacity of hunters to meet their needs increased (Figures 8, 9f). Last censuses have reported that the Porcupine herd increased from 123,000 animals in 2001 to 169,000 in 2010 and 197,000 in 2013 (Porcupine Caribou Technical Committee 2014). Combined with caribou being closer to communities, this could have

contributed to make caribou more accessible, and thereby to decrease hunting efforts required to satisfy needs.

Our findings demonstrate that fall temperatures, snow conditions, and icing events, through their impact on perception of caribou availability, affect the capacity of indigenous hunters to meet their needs in caribou. We also show that non-climatic temporal trends, potentially linked to caribou demography, also strongly affect the capacity to meet needs. To our knowledge, this is the first time that a comprehensive model using complex system analysis is able to bridge long-term ILK and scientific knowledge to provide an integrated perspective on the mechanisms affecting human needs. Considering that climate in the western North American Arctic is rapidly changing (IPCC 2014) and that caribou populations may in the long term be negatively affected by climate change (Fauchald et al. 2017), identifying the mechanisms regulating the ability to meet needs may help direct future monitoring of this SES.

Importantly, our novel approach indicates that ecological research and global assessments, which both seek directions on how to incorporate and apply diverse knowledge systems, could greatly benefit from more investment in long-term ILK monitoring. Long-term ILK monitoring allows innovative quantitative analyses that were never used to bridge ILK and science. Such approaches increase our understanding of SES beyond what is possible from ILK or scientific knowledge alone. They can also help to overcome the challenge of ILK being considered as simply anecdotal. Participatory approaches, still underrepresented in arctic research (Brunet et al. 2014), can also help to reduce imbalances in information used for management, thus improving the co-management process among stakeholders.

## 2.5 METHODS

### 2.5.1 Study area

Our study area encompassed the annual range of the Porcupine Caribou Herd (PCH; *Rangifer tarandus granti*), a region covering ca. 250 000 km<sup>2</sup> in northeast Alaska (USA), and the northern Yukon and Northwest Territories (Canada; Annexe X). Within this range, the PCH undergoes bi-annual migrations from its spring and summer ranges located on the arctic coastal plain of Alaska and the northern Yukon Territory, to its winter range in the southern mountainous and forested habitats of northeastern Alaska, northern Yukon, and the Northwest Territories (Fancy et al. 1989). Since the 1970s, the PCH has received considerable attention due to potential industrial development over its calving range, as well as an observed population decline from 1989 to 2001 (Porcupine Caribou Technical Committee 2014). During this period the PCH declined from 178,000 to 123,000 individuals, but then increased to 169,000 individuals in 2010 and 197,000 in 2013 (Porcupine Caribou Technical Committee 2014).

The range of the PCH encompasses the indigenous communities of Old Crow, Fort McPherson, Tsiigehtchic, Aklavik, Inuvik and Tuktoyaktuk, in Canada, and the indigenous communities of Kaktovik and Arctic Village, in the USA (Annexe X). Two indigenous groups, the Gwich'in and Inuvialuit, live in both Aklavik and Inuvik and were considered as a distinct community. For thousands of years, the PCH has had considerable spiritual, cultural, and nutritional importance for these communities. Today, caribou remains the most important source of adult daily protein, vitamin, and iron intake (Kuhnlein et al. 2009) in some of these communities, where food costs in market stores are higher than those found in southern Canada (NWT Bureau of Statistics 2017). Harvesting opportunities, however, vary between communities according to their location in relation to the PCH annual migration.

### **2.5.2 Data collected through interviews with hunters**

Details about the creation, implementation, and guiding principles of the Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society (ABEKS) have already been discussed in depth (Eamer 2006; Kofinas et al. 2002). In short, ABEKS was created in 1994 to improve ecological understanding within the range of the PCH by involving both local indigenous knowledge and science-based research and monitoring. One important aspect of the ABEKS is an annual community-based ecological monitoring program that involves interviews with local experts from each PCH community. Interviews were conducted each March by community monitors hired through local organizations. Monitors received a three-day training session prior to each annual interview process. Interviews were guided by a questionnaire (developed in 1997 and modified in 2003 and 2010) including both closed and open-ended questions on topics such as climate, caribou, berries, fish, and predators (for the 2016 questionnaire, see: Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society 2014b). The reporting period for each interview included previous winter, fall, and spring, meaning that an interview conducted in March 2008 covered the winter 2007-2008, fall 2007, and spring 2007 conditions. In every community, 15-20 local experts were interviewed each year. Local experts were selected based on their current knowledge of the land and were given a personal number that allowed tracking their answers from subsequent years without revealing identity. To use the ABEKS database, a request for data access and letters of support from all communities were submitted to the ABEKS board of director. This study analysed answers to three questions relating to caribou availability, caribou hunting, and meeting needs in caribou.

In the first question analysed, interviewees were asked for each hunting season separately (i.e. fall, winter, and spring) how available caribou were to their community. Respondents had to choose between “close (within one day travelling distance, easily found)”, “far (within one week, required lots of efforts to get them)”, or “not available”. When caribou were hard to access for the community (i.e. “far”/“not available”), respondents were asked to explain what made them hardly accessible.



In the second question, interviewees were asked whether they hunted or not in each season. Only yes/no answers were allowed. If the answer was negative, hunters were asked to explain their answer. In the third question, interviewees were asked for each season whether they met their needs in caribou. Only yes/no answers were allowed. Interviewees were subsequently asked to explain their answer. The concept of “meeting needs” rests on a personal and subjective assessment of fulfillment. Answers therefore cannot be assumed to correlate with the number of harvested caribou.

We analysed answers for the years 2000-2008, fall and spring periods. We chose to analyse data for spring and fall exclusively because they represent the most important hunting seasons. Changes in the questionnaire prevented analysis beyond 2008. For the fall, we analysed 688 answers from 405 interviewees and 9 communities. For the spring, we analysed 616 answers from 390 interviewees and 9 communities. Tuktoyaktok was not included in the analysis due to low answer rates during the period covered.

### **2.5.3 Climate data**

Snow conditions have an impact on the movement and distribution of the PCH (Eastland 1991; McNeil *et al.* 2005), and on the distribution, winter survival, and feeding capacities of caribou in general (Tyler 2010). Furthermore, icing events, i.e. climate events susceptible to create ice layers thick enough to impede access to forage (e.g. freezing rain), impact the distribution (Hansen *et al.* 2010) and population dynamics (Hansen *et al.* 2011; Hansen *et al.* 2013; Langlois *et al.* 2017; Solberg *et al.* 2001) of caribou. To assess the influence of such climate conditions on caribou and their accessibility, we defined a series of seasonal variables based on climate data obtained through the CircumArctic Rangifer Monitoring and Assessment Network (CARMA; Russell *et al.* 2015). The CARMA climate database (Russell *et al.* 2013b) was constructed using remotely sensed daily averaged climate data from the Modern Era Retrospective analysis for Research and Applications project (MERRA; <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA/>) and NASA (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/mdisc/data-holdings>). These data have a spatial resolution of

1/2 degree (latitude)  $\times$  2/3 degree (longitude). To produce the CARMA database, shapefiles of known seasonal ranges for the PCH were overlapped with the MERRA gridded climate variables using ArcGIS version 10 (ESRI 2010). Daily data for a seasonal range was the median value among the grids included in the range polygons. Daily averages specific to the fall (16 August–30 November), winter (1 December – 31 March), and spring (1 April–31 May) ranges of the PCH were then calculated (Cai *et al.* 2011; Russell *et al.* 2013b; Annexe XIV) to produce the seasonal climate variables (Annexes XV and XVI).

We calculated a series of variables describing snow conditions encountered by caribou over their seasonal ranges, as well as four variables describing the overall snow conditions for each year (number of days with snow, melt speed, melt date, and snow arrival date). We also calculated average temperatures ( $^{\circ}\text{C}$ ) for spring and fall.

Finally, we calculated a series of variables describing icing events to which the PCH was likely exposed over its respective ranges. We used the term climate data to refer to any meteorological data used in our analysis.

Because climate variables were numerous and often correlated, we performed principal component analyses (PCAs) to avoid multicollinearity and reduce the number of parameters used in models. PCAs generate new sets of linearly independent variables, the principal components (PCs; Jolliffe 2005). The first PC accounts for the largest variation among input variables, and each successive PC accounts for the largest variation left in data once the previous PCs have been accounted for. Because we had numerous climate variables (Annexes XV and XVI) but few years recorded ( $n=9$ ), we reduced the number of variables to ensure stability of the PCAs. First, we eliminated variables that were highly correlated ( $r > 0.7$ ), and replaced them with one that provided similar climate information, such as average or cumulated snow depth (Annexe XV). We then separated the remaining variables in two categories, those describing snow and temperature conditions and those describing icing events. We therefore performed two separate PCAs and repeated this procedure for each season, spring and fall (Annexe XVII). Variables not meeting the normality assumption were transformed before being used in the PCAs. For each PCA, we determined the number of

PCs to be retained using the scree-test method, based on the rapid decrease in consecutive eigenvalues (Cattell 1966). We then extracted the scores of the PCs selected and used them in further analyses as indices of snow and temperature conditions and indices of icing events.

For the fall season, we retained one PC to summarize snow and temperature conditions and two PCs to describe icing events (Annexes XVII and XVIII). For the spring season, we retained two PCs to summarize snow and temperature conditions and one to describe icing events (Annexes XVII and XVIII). Because we had to perform separate PCAs for snow and temperature conditions and icing events, PCs obtained from the separate PCAs were not necessarily independent. Nevertheless, their correlation was weak and was accounted for in the piecewise structural equation modelling (SEM; see below).

#### **2.5.4 Caribou distribution data**

The range use and migratory patterns of the PCH herd have been documented by U.S. and Canadian governmental agencies through satellite tracking of adult females since the 1980s (see details at <http://www.pcmb.ca/herd>). During 2000-2008, 32 cows were monitored for a total of 7,428 locations. The average duration of individual monitoring was 3.5 years, but some animals were followed for up to 9 years. Frequency of locations varied across seasons, years, and individuals. On average, individuals were located every 6 days (range 1-251), except from mid-May to mid-July, when locations occurred approximately every second day. Caribou location data were considered highly representative of the PCH location given that this herd remains strongly aggregated.

We analysed caribou and community location data using the `sp` (Bivand et al. 2013; Pebesma & Bivand 2005), `rgdal` (Bivand et al. 2014) and `rgeos` (Bivand & Rundel 2014) packages in R. Locations were first imported in R and converted to the WGS84 coordinate system. We then calculated the weekly median distances between caribou locations and each of the 9 communities considered in our study. This allowed us to calculate the median of the weekly median distances for the fall (16 August-30 November) and spring (1 April-31 May) PCH seasons. Median seasonal distances between the PCH and the communities were highly

correlated to minimum seasonal distances ( $r > 0.9$ ). For ease of interpretation with indices of caribou availability, we report the median proximity to communities, which corresponds to the reverse of median distances.

### **2.5.5 Piecewise Structural Equation Modelling**

For each hunting season analysed (fall and spring), we performed a piecewise structural equation modelling (SEM; Lefcheck 2016), also called confirmatory path analysis, to determine the relationships among: i- the different annual climate indices, ii- the study years, iii- the median distance between the PCH and communities, iv- the availability of caribou as perceived by hunters, v- the probability of hunters going hunting caribou, and vi- the probability that hunters met their needs. Piecewise SEM tests for direct and indirect causal relationships among variables in separate steps, one step for each endogenous variable (Lefcheck 2016). This approach was best suited to our study given the hierarchical and heterogeneous nature of our data (Shipley 2009). Indeed, our dataset included continuous (climate, caribou distances, years), ordinal (caribou availability), and binary variables (probability of going hunting, probability of hunters meeting their needs), and piecewise SEM allows linking all these variables within one structural model (Lefcheck 2016).

Piecewise SEM requires the a priori designation of plausible hypothesized relationships between independent and dependent variables, which are transposed in box-and-arrow diagrams called directed acyclic graphs (Shipley 2000, 2009; Thomas et al. 2007). To test the validity of these hypothesized causal models, simultaneous tests of all independence claims, known as a directional-separation (d-sep) test (Shipley 2009), are performed. A directed acyclic graph model is rejected if the C statistics calculated from the d-sep test falls below the statistical significance level, set here at 0.05. We performed the piecewise SEM in five strategic steps, numbered 1 to 5 in Annexe XIX, which illustrates the most complex hypothesized causal structure linking fall variables. Because variables included in the analysis were numerous, each step consisted of a SEM in itself and established the best reference model on which to add further variables to be tested in the next step. At

each step of the piecewise SEM, we built a series of hypothesized models that we validated using the d-sep test (Shiple 2009). We then selected the best model among the models considered valid based on the Akaike Information Criterion (AIC; Shiple 2013). We considered the model with the lowest AIC as the best model unless other models were equivalent ( $\Delta \text{AIC} \leq 2$ ), in which case we retained the most parsimonious model (Burnham & Anderson 2002). The selected model was then used as the basis model for the next step in which another level of variables was added.

The first step of the piecewise SEM consisted of selecting the best model describing the causal structure among the different climate indices (PC scores relating to year-to-year climatic variation) as well as the continuous variable “years” (2000-2008). For the fall season, we included “years” as a continuous variable to account for the long-term temporal effects of changes in caribou demography or migratory patterns on their distribution, as well as to account for the long-term changes in perception of fulfillment by hunters, which are not explained by annual variation in climate. For the spring season, “years” (2000-2008) was highly correlated ( $r$  [95% confidence interval] = 0.85 [0.44; 0.97]) with the PC describing temperature and melt date. Therefore, “years” could not be included as a distinct variable. Instead, temporal effects are confounded within the spring PC named “temperature and early melt”. The latter should be considered as representing both large-scale temporal changes and temperature/melt date, with later years being warmer and having an earlier snowmelt. This first step of the piecewise SEM was based on the hypothesis that snow depth, the length of the snow season, and icing events could be linked via broader climate patterns, and that there may be trends in climate condition with time. Ten and 6 causal models were evaluated for the fall and spring, respectively. This step was modelled with linear regressions using the `lm` function of R (R Development Core Team 2011).

In the second step, we assessed the structural causal links between climate indices, time, and the median proximity between caribou and communities. Four and 3 causal models were evaluated for the fall and spring, respectively. This step is based on the hypothesis that snow depth, the length of the snow season, number of icing events, as well long-term

processes (embedded with the variable “years”) influence caribou distribution. This hypothesis is based on previous work showing that environmental factors, especially snow conditions, influence PCH movements (Eastland 1991; McNeil et al. 2005; Russell et al. 1993). Studies performed on other migrating caribou herds also showed that icing events and demographic factors may influence caribou distribution (Hansen et al. 2011). This step was assessed with linear mixed models (lmer function of the lme4 package in R; Bates *et al.* 2013), including “community” as a random intercept to account for the repetition of caribou distances within a community each year.

In the third step, we evaluated the causal links between climate conditions, years, and caribou proximity to communities, and hunters’ perception of caribou availability. Five and 4 causal models were evaluated for the fall and spring, respectively. This hypothesis is based on informal discussions with hunters, combined with previous studies (Berman & Kofinas 2004) showing that hunters have a deep and complex knowledge about how environmental conditions influence both caribou distribution and availability to hunters. To hunters, caribou availability embeds both the environmental conditions affecting caribou distribution and the capacity of hunters to access caribou (Berman & Kofinas 2004). We thus postulated that climate conditions and caribou distance to communities have both a direct effect on the hunter’s perception of caribou availability (Annexe XIX). Because hunter perception of caribou availability was an ordinal variable with 3 levels ( “close”, “far”, “not available”), this step was assessed with cumulative link mixed models (clmm function of the ordinal package in R; Christensen 2013) using a logit link and including “interviewee identity” nested within “community” as a random intercept.

In the fourth step, we assessed the structural links between climate conditions, years, perception of caribou availability, and whether or not local experts went hunting. Five and 4 structural models were evaluated for the fall and spring, respectively. Again, informal discussions and previous research have shown that climate affects the probability that northern hunters go hunting and access wildlife (Berman & Kofinas 2004; Krupnik & Jolly 2002). In addition to climate, other environmental and socio-economic conditions (e.g.

caribou density and access to gear) may also affect the probability of going hunting (Berman et al. 2004). This step was modelled with generalized linear mixed models (GLMMs; glmer function of the lme4 package in R; Bates *et al.* 2013) using a binomial family with a logit link and including “interviewee identity” nested within “community” as a random intercept.

In the fifth step, we tested the hypothesis that the probability that local experts meet their needs in caribou is directly affected by the probability that local experts go hunting, and directly or indirectly affected by climate indices, temporal trends in environmental and socio-economic factors, as well as by the perceived availability of caribou. Nine and 6 structural models were evaluated for the fall and spring, respectively. This hypothesis is based on the fact that community members meet their needs in caribou both by going hunting themselves and through sharing of harvest within the community (see also Berman et al. 2004). This step was modelled with GLMMs as described in step four.

For each season, the best model selected in the last step represented the complete final model of our piecewise SEM (fall: Figure 8, spring: Annexe XI). We calculated the path coefficients by regressing each variable on its direct causes (Shipley 2009) using the models described above. For each path coefficient, we present the estimate and its 95% confidence intervals. All continuous variables were standardized to allow interpretation of the relative influence of different continuous predictors on a specific response (Schielzeth 2010), meaning parameters presented are standardized (see Annexe XIII for standardization values). For models involving ordinal and binary dependent variables (steps 3-5), coefficients were transformed as odds ratios to ease interpretation and comparisons. Odds ratios measure effect size in logistic and multinomial regressions and range between 0 and infinity. Values around 1 indicate no difference, values moving from 1 towards 0 indicate a decreasing probability, and values moving from 1 to infinity indicate an increasing probability. As an example, an odds ratio of 2 indicates that an event is twice as likely to occur when the independent variable increases of 1 unit.

### **2.5.6 Code availability**

All R scripts used in this study are available from the corresponding authors upon request.

### **2.5.7 Data availability**

The full database of climate variables from the CircumArctic Rangifer Monitoring and Assessment Network (CARMA) is available upon request at <https://carma.caff.is/>. Source data of climate variables used in this study are available in the online version of the paper.

Data on median caribou distances to communities are available in the online version of the paper. These data, which consist in caribou satellite locations, belong to the Porcupine Caribou Technical Committee.

Access to the database of survey data from the Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society (ABEKS) requires consent from indigenous communities involved in the project. The source data of indigenous monitoring used in this study can be accessed by sending a request to the ABEKS via <https://www.arcticborderlands.org/services>.

## **2.6 ACKNOWLEDGEMENTS**

We thank the many monitors, local experts, organizations, and community members who contributed to the Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society since 1998. We thank N. Casajus for assistance in computing caribou location indices, and Y. Gendreau, V. Lamarre, P. Legagneux, P. Royer-Boutin, C. Doucet, L. Guéry, M.-H. Truchon, É. Bolduc, V. l'Hérault, and J. Bêty for comments on the manuscript. Our research was supported by the Canada Research Chairs Program, the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada, the Northern Scientific Training Program (Polar Knowledge Canada), the International Polar Year program of Indian and Northern Affairs Canada, the Network of



Centers of Excellence of Canada ArcticNet, and the NSERC CREATE Training Program in Northern Environmental Sciences (Environorth).

**CHAPITRE 3**

**SURVEILLANCE ENVIRONNEMENTALE COMMUNAUTAIRE DANS  
L'ARCTIQUE : CAPITAL SOCIAL, UTILISATION DES CONNAISSANCES  
LOCALES DANS LES PROCESSUS DÉCISIONNELS ET APPRENTISSAGE**

De toutes les couleurs que je porte  
À l'intérieur de ma ville  
Il y a celle du vivre ensemble  
Se dessinant à l'horizon  
Les tyrans n'auront plus rien à dire  
Les femmes tomberont du ciel  
Et les chapeaux se feront papillons  
Pour traverser la mer  
Et là, par nos battements véritables  
Pessamit, Port-au-Prince, Montréal, Arequipa  
Nous pardonnerons  
Les ouragans

Natasha Kanapé-Fontaine<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup>Poème de l'artiste Innue Natasha Kanapé-Fontaine, entendu à l'émission la route des 20 de Radio-canada, le 20 octobre 2016. Accessible en rediffusion à l'adresse:  
<https://routedes20.radio-canada.ca/journal/detail/pessamiushkuess-a-port-au-prince/>

### 3.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU TROISIÈME ARTICLE

Les programmes collaboratifs de surveillance environnementale communautaire suscitent beaucoup d'intérêt dans l'Arctique, parce qu'ils ont le potentiel d'élargir la participation des résidents de l'Arctique en recherche et d'accroître la visibilité et l'utilisation des connaissances locales et traditionnelles dans les prises de décisions. Or, les retombées des programmes de surveillance environnementale communautaire sont encore peu connues, particulièrement dans le Nord. Nous nous sommes donc penchés sur un programme à long terme de surveillance environnementale communautaire œuvrant aux États-Unis et au Canada, l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society, pour évaluer les retombées sociales de ce programme en termes de construction de capital social, d'utilisation des connaissances locales par les gestionnaires et d'apprentissage parmi ses membres. Selon un sondage que nous avons effectué, tous les aspects du capital social mesurés, c.-à-d. la réciprocité, le respect, le partage des objectifs et des valeurs, les relations et la facilité de communication, sont élevés entre les membres du programme. Toutefois, malgré un haut niveau de capital social au sein l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society, seuls quelques exemples d'utilisation des connaissances locales par des gestionnaires de l'environnement ont été documentés suite à une revue exhaustive de la littérature. Nos résultats documentent les barrières freinant l'utilisation des connaissances locales récoltées par l'organisme étudié et illustrent comment cet organisme a appris à reconnaître ces difficultés et à les contourner. Les implications de notre étude incluent l'importance de voir les programmes de surveillance environnementale communautaires dans le Nord comme des initiatives pouvant favoriser la construction de relations respectueuses, l'apprentissage social et, ultimement, une plus grande utilisation des connaissances locales en gestion. Notre étude souligne aussi la nécessité pour les programmes de surveillance communautaire d'avoir accès à du financement à long terme s'ils veulent atteindre ces trois objectifs.

Ce troisième article, intitulé « *Community-based monitoring in the Arctic: social capital, use of local knowledge in decision-making, and learning* », fut corédigé par moi-même ainsi que par mon directeur de recherche Dominique Berteaux. Ce chapitre est un

manuscrit en préparation pour la revue *Ecology and Society*. En tant que première auteure, j'ai fourni l'idée originale de cette recherche et j'ai contribué à l'essentiel de la recherche, l'analyse des données, l'interprétation des résultats et la rédaction du manuscrit. Dominique Berteaux, deuxième auteur, a contribué à la révision du manuscrit.

Mots clés: surveillance collaborative; surveillance environnementale communautaire; co-production de connaissances; connaissances locales; recherche participative; capital social; apprentissage social

### **3.2 COMMUNITY-BASED MONITORING IN THE ARCTIC: SOCIAL CAPITAL, USE OF LOCAL KNOWLEDGE IN DECISION-MAKING, AND LEARNING**

#### **3.3 ABSTRACT**

Collaborative community-based monitoring programs are receiving increasing attention in the Arctic because they have the potential to expand the involvement of arctic residents in conducting research and increase the visibility and use of local and traditional knowledge within management processes. However, the outcomes of community-based monitoring programs are still poorly understood, especially in the North. We drew on a longstanding community-based monitoring program from the U.S. and Canadian Arctic, the Arctic Borderlands Ecological Knowledges Society, to assess the role of this collaborative program in terms of building social capital, bringing local knowledge to the decision-making table and promoting learning among its members. According to our survey, all aspects of social capital, i.e. reciprocity, shared goals and values and relationship and communication building, were high amongst Arctic Borderlands Ecological Knowledges Society members. Despite evidence of high social capital within the Arctic Borderlands Ecological Knowledges Society, only few examples of local knowledge uptake for management decisions were found. Our results document several barriers that impeded broader local knowledge presence in management processes, and illustrate how the Society has learned to address these barriers. The implications of our findings include the importance of looking at community-based monitoring programs as institutions that have the potential to foster relationship building, social learning and, ultimately, knowledge bridging. Our results also highlight the need for these programs to be able to access long-term funding if they want to successfully achieve this triple goal.

Key words: collaborative monitoring; community-based monitoring; knowledge co-production; learning; local knowledge; participatory research; social-capital; social learning

### 3.4 INTRODUCTION

Community participation in environmental monitoring and management has grown over the past decades (Conrad & Daoust 2008), including in the north-American Arctic where community-based monitoring has enjoyed a growing interest (Johnson *et al.* 2015). In Canada, policies and legal agreements now require the inclusion of local and traditional knowledge in environmental research and management (Gearheard & Shirley 2007), and support community-led science addressing local priorities (ITK & NRI 2007; Johnson *et al.* 2015).

Community-based monitoring (CBM) is generally defined as “a process where concerned citizens, government agencies, industry, academia, community groups, and local institutions collaborate to monitor, track, and respond to issues of common community concern” (Whitelaw *et al.* 2003). The participation of community members is thus an inherent aspect of CBM (Johnson *et al.* 2015), but the nature of such participation can vary greatly among programs (Conrad & Hilchey 2011). At one end of the spectrum, CBM is designed and led by government agencies whereas community residents simply implement data collection. At the other end of the spectrum, in collaborative, or *multi-party* CBM initiatives, community members take an active part on all aspects of the program and decide about monitoring priorities. These collaborative CBM programs are often overseen by a multi-stakeholder group including scientific researchers, community residents and government representatives (Conrad & Hilchey 2011). Collaborative CBM may also mobilize both scientific and local knowledge, in a knowledge co-production approach (Armitage *et al.* 2011; Kofinas *et al.* 2002).

Collaborative CBM programs in the Arctic present several potential benefits (Danielsen *et al.* 2010; Huntington 2011). First, the harsh winter and the high costs of arctic research challenge the ability of scientists to gather year-round data (Danielsen *et al.* 2014). Second, residents from northern Indigenous communities have monitored the Arctic environment since times immemorial (Kofinas *et al.* 2002) and frequently hold skills and

knowledge that can improve the monitoring and understanding of arctic ecosystems (Danielsen *et al.* 2014; Huntington 2011; Johnson *et al.* 2015; Moller *et al.* 2004). Fourth, collaborative CBM can help building a common understanding of ecological issues between scientists and northerners, thus improving relationships and trust amongst participants (Fernandez-Gimenez *et al.* 2008; Fernandez-Gimenez *et al.* 2005). Finally, the involvement of local residents in monitoring programs relevant to management can accelerate local policy changes (Danielsen *et al.* 2010) and facilitate approval of management policies (Wilson *et al.* 2006).

Yet the CBM outcomes remain understudied (Fernandez-Gimenez *et al.* 2008), especially in the Arctic where CBM is still scarce (Huntington 2011; Johnson *et al.* 2015). It is therefore critical to learn from the rare longstanding programs. Here we examine the outcomes of the Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society (ABEKS), one of the oldest (and still ongoing) collaborative CBM programs in the Arctic. Drawing on the recent literature on CBM and co-management (Armitage *et al.* 2011; Armitage *et al.* 2007; Berkes 2009; Fernandez-Gimenez *et al.* 2008; Plummer & FitzGibbon 2007; Ulambayar *et al.* 2016; Wagner *et al.* 2007) we identified three particularly relevant outcome categories for collaborative CMB programs in the Arctic: social capital, learning, and knowledge co-production for environmental management. We present them in turn.

### **3.4.1 Outcome category 1: Social capital**

In addition to generating data, CBM can build positive social relationships (Wagner & Fernandez-Gimenez 2008). Such relationships are an important asset that fosters collective action (Coleman 1988; Ostrom & Ahn 2001; Plummer & FitzGibbon 2006a; Pretty & Ward 2001) and can be drawn upon to gather or protect other forms of capital, such as economic and natural capital (Coleman 1988). Social capital is defined by the OECD as “networks together with shared norms, values and understanding that facilitate cooperation within or among groups” (OECD 2001: 41). This important concept is multidimensional and context-related, thus it is difficult to quantify (Nath *et al.* 2010; Plummer & FitzGibbon 2006a).

Nevertheless, four dimensions of social capital have been identified as being particularly relevant for environmental management and monitoring: 1- trust, 2- reciprocity and exchange, 3- shared vision and goals, and 4- relationship and communication (e. g. Ruseva *et al.* 2016; Smith *et al.* 2013a; Smith *et al.* 2013b; Wagner & Fernandez-Gimenez 2008). Social capital (trust in particular) facilitates sustainable resource management (Wagner & Fernandez-Gimenez 2008) and acts as a catalyst to the development of successful co-management initiatives (Plummer & FitzGibbon 2006a). It is an essential foundation for successful collaborative projects (Berkes 2009).

### **3.4.2 Outcome category 2: Knowledge co-production for environmental management**

Managing natural resources for sustainable development and human well-being requires extensive amounts of information (Millenium Ecosystem Assessment 2005; Turnhout *et al.* 2012; United Nations Environment Programme 2012), including scientific, local and traditional knowledge (Thaman *et al.* 2013; Turnhout *et al.* 2012). But how to best combine scientific and local knowledge is still unclear (Reid *et al.* 2006), so that innovative and transparent methods to do so still need to be developed (Tengö *et al.* 2014). In this regard, combining scientific and local knowledge has moved from knowledge integration to knowledge co-production, whereby both knowledges are engaged in “mutual processes of knowledge generation” (Tengo *et al.* 2014).

Knowledge co-production can be challenging when the perspectives of scientists and other actors conflict, or when social relations amongst actors are colored by past and contemporary power inequities (Pohl *et al.* 2010). CBM offers a promising avenue to co-produce science and local knowledge (Danielsen *et al.* 2007), and in the Arctic such co-production can promote the use of local and traditional knowledge in environmental management processes (Johnson *et al.* 2015).



### 3.4.3 Outcome category 3: Learning

Learning has recently emerged as an important topic regarding the theory and practice management of natural resources (Berkes 2009; Keen & Mahanty 2006). In particular, “learning-based” and “learning-by-doing” approaches were recognized as more effective than rigid prescriptions to handle uncertain and complex environments (Armitage *et al.* 2007). Learning has thus become a foundation of adaptive environmental management (Holling 1978).

Learning can occur at both the individual and group level (Armitage *et al.* 2011). Individually, people can go through various cognitive processes that change their understanding and perspectives about ecosystems and environmental issues (Pahl-Wostl *et al.* 2007). However, focusing on individuals fails to recognize the social context within which learning takes place. In contrast, group-level learning, or social learning, can be defined as “iterative action, reflection, and deliberation of individuals and groups engaged in sharing experience and ideas to resolve complex challenges collaboratively” (Armitage *et al.* 2011). Social learning is thus “situated within wider social units or communities of practice through social interactions between actors within social networks” (Reed *et al.* 2010). This definition emphasises that learning processes are influenced by both the environmental and organizational structures within which they occur (Pahl-Wostl *et al.* 2007). Pahl-Wostl *et al.* (2007), for example, showed that informal discussion platforms favor learning processes in the context of sustainable water resources management. CBM can foster social learning (e.g. Fernandez-Gimenez *et al.* 2008) by allowing individual learning to be shared and evolved into group learning (Diduck *et al.* 2005). Yet, much remains to be understood about the links between CBM and social learning in the Arctic.

### 3.4.4 Objectives

Most of what we know about social capital, knowledge co-production and learning in the Arctic has emerged from the co-management literature (Armitage *et al.* 2007). However,

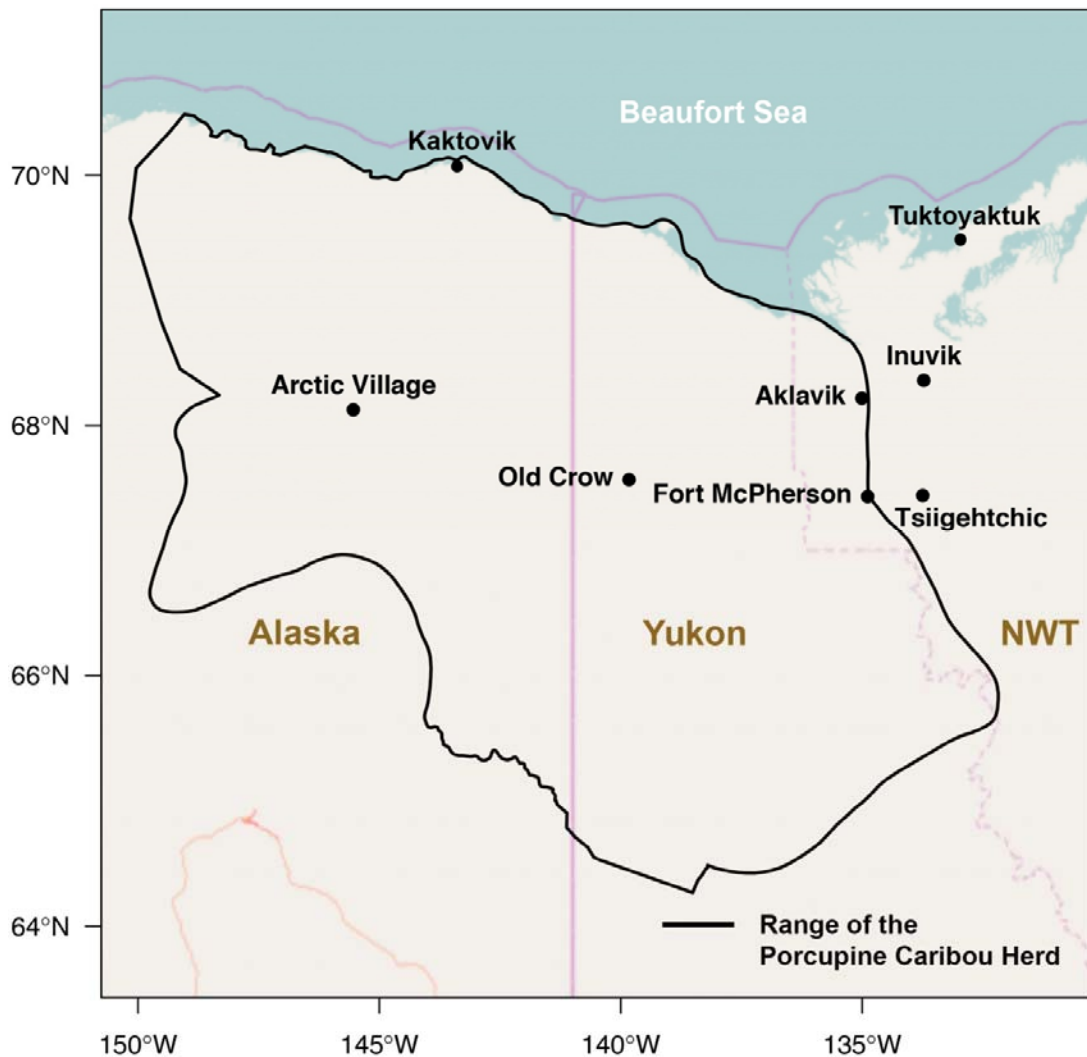
CBM is submitted to different power relationships than co-management because it is not always directly related to decision making (e.g. Eamer 2006). In this context, we examined the outcomes of the ABEKS collaborative CBM program in terms of social capital, knowledge co-production for environmental management, and learning. More specifically, our objectives were to 1- assess the level of social capital within the ABEKS organization (outcome category 1), 2- look for evidence of local knowledge collected through CBM being applied to make environmental decisions (category 2), 3- identify factors that may have facilitated or inhibited the application of local knowledge (category 2), 4- examine whether CBM fostered individual or social learning amongst its members (category 3), and 5- analyse differences between ABEKS members involved locally (community monitors) and those involved at the regional to national level (mostly board members, government and agency representatives) in (a) use of local knowledge to make environmental decisions and (b) learning (categories 2 and 3). Generally, we predicted that the ABEKS collaborative CBM program promoted the building of social capital amongst its members and that this would be reflected in frequent examples of ABEKS data being used by management agencies closely related to the program. We also anticipated a positive effect of the CBM program in fostering learning at the individual and institutional level.

### **3.5 METHODS**

#### **3.5.1 The Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society**

The ABEKS is a collaborative monitoring program ongoing since 1994. ABEKS operates within the range of the Porcupine caribou herd, as well as adjacent marine and coastal areas. The Porcupine herd (named after the Porcupine River) is a large migratory caribou herd (197,000 individuals in 2013) that ranges over ca. 250,000 km<sup>2</sup> in parts of the Yukon and Northwest Territories (Canada) and northeastern Alaska (USA). This region, named “Arctic borderlands”, is ecologically diverse, including large rivers, tundra and taiga habitats, mountainous areas and the Mackenzie Delta, one of Earth’s most extensive river delta. The Arctic borderlands is sparsely populated and the vast majority of residents are

Indigenous Peoples, including three cultural groups, the Inupiat (Alaska), the Inuvialuit (Canada) and the Gwich'in (Alaska and Canada). These groups live in the communities of Old Crow, Fort McPherson, Tsiigehtchic, Aklavik, Inuvik, Arctic Village, Kaktovik and Tuktoyaktuk (Figure 10).

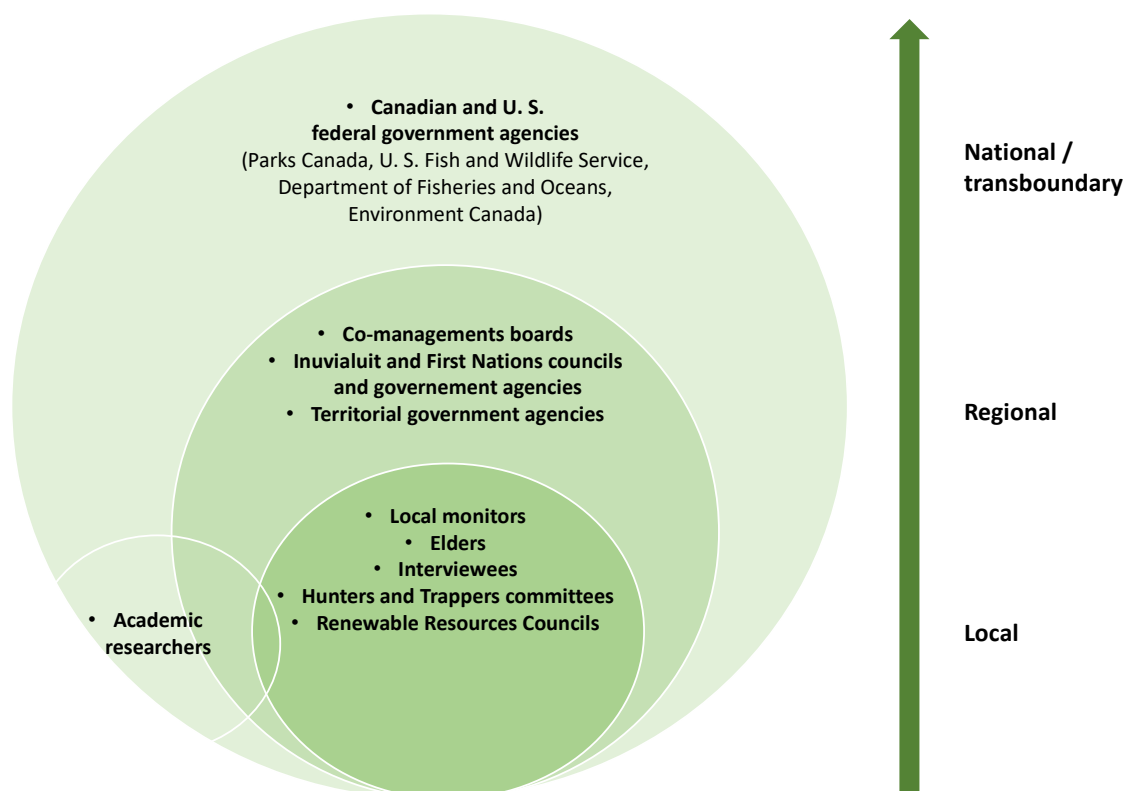


**Figure 10.** The area covered by the Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society encompasses the annual range of the Porcupine caribou herd and adjacent marine and coastal areas. All communities located on the map have been involved in the Society. These communities include Inupiat (Kaktovik), Gwich'in (Arctic Village, Old Crow, Fort McPherson, Tsiigehtchic, Inuvik and Aklavik) and Inuvialuit (Aklavik, Inuvik and Tuktoyaktuk) cultural groups. Inuvik and Aklavik include both Inuvialuit and Gwich'in cultural groups and these have been involved separately in the Society.

Together, these communities have broad knowledge and experience about the Arctic borderlands. Caribou, in particular, has been an important resource for hundreds to thousands of years (Bourgeon *et al.* 2017; Le Blanc 2015). Today, communities have mixed traditional-cash economies, yet caribou hunting remains a significant cultural tradition and caribou meat an important part of the diet (Kuhnlein *et al.* 2009; Porcupine Caribou Management Board 2004).

The creation and implementation of the ABEKS are described in Eamer (2006) and Kofinas (2002). In short, the ABEKS was born out of a meeting held in the Yukon in the mid-1990s between community representatives, government managers, scientists and indigenous leaders (Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society 2014a; Eamer 2006). The aim of the meeting was to find a way to improve ecological monitoring in the range of the Porcupine caribou herd, given various concerns about climate change and potential developments in the region. From the onset of the program, collaboration between scientists and community members was at the core of the ABEKS. In the mid-1990s, most environmental management in the North American Arctic drew on scientific information only. People creating the ABEKS wanted to overcome the gap between scientists and community members by developing a monitoring program incorporating scientific research, local observations and traditional ecological knowledge. The ABEKS was established as a non-profit organization run cooperatively by its members.

The communities of Aklavik, Old Crow and Fort McPherson were involved in the ABEKS since its beginning and were later joined by the other communities. In 2018, all the above-mentioned communities were actively participating in the ABEKS. The ABEKS bridges diverse jurisdictional and organizational setting because its membership includes community residents, government agencies, representatives of management boards and academic researchers. As a bridging organization (Berkes 2009; Folke *et al.* 2005), the ABEKS facilitates exchanges between local and scientific knowledge and promotes horizontal and vertical linkages amongst individuals and organizations (Figure 11).



**Figure 11.** The membership of the Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society comprises individuals and organizations operating at various geographical and jurisdictional scales. The Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society is a bridging organization which facilitates collaboration across scales and promotes the co-production of local and scientific knowledge.

Since its creation, the ABEKS has followed four main objectives: 1) to monitor and assess ecosystem changes in the range of the Porcupine caribou herd and adjacent coastal and marine areas, 2) to encourage use of both science-based studies and studies based on local and traditional knowledge in ecological monitoring and ecosystem management, 3) to improve communications and understanding among governments, indigenous and

nonindigenous communities, and scientists with regard to ecosystem knowledge and management, and 4) to foster capacity-building and training opportunities in northern communities in the context of the above-listed goals.

In order to comply with its objectives, the ABEKS comprises three main components. First, ABEKS participants identified 70 existing scientific indicators that track environmental conditions in the Arctic borderlands. These indicators include, for example, contaminant levels in wildlife, physical factors such as temperatures, snow depth, indices of forest fires, trends in animal populations and trend in plant growth (Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society 2014c). Indicators are mostly monitored through governmental agencies, whereas the ABKES gathers the data in a single public repository.

The second and perhaps most well-known component of the ABEKS is its community-based monitoring program. Each year, community monitors are selected by their local participating organizations to interview local experts of the land about various topics including caribou, fish, berries and predators. The interviews rely on a questionnaire including close and open-ended questions developed by ABEKS members. Prior to interviewing, community monitors receive an annual training from the ABEKS. The first task of community monitors is to establish a list of local experts that were active on the land during the previous year. This list is elaborated with help from local organizations. The monitors then proceed with interviewing, and submit their results to the ABEKS coordinator. The monitoring program attempts to interview 20 local experts per year per community. Over the years, the monitoring questionnaire was reviewed and adapted, but many questions have remained unchanged. From 2001 to 2015, the ABEKS performed 1959 interviews.

Finally, the ABEKS is responsible for communicating back to communities and participating organizations the trends in indicators and the results from the monitoring program. This is done at annual gatherings and through community meetings. Annual gatherings are held in one of the participating communities and community monitors, ABEKS participating organizations, board members and the public are all invited. Each year, community monitors prepare their own summary of findings and present the results to

gathering attendance (Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society 2014a). Gatherings and meetings also provide the opportunity to discuss and make decisions about the ABEKS (Eamer 2006). Reports from gatherings are published on the ABEKS website (Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society 2014a) and sent to participating organizations.

Two organizations with mandates on the management of renewable resources have been particularly involved with the ABEKS and were identified as potential ABEKS data users, the Porcupine Caribou Management Board (PCMB) and the Wildlife Management Advisory Council for the Yukon North Slope (WMACNS; Svoboda 2015). The PCMB was created in 1985 and makes harvest recommendations to the agencies managing the Porcupine caribou herd (Porcupine Caribou Management Board 2010). Its membership comprises representatives from First Nations and Inuvialuit councils, as well as representatives from Canadian territorial and federal governments (Porcupine Caribou Management Board 2018a). The WMACNS was also established in the 1980s through the Inuvialuit Final Agreement land claim settlement and its role is to “conserve and protect wildlife, habitat and traditional Inuvialuit use within the Yukon North Slope” (Wildlife Management Advisory Council Yukon North Slope 2018). WMACNS’ membership comprises representatives from the Inuvialuit Game Council, the territorial government of Yukon, and the federal government of Canada. The core management implication of WMACNS is to develop a conservation and management plan for the North Slope and act to implement this plan. For years, the WMACNS has funded the ABEKS to receive information about the state of the Yukon North Slope environment.

### **3.5.2 Data collection**

We combined a web survey, a document review, and participant observations (Creswell 1998) to collect information on social capital, the inclusion of local knowledge in management decisions, and learning.

Social capital was conceptualized in the context of the ABEKS based on the environmental management and monitoring literature (e. g. Ruseva *et al.* 2016; Smith *et al.*

2013a; Smith *et al.* 2013b; Wagner & Fernandez-Gimenez 2008). Based on survey examples that demonstrated high reliability and validity (Ruseva *et al.* 2016; Smith *et al.* 2013b; Wagner & Fernandez-Gimenez 2008), we developed a pool of statements intended to measure three of the four dimensions of social capital above-mentioned, i.e. 1- reciprocity and information exchange, 2- shared vision and goals and 3- relationship and communication. Trust was not measured because this raised ethical concerns according to ABEKS members and our university's ethical committee. In particular, any potential result showing a low level of trust among ABEKS members could have affected relationships within the ABEKS or between the ABEKS and outside organizations. Respondents were asked through an online survey to indicate their level of agreement or disagreement with each of our statements, using a 5-point Likert-like scale (Likert 1932) in which response values were ranked from 1 (no, not at all) to 5 (yes, definitively). Tableau 4 lists our statements and details our 5-point scale.

We also developed a pool of statements inquiring about the contributions of the ABEKS to the two other outcome categories for collaborative CMB programs in the Arctic, namely the inclusion of local knowledge in environmental decision-making and common learning about ecosystems (Tableau 5). Again, responses to statements followed a 5-point likert-like scale. Prior to its implementation, the online survey was reviewed and tested by two close collaborators of the ABEKS. Some questions were clarified following their comments.

The final survey contained 21 statements, one open question about the inclusion of local knowledge in management, and 6 questions about the role and length of involvement of respondents in the ABEKS. The survey questionnaire was sent to all ABEKS members involved in 2006-2017, as identified through group mailing lists and reports from the ABEKS annual gatherings. Participants included community monitors, board members, academic researchers and observers (mostly agency representatives). In total 48 surveys were sent and 17 responses were received, for a response rate of 35% that is consistent with Johnston (2005) who also surveyed the ABEKS.



We verified nonresponse bias by comparing successive waves of survey answers, as described by Armstrong and Overton (1977). This method assumes that persons responding late share more similar characteristics and answers with nonrespondents than those responding early, thus allowing to extrapolate nonresponse bias. We found no significant effect of the timing of survey answers on characteristics and responses of respondents, suggesting little or nonresponse bias.

Concurrently with the survey, we reviewed all documents related to the ABEKS in order to 1- identify examples where local or traditional knowledge collected through ABEKS was used to inform environmental decision making and 2-look for evidence regarding the factors that may have inhibited or facilitated this use. The reviewed documents included 14 internal and 19 external reports, seven ABEKS community-based monitoring questionnaires, two public presentations performed by ABEKS members, two case studies published in books, eight scientific articles, 13 meeting minutes, and 15 ABEKS annual gathering reports.

Finally, one of us (CAG) actively participated to >10 ABEKS activities from 2009 to 2013 to validate and help interpreting the survey data and the document review. She participated to three ABEKS annual gatherings, to one joint meeting between the ABEKS and the Porcupine Caribou Management Board, and to one board meeting reviewing the ABEKS community-based monitoring questionnaire. She also attended five phone meetings among ABEKS board members. In 2013, the lead author did a seven-week internship in the Environment and Climate Change Canada office in Whitehorse (Yukon) which coordinates the program. Finally, the lead author attended in 2017 a multi-stakeholders webinar investigating potential overlap between the monitoring program of the ABEKS and others conducted in the same region.

### **3.5.3 Data analysis**

We used R software version 3.4.2 (R Development Core Team 2017) for all survey analyses. Before compiling and analysing our survey results, we verified the internal reliability and composite reliability (Laveault 2012; Revelle 2017; Rosseel 2012) for each

dimension of social capital measured, to ensure that our survey instrument's wording reliably measured these dimensions. Cronbach's alpha values ( $\alpha$ ) and composite reliability (cr) were calculated using the "psych" package in R (Revelle 2017; Rosseel 2012).

*Objective 1-* To assess the level of social capital in the ABEKS organization, we calculated the medians and interquartile ranges (IRQ) (IQR; Sullivan & Artina 2013) of the results of each survey statement pertaining to social capital. The interquartile range is a measure of data spread and therefore indicates if there were small or large differences in the answers provided by respondents regarding each statement.

*Objectives 2 and 3* – First, we calculated the medians and interquartile ranges of the results of each survey statement pertaining to the use of local knowledge (see above). Second, we extracted from reviewed documents all instances where local knowledge collected through the ABEKS CBM program was applied in an environmental decision-making process. Third, we analysed documents and drew from our participant observations to list barriers to the use of ABEKS local knowledge data. Fourth, we then inductively classified barriers according to four categories that emerged from our analysis, as described in Miles and Huberman (2003).

*Objective 4* –To assess level of individual learning, again we calculated the medians and interquartile ranges of the results of each survey statement. In addition, we collected evidence of social learning from our document review and participant observation, as described in Miles and Huberman (2003).

*Objective 5* - Due to a relatively low sample size ( $n < 30$ ) of respondents, we used the non-parametric Wilcoxon rank sum test (function `wilcox.test` in R; de Winter & Dodou 2010; Mircioiu & Atkinson 2017) to compare survey responses between respondents mostly active locally and those working at the regional to national level. We report results of this analysis with the Wilcoxon statistics (W) and  $p$ -values.

### 3.6 RESULTS

Internal reliability and composite reliability were high for each dimension of social capital measured. Cronbach's alpha values and composite reliability were above 0.7 for all dimensions of social capital including reciprocity and exchange ( $\alpha = 0.72$ ;  $cr = 0.71$ ), shared vision and goals ( $\alpha = 0.71$ ;  $cr = 0.78$ ) and relationship and communication ( $\alpha = 0.77$ ;  $cr = 0.80$ ). Internal reliability and composite reliability were also strong for the measures of common learning ( $\alpha = 0.81$ ;  $cr = 0.80$ ) inclusion of local knowledge and management ( $\alpha = 0.82$ ;  $cr = 0.88$ ).

#### 3.6.1 Community-based monitoring increased social capital (Objective 1)

Respondents strongly agreed with the presence of reciprocity, information exchange, shared vision and goals and relationship building among ABEKS members (Tableau 4). Overall, the level of variability in the answers was fairly small, with  $IQR \leq 0.50$  for 7 statements and  $IQR = 1.00$  for 8 statements. Notably, answers did not vary regarding respect among participants and comfort in expressing opinions and concerns, meaning that all participants believed there was a high level of respect and free expression within the ABEKS. The lowest recorded medians concerned methods used during gathering and board meetings with regards to information sharing (3.50), and opportunities do discuss interests, goals and concerns (3.00), indicating that most respondents had neutral level of agreement with these statements.

**Tableau 4.** Median, interquartile range (IQR) and sample size (n) for responses to a web survey conducted in 2017 about social capital within the Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society. Responses indicated a level of agreement with statements along a 5-point scale: 1 = not at all, 2 = no, 3 = undecided, 4 = yes, 5 = yes, definitively.

	Median (n)	IQR
<b>Statements allowing assessment of social capital (dimension 1): Reciprocity and information exchange</b>		
1. I get to exchange with other ABEKS participants at outside the ABEKS gathering or meetings	4.00 (17)	1.00
2. I believe participants openly share knowledge and information	4.00 (17)	0.00
3. I believe participants openly share their interests, goals, and concerns	4.00 (17)	1.00
4. I feel comfortable expressing my opinion	4.00 (16)	0.00
5. I also express my ideas when they differ from the ones expressed by other participants	4.00 (17)	1.00
6. I am satisfied with the amount of influence I have in the gatherings or meetings	4.00 (17)	1.00
7. My views and concerns are treated seriously by other participants	4.00 (17)	0.50
<b>Statements allowing assessment of social capital (dimension 2): Shared vision and goals</b>		
8. As a result of the ABEKS process, I feel part of a group that tries to better understand the Arctic borderlands area of study	4.00 (17)	1.00
9. As a result of the ABEKS program, I feel part of a group that tries to develop common knowledge of the environmental conditions within the Borderlands area of study	4.00 (16)	0.25
<b>Statements allowing assessment of social capital (dimension 3): Relationship and communication</b>		
10. As a result of the ABEKS program, I have made new contacts and relationships with other participants that I would not have been able to do otherwise	4.00 (17)	1.00
11. As a result of the ABEKS process, I have further developed existing relationships with other participants that I would not have been able to do otherwise	4.00 (16)	0.25
12. I consider that there is mutual respect amongst ABEKS members.	4.00 (17)	0.00
13. ABEKS does a good job of being a bridge between local experts of the land and managements organizations	4.00 (15)	0.50
14. Methods employed during and outside gatherings or meetings provide participants and other stakeholders with opportunity to provide and obtain information	3.50 (16)	1.00
15. Methods employed during and outside gatherings or meetings provide participants and other stakeholders with opportunity to discuss their interests, goals, and concerns	3.00 (17)	1.00

### **3.6.2 Community-based monitoring marginally contributed to including local knowledge in management processes (Objective 2)**

Respondents strongly agreed that the ABEKS contributed to the inclusion of local knowledge within management processes (Tableau 5, statements 1-3). However, responses were highly variable (IQR = 2.00; Tableau 5, statement 3) when respondents were asked if they actually included local knowledge in their management decisions as an outcome of their participation in the ABEKS.

Our document analysis and participant observations yielded only two examples where local knowledge collected through the ABEKS CBM program informed environmental management. First, data from the ABEKS CBM program were used for the annual assessment of the Porcupine caribou herd status. The annual assessment of herd status is an important endeavor for the PCMB and uses indicators based on both scientific and local knowledge (Porcupine Caribou Technical Committee 2016). The PCMB has long recognized the importance of local and traditional knowledge but has struggled to incorporate the ABEKS local knowledge indicators into their herd assessment, mainly because they were often presented as raw data (Cleghorn & Staples 2016). Validity of the data was also sometimes questioned (CAG, personal observation). Nevertheless, this input offers the only clear example where CBM knowledge was used for management.

Second, the ABEKS data were used for the WMAC project on Inuvialuit Traditional Knowledge of Wildlife and habitat (Wildlife Management Advisory Council (North Slope) & Aklavik Hunters and Trappers Committee 2018). However, the WMAC also questioned the applicability of the ABEKS data to support their management decisions (Symbion Consultants 2008; Wildlife Management Advisory Council Yukon North Slope 2008).

**Tableau 5.** Median and interquartile range (IQR) for responses to a web survey conducted in 2017 about the contributions of the Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society regarding the inclusion of local knowledge in environmental management processes and learning about ecosystems and ecological issues. A comparison between members most active at the local scale (L) and members most active in regional and national organizations (R) is also presented. Responses indicated a level of agreement with statements along a 5-point scale: 1 = not at all, 2 = no, 3 = undecided, 4 = yes, 5 = yes, definitively. Significant differences (Wilcoxon rank sum test) between answers of local and regional groups of respondents are in bold.

	Median (n)	IQR	Median (n) L	IQR L	Median (n) R	IQR R	W	p- value
<b>Statements allowing assessment of inclusion of local and traditional knowledge in management decisions</b>								
1. ABEKS contributes to bringing together local AND scientific knowledge to better understand environmental conditions within the Borderlands area of study.	4.50 (16)	1.25	5.00 (7)	1.00	4.00 (9)	2.00	21	0.28
2. ABEKS contributes to a greater inclusion of community knowledge within management	4.00 (15)	1.00	4.50 (6)	1.00	4.00 (9)	1.00	10.5	<b>0.04</b>
3. Due to the ABEKS, I have included more local knowledge in my management decisions	4.00 (11)	2.00	4.00 (5)	1.00	2.50 (6)	1.75	6.5	0.13
<b>Statements allowing assessment of learning</b>								
4. As a result of the ABEKS program, I have a better understanding of the environmental conditions within the Co-op area of study.	4.00 (16)	1.00	5.00 (7)	1.00	4.00 (9)	0.00	14	<b>0.04</b>
5. As a result of the ABEKS process, I changed my view about the important issues related to the Co-op area of study.	4.00 (15)	1.50	4.00 (7)	1.00	2.50 (8)	1.25	4	<b>0.005</b>
6. ABEKS improves understanding among governments, indigenous and non-indigenous communities and scientists with regard to ecosystem knowledge and management	4.00 (15)	1.00	4.00 (6)	1.50	3.00 (9)	1.00	15	0.15

### **3.6.3 There were barriers to using in management processes the local knowledge derived from the ABEKS community-based monitoring (Objective 3)**

Our document review and participant observations identified four types of barriers impeding a broader use of ABEKS local knowledge in management processes.

*Methodological barriers* – The format of the ABEKS database made it difficult to retrieve data and this was a serious methodological issue for at least the first 12 years of the program (Johnston 2005; Symbion Consultants 2008). Data was stored in a Microsoft Access database. Within this database, responses to the question were codified and organized in several types of tables and identified by obscure codes. To be able to efficiently retrieve data, an individual would need to be proficient with the Access software and very familiar with the codes developed to store the question responses. Over the years, only few individuals appeared to possess all the necessary skills to work with the data (Symbion Consultants 2008). Obtaining data access has also been an issue for many years. From the onset of the CBM program, it was obvious that open data access was not appropriate. Therefore, the ABEKS established a data access protocol requesting external partners to fill a form and provide consent letters from all participating communities. However, this protocol was not well-known to potential users, which restricted access to the data. As a result of these methodological issues, analysis of ABEKS local knowledge data has been fairly superficial for several years, and results were generally communicated as broad summaries and sometimes raw annual data. It was not until 2008 that funding agencies started to ask for more extensive analyses and summary results. Until then, the ABEKS database was perceived by some as a Pandora box and lack of analysis impeded data uptake by management agencies.

*Organizational barriers* – Analysing and interpreting local knowledge is challenging and too little human and financial resources were dedicated to this task from the beginning of the program (Eamer 2006). Also, the ABEKS was established and given a good start owing to the dedication of a core set of people, including a dynamic program coordinator working for Environment and Climate Change Canada (Yukon). Coordinating the ABEKS, however, was never part of the main job definition of the Environment Canada employee. When the

program coordinator changed employment, she was replaced by another employee who had less personal involvement with the ABEKS, and this contributed to affect the program's leadership, momentum and radiance.

*Data relevance* –Tensions occurred within the ABEKS CBM program between the need to develop a sense of local ownership and participation and the need to satisfy the data requirements of contributing agencies. In other words, the ABEKS local knowledge data do not always fit the priority topics and data formats sought by management agencies, because such fit was not an original goal of the monitoring.

*Data credibility* –The lack of data relevance also generated questions about data credibility for decision making. In 2005, a report conducted through Environment Canada stated that the ABEKS community-based monitoring data would “require significant re-evaluation in order to ensure that the data meet the necessary rigor for policy and decision-makers” (Johnston 2005). In 2008, the WMACNS also commissioned an external review to evaluate the quality of the ABEKS community-based monitoring database (Symbion Consultants 2008). The review raised issues such as incomplete questionnaires, interviewee turnover, and questions offering subjective response choices. Finally, in 2016, the ABEKS hired consultants to evaluate the validity of ABEKS data as a source of local knowledge for the management of the Porcupine Caribou Herd (Cleghorn & Staples 2016). This time, the report concluded that the data was valid. However, the commissioning of several reports to evaluate the validity of the data suggests an inherent suspicion from some agencies.

#### **3.6.4 Community-based monitoring contributed to common learning about ecosystems and environmental conditions and presented evidence of social learning**

Respondents strongly agreed that the ABEKS contributed to individual learning about ecosystems and environmental conditions within the Arctic borderlands (Tableau 5, statements 4-6). The median was 4 for all statements, although answers were more variable (IQR = 1.50) for the statement regarding changes in views about important issues.



Social learning was not assessed directly through the survey, but emerged as a theme during document review and participant observant. For example, when issues regarding the database format were raised (Symbion Consultants 2008), the ABEKS hired an external consultant to simplify the format. Recognizing that data access was an issue for external researchers, the ABEKS simplified the data access protocol and offered assistance to complete the form in order to encourage broader use and analysis of the monitoring data. The ABEKS board members also recognized the need to harmonize their goals with those of regional management agencies. To address this, the ABEKS modified its CBM questionnaire several times to include questions fitting the needs of agencies. The ABEKS also started a project in 2016 to clarify the needs of the PCMB and WMACNS with regards to local knowledge data content and format (Svoboda 2015). To address lack of analysis and questions regarding data credibility, the ABEKS also secured funding to hire external consultants that analyzed trends in ABEKS caribou indicators and evaluated the validity of ABEKS caribou data (Cleghorn & Staples 2016; Nguyen 2016; Russell *et al.* 2013a).

### **3.6.5 Differences were observed in levels of use of local knowledge and learning between ABEKS members (Objective 5)**

When asked if the ABEKS contributed to a greater inclusion of local knowledge, respondents working at the local scale and respondents working at the regional and national scale both agreed (median (L) = 4.50; median (R) = 4.00) but respondents working at the local scale presented a slightly higher level of agreement ( $W = 10.5$ ,  $p$ -value = 0.04; Tableau 5, statement 2). Interestingly, respondents working at the local scale also agreed that ABEKS made them include local knowledge in their management decisions (median (L) = 4.00) whereas respondents working at larger scales tended to disagree (median (R) = 2.50), but the Wilcoxon rank sum test failed to detect a statistically significant difference between answers from the two groups (Tableau 5, statement 3).

Perceptions about learning statistically differed between respondents active in local organizations versus those working at regional or national scales in two out of three items (Tableau 5, statement 4-5). Noteworthy, our analysis shows that respondents involved at the

local scale agreed that the ABEKS changed their view about important issues in the ABEKS area of study (median (L) = 4.00), whereas respondents working at regional and national scales disagreed with this item (median (R) = 2.50;  $W = 4$ ,  $p$ -value = 0.005; Tableau 5, statement 5).

### **3.7 DISCUSSION**

We investigated the evolution and outcomes of the longstanding and collaborative Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society. Our study shows that collaborative CBM can yield high levels of social capital among participants, but that social capital does not directly lead to high levels of local knowledge representation within environmental decision-making processes. Four barriers to such representation were identified. Our results also suggest that CBM provides mechanisms for learning that can foster local knowledge inclusion, although the level of knowledge inclusion varies among CBM participants, depending on the scale at which they work.

#### **3.7.1 Community-based monitoring can build social capital**

Overall, we observed a high level of social capital within the ABEKS in terms of reciprocity and information exchange, shared vision and goals and relationship building. Low variability in most survey answers indicated that social capital was not influenced by the role that members played within the program. In other words, local monitors, board members or agency representatives all highly agreed that, for example, their concerns were treated seriously by others ABEKS members. Respect and comfort in expressing opinions demonstrated particularly high levels of consensus within respondents (Tableau 4, statements 2, 4 and 12). The independence between the ABEKS and management systems may explain this high level of consensus, as people may feel less inhibited to express themselves than they would in a decision-making process. According to Wagner and Fernandez-Gimenez (2008), respect and equal input are perhaps the most important components of social capital, as they lay the foundation from which relationships among participants can evolve. Our results

suggest that as a bridging organization, the ABEKS succeeded in its relationship building role since it promoted high levels of respect and equal input among its participants (Berkes 2009).

Our findings are consistent with those from earlier studies conducted outside the Arctic, where social benefits of community-based monitoring programs in terms of trust and community building were also demonstrated (Fernandez-Gimenez *et al.* 2008; Smith *et al.* 2013b). Our findings also support the idea that social interactions among people involved in collaborative natural resources management increase social capital (Ostrom & Ahn 2003; Pretty & Ward 2001). Relationship building, however, takes time and needs opportunities for interactions (Ostrom & Ahn 2001). Fernandez-Gimenez *et al.* (2008) also found that community-based monitoring programs involving diverse cross-sections of community members resulted in greatest social benefits. We believe that the longstanding nature of the ABEKS program, as well as the diversity of community members and stakeholders involved, favored a high level of relationship building. The gatherings held annually by the ABEKS generate many interactions between members and are undoubtedly triggering much of this relationship building.

Using a survey methodology to investigate social capital has shortcomings, both in terms of measurements and possibilities for in-depth analysis. There is not a universally accepted definition of social capital (Ostrom & Ahn 2003), nor is there a single standardized instrument for measuring it (Plummer & FitzGibbon 2006b). It is difficult to determine from surveys if reported levels of agreement with social capital items reflect exactly the reality. People may decide to report high level of agreement because, consciously or not, they do not want to admit failure in their organization (Ruseva *et al.* 2016). Nevertheless, our participant observations, combined with the lack of apparent internal conflict within the ABEKS and the long-term investment (> 10 years) of a third of ABEKS survey participants, support our findings of high social capital levels. Adding semi-structured interviews to the survey would have allowed more in-depth analysis of our results.

### 3.7.2 Informing management: the crux of local knowledge monitoring

We expected that a high level of social capital within the ABEKS would promote the use of local knowledge for management decisions. We also expected to find wide examples of data uses given the extent of the dataset (1,959 interviews) and the large spatial and temporal scales covered by collected knowledge. Nevertheless, we found that the use of ABEKS data to inform herd status by the Porcupine Caribou Management Board was the only clear example of ABEKS data usage for management. We now discuss this poor link between social capital and the use of local knowledge in environmental management.

Bridging science and local knowledge for management is not easy (Reid *et al.* 2006). Barriers include the difficulty to present local and traditional knowledge in a format that is amenable to management institutions without compromising its essence and meaning (Reid *et al.* 2006). Moreover, the local knowledge of Indigenous Peoples is constructed from different worldviews and assumptions than scientific knowledge (Berkes 1999), and government managers may be reluctant to trust this knowledge (Reid *et al.* 2006). Finally, the depth and focus of local and traditional knowledge is influenced by culture and means by which local residents interact with their surrounding environment (Johnson *et al.* 2015). Therefore, community residents have more knowledge on topics of cultural interest (Gagnon & Berteaux 2009). Because of this cultural bias, local knowledge may not always be available at level of details and scales required for management. In the case of the ABEKS, relevance of data for management has been one of the most important barriers to its uptake. Community priorities were central when the ABEKS was created in 1994, and the ABEKS CBM program thus addressed community concerns.

In Canada, there is a strong will from national indigenous organisations to change the paradigm of research conducted in the Arctic and move towards research programs being conducted by and for indigenous communities (e.g. ITK & NRI 2007). The ABEKS was at the forefront of this transition. Interestingly, our results show that members of the ABEKS working at the local level reported using ABEKS local knowledge for management, whereas

this was less clear for members working at higher scales of organisation. Unfortunately, our survey did not allow for an in-depth understanding of what was meant when people working locally used local knowledge for management. Moreover, the use of local knowledge at the community level tends not to be documented in reports. Therefore, unless one is highly familiar with local organisations, it is hard to find documented examples of the use of ABEKS data for local management. Nevertheless, our results suggest that the ABEKS complied with its original objectives to address the information needs of communities. One should therefore be cautious when judging the success or failure of a CMB program based on its data use by agencies at the regional and national scales.

The credibility of data generated through the ABEKS monitoring program has been another important barrier to its uptake by some decision-making groups. Questions pertaining to data accuracy and bias are common to most scientific endeavors. In the case of the ABEKS however, certain agency representatives were particularly sensitive to the question of accuracy because data were based on observations from local people (CAG, pers. observation). This barrier and skepticism is in fact common to most data collected through CBM (Conrad & Daoust 2008; Eamer 2006). Russel *et al.* (2013a) concluded that ABEKS local knowledge was a valid source of information to understand the ecology of caribou (Russell *et al.* 2013a). Despite this, the ABEKS had to tackle the credibility issue again in 2016 when it hired an independent consultant to specifically evaluate the validity of ABEKS data as a source of local knowledge for caribou management (Cleghorn & Staples 2016). The study concluded that data was credible. This example illustrates how, despite a high level of social capital amongst people, the epistemological distinctions that lay the foundations of different knowledges can be particularly hard to overcome.

Looking at scale complementarities offers a useful lens to help bridging scientific and local knowledge for decision making (Gagnon & Berteaux 2009; Reid *et al.* 2006; Tengö *et al.* 2014). Russell *et al.* (2013) explained how, for nine consecutive years (2001-2009), population estimates for the Porcupine caribou herd were impossible to collect. At the time, agencies and groups managing the herd feared a continued declining in the population, as

was observed through estimates conducted in the 1990s, while ABEKS data about caribou health and availability suggested improving conditions for the herd. In 2010, a successful population survey concluded that the herd had in fact grown (Porcupine Caribou Technical Committee 2014) during 2001-2009. Although it was not used to inform management between 2001 and 2009, the ABEKS data could have complemented temporal gaps in scientific data during this period. Russell *et al.* (2013) provide a good example of temporal scale complementary among scientific and ABEKS local knowledge. They also concludes that ABEKS data and scientific data could be combined (see Tengö *et al.* 2014) to inform caribou management.

### **3.7.3 Community-based monitoring for learning**

According to our survey results, the ABEKS contributed to individual learning about ecosystems in the Arctic borderlands, but ABEKS members working locally learned more than those working at regional and national scales. These results again reflect the locally embedded objectives of the ABEKS, and support the idea that local knowledge contributes poorly to environmental understanding at large spatial scales (Reid *et al.* 2006). ABEKS members working at regional and national scales are often involved in wider groups and organizations and may therefore benefit from stronger information flow. People working in regional organizations often received a scientific training and may have been more reluctant to change their point of view based on local knowledge.

The ABEKS monitoring program has faced several challenges, especially regarding data credibility and uptake. However, the ABEKS has been proactive in addressing these challenges and has shown a strong capacity for social learning. Iterative learning loops are illustrated by the high number of documents in which issues are detailed and solutions suggested (e.g. Johnston 2005; Svoboda 2015; Symbion Consultants 2008). The ABEKS was one of the earliest collaborative monitoring programs to be established in the North American Arctic and, when created, could not rely on lessons from other programs. Learning-by-doing was central to the survival of the program and ABKES demonstrated that it was able to

recognize and address the methodological and organizational barriers it encountered. At the time of writing, it is also reflecting on solutions to tie in with broader decision-making processes. Theory suggests that social capital is a prerequisite to collaborative actions and social learning. We believe that the high level of social capital observed in the ABEKS was a catalyst to the learning, adaptive capacity and flexibility that the program demonstrated in the last 24 years.

### **3.8 CONCLUSION**

Much remains to be learned about the outcomes of CBM initiatives conducted in the cross-cultural settings of the North American Arctic. Our case study highlights that 1) the social benefits of CBM may be as important as the data generated, 2) high social capital within a CBM initiative can lead to learning, adaptive capacity and flexibility with the organization, and 3) high levels of social capital and social learning within CBM initiatives that bridge organizations, people and knowledge at various institutional levels are likely important prerequisites for bridging local knowledge with information needs of decision-making processes at larger scales.

Considering the history of colonialism that still colors relationships between indigenous communities and government agencies in North America, building respectful and open relations between these entities is not a trivial task. Moreover, building social capital takes time and in contrast with natural and economic capital, social capital decreases when not used (Ostrom & Ahn 2001). CBM programs should therefore have access to long-term and sustained investments in if they want to promote and achieve successful collaboration between Arctic residents, government agencies and scientists.

### **3.9 ACKNOWLEDGEMENTS**

We are extremely grateful to the many monitors, local experts, organizations, and community members who contributed to the Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society since 1998. Our research was supported by the Canada Research Chairs Program,

the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada, the Northern Scientific Training Program (Polar Knowledge Canada), the International Polar Year program of Indian and Northern Affairs Canada, the Network of Centers of Excellence of Canada ArcticNet, and the NSERC CREATE Training Program in Northern Environmental Sciences (Environorth).



## CONCLUSION GÉNÉRALE

I was left with the deep conviction that I had yet to write about that which is most important. Something lay there that eluded not just me, but many who have experienced another way of life. We write about some facets of it, some surfaces, that we make our business. But the gold we find is transformed by the reverse alchemy of our journey, from there to here, into lead. Not into nothing, not into worthlessness, but into a substance that has more weight than light, more utility than beauty [ ... ](Brody 2000).

### L'ORIGINALITÉ ET L'IMPORTANCE DE L'ÉTUDE

#### L'originalité et l'importance du contexte de l'étude

La gestion des ressources naturelles en vue d'assurer le maintien des services environnementaux et le bien-être humain nécessite d'acquérir beaucoup d'informations (Berkes 2009; Millenium Ecosystem Assessment 2005). Elle nécessite des connaissances approfondies sur les multiples facettes des systèmes socio-écologiques, tant pour assurer un bon suivi des ressources naturelles, que pour mettre en place des mesures de gestion adéquates et être en mesure de répondre aux rétroactions des systèmes (Berkes *et al.* 2003). Cette tâche est si considérable qu'elle requiert des connaissances provenant de différentes sources et de différents groupes et organisations œuvrant à de multiples échelles (Folke *et al.* 2005).

Or, il est difficile de mettre en commun différents types de savoirs, surtout lorsque ceux-ci proviennent de cultures variées (ex. science et connaissances autochtones; Reid *et al.* 2006). L'identification de méthodes facilitant la mise en commun de différents savoirs est un champ de recherche encore en émergence, mais qui revêt une importance considérable tant au niveau éthique, qu'au niveau de l'avancement des connaissances et de leur applicabilité à

la gestion durable des socio-écosystèmes (Rathwell *et al.* 2015). Nous avons ainsi étudié plusieurs aspects d'un programme de surveillance environnementale communautaire, une méthode permettant potentiellement de lier des données scientifiques et des observations de chasseurs autochtones, ainsi que de favoriser les échanges entre scientifiques, membres des communautés et représentants de gouvernements. La considération des connaissances autochtones en recherche et gestion environnementale est un sujet cher à plusieurs communautés et organisations autochtones (ITK & NRI 2007), et le contexte politico-légal actuel de l'Arctique canadien en fait un sujet incontournable pour qui s'intéresse à la recherche nordique. La surveillance environnementale communautaire, en particulier, tente d'impliquer les communautés nordiques et suscite beaucoup d'intérêt, mais ses retombées sont peu documentées (Huntington 2011; Johnson *et al.* 2015), ce qui rend d'autant plus importante l'étude des rares programmes existant depuis longtemps.

En plus de fournir un contexte socio-politique favorisant une présence accrue des autochtones en gestion et recherche, l'Arctique est marqué par de grands bouleversements environnementaux (ACIA 2005). Outre les changements climatiques qui y sont particulièrement prononcés (IPCC 2013), l'Arctique canadien est soumis à l'expansion de la présence humaine et des activités industrielles (Parlee *et al.* 2018). À l'instar de l'ours polaire, le caribou est devenu un emblème de ces changements. En effet, bien que les populations de caribous migrateurs soient connues pour leurs fluctuations naturelles (Festa-Bianchet *et al.* 2011; Gunn 2003; Gunn *et al.* 2009), certains troupeaux ont actuellement atteint des seuils historiquement bas. Dans ce contexte, il est urgent de mieux comprendre les facteurs influençant la démographie des troupeaux, d'autant plus que les caribous sont une ressource importante pour de nombreuses communautés nordiques à l'échelle circumpolaire (Uboni *et al.* 2016). Or, peu de données scientifiques à long terme permettent de comprendre ces facteurs (Taillon 2013). Il est donc vital de développer des méthodes intégrant les connaissances autochtones dans nos études sur l'écologie des caribous et les systèmes humains-*Rangifer*, ce que nous avons fait dans cette thèse.

En plus de bénéficier de ce contexte général, le programme de surveillance environnementale communautaire étudié ici est d'une envergure sans précédent en ce qui a trait à l'étendue spatiale et temporelle des connaissances locales documentées. En effet, ce programme a été fondé il y a plus de 24 ans (en 1994), il implique 10 communautés autochtones dont les territoires ancestraux couvrent l'aire de répartition du troupeau de caribous de la rivière Porcupine (approx. 250 000 km<sup>2</sup>), sa base de données contient les résultats de plus de 1900 entrevues (dont environ 700 ont été analysées) effectuées avec des centaines d'experts locaux et, finalement, il couvre tout le cycle annuel du caribou. L'envergure de ce jeu de données nous a permis d'effectuer la première étude à long terme analysant conjointement des connaissances locales autochtones et des données environnementales scientifiques. Elle a aussi permis d'analyser les connaissances autochtones de façon tout à fait novatrice. Enfin, le fait que le programme de surveillance étudié ait été mis en place il y a 24 ans nous a permis d'analyser de façon approfondie les retombées sociales d'une telle approche.

### **L'originalité et l'importance des principales questions abordées**

#### Facteurs influençant la condition physique du caribou à différentes saisons

Les variations de la condition physique individuelle constituent un mécanisme important pour comprendre l'effet des facteurs environnementaux sur les populations de caribous et d'ongulés nordiques en général (Albon *et al.* 2017; Taillon 2013; Weladji *et al.* 2002). Dans le contexte des changements climatiques en cours dans l'Arctique, du déclin de la plupart des grands troupeaux de caribou et des perturbations liées aux développements humains, l'étude des facteurs influençant la condition physique du caribou est primordiale. Plusieurs études se sont déjà intéressées aux facteurs environnementaux ou dépendant de la densité qui ont un effet sur la condition physique du caribou (Adamczewski *et al.* 1987; Albon *et al.* 2017; Couturier *et al.* 2009a; Couturier *et al.* 2009b; Mallory *et al.* 2018; Weladji & Holand 2003; Weladji *et al.* 2003). Or, les différents écotypes et sous-espèces de *Rangifer* occupent une grande variété d'habitats, s'étendant sur plusieurs degrés de latitude. Il est donc

difficile de généraliser les effets de facteurs environnementaux tels que le climat, la météo et la productivité végétale sur toutes les populations de caribous (Tyler 2010). En ce qui concerne les populations migratrices nord-américaines, des études approfondies ont été effectuées sur les troupeaux de la Rivière-George et de la Rivière-aux-Feuilles (Péninsule Québec-Labrador) (Couturier *et al.* 2009a; Taillon 2013). Récemment, Mallory *et al.* (2018) ont aussi établi une corrélation entre l'Oscillation Arctique et la condition physique des caribous du troupeau Beverly (Nunavut). Or, pour permettre une bonne gestion des troupeaux, il est important de comprendre les mécanismes spécifiques à chacun des troupeaux. En étudiant les facteurs influençant la condition physique des caribous du troupeau de la rivière Porcupine, notre étude contribue à combler ce besoin.

D'autre part, nous savons que les facteurs influençant la condition physique printanière des caribous sont probablement différents de ceux qui influencent la condition automnale, entraînant de fait des effets contrastés sur les composantes biodémographiques des populations (Albon *et al.* 2017). Par exemple, la productivité végétale affecte la condition physique des femelles en automne (Couturier *et al.* 2009a) et cette dernière influence le taux de fécondité (Russell *et al.* 1998). Les épisodes d'englacement hivernaux influenceraient quant à eux la condition physique au printemps et affecteraient la survie adulte et le recrutement de faons (Albon *et al.* 2017). Seuls Albon *et al.* (2017), grâce à une étude au Svalbard (Norvège), ont étudié les facteurs saisonniers affectant la condition physique du caribou à différents moments de leur cycle annuel. Le caribou de Svalbard (*Rangifer tarandus platyrhynchus*) évolue toutefois dans un environnement et à des densités bien différents de ceux du caribou migrateur. En Amérique du Nord, Couturier *et al.* (2009) ont abordé la question en investiguant l'effet de différents facteurs saisonniers (productivité primaire, oscillation nord-atlantique, précipitations de neige en hiver) sur la condition physique automnale de femelles caribou, sans toutefois étudier l'effet de ces variables à d'autres moments du cycle annuel. Nous examinons donc pour la première fois, chez une population de caribous migrants, l'effet d'une grande variété de facteurs météorologiques (incluant des variables reflétant la productivité végétale et le dérangement par les insectes) qui agissent sur la condition physique individuelle à différents moments du cycle annuel du

caribou (printemps et automne). Ces analyses sont importantes puisqu'elles permettent de comprendre plus finement les mécanismes affectant la démographie des populations migratrices de caribou.

Plusieurs études récentes ont abordé les déterminants communs pouvant expliquer le déclin quasi simultané de la plupart des populations de caribous (Fauchald *et al.* 2017; Mallory *et al.* 2018; Stien *et al.* 2012). Notre étude contraste avec ces dernières puisqu'elle s'intéresse à la seule population de caribous migrateurs en croissance depuis les années 2000. Nous croyons qu'il est important de comprendre les facteurs influençant cette population en croissance afin d'élucider les différences pouvant expliquer pourquoi toutes les populations de caribou ne fluctuent pas de manière synchrone. Enfin, l'originalité de la question abordée réside aussi dans l'approche méthodologique que nous avons utilisée. En effet, nous utilisons pour la première fois des données à long terme provenant d'Autochtones et de scientifiques pour examiner les liens entre le climat et la condition physique du caribou.

#### Liens entre le climat, les caribous et le bien-être humain

Dans l'Arctique, les systèmes humains-*Rangifer* ont depuis longtemps fourni d'importants services culturels et d'approvisionnement, puisque rennes et caribous y constituent la plus importante ressource faunique terrestre (Uboni *et al.* 2016). Or, nous savons que le climat et la météo affectent l'écologie du caribou (Albon *et al.* 2017; Weladji & Holand 2003), et des études ont lié les conditions climatiques et les activités de subsistance des populations autochtones de l'Arctique (Krupnik & Jolly 2002; Riedlinger & Berkes 2001). Toutefois, aucune étude n'avait encore analysé conjointement ces deux aspects pour lier les facteurs environnementaux (par ex. climat et végétation), l'écologie du caribou, les activités de subsistance et l'accès aux services écologiques.

Forbes *et al.* (2009) ont étudié la résilience des systèmes humains-*Rangifer* de l'ouest de la Sibérie face aux changements climatiques et au développement industriel. Ils ont utilisé des données satellitaires sur le couvert végétal et de connaissances locales autochtones (fournies par les Nenets lors d'entrevues) sur l'adaptation aux changements

environnementaux. Ces auteurs ont ainsi pu estimer des taux de modification de la végétation et quantifier la perte de territoires d'élevage au profit du développement industriel. Ils ont ensuite utilisé les données qualitatives provenant d'entrevues pour documenter les stratégies d'adaptation des familles d'éleveurs face à ces changements, et ont démontré qu'elles étaient résilientes face au changement. Dans leur étude cependant, les informations provenant des connaissances locales ont été analysées séparément (comme c'est souvent le cas) des données scientifiques. Aussi, leur analyse qualitative mettait l'accent sur les stratégies d'adaptation et non sur l'impression des éleveurs quant à leur capacité à satisfaire leurs besoins. Leurs analyses ne s'attardaient pas non plus aux réponses écologiques des troupeaux de rennes face aux changements de leur environnement.

Cette thèse constitue ainsi la toute première recherche qui regroupe dans un seul modèle l'aspect écologique (climat-caribou) et l'aspect social (perceptions, activité de chasse et satisfaction des besoins) du socio-écosystème humains-*Rangifer*, ce qui a permis d'établir des liens causaux entre ses différentes composantes. À notre connaissance, notre étude utilise aussi pour la première fois les analyses de pistes (« Structural Equation Models ») avec des données provenant de connaissances locales. Enfin, notre étude aborde directement la question de la satisfaction des besoins humains en lien avec les services écologiques sans passer par le filtre de l'analyse qualitative (Creswell 1998), ce qui est peu fréquent. En effet, dans la plupart des études sur les connaissances locales en lien avec les services écologiques et le bien-être humain, les données disponibles proviennent d'entrevues et de groupes de discussions (Roué & Molnár 2016). Ces méthodes qualitatives fournissent des informations très riches et permettent de les situer dans leur contexte (Creswell 1998). Par contre, l'interprétation du chercheur filtre l'information acquise et celle-ci est difficile à lier directement avec des données environnementales comme la météo. Dans cette thèse, la satisfaction des besoins était abordée à l'aide d'une question à réponse fermée (oui ou non), posée de manière identique pendant une décennie. Cette approche, à notre connaissance jamais utilisée sur une aussi longue période, nous a permis d'analyser les impressions des personnes interrogées sans passer par le filtre de notre interprétation et d'utiliser de nouvelles méthodes d'analyse pour combiner les connaissances locales et scientifiques.

## Capital social et surveillance environnementale communautaire

La littérature montre que les questions relatives à la construction de capital social, à l'apprentissage social (en anglais, « social learning ») et à l'utilisation des connaissances locales ont été surtout examinées dans le contexte de la cogestion des ressources naturelles (ex. les pêcheries et la gestion de mammifères marins; Armitage 2005; Armitage *et al.* 2007; Berkes 2009; Kendrick & Manseau 2008; Kofinas 1998; Plummer & FitzGibbon 2007; Wagner & Fernandez-Gimenez 2008). Toutefois, ces questions ont été peu examinées dans le contexte des programmes de surveillance environnementale communautaire (Fernandez-Gimenez *et al.* 2008), et jamais dans celui des programmes œuvrant dans l'Arctique, puisque la plupart sont trop récents (Johnson *et al.* 2015). Or, les programmes de surveillance environnementale sont différents des programmes de cogestion puisqu'ils ne sont pas directement liés aux processus décisionnels, offrant ainsi un espace d'échange moins politisé. Leurs retombées sociales sont ainsi probablement différentes de celles observées pour les programmes de cogestion, et se doivent ainsi d'être étudiées. En effet, dans l'Arctique, l'établissement de liens de confiance entre les membres des communautés, les chercheurs et les représentants des agences gouvernementales est un aspect important de l'étude et de la gestion des ressources naturelles (Armitage *et al.* 2007). Il était donc important de s'intéresser aux différentes institutions et procédés à l'œuvre, incluant les programmes de surveillance communautaire, qui peuvent favoriser ces liens. Des études antérieures se sont intéressées à la production de données par l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society (Cleghorn & Staples 2016; Russell *et al.* 2013a). Mais notre étude est la première à s'attarder en détails aux retombées sociales de ce programme.

## RETOUR SUR LES PRINCIPAUX RÉSULTATS DE LA THÈSE

### **Variations temporelles et facteurs environnementaux affectant la condition physique des caribous du troupeau de la rivière Porcupine**

Dans le premier chapitre, nous avons étudié les variations temporelles dans la condition physique printanière et automnale des caribous du troupeau de la rivière Porcupine au cours de la décennie 2000-2010. Nous avons aussi investigué les facteurs climatiques et environnementaux affectant la condition physique des caribous au printemps et à l'automne (Figure 12). Nous avons trouvé que la condition physique des caribous du troupeau de la rivière Porcupine s'est améliorée entre 2000 et 2010 aux deux saisons étudiées (Figure 4), malgré une augmentation annuelle du troupeau d'environ 3,6%. Nos résultats montrent aussi que la condition physique des caribous, au printemps et à l'automne, est influencée par les conditions environnementales sur les aires de répartition hivernale et printanière, et en particulier par la profondeur et la date de fonte de la neige au printemps et les températures moyennes printanières (Figures 5 et 6). De plus, nos résultats indiquent que la condition printanière des caribous serait négativement influencée par le dérangement par les insectes durant l'été précédent (Figure 5), alors que la condition automnale serait négativement influencée par la fréquence des événements d'englacement (Figure 6).

Chez les ongulés, il est admis que la condition physique individuelle dépend à la fois de facteurs environnementaux indépendants de la densité et de facteurs dépendants de la densité (Bonenfant *et al.* 2009). Chez le troupeau de la Rivière-George, les femelles avaient une meilleure condition à faible densité, probablement à cause d'une plus faible compétition alimentaire (Couturier *et al.* 2009a; Pachkowski *et al.* 2013). Nos résultats suggèrent au contraire que la condition des caribous du troupeau de la rivière Porcupine ne dépend peu ou pas de la densité. Ces résultats concordent avec ceux d'études suggérant que les effets dépendants de la densité déclinent avec la latitude (Bjørnstad *et al.* 1995; Post 2005; Stenseth 1999). En effet, le troupeau de la rivière Porcupine a une aire de répartition plus nordique que celle de la plupart des troupeaux migrateurs nord-américains, ce qui pourrait expliquer



la faible influence de facteurs dépendants de la densité, tel que suggéré par Post (2005). Nos résultats appuient ainsi les observations de Griffith *et al.* (2002) montrant que plusieurs composantes biodémographiques du troupeau de la rivière Porcupine (taux de reproduction et de mise bas) ne sont pas affectées par la taille du troupeau. Il est aussi possible que l'amélioration des conditions environnementales observée durant notre période d'étude ait masqué de potentiels effets de la taille de la population, comme il a été observé au Svalbard (Albon *et al.* 2017).

Nos résultats suggèrent par ailleurs que la condition physique des caribous du troupeau de la rivière Porcupine, au printemps et à l'automne, serait particulièrement influencée par les conditions de neiges et de température au printemps. Il est connu que la profondeur de la neige augmente les coûts de locomotion et nuit à l'accès aux ressources alimentaires chez le caribou (Fancy & White 1987). Les répercussions négatives (survie adulte et juvénile diminuée en hiver, taux de mise bas diminué au printemps) des conditions de neige difficiles ont été documentées pour le caribou et d'autres ongulés nordiques (Adamczewski *et al.* 1987; Albon *et al.* 2017; Loison *et al.* 1999; Post & Stenseth 1999; Solberg *et al.* 2001; Weladji & Holand 2003). Certaines populations de caribou peuvent compenser l'été suivant la perte de condition encourue suite à un hiver difficile (Adamczewski *et al.* 1987; Albon *et al.* 2017; Ouellet *et al.* 1997). Or, dans le troupeau de la rivière Porcupine, nous avons détecté au printemps et à l'automne les effets négatifs d'un épais couvert neigeux et de printemps tardifs (températures froides et fonte tardive de la neige) sur la condition physique. Nos résultats appuient les observations de Russell et McNeil (2005) suggérant que les caribous du troupeau Porcupine ne seraient pas capables de compenser durant l'été pour une mauvaise condition physique au printemps. Nos résultats suggèrent aussi que les répercussions des conditions hivernales et printanières pourraient avoir des effets prononcés sur la population en affectant sa démographie durant tout le cycle annuel. D'ailleurs, durant la période d'étude (2000-2010), nous avons détecté une augmentation significative des températures printanières, un avancement significatif des dates de fonte de neige, et une diminution significative de la profondeur de la neige au printemps (Annexe IX). Nous croyons que ces tendances sont en

partie responsables de l'amélioration de la condition physique au printemps et à l'automne, ainsi que de l'augmentation de la population depuis le début des années 2000.

Ainsi, les résultats de ce chapitre démontrent qu'une population de caribous migrants peut croître et comporter des individus en bonne condition physique malgré le fait que son aire de répartition soit située dans une des régions les plus affectées par le réchauffement climatique (IPCC 2013). Évidemment, nos résultats vont à l'encontre des études cherchant un déterminant environnemental commun pouvant expliquer le déclin quasi synchrone de plusieurs troupeaux de caribous (Fauchald *et al.* 2017; Mallory *et al.* 2018; Stien *et al.* 2012). Nos résultats n'appuient pas non plus les études suggérant que les printemps plus hâtifs causeraient une désynchronisation entre la phénologie des ressources alimentaires et la migration, conduisant au déclin des populations d'ongulés (Post & Forchhammer 2008). À l'inverse, nos résultats indiquent que les printemps hâtifs contribueraient plutôt à une meilleure condition du troupeau Porcupine. Ceci pourrait être expliqué par le fait que lorsque les printemps sont hâtifs, les caribous de ce troupeau ont tendance à migrer et mettre bas de manière plus concentrée sur la plaine côtière de l'Arctic National Wildlife Refuge (Griffith *et al.* 2002; Nicolson *et al.* 2013), où le taux de survie des faons est supérieur aux taux observés lorsque les femmes mettent bas sur des aires moins fréquemment utilisées (Griffith *et al.* 2002). Ainsi, les printemps hâtifs favoriseraient l'utilisation d'une aire de mise bas de meilleure qualité, ce qui pourrait en partie expliquer la tendance démographique favorable observée. D'ailleurs, on a observé que lors de printemps chauds, la phénologie de migration des troupeaux Rivière-George et Rivière-aux-Feuilles était devancée, ce qui pourrait constituer une stratégie d'adaptation atténuant les effets de la désynchronisation entre la phénologie des plantes et la mise bas (Taillon 2013).

Ainsi, nos résultats vont dans le sens des propos d'Uboni *et al.* (2016) qui suggèrent d'éviter les généralisations lorsqu'il est question des facteurs expliquant le déclin des troupeaux de caribou. Enfin, nos résultats montrent que les connaissances locales autochtones, recueillies via un programme de surveillance environnementale

communautaire, peuvent améliorer notre compréhension des processus écologiques régulant les populations animales.

### **Facteurs climatiques influençant un socio-écosystème humains-*Rangifer***

Dans le second chapitre de la thèse, nous nous sommes intéressés aux facteurs climatiques influençant le socio-écosystème humains-*Rangifer* constitué par le troupeau de la rivière Porcupine et les communautés qui en dépendent (Figure 12). Notre étude, utilisant des analyses de pistes, a démontré que les conditions climatiques ont une influence directe sur la distribution du caribou et la perception des chasseurs quant à la disponibilité du caribou (Figure 8). Nos résultats montrent aussi que par ces effets directs, les conditions climatiques ont une incidence indirecte sur les activités de chasse et la capacité des chasseurs à satisfaire leurs besoins en caribou (Figures 8 et 9). Nos analyses révèlent que l'épaisseur de la neige et sa date de fonte, ainsi que les températures printanières, sont les facteurs climatiques ayant le plus d'influence sur la distribution du caribou et la perception des chasseurs. Par exemple, lorsque la neige est profonde et qu'il fait froid au printemps, les caribous ont tendance à occuper des aires plus éloignées des communautés, alors que les chasseurs ont tendance à les considérer plus disponibles (Figures 8 et 9). Ce paradoxe s'explique par le fait que la disponibilité des caribous ne dépend pas que de leur localisation, mais aussi de la capacité des chasseurs à les atteindre. En effet, les chasseurs utilisent des motoneiges pour se déplacer et de meilleures conditions de neige ainsi que des basses températures maintenant les cours d'eau gelés facilitent les déplacements. Il se peut aussi que les chasseurs localisent les caribous plus facilement quand les conditions de neige sont bonnes car les habitats utilisés par les caribous sont plus prévisibles et ceux-ci sont plus faciles à localiser et suivre à la trace. Ces résultats sont fascinants car ils montrent bien que notre interprétation quant à la disponibilité des caribous aurait pu être complètement faussée si nous n'avions utilisé comme source d'information que le suivi satellitaire des caribous. Une étude plus approfondie de la relation entre les chasseurs, la neige et la température pourrait permettre de comprendre en détails l'importance des conditions climatiques pour la chasse au caribou.

Nos résultats montrent également que les événements d'englacement (par ex., la fréquence des événements de pluie-sur-neige) ont aussi un effet positif sur la proximité des caribous par rapport aux communautés et sur la perception des chasseurs quant à leur disponibilité. On peut expliquer ces résultats par le fait que les caribous ont tendance à éviter les zones fortement englacées (Stien *et al.* 2010b). Dans le cas du troupeau de la rivière Porcupine, il se pourrait que l'évitement des zones englacées concentre les caribous dans des aires moins exposées aux intempéries et où les déplacements sur la glace sont moins risqués, comme le bas des vallées versus les flancs de montagne, qui sont plus accessibles aux chasseurs. Encore une fois, une étude plus approfondie des liens entre la glace et la perception des chasseurs pourrait nous éclairer à ce sujet.

Nos résultats démontrent aussi que les conditions climatiques susmentionnées ont un effet indirect sur la satisfaction des besoins, via une chaîne causale qui mène de la distribution des caribous à la satisfaction des besoins, en passant par la perception des chasseurs face à la disponibilité et par les activités de chasse (Figure 8). Nos résultats quantifient les relations entre ces différentes variables. Par exemple, nous montrons que lorsque les chasseurs considèrent les caribous comme étant proches (*versus* non disponibles), ils ont 35 fois plus de chances d'aller chasser et qu'en allant chasser, un chasseur a 20 fois plus de chances de satisfaire ses besoins. Nous montrons aussi qu'un chasseur peut satisfaire ses besoins sans aller chasser. Par exemple, lorsque les caribous sont considérés comme étant facilement accessibles, un chasseur a 16 fois plus chances de satisfaire ses besoins même s'il ne chasse pas. Ce résultat peut sembler paradoxal mais s'explique par la culture des chasseurs puisqu'ils partagent la viande (ACIA 2005). Ainsi, plus le caribou est perçu comme disponible, plus on chasse, plus on partage, et plus il est possible de satisfaire ses besoins, même si on ne chasse pas!

Nos résultats révèlent aussi que de 2000 à 2008, les caribous se sont rapprochés des communautés et ont été perçus comme étant de plus en plus disponibles. Les résultats montrent aussi que les chasseurs ont diminué leurs activités de chasse mais qu'ils ont tout même été capables d'accroître la satisfaction de leurs besoins (Figure 8). Comme nous

l'avons mentionné, le troupeau de la rivière Porcupine est passé de 123 000 individus en 2001 à 169 000 individus en 2010 (Porcupine Caribou Technical Committee 2016). Il est donc possible qu'une telle croissance de population (37%), combinée à un rapprochement des caribous par rapport aux communautés, ait contribué à une augmentation générale de la satisfaction des besoins tout en permettant un plus faible effort de chasse. La connaissance du nombre de caribous récoltés par année durant cette période aiderait à interpréter ces résultats, mais aucune estimation fiable n'est disponible. Selon nous, cette étude fournit les premières analyses de connaissances autochtones locales et de connaissances scientifiques démontrant un lien entre les facteurs climatiques et la satisfaction des besoins environnementaux. Notre étude dénote encore une fois que la surveillance environnementale communautaire permet de combiner de façon novatrice les connaissances locales et scientifiques, et ainsi accroître notre compréhension d'un socio-écosystème arctique.

#### **Surveillance environnementale, capital social et utilisation des connaissances locales pour la gestion environnementale.**

Le troisième chapitre de la thèse s'attarde aux retombées sociales du programme de surveillance environnementale communautaire de l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society et est basé sur l'utilisation d'un questionnaire, une revue de documents et la méthode d'observation participante (Creswell 1998). Ce chapitre permet d'abord d'identifier que le niveau de capital social au sein de la coopérative est élevé en termes de réciprocité, de respect et de facilité de communication entre les participants (Figure 12). Comme on sait que le capital social prend du temps à se construire (Ostrom & Ahn 2001), nous attribuons en partie ce résultat au fait que l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society avait plus de 24 ans et que plus d'un tiers des répondants à notre questionnaire étaient des membres actifs de la coop depuis plus de 10 ans. Nous attribuons aussi le haut niveau de capital social observé au fait que la coop n'était pas directement impliquée dans des décisions de gestion environnementale, et que ses membres se sentaient potentiellement plus confiants de s'exprimer librement, tel que suggéré par Fernandez-Gimenez *et al.* (2008).

Toutefois, contrairement à notre prédiction, les données générées par l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society étaient très peu utilisées au sein des organismes de gestion environnementale connaissant la coop et traitant de sujets abordés par son programme de surveillance environnementale. Nous avons trouvé un seul exemple net d'utilisation dans un processus de gestion des connaissances locales documentées par l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society. Cette utilisation vient du conseil de cogestion du troupeau de caribou de la rivière Porcupine qui détermine chaque année le niveau de santé du troupeau en prenant comme indicateurs, entre autres, des données de la coop. Nos résultats suggèrent ainsi qu'un fort niveau de capital social au sein d'un programme de surveillance environnementale communautaire n'est pas garant d'une grande utilisation des connaissances locales documentées.

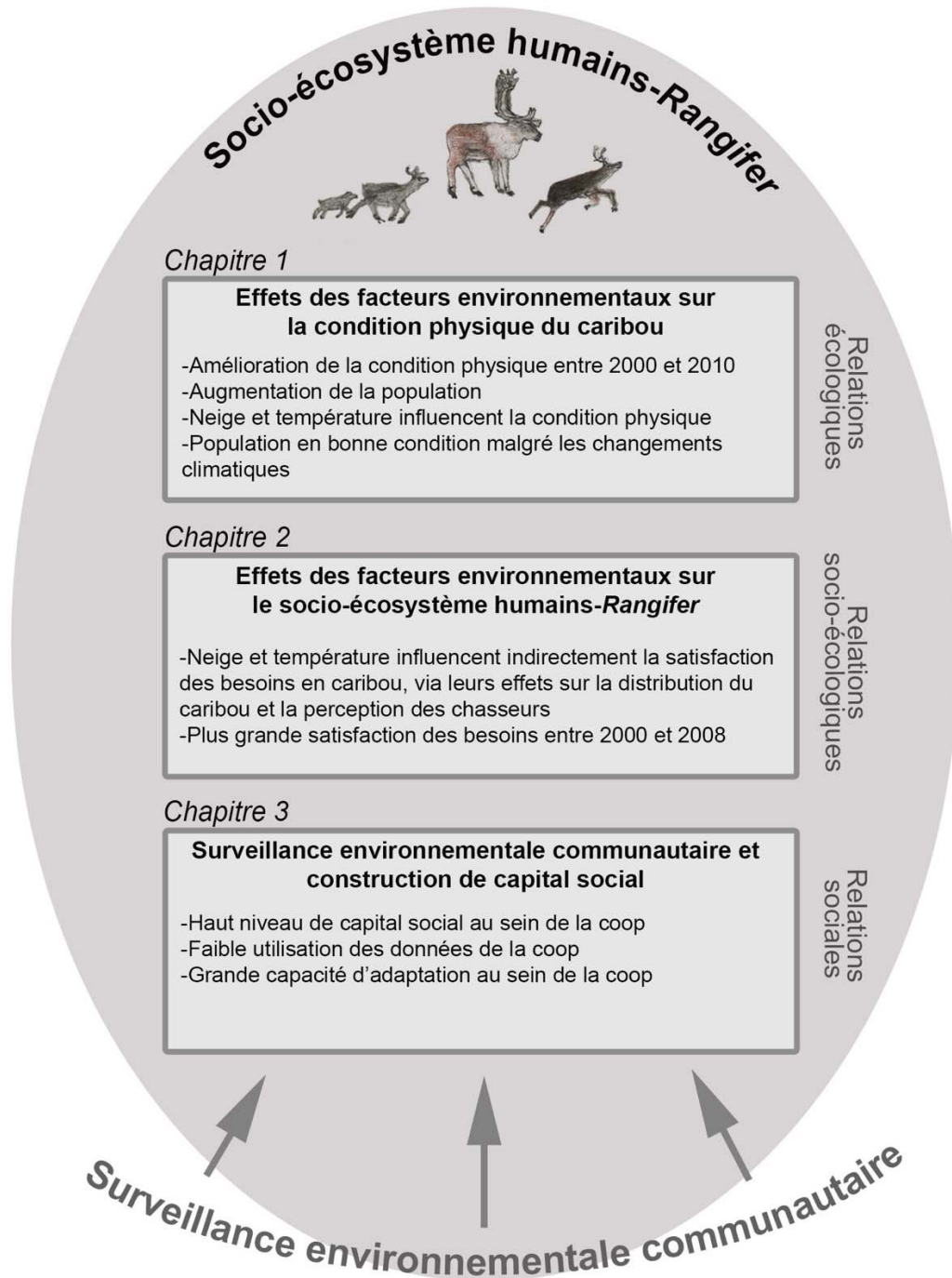
En recensant les documents faisant référence à l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society, nous avons identifié plusieurs causes méthodologiques et organisationnelles ayant freiné l'utilisation des données récoltées par la coop. Ainsi, l'utilisation de la base de données dans laquelle les résultats des entrevues étaient entreposés a longtemps été très difficile. De plus, il a longtemps été ardu pour une personne non membre de la coop de savoir si les données étaient accessibles et de comprendre le protocole d'accès à ces données. Finalement, l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society a toujours eu des moyens financiers et humains limités pour faire ses propres analyses.

Nos recherches indiquent que l'utilisation restreinte des données de l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society est aussi due à des raisons plus fondamentales. En effet, le programme a d'abord été conçu pour satisfaire les besoins des communautés et non ceux des groupes et organismes de gestion environnementale. Dès lors, les sujets couverts lors des entrevues et le format des données récoltées ne satisfont pas nécessairement aux exigences de ces organismes. De plus, il existe depuis le début des années 2000 un certain scepticisme de la part de certains membres d'organismes de gestion quant à la validité et la crédibilité des données produites par la coop, puisque celles-ci proviennent d'observations

locales. Ce scepticisme est une barrière fréquemment rencontrée par les programmes de surveillance environnementale communautaire (Conrad & Hilchey 2011).

Notre étude conclut néanmoins qu'au fil des années, l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society a montré, en tant qu'institution, une grande capacité d'apprentissage social. Comme cette coop a mis en place un des premiers programmes de surveillance environnementale communautaire dans l'Arctique, elle n'a pas pu profiter de l'expérience acquise par d'autres programmes. Malgré cela, grâce à un processus itératif d'observations, d'actions et de réflexions, les membres de son comité de gestion ont su reconnaître les difficultés rencontrées et agir pour les contourner. Ainsi, les obstacles méthodologiques et organisationnels susmentionnés ont été surmontés. Depuis 2008, la coop a aussi dévoué une bonne partie de son financement à l'engagement de consultants externes pour analyser les données récoltées et réfléchir aux moyens de mieux arrimer son programme aux besoins des organismes de gestion. La théorie suggère que le capital social serait un prérequis à l'action collective et à l'apprentissage social (Berkes 2009; Ostrom & Ahn 2001). Nous suggérons en effet que le niveau élevé de capital social identifié au sein de la coop aurait contribué à la capacité d'apprentissage social et d'adaptation montrée par le programme depuis ses débuts.

Le troisième chapitre de la thèse montre finalement que les retombées sociales, notamment la construction de relations respectueuses entre les différents participants, sont une contribution importante des programmes de surveillance dans le Nord et devraient être considérées au même titre que les données produites. Enfin, nos résultats suggèrent que le capital social et la capacité d'apprentissage social seraient probablement des prérequis à l'utilisation des connaissances locales dans les processus de gestion. Toutefois, notre étude met aussi en lumière le fait que les programmes de surveillance environnementale communautaire devront toujours trouver un équilibre entre la satisfaction des priorités des communautés et les besoins des organismes de gestion.



**Figure 12.** Agencement des principaux résultats des chapitres de la thèse. Les rectangles présentent, pour chaque chapitre, le titre succinct (gras) et les principaux résultats. Les flèches indiquent que la surveillance environnementale communautaire peut contribuer à notre compréhension des différents aspects (social, écologique, socio-écologique) du socio-écosystème humains-Rangifer.



## IMPLICATIONS ET PERSPECTIVES FUTURES

### L'écologie et de la conservation du caribou

Les facteurs influençant la condition physique des caribous, qu'ils soient environnementaux ou dépendants de la densité, avaient déjà fait l'objet de plusieurs études, puisque la condition physique est un outil privilégié pour comprendre la démographie de l'espèce (Adamczewski *et al.* 1987; Albon *et al.* 2017; Couturier *et al.* 2009a; Couturier *et al.* 2009b; Mallory *et al.* 2018; Weladji & Holand 2003; Weladji *et al.* 2003). Seulement une étude s'était auparavant penchée sur les facteurs climatiques saisonniers influençant la condition physique d'une population de caribous à différentes saisons, et la population concernée (caribou de Svalbard) était d'un écotype bien différent des populations migratrices d'Amérique du Nord (Albon *et al.* 2017). Pour ce qui est de l'écologie de l'espèce, cette thèse présente donc la première étude de l'influence des facteurs climatiques saisonniers sur la condition physique de caribous migrants à différentes saisons (printemps et automne). Notre étude a permis de dévoiler que les conditions de neige et la précocité du printemps peuvent à la fois influencer la condition physique printanière et automnale des caribous, avec des conséquences potentielles sur plusieurs composantes biodémographiques. Ceci n'avait jamais été documenté. Un résultat surprenant est aussi l'absence de relations significatives entre nos indices de productivité végétale en été (degrés jours de croissance en juin et en août) et la condition physique à l'automne, réitérant de fait la grande influence des conditions de neige et de la température printanière sur la condition physique des individus de cette population migratrice. À l'aide d'analyses de pistes, il serait possible de tester l'influence directe et indirecte des conditions de neige et de température sur la condition physique des caribous et les paramètres démographiques (survie des faons, taux de mise bas) documentés par le *Porcupine Caribou Technical Committee*.

Des études plus approfondies de la phénologie de migration du troupeau et de la phénologie et qualité végétale des différentes aires utilisées par le troupeau permettraient aussi d'élucider une partie des mécanismes expliquant pourquoi les printemps hâtifs

semblent si favorables à la condition physique des individus. L'analyse des données de suivi satellitaire du troupeau serait très utile dans ce contexte. De plus, considérant l'importance des caractéristiques de la neige pour la condition physique et plus généralement l'écologie du caribou (Couturier *et al.* 2009b; Fancy & White 1987; Le Corre *et al.* 2017; Post & Stenseth 1999), le développement d'outils permettant de bien caractériser la structure de la neige aiderait à comprendre comment les caribous utilisent leur habitat selon les conditions nivales.

Un autre résultat surprenant de notre étude est que la condition physique au printemps et à l'automne s'est améliorée de 2000 à 2010, malgré une augmentation de la population, suggérant que les facteurs dépendants de la densité n'auraient pas une influence majeure sur la condition physique des caribous du troupeau de la rivière Porcupine, du moins dans la gamme de densités observées. Ainsi, nos résultats soutiennent la théorie selon laquelle les facteurs dépendants de la densité soient moins influents dans les populations les plus nordiques. Or, le dernier inventaire de population du troupeau de la rivière Porcupine, effectué à l'été 2017, faisait état de la plus grande taille de population jamais estimée pour ce troupeau (environ 219 000 individus, alors que le dernier maximum était de 178 000 individus). Il semble donc impératif de poursuivre le suivi de la condition physique des individus de ce troupeau afin de détecter de potentiels effets de la taille de la population dans le futur, si le troupeau continue de croître.

Enfin, concernant l'écologie du caribou, un de nos résultats les plus importants est le dévoilement d'un mécanisme potentiel expliquant pourquoi le troupeau Porcupine s'est accru bien malgré un important réchauffement climatique. De 2000 à 2010, nous avons démontré que la neige était de moins en moins profonde au printemps et que les printemps étaient de plus en plus chauds et hâtifs. Ce changement du climat a probablement eu une influence positive sur la condition physique des caribous, ce qui pourrait en partie expliquer la croissance du troupeau. Ces résultats appuient l'idée selon laquelle les changements climatiques auront aussi des effets positifs sur les caribous (Festa-Bianchet *et al.* 2011). Pour l'instant, on a beaucoup étudié les effets négatifs des changements climatiques sur les tailles

des troupeaux. Il est indéniable que certaines hardes on atteint des tailles extrêmement basses (Festa-Bianchet *et al.* 2011; Gunn *et al.* 2009) et que des facteurs climatiques, comme les épisodes plus fréquents d'englacement, influencent négativement certaines populations (Hansen *et al.* 2011; Stien *et al.* 2012). Cependant, nos résultats suggèrent qu'il faut peut-être réévaluer le rôle du climat dans le déclin des populations de caribous migrants d'Amérique du Nord. Surtout, il faut éviter que la prédominance de l'étude des changements climatique entrave celle d'autres facteurs majeurs pouvant expliquer ces déclin.

Uboni *et al.* (2016) a démontré que les perturbations anthropiques avaient une influence plus marquée que les facteurs climatiques sur les populations de rennes sauvages et semi-domestiques d'Eurasie. Chez plusieurs ongulés migrants, les perturbations anthropiques telles la dégradation et la fragmentation d'habitat perturbent les déplacements migratoires et l'utilisation d'aires de répartition privilégiées (Bolger *et al.* 2008; Singh *et al.* 2010). En Amérique du Nord, on a beaucoup étudié l'impact des perturbations anthropiques, telle la fragmentation d'habitat, sur les populations de caribou de l'écotype boréal (Bradshaw *et al.* 1997; Courbin *et al.* 2009; Dyer *et al.* 2002; Mahoney & Schaefer 2002; McLoughlin *et al.* 2003). Par contre, l'impact de l'expansion anthropique sur les aires de répartition du caribou migrant a été beaucoup moins étudié (Festa-Bianchet *et al.* 2011), bien que Parlee *et al.* (2018) ait établi une corrélation entre le développement minier et le déclin drastique du troupeau migrant de Bathurst. La grande fidélité du caribou migrant à ses aires de mise bas le rendrait particulièrement vulnérable au développement industriel lors de l'élevage des jeunes (Griffith *et al.* 2002; Gunn & Miller 1986; Taillon 2013). À l'heure actuelle, seule une petite proportion des aires de mise bas du caribou migrant est protégée (Festa-Bianchet *et al.* 2011; Taillon *et al.* 2012). L'aire de mise bas traditionnelle du troupeau de la rivière Porcupine est d'ailleurs fréquemment menacée par le développement pétrolier (Cornwall 2017). Il est donc impératif d'approfondir les études sur l'impact du développement anthropique sur l'utilisation des aires de mise bas, sur les routes migratoires et sur les autres aires saisonnières du caribou migrant. Il serait aussi critique d'évaluer dès que possible l'influence du développement humain sur la démographie des troupeaux migrants nord-américains.

Enfin, la bonne gestion des troupeaux de grands ongulés requiert l'utilisation de plusieurs indicateurs démographiques (Porcupine Caribou Management Board 2010). Or, même les grands troupeaux de la Rivière-George et de la Rivière-aux-Feuilles ne bénéficiaient pas, jusqu'à récemment, d'un suivi de la condition physique (Taillon 2013). Nos résultats suggèrent que des programmes de surveillance de la condition physique du caribou impliquant les communautés locales d'utilisateurs aideraient à pallier à ce manque.

### **La compréhension du socio-écosystème humains-*Rangifer* et de sa résilience**

De nombreuses études depuis les années 2000 ont mis en lumière dans l'Arctique canadien l'importance de l'influence des conditions climatiques sur les activités de subsistance des chasseurs autochtones (Ford *et al.* 2006a; Gearheard *et al.* 2013; Krupnik & Jolly 2002; Nichols *et al.* 2004). À notre connaissance toutefois, aucune étude n'avait encore tenté d'évaluer simultanément l'influence des facteurs climatiques sur l'écologie d'une espèce, sur l'activité humaine et sur la satisfaction des besoins culturels et de subsistance des humains. Notre étude permet de comprendre certains mécanismes qui unissent le climat, le caribou et les humains dans le socio-écosystème humains-*Rangifer*. Ces mécanismes n'auraient probablement pas pu être décrits si l'aspect écologique (la distribution du caribou) ou l'aspect social du système avaient été exclus des analyses. Aussi, nous quantifions pour la première fois les relations entre les différentes composantes du système, ce qui est très riche puisque nous pouvons par exemple affirmer que l'activité de chasse augmente de plus de 20 fois (Figure 8) et 30 fois (au printemps; Annexe XI) la capacité des chasseurs à satisfaire leurs besoins en caribou. Ces résultats ont des implications en termes de sécurité alimentaire pour les communautés autochtones étudiées. Considérant que le caribou est une source de nourriture importante chez de nombreuses communautés nordiques (Kuhnlein *et al.* 2009), ces estimés indiquent que toute activité ou condition ayant une influence directe ou indirecte sur la chasse peut avoir de lourdes conséquences sur la capacité des membres des communautés à avoir accès à une ressources alimentaire et culturelle importante.

Dans les chapitres 1 et 2 de la thèse, nous avons montré l'importance des conditions nivales et de la température comme facteurs climatiques modulant la condition physique des caribous et les relations socio-écologiques dans ce système, durant les saisons de transition telles l'automne et le printemps. Nous pensons que l'augmentation de la population du troupeau Porcupine, elle-même vraisemblablement influencée par une amélioration des conditions de neige et de température au printemps, aurait contribué à une satisfaction croissante des besoins des chasseurs entre 2002 et 2008. Or, nous savons que l'abondance des populations de caribous migrateurs fluctue. Qu'advient-il lorsque la population diminuera de nouveau? Il est plausible que dans le futur des printemps plus hâtifs et des automnes plus tardifs inhibant la chasse, combinés à une population de caribous décroissante, conduiront ce socio-écosystème vers un seuil au-delà duquel sa résilience sera compromise.

Le faible nombre d'estimés d'abondance pour le troupeau de la Porcupine n'a pas permis d'inclure la taille de population dans notre modèle. Depuis 2010, trois inventaires du troupeau ont été réalisés. Dans le futur, il serait intéressant d'évaluer l'influence de la taille du troupeau sur les activités de chasse et la satisfaction des besoins. En utilisant des scénarios climatiques et des modèles populationnels pour le caribou, des modèles prédictifs pourraient être développés pour identifier les seuils critiques au-delà desquels la capacité à satisfaire les besoins en caribou serait grandement compromise. Ces modèles permettraient d'appréhender l'avenir des communautés et de discuter les solutions à envisager (Carpenter *et al.* 2006).

Évidemment, il est difficile de prédire l'évolution d'un système socio-écologique. Les communautés nordiques sont en transition culturelle et les besoins en caribou des prochaines générations pourraient changer car elles sont de moins en moins dépendantes des ressources du terroir. L'étude des facteurs sociaux-économiques influençant les activités de chasse et la satisfaction des besoins contribueraient aussi à suivre l'évolution du socio-écosystème.

### **La pratique de surveillance environnementale communautaire**

Les programmes de surveillance environnementale communautaire sont encore rares et peu étudiés dans l'Arctique (Huntington 2011). Notre étude de l'Arctic Borderlands

Ecological Knowledge Society démontre que ces programmes peuvent générer des informations qui améliorent notre compréhension des écosystèmes et socio-écosystèmes du Nord. Nous sommes donc en accord avec Huntington (2011) selon qui le potentiel de la surveillance environnementale communautaire est largement sous-utilisé. Dans le cas spécifique du caribou, un manque flagrant d'information subsiste quant aux tailles de populations, aux aires de répartition et aux tendances démographiques, surtout à cause des coûts et difficultés logistiques du travail en régions éloignées (Festa-Bianchet *et al.* 2011). Nous avons démontré qu'un programme de surveillance environnementale peut aider à combler, au moins en partie, ce manque d'information. Dès 2003 Kofinas *et al.* (2003) avaient suggéré qu'un programme de surveillance de la condition physique du caribou impliquant les communautés locales soit mis en place dans différentes régions de l'Arctique nord-américain. Ce programme, similaire à celui de l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society, aurait permis de combler le manque d'information et de permettre des études comparatives entre troupeaux. Mais cette suggestion ne s'est pas réalisée. Pire, certains troupeaux, tels ceux de Beverly et de Qamanirjuaq, n'ont pas été inventoriés pendant plus de vingt ans (1994-2007; Festa-Bianchet *et al.* 2011). Lorsqu'un inventaire a finalement été fait, la population s'était effondrée, avec des répercussions négatives majeures pour les communautés qui en dépendent. Dans ce cas, les coûts reliés au manque d'information ont été colossaux.

Il est à noter qu'en 1996, l'inventaire aérien d'un troupeau coûtait plus de 100 000 dollars (Courtois *et al.* 1996), en plus d'être souvent difficile à réaliser compte tenu des contraintes météorologiques. En comparaison, l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society fonctionnait avec moins de 50 000 dollars en 2002 (Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society 2002). Ceci incluait le programme de surveillance environnementale qui couvrait une vaste panoplie de sujets outre le caribou (voir introduction), les rencontres du comité de gestion et une rencontre annuelle des membres. Compte tenu des grands changements que subit l'Arctique et qui risquent d'affecter le caribou, il semble impératif d'établir un programme de surveillance communautaire du caribou qui serait basé sur une méthodologie uniformisée et couvrirait une grande région incluant plusieurs troupeaux et

plusieurs communautés. En plus de fournir des informations importantes et complémentaires au suivi scientifique permettant les analyses comparatives entre les troupeaux, ce programme améliorerait la communication entre les communautés autochtones, les scientifiques et les représentants d'agences gouvernementales impliqués dans la cogestion des caribous migrateurs au Canada (Gunn *et al.* 2009).

Les résultats du chapitre 3 montrent en effet qu'un programme de surveillance environnementale communautaire permet une communication ouverte et respectueuse entre différents acteurs concernés par la gestion des ressources naturelles. Des études récentes ont montré que les interactions humaines positives (le capital social) sont nécessaires à une cogestion réussie des ressources naturelles (Plummer & FitzGibbon 2006a; Pretty & Ward 2001). De futurs projets devront analyser les programmes de surveillance environnementale communautaire actuels pour mieux identifier les facteurs et conditions institutionnelles favorisant ou entravant la création de capital social entre leurs participants. Aussi, nous suggérons que les acteurs impliqués dans de futurs programmes de surveillance environnementale communautaire reconnaissent ouvertement la valeur du capital social et établissent explicitement la construction de relations sociales comme un objectif de leur projet.

Comme nous avons vu dans le chapitre 3 de la thèse, un programme de surveillance communautaire peut aussi être très dynamique et ses objectifs et méthodes peuvent évoluer dans le temps. Encore une fois, des futures recherches devront s'attarder aux facteurs favorisant ou empêchant l'apprentissage au sein des institutions en charge de tels programmes. Selon nos observations, si les membres d'un programme de surveillance environnementale communautaire souhaitent que les résultats soient utilisés à plus grande échelle, ils devront trouver un juste équilibre entre la satisfaction des besoins des communautés et les exigences des agences de gestion des ressources. Aussi, les agences et organismes finançant les programmes de surveillance environnementale communautaire devront évaluer le succès des programmes en fonction de ces divers objectifs, et non seulement selon la quantité de données générées. Il est aussi actuellement difficile pour les

programmes de surveillance environnementale communautaire d'attirer du financement à long terme (Johnson *et al.* 2015). Tel est le cas du programme piloté par l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society (Eamer 2006). Or, l'effritement d'un programme après quelques mois ou quelques années peut saper la confiance et entraîner un désintérêt des membres de communautés locales et autochtones (Johnson *et al.* 2015). Afin que la surveillance environnementale communautaire atteigne son plein potentiel dans l'Arctique, des enveloppes budgétaires devront leur être réservées pendant assez longtemps pour que des processus sociaux complexes puissent se développer. Enfin, des ressources financières et humaines doivent favoriser le développement de capacités locales, comme la formation d'acteurs locaux pouvant analyser les données récoltées.

### **L'établissement de ponts entre les connaissances**

Comme nous l'avons maintes fois répété dans cette thèse, il est difficile de lier entre elles différents types de connaissances. C'est néanmoins nécessaire pour profiter de toute la richesse des connaissances humaines et gérer plus durablement les ressources dont nous dépendons. La mise en commun des connaissances scientifiques et locales est un domaine en ébullition qui requiert encore beaucoup d'innovation.

Dans les deux premiers chapitres de la thèse, nous avons utilisé des méthodes de modélisation qui permettent d'analyser des données numériques scientifiques et des données catégoriques et/ou binomiales provenant d'observations locales. Les avancées récentes dans les techniques de modélisation, telles les analyses de pistes, permettent maintenant ces analyses, à condition d'avoir des observations locales répétées sur plusieurs années. En ce sens, nos résultats montrent que la surveillance environnementale communautaire est une approche de documentation de connaissances locales qui permet la collecte d'observations répétées et qui ouvre la porte à de nouvelles méthodes pour combiner les connaissances.

Certains ont écrit que ces méthodes quantitatives dénaturent les connaissances locales en les extrayant de leur contexte (Ellis 2005; Nadasdy 1999, 2003). Nous pensons plutôt que nous ne devons pas restreindre l'éventail des méthodes d'analyse, tant que les membres d'un



programme de surveillance sont informés et d'accord avec la méthodologie employée. L'innovation est plus que jamais souhaitable dans ce domaine. Bien entendu, les savoirs locaux ne peuvent être réduits à des réponses de questionnaires, mais rien n'empêche d'utiliser simultanément des approches variées. D'ailleurs, dans le cas de l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society, les questions à réponse fermée sont souvent associées à des questions ouvertes permettant d'expliquer le contexte de la réponse.

Au niveau de l'utilisation des connaissances pour la gestion environnementale, nous avons vu dans le chapitre 3 que les perceptions quant à la crédibilité des connaissances locales peuvent freiner leur utilisation par les agences gouvernementales (Berkes 1999; Conrad & Hilchey 2011; Johnson *et al.* 2015). À l'inverse, les membres des communautés locales peuvent être réticents et critiques face aux connaissances scientifiques (Armitage 2005; Berkes 1999). À cet égard, la mise en commun des connaissances serait certainement favorisée par la mise en place d'institutions (par ex, des institutions de cogestion ou de surveillance environnementale) au sein desquelles chacun des camps reconnaîtrait et discuterait ouvertement les ressemblances et différences inhérentes à chaque type de connaissance, tout en développant des méthodes innovantes qui utilisent les forces et avantages de chacun.

## **LES LIMITES DE L'ÉTUDE**

### **Les observations locales sur la condition du caribou**

Nous devons rappeler que les observations des chasseurs quant à la condition physique des caribous ne sont pas une mesure parfaite de la condition physique des individus. Elles fournissent plutôt une impression relative de l'état physique des caribous à différentes saisons. Les observations des chasseurs sont ainsi moins précises que les mesures normalement utilisées par les biologistes, telle la masse corporelle (Taillon *et al.* 2011). L'imprécision de ces observations affecte les analyses possibles et probablement la capacité de détecter l'influence de certaines variables sur la condition physique. Chez les ongulés, des

mesures de condition physique telles la masse corporelle et le pourcentage de gras peuvent être corrélées au taux de fertilité (Pachkowski *et al.* 2013). Ce type de corrélation ne peut être établi en utilisant les données catégoriques provenant d'observations de chasseurs.

Aussi, les observations des chasseurs indiquent la condition physique d'un amalgame de caribous, incluant les mâles, les femelles et les juvéniles. Or, nous savons que la condition est influencée par le statut reproducteur de l'individu. Par exemple, la condition physique des femelles est influencée par l'allaitement. Ainsi, les femelles nourrissant des faons sont souvent en moins bonne condition physique à la fin de l'été que les femelles non reproductrices (Barboza & Parker 2008). L'indice de condition physique fourni par les chasseurs ne permet pas de lier le statut reproducteur et la condition physique.

En contrepartie, les données scientifiques sont souvent peu nombreuses, sinon absentes, et sont souvent récoltées lors d'une seule saison. À défaut de fournir des mesures précises, les observations des chasseurs donnent tout de même un bon aperçu de la condition générale du troupeau et de son évolution dans le temps.

Enfin, malgré l'ampleur des données sur la condition physique du caribou récoltées par l'Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society, le suivi couvre seulement une période de croissance de la population de caribou. Prolonger le programme de surveillance et obtenir une mesure de densité permettraient d'évaluer un effet potentiel de la densité si la population continue de croître. Aussi, prolonger le programme de surveillance jusqu'à une phase de décroissance permettrait d'évaluer si les facteurs environnementaux ayant une influence sur la condition physique de ce troupeau sont identiques en période de déclin.

### **La compréhension des facteurs limitant l'accès au caribou**

Dans le chapitre 2, nous avons étudié les facteurs environnementaux ayant un impact sur la satisfaction des besoins en caribou. Évidemment, les facteurs environnementaux ne sont pas les seuls à influencer les activités de chasse et la satisfaction des besoins en caribou. À cet égard, l'environnement socio-culturel et économique peut être aussi, sinon plus,

important que les facteurs environnementaux. Il était impossible d'analyser les facteurs socio-économiques dans cette thèse. Il se peut que la diminution de la chasse et la plus grande satisfaction des besoins au fil du temps n'aient pas été causées par l'augmentation de la population de caribous, mais plutôt par des changements dans la situation socio-économique des communautés. Seule une étude tenant compte de ces facteurs, ou une étude qualitative lors de laquelle on interrogerait les membres des communautés pour interpréter ces résultats, permettraient d'élucider cette question.

### **Le sondage pour comprendre les relations humaines**

Dans le troisième chapitre, nous avons abordé la question du capital social en analysant des réponses de questionnaires. Le questionnaire est la méthodologie standard promue par la Banque Mondiale (Krishna & Shrader 1999) pour étudier le capital social (Wagner & Fernandez-Gimenez 2008; Wagner *et al.* 2007). Cette méthodologie est toutefois critiquée, entre autres en ce qui concerne les sujets et “mesures” (par ex., respect, réciprocité, confiance) les plus appropriées pour aborder le concept (Stone & Hughes 2002). Nous avons quant à nous utilisé les mesures les plus fréquentes, mais sans pouvoir aborder, pour des questions éthiques (voir chapitre 3) les questions relatives à la confiance. La confiance envers les autres est un aspect important du capital social, et le fait que nous n'ayons pu inclure de questions relatives à ce sujet limite notre capacité à pleinement appréhender le capital social.

De plus, nous reconnaissons que notre taille d'échantillon était faible, même si elle représentait plus d'un tiers des membres de la coop. Il est donc possible que les membres de la coop ayant répondu au questionnaire soient les plus intimement attachés au programme, et donc ceux bénéficiant du plus haut taux de capital social. Nous avons estimé le biais de non-réponse par la méthode d'extrapolation (Armstrong & Overton 1977). Dans l'idéal, nous aurions contacté une partie des non-répondants et comparé leurs réponses à celles des répondants. Des entrevues semi-dirigées sur les sujets abordés dans les questions auraient en outre bonifié nos analyses.

**MOT DE LA FIN**

Nos résultats ont montré l'importance de la neige et des températures printanières comme facteurs influençant la condition physique du caribou et le socio-écosystème humains-*Rangifer*. Nous avons aussi montré l'importance des connaissances locales autochtones pour comprendre ces systèmes. De manière plus générale, cette thèse approfondit notre compréhension des programmes de surveillance communautaire et des institutions qui, en les coordonnant, permettent de construire des liens sociaux et de lier de manière innovante connaissances scientifiques et locales.

À l'heure actuelle, les communautés autochtones désirent manifestement conserver et promouvoir leurs cultures traditionnelles, tout en sécurisant leur avenir dans un contexte de changements et d'incertitudes. La résilience des socio-écosystèmes arctiques, et celle des chasseurs de caribou, passera nécessairement par l'acquisition de connaissances sur les changements en cours, mais aussi par la création d'institutions permettant aux acteurs d'agir de manière adaptative et concertée. Les socio-écosystèmes sont en constante évolution. Leur gestion ne peut donc être basée sur des informations et des modes de gestion figés dans l'espace et le temps (Ostrom 2007). En ce sens, et à la lumière de notre étude, la surveillance environnementale communautaire, bien qu'elle doive surmonter plusieurs défis, est une approche prometteuse.

There is no reason to believe that bureaucrats and politicians, no matter how well meaning, are better at solving problems than the people on the spot, who have the strongest incentive to get the solution right.

Elinor Ostrom, prix Nobel d'économie

## ANNEXE I

### CLIMATE VARIABLES FROM THE CIRCUMARCTIC RANGIFER MONITORING AND ASSESSMENT NETWORK (CARMA)

CARMA climate variable	Unit	Calculation algorithm*
Mean daily snow depth	m	No algorithm. Equal to MERRA variable named as snow depth (snodp)
Mean daily temperature at 2 m above displacement	°C	No algorithm. Equal to MERRA variable named as daily mean temperature at 2 m above displacement (t2m)
Mean daily fractional snow-covered area	fraction	No algorithm. Equal to MERRA variable named as fractional snow-covered area (frsno)
Number of days of freeze/thaw events	days	Cumulative days when t2m_max is above 0°C and t2m_min is below 0°C
Mean daily cumulative rain on snow	mm	Uses MERRA variables named as surface snowfall rate (precsno) and total surface precipitation rate (prectot). Is calculated as cumulative rainfall <sub>(mm/s)</sub> *24*60*60 if (prectot-precsno)>0 & snodp >0.01
Number of days of rain on snow	days	Cumulative days with rain on snow events.
Mean daily cumulative freezing rain	mm	Uses MERRA variables named as surface snowfall rate (precsno) and total surface precipitation rate (prectot). Is calculated as cumulative rainfall <sub>(mm/s)</sub> *24*60*60 if (prectot-precsno)>0 & t2m <0
Number of days of freezing rain	days	Cumulative days with freezing rain.
Mean daily cumulative growing degree days (above 5 °C)	GDD	Accumulate daily averaged values of t2m if t2m > 5°C.
Mean daily oestrid harassment index		Corresponds to =T×W, where: T = 1 if [t2m > 18°C], T = 0 if [t2m < 13°C], and T = 1–18–t2m/10 if [13 °C < t2m > 18 °C] W = 0 if wind speed > 9m/s and W = 9–wind speed/ 9 if wind speed < 9m/s

\*Calculation algorithms describe how CARMA variables were calculated from the Modern Era Retrospective analysis for Research and Applications (MERRA) daily averaged values.

## ANNEXE II

**CLIMATE VARIABLES DESCRIBING TEMPERATURE, SNOW  
CONDITIONS AND ICING EVENTS LIKELY TO AFFECT THE BODY  
CONDITION OF CARIBOU, CALCULATED FROM THE CARMA DATABASE  
(ANNEXE I)**

Climate variable	Unit	Calculation	Season of analysis	PCH range*	Included in PCA†
Average temperature–spring range	°C	Mean temperature for the spring season	Spring	Spring	Yes
Cumulative snow depth–winter range	m	Daily snow depth added over the winter season	Spring	Winter‡	Yes
Cumulative snow depth–spring range	m	Daily snow depth added over the spring season	Spring	Spring	Yes
Coefficient of variation in snow depth–spring range		Coefficient of variation in snow depth for the spring season	Spring	Spring	Yes
Coefficient of variation in snow depth–winter range		Coefficient of variation in snow depth for the winter season	Spring	Winter‡	Yes
Melting date–spring range	Julian day	Julian day when snow cover reaches less than 20% on the spring range and never increase over 20% again	Spring	Spring	Yes
Average snow depth–spring range	m	Mean daily snow depth for the spring season	Spring	Spring	No, correlated with cum. snow depth–spring range†
Maximum snow depth–spring range	m	Highest daily snow depth recorded during the spring season	Spring	Spring	No, correlated with cum. snow depth–spring range†
Average snow depth–winter range	m	Mean daily snow depth for the winter season	Spring	Winter‡	No, correlated with cum. snow depth–winter range†
Maximum snow depth–winter range	m	Highest daily snow depth recorded during winter	Spring	Winter‡	No, correlated with cum. snow depth–winter range†
Number of days with freeze–thaw–spring range extended§	days	Number of days when freeze-thaw events occurred on the spring range from 16 August to 31 May	Spring	Fall, winter and spring‡	Yes

Number of days with freeze-thaw-winter range extended§	days	Number of days when freeze-thaw events occurred on the winter range from 16 August to 31 March	Spring	Fall and winter‡	Yes
Freezing rain falling on the ground-fall range	mm	Daily freezing rain when fraction of snow cover is less than 0.2, added over the fall season	Spring	Fall‡	Yes
Freezing rain falling on the ground-spring range	mm	Daily freezing rain when fraction of snow cover is less than 0.2, added over the spring season	Spring	Spring	Yes
Freezing rain falling on the ground-winter range	mm	Daily freezing rain when fraction of snow cover is less than 0.2, added over the winter season	Spring	Winter‡	Yes
Cumulative rain on snow-winter range extended§	mm	Daily rain on snow falling on the winter range from 16 August to 31 March	Spring	Fall and winter‡	Yes
Cumulative freezing rain-winter range extended§	mm	Daily freezing rain falling on the winter range from 16 August to 31 March.	Spring	Fall and winter‡	No, correlated with rain on snow-winter range expanded†
Cumulative rain on snow-spring range	mm	Daily rain on snow added over the spring season	Spring	Spring	No, correlated with rain on snow-winter range extended†
Cumulative freezing rain-spring range	mm	Daily freezing rain added over the spring season	Spring	Spring	No, correlated with rain on snow-winter range extended†

\*Variables were calculated with reference to the Porcupine Caribou Herd (PCH) seasonal range use. For the PCH, fall range is considered to be used from around 16 August to 30 November, the winter range is used from around 1 December to 31 March, and the spring range is used from around 1 April to 31 May. †Variables highly correlated ( $r > 0.7$ ) with another variable providing similar information were excluded from the principal component analysis (PCA) to ensure stability (see Methods). ‡Climate variables describing conditions on the winter and fall ranges were included in spring analysis considering that caribou arriving on the spring range have been affected by climate conditions previously encountered. § Extended range: signifies that the variables were calculated (e.g. number of days with freeze-thaw) starting from the fall season. This was done under the logic that caribou arriving on their winter range may have met ice layers that were formed on the winter range during previous fall.

## ANNEXE III

**PRINCIPAL COMPONENTS (PC) SCORES (EIGENVECTORS) FROM  
PRINCIPAL COMPONENT ANALYSES (PCA) INCLUDING SNOW AND  
TEMPERATURE CONDITIONS, AND THE PCA INCLUDING ICING  
EVENTS, BETWEEN 2000-2010\***

Climate variables	Snow and temperature		Icing events
	PC1	PC2	PC1
Average temperature – spring range (°C)	-0.46	-0.29	
Cumulative snow depth – winter range (m)	0.37	-0.42	
Cumulative snow depth – spring range (m)	0.47	-0.28	
Coefficient of variation in snow depth – spring range	-0.41	0	
Coefficient of variation in snow depth – winter range	0.11	0.79	
Melting date (Julian days)	0.49	0.18	
Number of days with freeze-thaw – spring range extended‡			0.49
Number of days with freeze-thaw – winter range extended‡			0.53
Freezing rain falling on the ground – fall range (mm)			0.46
Freezing rain falling on the ground – the spring range (mm)			0.28
Freezing rain falling on the ground – the winter range (mm)			0.43
Cumulative rain on snow – winter range extended (mm)			0

\* These PCA included weather conditions occurring during the winter and spring and likely affecting the body condition of Porcupine caribou. ‡Extended range means that the number of days of freeze-thaw or rain on snow events occurring on the spring or winter ranges were computed starting from the fall season. This was done under the logic that caribou arriving on their winter range may have encountered ice layers that were formed on the winter range during previous fall.



## ANNEXE IV

**DESCRIPTION OF THE PRINCIPAL COMPONENTS (PCS) USED AS  
CLIMATE INDICES IN OUR ANALYSIS**

<b>Component</b>	<b>Descriptive name</b>	<b>Meaning of component</b>	<b>% of variance explained</b>	<b>Cumul. % of variance explained</b>
PC1- Snow and temperature (PCsnow1)	Temperature and early melt	Greater PC scores represent years with a longer snow season (late melting date), deeper snow in winter and spring, and colder temperatures	61.5	61.5
PC2- Snow and temperature (PCsnow2)	Variability in snow cover	Greater PC scores represent years with more variability in the snow cover during winter, as well as shallower snow on the winter range	24.5	86.0
PC1- Icing events (PCice1)	Icing events	Greater PC scores represent years with more icing events in general, and especially more freeze-thaw events on the winter range	48.0	48.0

## ANNEXE V

**COMPLETE LIST OF POTENTIAL COMPETITIVE MODELS EVALUATED  
FOR THE INFLUENCE OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS ON THE  
SPRING BODY CONDITION OF CARIBOU FROM THE PORCUPINE  
MIGRATORY CARIBOU HERD BETWEEN 2000-2010\***

Models	NP	AIC	$\Delta$ AIC	AIC weight
Step I) Large-scale climatic variables				
<b>AO</b>	<b>4</b>	<b>1144.53</b>	<b>0.00</b>	<b>0.89</b>
AOW	4	1150.84	6.30	0.04
Null model	3	1149.47	4.94	0.07
Step II) Local weather variables over winter and spring – variables affecting costs of locomotion and thermoregulation				
PCsnow1*	5	1114.83	2.62	0.12
PCsnow2	4	1147.05	34.84	0.00
PCice1	4	1151.04	38.83	0.00
<b>PCsnow1* + PCsnow2</b>	<b>6</b>	<b>1112.44</b>	<b>0.23</b>	<b>0.38</b>
PCsnow1* + PCice1	6	1115.83	3.62	0.07
PCsnow2 + PCice1	5	1147.68	35.47	0.00
<b>PCsnow1* + PCsnow2 + PCice1</b>	<b>7</b>	<b>1112.21</b>	<b>0.00</b>	<b>0.43</b>
Null model	3	1149.47	37.26	0.00
Step III) Proxies of vegetation productivity and insect harassment on the summer range				
GDDMay yr-1	4	1120.59	11.49	0.00
GDDJune yr-1*	5	1147.60	38.50	0.00
GDDMay yr-1 + GDDJune yr-1*	6	1117.60	8.50	0.02
IHI yr-1*	5	1137.84	28.75	0.00
<b>GDDMay yr-1 + IHI yr-1*</b>	<b>6</b>	<b>1109.10</b>	<b>0.00</b>	<b>0.98</b>
Null model	3	1149.47	40.38	0.00
Step IV) Comparison of candidate models				
AO	4	1144.53	47.62	0.00
PCsnow1* + PCsnow2	6	1112.44	15.53	0.00
PCsnow1* + PCsnow2 + PCice1	7	1112.21	15.30	0.00
GDDMay yr-1 + IHI yr-1*	6	1109.10	12.18	0.00
AO + PCsnow1* + PCsnow2	7	1114.28	17.37	0.00
AO + PCsnow1* + PCsnow2 + PCice1	8	1114.21	17.29	0.00
AO + GDDMay yr-1 + IHI yr-1*	7	1104.19	7.27	0.01
<b>PCsnow1* + PCsnow2 + IHI yr-1*</b>	<b>8</b>	<b>1096.98</b>	<b>0.07</b>	<b>0.31</b>
AO + PCsnow1* + PCsnow2 + IHI yr-1*	9	1098.96	2.05	0.12
GDDMay yr-1 + PCsnow2 + IHI yr-1*	7	1105.79	8.88	0.00
AO + GDDMay yr-1 + PCsnow2 + IHI yr-1*	8	1101.46	4.55	0.03
<b>PCsnow1* + PCsnow2 + PCice1 + IHI yr-1*</b>	<b>9</b>	<b>1096.91</b>	<b>0.00</b>	<b>0.32</b>
<b>AO + PCsnow1* + PCsnow2 + PCice1 + IHI yr-1*</b>	<b>10</b>	<b>1098.63</b>	<b>1.72</b>	<b>0.14</b>
GDDMay yr-1 + PCsnow2 + PCice1 + IHI yr-1*	8	1103.70	6.79	0.02
AO + GDDMay yr-1 + PCsnow2 + PCice1 + IHI yr-1*	9	1100.47	3.56	0.05
Null model	3	1149.47	52.56	0.00

\*n=617 observations in 10 communities.

**Notes:** Models in boldface were selected based on  $\Delta$ AIC (difference in Akaike Information Criterion; see methods). AO: annual Arctic Oscillation index; AOW: Arctic Oscillation index for the winter months (January to March); PCSnow1: first principal component on snow and temperature variables, contrasting years with a longer snow season (late melting date), deeper snow in winter and spring, and colder temperatures and years with warmer springs, short snow season and shallower snow conditions (see methods and Annexes III and IV); PCSnow2: second principal component on snow and temperature variables, contrasting winters with high and low variability in the snow cover; PCIce1: first principal component on icing variables contrasting years with high and low frequencies of icing events; GDDMay yr-1: cumulative growing degree-days (above 5°C) on May 31 the previous year; GDDJune yr-1: cumulative growing degree-days (above 5°C) on June 21 the previous years; IHI yr-1: insect harassment index the previous years (see methods). Variables marked with an asterisk (\*) have a nominal effect. For these variables, the probability of caribou passing from the poor to average category (1 to 2) is not the same as the probability to pass from the average to excellent category (2 to 3). In these cases, two parameters estimates are calculated instead of one regression slope coefficient, which increases K by 1 (see Statistical analyses).

## ANNEXE VI

**COMPLETE LIST OF POTENTIAL COMPETITIVE MODELS EVALUATED  
FOR THE INFLUENCE OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS ON THE FALL  
BODY CONDITION OF CARIBOU FROM THE PORCUPINE MIGRATORY  
CARIBOU HERD BETWEEN 2000-2010\***

<b>Models</b>	<b>NP</b>	<b>AIC</b>	<b>ΔAIC</b>	<b>AIC weight</b>
Step I) Large-scale climatic variables				
<b>AO</b>	<b>4</b>	<b>1048.86</b>	<b>0.00</b>	<b>0.59</b>
AOW	4	1051.21	2.36	0.18
<b>Null model</b>	<b>3</b>	<b>1050.71</b>	<b>1.86</b>	<b>0.23</b>
Step II) Local environmental variables over winter, spring and fall – variables affecting costs of locomotion and thermoregulation				
PCsnow1	4	1040.30	19.04	0.00
PCsnow2*	5	1038.51	17.24	0.00
PCice1	4	1047.74	26.47	0.00
PCsnow1 + PCsnow2*	6	1029.66	8.39	0.01
PCsnow1 + PCice1	5	1035.92	14.65	0.00
PCsnow2* + PCice1	6	1030.91	9.65	0.01
<b>PCsnow1 + PCsnow2* + PCice1</b>	<b>7</b>	<b>1021.27</b>	<b>0.00</b>	<b>0.98</b>
Null model	3	1050.71	29.45	0.00
Step III) Proxies of vegetation productivity and insect harassment on the summer range				
GDDMay*	5	1040.67	6.88	0.03
GDD_21June	4	1039.32	5.53	0.05
IHI	4	1050.23	16.44	0.00
<b>GDDMay* + GDDJune</b>	<b>6</b>	<b>1033.79</b>	<b>0.00</b>	<b>0.87</b>
GDDMay* + IHI	6	1039.68	5.89	0.05
Null model	3	1050.71	16.93	0.00
Step IV) Comparison of candidate models				
AO	4	1048.86	28.56	0.00
<b>PCsnow1 + PCsnow2* + PCice1</b>	<b>7</b>	<b>1021.27</b>	<b>0.97</b>	<b>0.24</b>
GDDMay* + GDDJune	6	1033.79	13.49	0.00
PCsnow1 + PCsnow2* + GDDJune	7	1027.91	7.61	0.01
<b>GDDMay* + PCsnow2* + PCice1</b>	<b>8</b>	<b>1020.30</b>	<b>0.00</b>	<b>0.40</b>
GDDMay* + PCsnow2* + GDDJune	8	1025.85	5.55	0.03
AO + PCsnow1 + PCsnow2* + PCice1	8	1023.17	2.87	0.09
AO + GDDMay* + GDDJune	7	1035.43	15.14	0.00
AO + PCsnow1 + PCsnow2* + GDDJune	8	1029.81	9.52	0.00
AO + <b>GDDMay* + PCsnow2* + PCice1</b>	<b>9</b>	<b>1021.70</b>	<b>1.40</b>	<b>0.20</b>
AO + GDDMay* + PCsnow2* + GDDJune	9	1025.69	5.39	0.03
Null model	3	1050.71	30.42	0.00

\*n=711 observations in 10 communities

**Notes:** models in boldface were selected based on  $\Delta$ AIC (difference in Akaike Information Criterion; see methods). AO: annual Arctic Oscillation index; AOw: Arctic Oscillation index for the winter months (January to March); PCSnow1: first principal component on snow and temperature variables, contrasting years with a longer snow season (late melting date), deeper snow in winter and spring, and colder temperatures and years with warmer springs, short snow season and shallower snow conditions (see methods and Annexes III and IV); PCSnow2: second principal component on snow and temperature variables, contrasting winters with high and low variability in the snow cover; PCIce1: first principal component on icing variables contrasting years with high and low frequencies of icing events; GDDMay: cumulative growing degree-days (above 5°C) on the 31 of May; GDDJune: cumulative growing degree-days (above 5°C) on the 21 of June; IHI: insect harassment index (see methods). Variables marked with an asterisk (\*) have a nominal effect. For these variables, the probability of caribou passing from the poor to average category (1 to 2) is not the same as the probability to pass from the average to good/ excellent category (2 to 3). For these variables, two parameters estimates are calculated instead of one regression coefficient, which increases K (see methods).

## ANNEXE VII

**PARAMETER ESTIMATES FOR THE VARIABLES INCLUDED IN THE MOST PARSIMONIOUS OF THE SUPPORTED MODELS (APPENDIX V, TABLEAU 2) DESCRIBING VARIATION IN SPRING BODY CONDITION OF THE PORCUPINE CARIBOU HERD, BETWEEN 2000-2010**

Variable category	Variable	Estimate [95 % CI]
Fixed intercepts	1 2	<b>-2.36 [-2.69; -2.02]</b>
	2 3	<b>0.66 [0.44; 0.88]</b>
Local environment winter and spring	<b>PCsnow2</b>	<b>-0.14 [-0.27; -0.01]</b>
	1 2 <b>PCsnow1*</b>	<b>0.38 [0.23; 0.52]</b>
	2 3 <b>PCsnow1*</b>	<b>0.26 [0.16; 0.36]</b>
Local environment spring and summer	1 2 IHI yr-1*	-0.06 [-0.38; 0.26]
	2 3 <b>IHI yr-1*</b>	<b>0.37 [0.20; 0.55]</b>
<i>Additional variables included in equivalent models:</i>		
Local environment winter and spring	PCice1	0.08 [-0.03; 0.20]
Large-scale climate	AO	0.06 [-0.14; 0.25]
Variance of random intercept	community	0.03

**Notes:** Estimates for additional variables included in equivalent models are also listed. Variables for which 95% CI exclude 0 are indicated in bold. Parameters estimates for variables in models within  $\Delta AIC \leq 2$  are presented. Abbreviations are: AO: annual Arctic Oscillation index; PCSnow1: first principal component on snow and temperature variables, contrasting years with a longer snow season (late melting date), deeper snow in winter and spring, and colder temperatures and years with warmer springs, short snow season and shallower snow conditions (see methods and Annexes III and IV); PCSnow2: second principal component on snow and temperature variables, contrasting winters with high and low variability in the snow cover; PCice1: first principal component on icing variables contrasting years with high and low frequencies of icing events; IHI yr-1: insect harassment index the previous years. Variables marked with an asterisk (\*) have a nominal effect. For these variables, the probability of caribou passing from the poor to average category (1 to 2) is not the same as the probability to pass from the average to good/ excellent category (2 to 3). For these variables, two parameters estimates are calculated instead of one regression coefficient, which increases K (see methods). Intercepts are always modelled as nominal.

## ANNEXE VIII

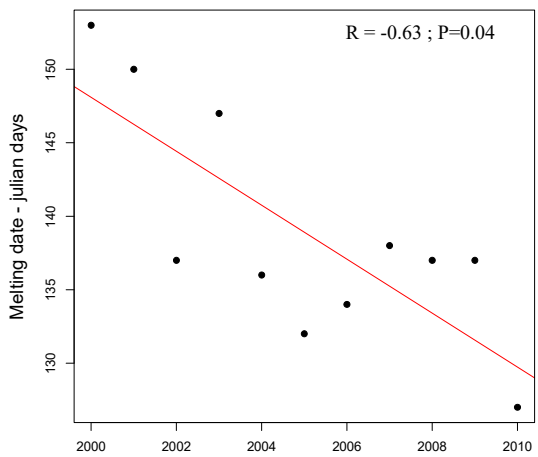
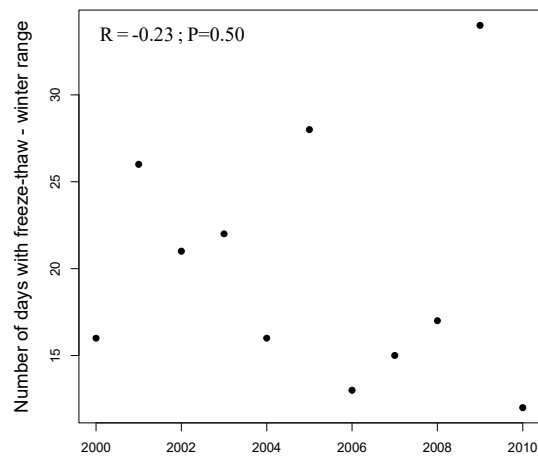
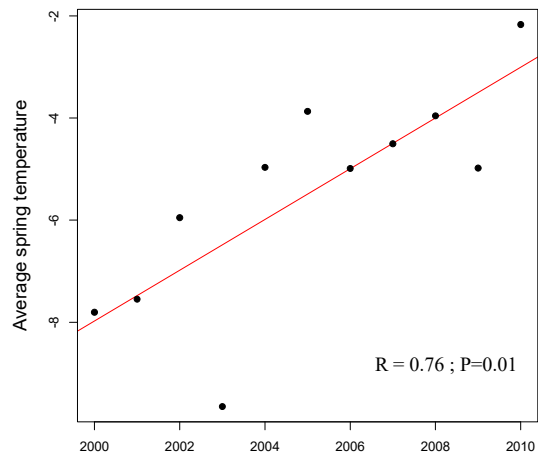
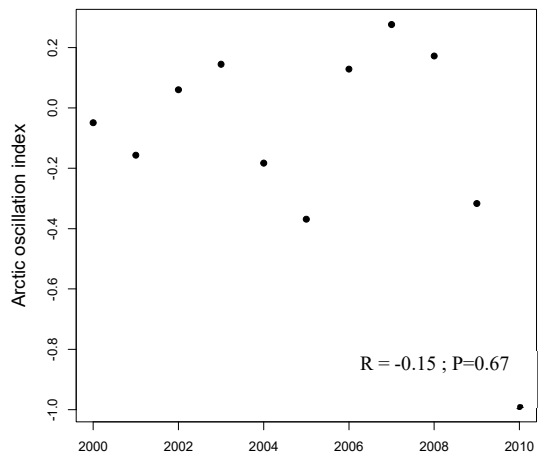
**PARAMETER ESTIMATES FOR THE VARIABLES INCLUDED IN THE MOST PARSIMONIOUS OF THE SUPPORTED MODELS (APPENDIX VI, TABLEAU 3) DESCRIBING VARIATION IN FALL BODY CONDITION OF THE PORCUPINE CARIBOU HERD, BETWEEN 2000-2010**

Variable category	Variable	Estimate [95 % CI]
Fixed intercepts	1 2	-3.43 [-3.93; -2.92]
	2 3	-0.73 [-1.05; -0.41]
Local environment winter and spring	<b>PCsnow1</b>	<b>-0.15 [-0.24; -0.06]</b>
	<b>PCice1</b>	<b>-0.15 [-0.24; -0.06]</b>
	1 2 <b>PCsnow2*</b>	<b>0.56 [0.29; 0.82]</b>
	2 3 <b>PCsnow2*</b>	<b>0.21 [0.07; 0.35]</b>
<i>Additional variables included in equivalent models:</i>		
Local environment spring and summer	1 2 GDDMay*	0.10 [-0.28; 0.48]
	2 3 GDDMay*	<b>-0.32 [-0.50; -0.13]</b>
Large-scale climate	AO	0.12 [-0.18; 0.41]
Variance of random intercept	community	0.16

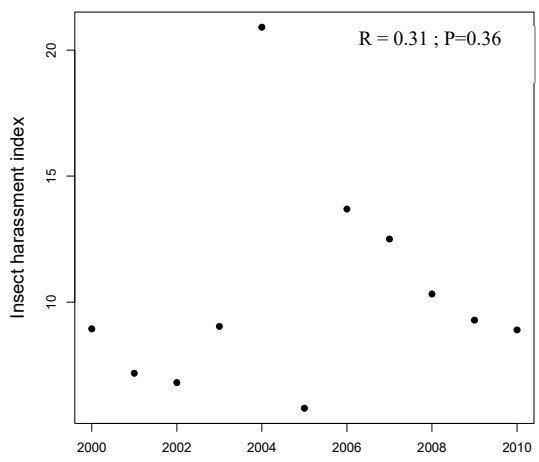
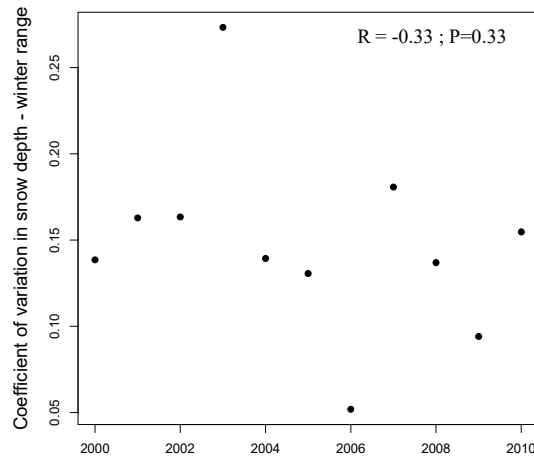
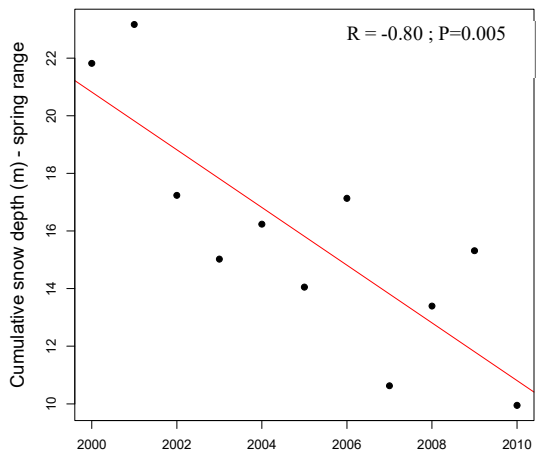
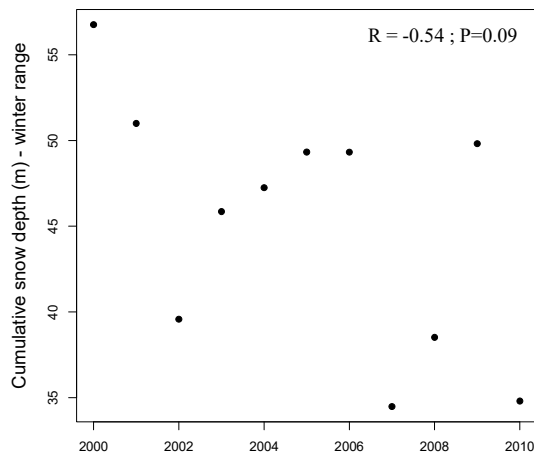
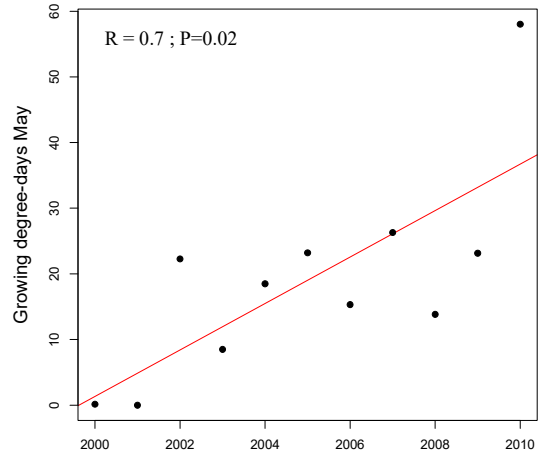
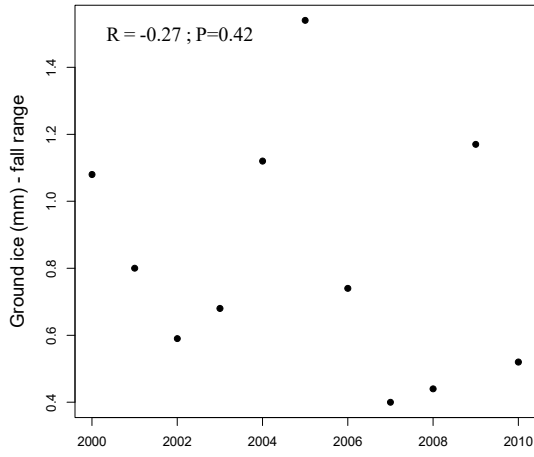
**Notes:** Estimates for additional variables included in equivalent models are also listed. Variables for which 95% CI exclude 0 are indicated in bold. Parameters estimates for variables in models within  $\Delta AIC \leq 2$  are presented. Abbreviations are: AO: annual Arctic Oscillation index; PCSnow1: first principal component on snow and temperature variables, contrasting years with a longer snow season (late melting date), deeper snow in winter and spring, and colder temperatures and years with warmer springs, short snow season and shallower snow conditions (see methods and Annexes III and IV); PCSnow2: second principal component on snow and temperature variables, contrasting winters with high and low variability in the snow cover; PCice1: first principal component on icing variables contrasting years with high and low frequencies of icing events; GDDMay: cumulative growing degree-days (above 5°C) on the 31 of May. Variables marked with an asterisk (\*) have a nominal effect. For these variables, the probability of caribou passing from the poor to average category (1 to 2) is not the same as the probability to pass from the average to good/ excellent category (2 to 3). For these variables, two parameters estimates are calculated instead of one regression coefficient, which increases K (see methods).

ANNEXE IX

TIME SERIES OF ENVIRONMENTAL VARIABLES EVALUATED IN THE ANALYSES ON THE SPRING AND FALL BODY CONDITION PORCUPINE CARIBOU HERD, BETWEEN 2000-2010







## ANNEXE X

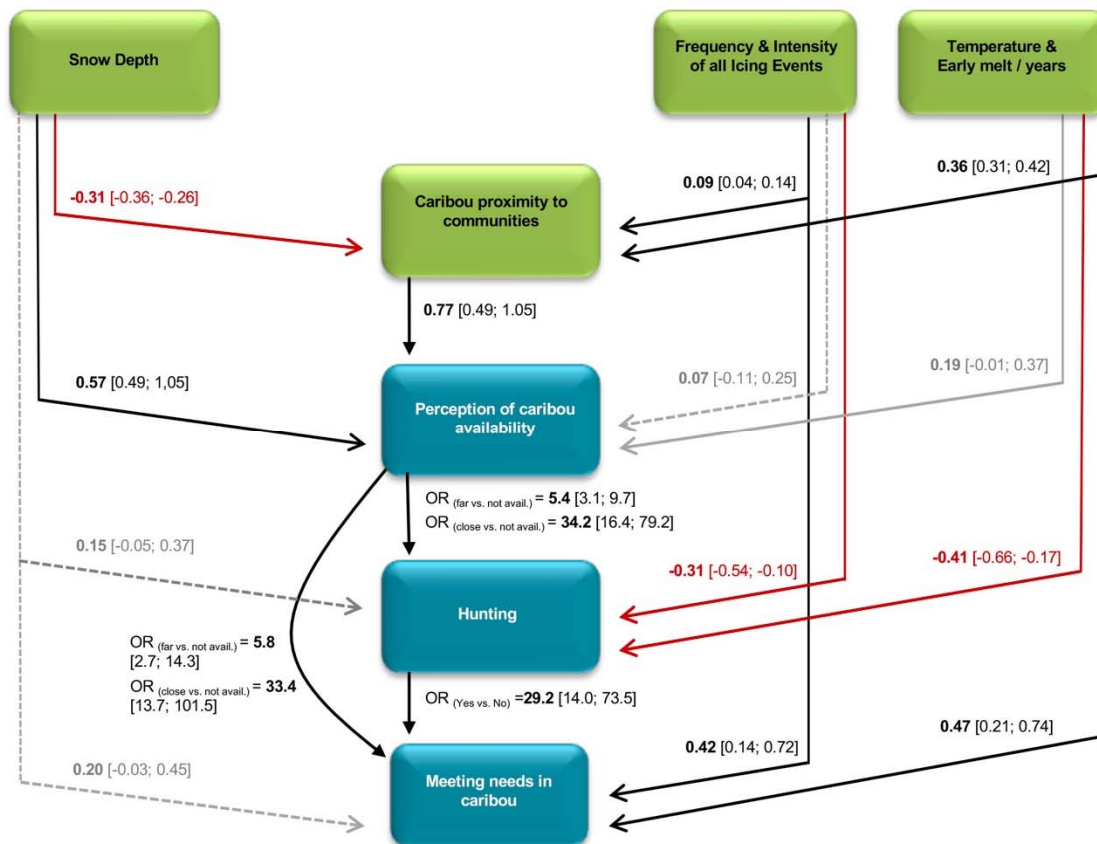
## ANNUAL RANGE OF THE PORCUPINE CARIBOU HERD (PCH)



Map showing the contour (black) of the annual range of the PCH in northeastern Alaska (USA), and the Yukon and Northwest Territories (Canada). Locations of the indigenous communities that are part of the annual monitoring program of the Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society are identified with a black dot. Map projection: Mercator. Base map source: Openstreetmap, nps.

## ANNEXE XI

**PATH DIAGRAM OF THE RELATIONSHIP BETWEEN CLIMATE, TIME (YEARS), CARIBOU, AND INDIGENOUS HUNTERS IN SPRING**



Final model for the capacity of indigenous hunters to meet their needs during the spring hunting season according to direct and indirect effect of climate conditions and temporal scale variations (model fit:  $C = 6.78$ ,  $k = 30$ ,  $P = 0.8$ ). Each line represents a specific direct path, with the black/red solid lines indicating positive/negative causal relationships (95% confidence intervals CI excluding 0), the grey solid lines indicating tendencies (95% CI marginally overlapping 0), and the grey dotted lines indicating lack of evidence. Parameter estimates (path coefficients) are given with their associated 95% CIs, and are presented as odds ratios (OR) for the ordinal and binary response variables (in blue). All continuous variables (in green) were standardized, meaning parameters are standardized and can be compared to assess the relative influence of different continuous predictors on the responses (Annexe XIII). Green: data generated through meteorological instruments and satellite collars. Blue: data generated through interviews with hunters. Discussion about these results can be found in the Supplementary Information.

## ANNEXE XII

### RESULTS AND DISCUSSION ABOUT THE FINAL MODEL FROM THE PATH ANALYSIS ON THE SPRING SEASON

Results and discussion about the final model from the path analysis on the spring season, which assessed whether climate and temporal scale variations have direct and/or indirect impacts on the capacity of indigenous hunters to meet their needs in caribou during the spring.

For the spring season, we found that climate conditions and temporal trends also had effects on caribou proximity, perception of caribou availability, hunting, and meeting needs in caribou (Annexe XI). Similarly to what was observed during fall, snow depth was the climate variable that had the greatest effect on caribou proximity and perception of caribou availability. When snow depth was deeper in spring, caribou tended to be further away from communities, but hunters tended to consider caribou as being more available. As for the fall season, this can be explained by the fact that perception of caribou availability results from both caribou distance and hunters' traveling capacity. Hunters need snow to travel with snowmobiles, hence poor snow cover prevents access to caribou even when they are relatively close to communities. Hunters' ability to locate caribou may also be favoured by deeper snow conditions through more predictable habitat use that is confined to discreet habitat types. Also, deeper snow may enhance tracking capacities by making hoof prints easier to follow.

During the spring, there was a very strong correlation ( $r = -0.85$ ) between years (2000 to 2008) and the principal component index related to temperature and early melts, meaning that average spring temperatures have increased from 2000 to 2008 and melting dates have tended to be earlier. During the same time period, the Porcupine caribou population increased from 123,000 animals in 2001 to 169,000 in 2010. Consequently, for the spring season, it was not possible to separate the effects of climate and large-scale temporal effects that could be due to changes in caribou demography on caribou proximity, perception of caribou availability, hunting, and meeting needs. Nonetheless, the results show that temperature,

early melt, and time (years) had a positive effect on caribou proximity, a weak positive effect on perception of caribou availability, a negative effect on hunting, and yet a positive effect on meeting needs (Annexe XI). These effects are similar to what was observed for the large-scale temporal effects during the fall (Figures 8 et 9). This leads us to believe that non-climatic temporal trends (such as caribou demographic trends) are more likely to explain these effects; if caribou were more abundant over time, they were more likely to be accessible to communities, and hunters could reduce hunting activities and yet increase their capacity to meet their needs.

Results also show that, in spring, icing events had a weak positive effect on caribou proximity, but a negative effect on hunting (Annexe XI). The negative effect of icing events on hunting was not observed in fall (Figure 8). During fall, caribou is the main resource hunted by communities, whereas other resources, such as fish, are available in spring. Therefore, hunters may be less willing to go hunting during spring when climate conditions are not optimal. In spring, results also show a positive effect of icing events on meeting needs in caribou, which was not observed in fall. Generally, snowmobile travel is easier early on in the spring before the snowpack starts to deteriorate. Icing events producing a crust on top of snow may make travel on deep snow easier in the spring.

Similarly, as in the fall season, caribou proximity to communities had a positive effect on perception of caribou availability (Annexe XI). Hunters were ~35 times more likely to go hunting when caribou were perceived as being close versus not available, and they were ~30 times more likely to meet their needs when they went hunting. Furthermore, hunters were ~30 times more likely to meet their needs in caribou when they considered caribou as being close versus not available, even though they did not go hunting (Annexe XI). As for the fall season, this paradox can be explained by the sharing tradition of caribou meat within the community, which seems to be enhanced when caribou are more available (see main text).

**ANNEXE XIII**  
**STANDARDIZATION VALUES**

<b>Variable</b>	<b>Season of analysis</b>	<b>Average</b>	<b>Standard deviation (SD)</b>
PC1–Snow depth & Length of the cold snowing season	Fall	0	1.48
PC1–Frequency & intensity of all Icing events	Fall	0	1.60
PC2–Intensity of ground ice events (locked pastures)	Fall	0	1.38
Years	Fall	2003.91	2.43
Proximity to communities	Fall	267.17	87.66
PC1–Temperature & early melt *	Spring	0	1.81
PC2–Snow depth	Spring	0	1.31
PC1–Frequency & intensity of all Icing events	Spring	0	1.68
Proximity to communities	Spring	260.89	77.82

Values used to center and standardize the continuous variables used in the piecewise structural equation modelling (SEM). \*This PC is highly correlated with years (2000-2008;  $r$  [95% confidence interval] = 0.85 [0.44; 0.97]).

## ANNEXE XIV

**CLIMATE VARIABLES FROM THE CIRCUMARCTIC RANGIFER  
MONITORING AND ASSESSMENT NETWORK (CARMA)**

<b>CARMA climate variable</b>	<b>Unit</b>	<b>Calculation algorithm*</b>
Mean daily snow depth	m	No algorithm. Equal to MERRA variable named as snow depth (snodp)
Mean daily temperature at 2 m above displacement	°C	No algorithm. Equal to MERRA variable named as daily mean temperature at 2 m above displacement (t2m)
Mean daily fractional snow-covered area	fraction	No algorithm. Equal to MERRA variable named as fractional snow-covered area (frsno)
Number of days of freeze/thaw events	days	Cumulative days when t2m_max is above 0°C and t2m_min is below 0°C
Mean daily cumulative rain on snow	mm	Uses MERRA variables named as surface snowfall rate (precsno) and total surface precipitation rate (prectot). Is calculated as cumulative rainfall <sub>(mm/s)</sub> *24*60*60 if (prectot-precsno)>0 & snodp >0.01
Number of days of rain on snow	days	Cumulative days with rain on snow events.
Mean daily cumulative freezing rain	mm	Uses MERRA variables named as surface snowfall rate (precsno) and total surface precipitation rate (prectot). Is calculated as cumulative rainfall <sub>(mm/s)</sub> *24*60*60 if (prectot-precsno)>0 & t2m <0
Number of days of freezing rain	days	Cumulative days with freezing rain.

List of climate variables calculated for each season from the CARMA database (see Methods). \*Calculation algorithms describe how CARMA variables were calculated from the Modern Era Retrospective analysis for Research and Applications (MERRA) daily averaged values.

## ANNEXE XV

**CLIMATE VARIABLES LIKELY AFFECTING THE PORCUPINE CARIBOU  
HERD (PCH) OVER ITS FALL RANGE**

<b>Climate variable</b>	<b>Unit</b>	<b>Calculation</b>	<b>Season of analysis</b>	<b>PCH range*</b>	<b>Included in PCA</b>
Average temperature–fall range	°C	Mean temperature for the fall season	Fall	Fall	Yes
Cumulative snow depth–fall range	m	Daily snow depth added over the fall season	Fall	Fall	Yes
Snow arrival date–fall range	Julian day	Julian day when snow cover reaches more than 20% on the fall range and never decrease below 20% again	Fall	Fall	Yes
Average snow depth–fall range	m	Mean daily snow depth for the fall season	Fall	Fall	No, correlated with cumulative snow depth – fall range†
Maximum snow depth–fall range	m	Highest daily snow depth recorded during the fall season	Fall	Fall	No, correlated with cumulative snow depth – fall range†
Variation in snow depth–fall range		Coefficient of variation in snow depth for the fall season	Fall	Fall	No, correlated with cumulative snow depth – fall range†
Number of days with rain on snow–fall range	days	Number of days when rain on snow events occurred in the fall season	Fall	Fall	Yes
Number of days with freeze–thaw events–fall range	days	Number of days when freeze–thaw events occurred in the fall season	Fall	Fall	Yes
Number of days with freezing rain–fall range	days	Number of days when freezing rain events occurred in the fall season	Fall	Fall	Yes
Cumulative rain on snow–fall range	mm	Daily rain on snow added over the fall season	Fall	Fall	Yes
Cumulative freezing rain–fall range	mm	Daily freezing rain added over the fall season	Fall	Fall	Yes
Freezing rain falling on the ground–fall range	mm	Daily freezing rain when fraction of snow cover is less than 0.2, added over the fall season	Fall	Fall	Yes



List of climate variables describing snow conditions, temperature, and icing events likely affecting the Porcupine Caribou Herd (PCH) over its fall range\*, and calculated from CARMA data (Annexe XIV). \*Variables were calculated with reference to the Porcupine Caribou Herd (PCH) seasonal range use. For the PCH, fall range is considered to be used from around 16 August to 30 November. † Variables highly correlated ( $r > 0.7$ ) with another variable providing similar information were excluded from the principal component analysis (PCA) to ensure stability (see Methods).

## ANNEXE XVI

**CLIMATE VARIABLES LIKELY AFFECTING THE PORCUPINE CARIBOU  
HERD (PCH) OVER ITS SPRING RANGE**

<b>Climate variable</b>	<b>Unit</b>	<b>Calculation</b>	<b>Season of analysis</b>	<b>PCH range*</b>	<b>Included in PCA†</b>
Average temperature–spring range	°C	Mean temperature for the spring season	Spring	Spring	Yes
Cumulative snow depth–winter range	m	Daily snow depth added over the winter season	Spring	Winter‡	Yes
Cumulative snow depth–spring range	m	Daily snow depth added over the spring season	Spring	Spring	Yes
Coefficient of variation in snow depth–spring range		Coefficient of variation in snow depth for the spring season	Spring	Spring	Yes
Coefficient of variation in snow depth–winter range		Coefficient of variation in snow depth for the winter season	Spring	Winter‡	Yes
Melting date–spring range	Julian day	Julian day when snow cover reaches less than 20% on the spring range and never increase over 20% again	Spring	Spring	Yes
Average snow depth–spring range	m	Mean daily snow depth for the spring season	Spring	Spring	No, correlated with cum. snow depth–spring range†
Maximum snow depth–spring range	m	Highest daily snow depth recorded during the spring season	Spring	Spring	No, correlated with cum. snow depth–spring range†
Average snow depth–winter range	m	Mean daily snow depth for the winter season	Spring	Winter‡	No, correlated with cum. snow depth–winter range†
Maximum snow depth–winter range	m	Highest daily snow depth recorded during winter	Spring	Winter‡	No, correlated with cum. snow depth–winter range†
Number of days with freeze–thaw–spring range extended§	days	Number of days when freeze-thaw events occurred on the spring range from 16 August to 31 May	Spring	Fall, winter and spring‡	Yes
Number of days with freeze–thaw–winter range extended§	days	Number of days when freeze-thaw events occurred on the winter range from 16 August to 31 Mars	Spring	Fall and winter‡	Yes

Freezing rain falling on the ground–fall range	mm	Daily freezing rain when fraction of snow cover is less than 0.2, added over the fall season	Spring	Fall‡	Yes
Freezing rain falling on the ground–spring range	mm	Daily freezing rain when fraction of snow cover is less than 0.2, added over the spring season	Spring	Spring	Yes
Freezing rain falling on the ground–winter range	mm	Daily freezing rain when fraction of snow cover is less than 0.2, added over the winter season	Spring	Winter‡	Yes
Cumulative rain on snow–winter range extended§	mm	Daily rain on snow falling on the winter range from 16 August to 31 March	Spring	Fall and winter‡	Yes
Cumulative freezing rain–winter range extended§	mm	Daily freezing rain falling on the winter range from 16 August to 31 March.	Spring	Fall and winter‡	No, correlated with rain on snow–winter range expanded†
Cumulative rain on snow–spring range	mm	Daily rain on snow added over the spring season	Spring	Spring	No, correlated with rain on snow–winter range extended†
Cumulative freezing rain–spring range	mm	Daily freezing rain added over the spring season	Spring	Spring	No, correlated with rain on snow–winter range extended†

List of climate variables describing snow conditions, temperature, and icing events likely affecting the Porcupine Caribou Herd (PCH) over its spring range\*, and calculated from the CARMA database (Annexe XIV). \*Variables were calculated with reference to the Porcupine Caribou Herd (PCH) seasonal range use. For the PCH, fall range is considered to be used from around 16 August to 30 November, the winter range is used from around 1 December to 31 March, and the spring range is used from around 1 April to 31 May. †Variables highly correlated ( $r > 0.7$ ) with another variable providing similar information were excluded from the principal component analysis (PCA) to ensure stability (see Methods). ‡Climate variables describing conditions on the winter and fall ranges were included in spring analysis considering that caribou arriving on the spring range have been affected by climate conditions previously encountered. §Extended range means that the number of days icing or rain on snow events occurring on the spring or winter ranges were computed starting from the fall season. Again, caribou arriving on the spring range in April, for example, may encounter ice layers that were formed due to icing events occurring on the spring range during previous fall or winter.

## ANNEXE XVII

## PRINCIPAL COMPONENT (PC) SCORES (EIGENVECTORS)

Climate variable - fall	Snow and temperature		Icing events	
	PC1		PC1	PC2
Average temperature – fall range (°C)	<b>-0.60</b>			
Cumulative snow depth – fall range (m)	<b>0.56</b>			
Snow arrival date (Julian days)	<b>-0.56</b>			
Number of days with rain on snow – fall range			<b>0.50</b>	-0.38
Number of days with freeze-thaw – fall range			0.36	0.47
Number of days with freezing rain – fall range			0.39	-0.22
Cumulative rain on snow – fall range (mm)			0.38	<b>-0.52</b>
Cumulative freezing rain – fall range (mm)			0.41	0.25
Freezing rain falling on the ground – fall range (mm)			0.40	<b>0.50</b>
<b>Climate variable - Spring</b>	<b>PC1</b>	<b>PC2</b>	<b>PC1</b>	
Average temperature – spring range (°C)	0.45	0.37		
Cumulative snow depth – winter range (m)	-0.37	0.36		
Cumulative snow depth – spring range (m)	-0.48	0.32		
Coefficient of variation in snow depth – spring range	0.40	-0.19		
Coefficient of variation in snow depth – winter range	-0.13	<b>-0.75</b>		
Melting date (Julian days)	<b>-0.51</b>	-0.20		
Number of days with freeze-thaw – spring range extended*			0.49	
Number of days with freeze-thaw – winter range extended*			<b>0.53</b>	
Freezing rain falling on the ground – fall range (mm)			0.41	
Freezing rain falling on the ground – spring range (mm)			0.22	
Freezing rain falling on the ground – winter range (mm)			<b>0.51</b>	
Cumulative rain on snow-winter range extended (mm)*			0.00	

\* Principal component (PC) scores (eigenvectors) from principal component analyses (PCAs) including snow and temperature conditions, and icing events. These PCAs included climate variables likely affecting the Porcupine Caribou Herd over its fall and spring range (2000-2008). Numbers in bold identify variables with scores higher than 0.5 for each PC axis retained<sup>63</sup>. \*Extended range means that the number of days of icing or rain on snow events occurring on the spring or winter ranges were computed starting from the fall season. Again, caribou arriving on the spring range in April, for example, may encounter ice layers that were formed due to icing events occurring on the spring range during previous fall or winter.

## ANNEXE XVIII

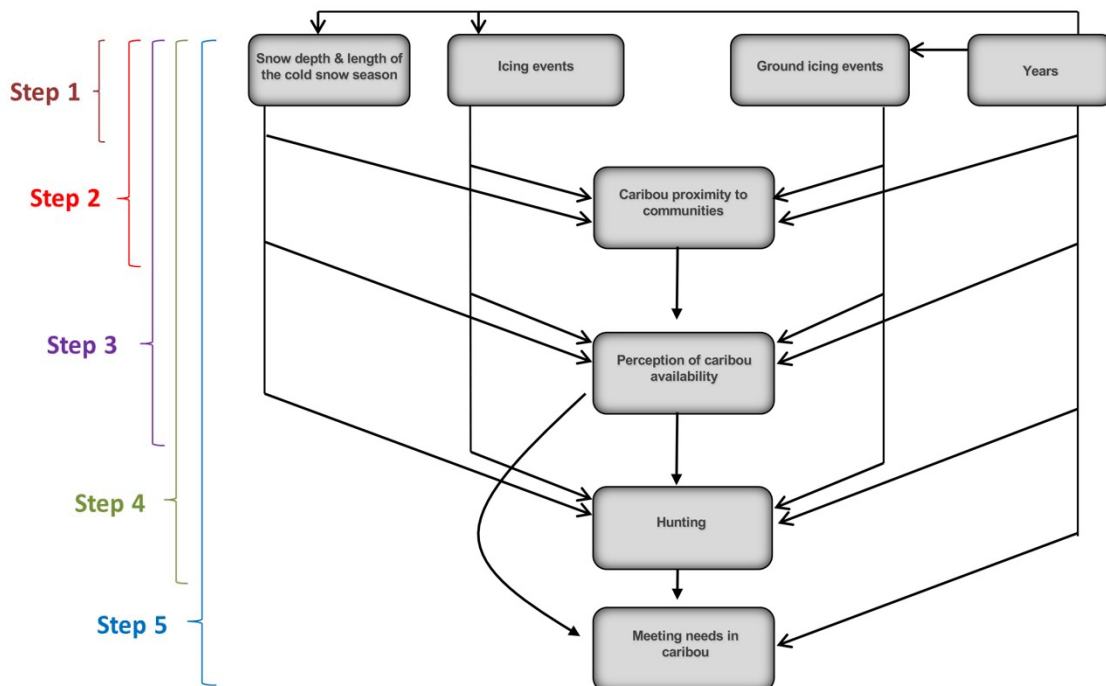
## PRINCIPAL COMPONENTS (PCS) SELECTED FOR THE PATH ANALYSES

Component	Descriptive name *	Meaning of component	Season of analysis	% of variance explained	Cumulative % of variance explained
PC1– Snow and Temperature	Snow depth & Length of the cold snowing season	Greater PC scores represent colder falls with early snow arrival and more snow accumulation	Fall	81.8	81.8
PC1– Icing events	Frequency & intensity of all Icing events	Greater PC scores represent years with more icing events in general, particularly greater amounts of rain falling on snow	Fall	42.2	–
PC2– Icing events	Intensity of ground ice events (locked pastures)	Greater PC scores represent years with more freeze-thaw events and freezing rain falling directly on the ground (ground ice, forming ice locked pastures), but less frequent rain on snow	Fall	29.8	72.0
PC1– Snow and temperature†	Temperature & early melt	Greater PC scores represent years with a shorter snow season (early melting date), shallow snow in winter and spring, and warm temperatures	Spring	56.5	–
PC2– Snow and temperature	Snow depth	Greater PC scores represent years with less variability in the snow cover during winter, as well as deeper snow	Spring	27.4	83.9
PC1– Icing events	Frequency & intensity of all Icing events	Greater PC scores represent years with more icing events in general, particularly more freeze-thaw events and freezing-rain falling directly on the ground on the winter range	Spring	47.7	47.7

Description of the principal components (PCs) selected to be used as climate variables in the path analyses, representing the snow and temperature conditions as well as the icing events to which the Porcupine Caribou Herd was exposed over its spring and fall ranges. \*Names used in Figure 8 or Annexe XI. †This PC is highly correlated with years (2000-2008;  $r$  [95% confidence interval] = 0.85 [0.44; 0.97]).

## ANNEXE XIX

## HYPOTHESIZED PATH DIAGRAM



Path diagram showing the most complex hypothesized causal structure for the fall season, linking direct and indirect relationships among climate conditions (indices obtained from PCAs), large-scale temporal variation (years), caribou proximity to communities (median distance to communities), caribou availability as perceived by hunters, the probability of going hunting, and the probability that hunters will meet their needs, for the Porcupine Caribou Herd, Northern Alaska (USA) and Northern Yukon and Northwest Territories (Canada), 2000-2008. The 5 steps illustrate the variables that were included in the 5 consecutive confirmatory path analyses that were conducted to build and select the final model.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACIA. (2005) *Arctic Climate Impact Assessment*. New York : Cambridge University Press. 1042 p.
- Adamczewski, J., Boulanger, J., Croft, B., Cluff, D., Elkin, B., Nishi, J., Kelly, A., D'Hont, A. et Nicolson, C. (2009) *Decline in the Bathurst caribou herd 2006-2009: a technical evaluation of field data and modeling*. Yellowknife : Wildlife Division, Environment and Natural Resources, Government of Northwest Territories. 105 p.
- Adamczewski, J. Z., Gates, C. C., Hudson, R. J. et Price, M. A. (1987) Seasonal changes in body composition of mature female caribou and calves (*Rangifer tarandus groenlandicus*) on an arctic island with limited winter resources. *Canadian Journal of Zoology*, 65, 1149-1157.
- Adams, L. G. (2005) Effects of maternal characteristics and climatic variation on birth masses of Alaskan caribou. *Journal of Mammalogy*, 86, 506-513.
- Adams, L. G. et Dale, B. W. (1998) Reproductive performance of female Alaskan caribou. *Journal of Wildlife Management*, 62, 1184-1195.
- Agrawal, A. (1995) Dismantling the divide between indigenous and scientific knowledge. *Development and Change*, 26, 413-439.
- Albon, S. D., Irvine, R. J., Halvorsen, O., Langvatn, R., Loe, L. E., Ropstad, E., Veiberg, V., Van Der Wal, R., Bjorkvoll, E. M., Duff, E. I., Hansen, B. B., Lee, A. M., Tveraa, T. et Stien, A. (2017) Contrasting effects of summer and winter warming on body mass explain population dynamics in a food-limited Arctic herbivore. *Global Change Biology*, 23, 1374-1389.
- Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society. (2002) *Proceedings of the Arctic Boderlands Ecological Knowledge Co-op 7th Annual Gathering (Feb. 28-March 2, 2002, Fort McPherson, Northwest Territories), Report Series Number 2002-1*. Whitehorse : Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society. 63 p.



- Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society. (2014a) *Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society*. Page consultée le 30 septembre 2017. Adresse URL : <https://www.arcticborderlands.org>.
- Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society. (2014b) *Community based monitoring*. Page consultée le 13 avril 2018. Adresse URL : <https://www.arcticborderlands.org/community-based-monitoring>.
- Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society. (2014c) *Scientific indicators*. Page consultée le 22 mars 2018. Adresse URL : <https://www.arcticborderlands.org/scientific-indicators>.
- Arctic Council. (2015) *Ottawa traditional knowledge principles*. Ottawa : Arctic Council. 2 p.
- Armitage, D. (2005) Community-based narwhal management in Nunavut, Canada: change, uncertainty, and adaptation. *Society & Natural Resources*, 18, 715-731.
- Armitage, D., Berkes, F., Dale, A., Kocho-Schellenberg, E. et Patton, E. (2011) Co-managements and the co-production of knowledge: learning to adapt in Canada's Arctic. *Global Environmental Change*, 21, 995-1004.
- Armitage, D., Berkes, F. et Doubleday, N. (Éds.). (2007) *Adaptive co-management: collaboration, learning, and multi-level governance*. Vancouver, BC : UBC Press. 344 p.
- Armstrong, J. S. et Overton, T. S. (1977) Estimating nonresponse bias in mail surveys. *Journal of Marketing Research (JMR)*, 14, 396-402.
- Arnold, J. S. et Fernandez-Gimenez, M. (2007) Building Social Capital Through Participatory Research: An Analysis of collaboration on Tohono O'odham Tribal Rangelands in Arizona. *Society & Natural Resources*, 20, 481 - 495.
- Ballard, W. B., Ayres, L. A., Krausman, P. R., Reed, D. J. et Fancy, S. G. (1997) Ecology of wolves in relation to a migratory caribou herd in northwest Alaska. *Wildlife Monographs*, 135, 5-47.

- Barboza, P. S. et Parker, K. L. (2008) Allocating protein to reproduction in arctic reindeer and caribou. *Physiological and Biochemical Zoology*, 81, 835-855.
- Barboza, P. S., Parker, K. L. et Hume, I. D. (2009) *Integrative wildlife nutrition*. Berlin, Germany : Springer-Verlag. 342 p.
- Barry, T., Kurvits, T., Alfthan, B. et Mork, E. (2010) *Arctic Biodiversity Trends 2010: Selected indicators of change*. Akureyri, Iceland : Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF). 121 p.
- Bates, D., Maechler, M. et Bolker, B. (2013) *lme4: linear mixed-effects models using Eigen and Eigenfaces*. R package version 0.999999-2. Page consultée le 17 octobre 2013. Adresse URL : <http://CRAN.R-project.org/package=lme4>.
- Bergerud, A. (1980) A review of the population dynamics of caribou and wild reindeer in North America. Dans E. Reimers, E. Gaare et S. Skjenneberg (dir.), *Proceedings of the Second International Reindeer/Caribou Symposium, Roros, Norway, 1979*. (p. 556-581). Trondheim, Norway : Direktoratet for vilt og ferskvannsfisk.
- Berkes, F. (1999) *Sacred ecology: traditional ecological knowledge and resource management*. Philadelphia, PA : Taylor & Francis. 209 p.
- Berkes, F. (2006). From community-based resource management to complex systems: the scale issue and marine commons. *Ecology and Society*, 11, 45. [Disponible en ligne] Adresse URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss41/art45/>. Récupéré de <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art45/>
- Berkes, F. (2009) Evolution of co-management: role of knowledge generation, bridging organizations and social learning. *Journal of Environmental Management*, 90, 1692-1702.
- Berkes, F., Colding, J. et Folke, C. (2000) Rediscovery of traditional ecological knowledge as adaptive management. *Ecological Applications*, 10, 1251-1262.

- Berkes, F., Colding, J. et Folke, C. (Éds.). (2003) *Navigating social-ecological systems: building resilience for complexity and change*. Cambridge : Cambridge University Press. 393 p.
- Berkes, F., Reid, W. V., Wilbanks, T. J. et Capstrano, D. (2006) Conclusions: bridging scales and knowledge systems. Dans W. V. Reid, F. Berkes, T. Wilbanks et D. Capistrano (dir.), *Bridging scales and knowledge systems : concepts and applications in ecosystem assessment* (p. 315-331). Washington, D.C. : Island Press.
- Berman, M. et Kofinas, G. (2004) Hunting for models: grounded and rational choice approaches to analyzing climate effects on subsistence hunting in an Arctic community. *Ecological Economics*, 49, 31-46.
- Berman, M., Nicolson, C., Fofinas, G., Tetlich, J. et Martin, S. (2004) Adaptation and sustainability in a small arctic community: results of an agent-based simulation model. *Arctic*, 57, 401-414.
- Berteaux, D., Réale, D., McAdam, A. G. et Boutin, S. (2004) Keeping pace with fast climate change: can Arctic life count on evolution? *Integrative and Comparative Biology*, 44, 140-151.
- Bivand, R. S., Keitt, T. et Rowlingson, B. (2014) *rgdal: bindings for the geospatial data abstraction library. R package version 0.8-16*. Page consultée le 12 septembre 2014. Adresse URL : <http://CRAN.R-project.org/package=rgdal>.
- Bivand, R. S., Pebesma, E. J. et Gomez-Rubio, V. (2013) *Applied spatial data analysis with R, Second edition*. New York : Springer p.
- Bivand, R. S. et Rundel, C. (2014) *rgeos: interface to geometry engine - open source (GEOS). R package version 0.3-4*. Page consultée le 13 septembre 2014. Adresse URL : <http://CRAN.R-project.org/package=rgeos>.
- Bjørnstad, O. N., Falck, W. et Stenseth, N. C. (1995) A geographic gradient in small rodent density fluctuations: a statistical modelling approach. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 262, 127.
- Boas, F. (1877) *The Central Eskimo*. Washington, D.C. : Smithsonian Institute. 295 p.

- Bolger, D. T., Newmark, W. D., Morrison, T. A. et Doak, D. F. (2008) The need for integrative approaches to understand and conserve migratory ungulates. *Ecology Letters*, *11*, 63-77.
- Bonenfant, C., Gaillard, J. M., Coulson, T., Festa-Bianchet, M., Loison, A., Garel, M., Loe, L. E., Blanchard, P., Pettoirelli, N., Owen-Smith, N., Du Toit, J. et Duncan, P. (2009) Empirical evidence of density-dependence in populations of large herbivores. *Advances in Ecological Research*, *41*, 313-357.
- Boudreau, S., Payette, S., Morneau, C. et Couturier, S. (2003) Recent decline of the George River Caribou herd as revealed by tree-ring analysis. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, *35*, 187-195.
- Boulet, M., Couturier, S., Côté, S. D., Otto, R. D. et Bernatchez, L. (2007) Integrative use of spatial, genetic, and demographic analyses for investigating genetic connectivity between migratory, montane, and resident caribou herds. *Molecular Ecology*, *16*, 4223-4240.
- Bourgeon, L., Burke, A. et Higham, T. (2017) Earliest Human Presence in North America Dated to the Last Glacial Maximum: New Radiocarbon Dates from Bluefish Caves, Canada. *PLOS ONE*, *12*, e0169486.
- Bradshaw, C. J. A., Boutin, S. et Hebert, D. M. (1997) Effects of petroleum exploration on woodland caribou in northeastern Alberta. *Journal of Wildlife Management*, *61*, 1127-1133.
- Briley, L., Brown, D. et Kalafatis, S. E. (2015) Overcoming barriers during the co-production of climate information for decision-making. *Climate Risk Management*, *9*, 41-49.
- Brody, H. (2000) *The other side of eden: hunters, farmers and the shaping of the world*. Vancouver/ Toronto : Douglas & McIntyre Ltd. 384 p.
- Brook, R. K., Kutz, S. J., Veitch, A. M., Popko, R. A., Elkin, B. T. et Guthrie, G. (2009) Fostering community-based wildlife health monitoring and research in the Canadian North. *Ecohealth*, *6*, 266-278.

- Brunet, N. D., Hickey, G. M. et Humphries, M. M. (2014) The evolution of local participation and the mode of knowledge production in Arctic research. *Ecology and Society*, 19, 69. [Disponible en ligne] Adresse URL : <https://www.ecologyandsociety.org/vol19/iss62/art69/>.
- Burnham, K. P. et Anderson, D. R. (2002) *Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach*. New York, USA : Springer. 454 p.
- Cai, J., Russell, D. et Whitfield, P. (2011) *Methodology and algorithms for constructing CARMA bio-climate tables*. Vancouver : Simon Fraser University. 29 p.
- Cameron, R. D., Smith, W. T., Fancy, S. G., Gerhart, K. L. et White, R. G. (1993) Calving success of female caribou in relation to body weight. *Canadian Journal of Zoology*, 71, 480-486.
- CARMA. (2017a) *CircumArctic Rangifer Monitoring and Assessment Network: status of herds*. Page consultée le 26 octobre 2017. Adresse URL : <https://carma.caff.is/herds>.
- CARMA. (2017b) *Mission Statement*. Page consultée le 27 octobre 2017. Adresse URL : <https://carma.caff.is/about-carma/mission-statement>.
- Carpenter, S. R., Bennett, E. M. et Peterson, G. D. (2006) Scenarios for ecosystem services: an overview. *Ecology and Society*, 11, 29. [Disponible en ligne] Adresse URL : <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss21/art29/>.
- Cattell, R. B. (1966) The scree test for the number of factor. *Multivariate Behavioral Research*, 1, 245-276.
- Chapin III, F. S., Carpenter, S. R., Kofinas, G. P., Folke, C., Abel, N., Clark, W. C., Olsson, P., Stafford Smith, D. M., Walker, B., Young, O. R., Berkes, F., Biggs, R., Grove, J. M., Naylor, R. L., Pinkerton, E., Steffen, W. et Swanson, F. J. (2010) Ecosystem stewardship: sustainability strategies for a rapidly changing planet. *Trends in Ecology and Evolution*, 25, 241-249.
- Chapin III, F. S., Peterson, G., Berkes, F., Callaghan, T. V., Angelstam, P., Apps, M., Beier, C., Bergeron, Y., Crepin, A. S., Danell, K., Elmqvist, T., Folke, C., Forbes, B., Fresco, N., Juday, G., Niemela, J., Shvidenko, A. et Whiteman, G. (2004) Resilience

and vulnerability of northern regions to social and environmental change. *Ambio*, 33, 344-349.

Christensen, R. H. B. (2013) *Ordinal: regression models for ordinal data. R package version 2013.9-30*. Récupéré de <http://cran.r-project.org/web/packages/ordinal/index.html>.

Christensen, R. H. B. (2015a) *Analysis of ordinal data with cumulative link models: estimation with the R-package ordinal*. 31 p.

Christensen, R. H. B. (2015b) *Ordinal: regression models for ordinal data. R package version 2015.6-28*. Récupéré de <https://cran.r-project.org/web/packages/ordinal/index.html>.

Christensen, R. H. B. (2015c) *A tutorial on fitting cumulative link mixed models with clmm2 from the ordinal package*. 10 p.

Cleghorn et Staples, L. (2016) *Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society data as a source of local ecological knowledge for the Porcupine Caribou Management Board*. Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society. 20 p.

Coleman, J. S. (1988) Social Capital in the Creation of Human Capital. *The American Journal of Sociology*, 94, Supplement: Organizations and Institutions: Sociological and Economic Approaches to the Analysis of Social Structure, S95-S120.

Conrad, C. C. et Hilchey, K. G. (2011) A review of citizen science and community-based environmental monitoring: issues and opportunities. *Environmental Monitoring and Assessment*, 176, 273-291.

Conrad, C. T. et Daoust, T. (2008) Community-Based Monitoring Frameworks: Increasing the Effectiveness of Environmental Stewardship. *Environmental Management*, 41, 358-366.

Cornwall, W. (2017) Drilling in Arctic refuge could put North America's largest caribou herd at risk. *Science*, [Disponible en ligne] Adresse URL : <http://www.sciencemag.org/news/2017/2011/drilling-arctic-refuge-could-put-north-america-s-largest-caribou-herd-risk>.

- COSEWIC. (2016) *COSEWIC assessment and status report on the caribou Rangifer tarandus, barren-ground population, in Canada*. Ottawa : Committee on the Status of Endangered Wildlife in Canada. 123 p.
- Coulson, T., Guinness, F., Pemberton, J. et Clutton-Brock, T. (2004) The demographic consequences of releasing a population of red deer from culling. *Ecology*, 85, 411-422.
- Courbin, N., Fortin, D., Dussault, C. et Courtois, R. (2009) Landscape management for woodland caribou: the protection of forest blocks influences wolf-caribou co-occurrence. *Landscape Ecology*, 24, 1375-1388.
- Courtois, R., Potvin, F., Couturier, S. et Gingras, A. (1996) *Révision des programmes d'inventaires aériens des grands cervidés*. Québec : Ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction de la faune et des habitats et Direction des affaires régionales. 49 p.
- Couturier, S., Brunelle, J., Vandal, D. et Stmartin, G. (1990) Changes in the Population Dynamics of the George River Caribou Herd, 1976-87. *Arctic*, 43, 9-20.
- Couturier, S., Côté, S. D., Huot, J. et Otto, R. D. (2009a) Body-condition dynamics in a northern ungulate gaining fat in winter. *Canadian Journal of Zoology*, 87, 367-378.
- Couturier, S., Côté, S. D., Otto, R. D., Weladji, R. B. et Huot, J. (2009b) Variation in calf body mass in migratory caribou: the role of habitat, climate, and movements. *Journal of Mammalogy*, 90, 442-452.
- Creswell, J. W. (1998) *Qualitative inquiry and research design: choosing among five traditions*. Thousand Oaks, California : Sage Publications, Inc. 403 p.
- Crête, M. et Huot, J. (1993) Regulation of a large herd of migratory caribou: summer nutrition affects calf growth and body reserves of dams. *Canadian Journal of Zoology*, 71, 2291-2296.
- Crutzen, P. J. et Steffen, W. (2003) How long have we been in the Anthropocene? *Climatic Change*, 61, 251-257.

- d'Huy, J. (2011) La distribution des animaux à Lascaux reflèterait leur distribution naturelle. *Bulletin de la Société Historique et Archéologique du Périgord*, CXXXVIII, 493-502.
- Danielsen, F., D., B. N., Jensen, P. M. et Pirhofer-Walzl, K. (2010) Environmental monitoring: the scale and speed of implementation varies according to the degree of people's involvement. *Journal of Applied Ecology*, 47, 1166-1168.
- Danielsen, F., Mendoza, M. M., Tagtag, A., Alviola, P. A., Balete, D. S., Jensen, A. E., Enghoff, M. et Poulsen, M. K. (2007) Increasing conservation management action by involving local people in natural resource monitoring. *Ambio*, 36, 566-570.
- Danielsen, F., Topp-Jørgensen, E., Levermann, N., Løvstrøm, P., Schiøtz, M., Enghoff, M. et Jakobsen, P. (2014) Counting what counts: Using local knowledge to improve Arctic resource management. *Polar Geography*, 37, 69-91.
- de Winter, J. C. F. et Dodou, D. (2010) Five-Point Likert Items: t test versus Mann-Whitney-Wilcoxon. *Practical Assessment, Research & Evaluation*, 15, [Disponible en ligne] Adresse URL : <http://pareonline.net/getvn.asp?v=15&n=11>.
- Diduck, A., Bankes, N., Clark, D. et Armitage, D. (2005) Unpacking social learning in social-ecological systems: case studies of polar bears and narwhal management in northern Canada. Dans F. Berkes, R. Huebert, H. Fast, M. Manseau et A. Diduck (dir.), *Breaking ice: renewable resource and ocean management* (p. 269–291). University of Calgary Press : Calgary.
- Diver, S. (2017) Negotiating Indigenous knowledge at the science-policy interface: Insights from the Xáxli'p Community Forest. *Environmental Science & Policy*, 73, 1-11.
- Dyer, S. J., O'Neill, J. P., Wasel, S. M. et Boutin, S. (2002) Quantifying barrier effects of roads and seismic lines on movements of female woodland caribou in northeastern Alberta. *Canadian Journal of Zoology*, 80, 839-845.
- Eamer, J. (2006) Keep it simple and be relevant: the first ten years of the Arctic Borderlands Ecological Knowledge Co-op. Dans W. V. Reid, F. Berkes, T. Wilbanks et D. Capistrano (dir.), *Bridging scales and knowledge systems : concepts and applications in ecosystem assessment* (p. 185-206). Washington, D.C. : Island Press.



- Eastland, W. G. (1991) *Influence of weather on movements and migrations of caribou*. Fairbanks, Alaska : University of Alaska Fairbanks. 111 p.
- Ellis, S. C. (2005) Meaningful consideration? A review of traditional knowledge in environmental decision making. *Arctic*, 58, 66-77.
- Environment Canada. (2003) *Améliorer la prise de décisions locale au moyen de la surveillance communautaire : vers l'établissement d'un réseau canadien de surveillance communautaire*. Ottawa : Government of Canada. 22 p.
- ESRI. (2010) *ArcGIS version 10*. Redlands, California : Environmental Systems Resource Institute.
- Fancy, S. G., Pank, L. F., Whitten, K. R. et Regelin, W. L. (1989) Seasonal movements of caribou in arctic Alaska as determined by satellite. *Canadian Journal of Zoology- Revue Canadienne De Zoologie*, 67, 644-650.
- Fancy, S. G. et White, R. G. (1987) Energy expenditures for locomotion by barren-ground caribou. *Canadian Journal of Zoology*, 65, 122-128.
- Fancy, S. G., Whitten, K. R. et Russell, D. E. (1994) Demography of the Porcupine Caribou Herd, 1983-1992. *Canadian Journal of Zoology- Revue Canadienne De Zoologie*, 72, 840-846.
- Fauchald, P., Park, T., Tømmervik, H., Myneni, R. et Hausner, V. H. (2017) Arctic greening from warming promotes declines in caribou populations. *Science Advances*, 3, e1601365.
- Fernandez-Gimenez, M. E. (2000) The role of Mongolian nomadic pastoralists' ecological knowledge in rangeland management. *Ecological Applications*, 10, 1318-1326.
- Fernandez-Gimenez, M. E., Ballard, H. L. et Sturtevant, V. E. (2008) Adaptive management and social learning in collaborative and community-based monitoring: a study of five community-based forestry organizations in the western USA *Ecology and Society*, 13, 4. [Disponible en ligne] Adresse URL : <http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss12/art14/>.

- Fernandez-Gimenez, M. E., Ruyle, G. et Jorstad McClaran, S. (2005) An evaluation of Arizona Cooperative Extension's rangeland monitoring program. *Rangeland Ecology and Management*, 58, 89-98.
- Festa-Bianchet, M., Gaillard, J.-M. et Jorgenson, J. T. (1998) Mass and density dependent reproductive success and reproductive costs in a capital breeder. *The American Naturalist*, 152, 367-379.
- Festa-Bianchet, M., Jorgenson, J. T., Bérubé, C., Portier, C. et Wishart, W. D. (1997) Body mass and survival of bighorn sheep. *Canadian Journal of Zoology*, 75, 1372-1379.
- Festa-Bianchet, M., Ray, J. C., Boutin, S., Côté, S. D. et Gunn, A. (2011) Conservation of caribou (*Rangifer tarandus*) in Canada: an uncertain future. *Canadian Journal of Zoology*, 89, 419-434.
- Finstad, G. L. et Prichard, A. K. (2000) Climatic influence on forage quality, growth and reproduction of reindeer on the Seward Peninsula II: reindeer growth and reproduction. *Rangifer, Special Issue 12*, 144.
- Folke, C., Carpenter, S., Elmqvist, T., Gunderson, L., Holling, C., Walker, B., Bengtsson, J., Berkes, F., Colding, J., Danell, K., Falkenmark, M., Gordon, L., Kasperson, R., Kautsky, N., Kinzig, A., Levin, S., Mäler, K.-G., Moberg, F., Ohlsson, L., Olsson, P., Ostrom, E., Reid, W., Rockström, J., Savenije, H. et Svedin, U. (2002) *Resilience and sustainable development: building adaptive capacity in a world of transformation. Scientific Background Paper on Resilience for the process of The World Summit on Sustainable Development*. Sweden : on behalf of The Environmental Advisory Council to the Swedish Government. 34 p.
- Folke, C., Hahn, T., Olsson, P. et Norberg, J. (2005) Adaptive governance of social-ecological systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 30, 441-473.
- Forbes, B. (2008a) Equity, vulnerability and resilience in social-ecological systems: a contemporary example from the Russian Arctic. *Research in Social Problems and Public Policy*, 15, 203-236.

- Forbes, B. (2008b) Equity, vulnerability and resilience in social-ecological systems: a contemporary example from the Russian Arctic. *Equity and the Environment Research in Social Problems and Public Policy*, 15, 203-236.
- Forbes, B. C., Stammer, F., Kumpula, T., Meschtyb, N., Pajunen, A. et Kaarlejärvi, E. (2009) High resilience in the Yamal-Nenets social-ecological system, West Siberian Arctic, Russia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106, 22041–22048.
- Ford, J. D., Cameron, L., Rubis, J., Maillet, M., Nakashima, D., Willox, A. C. et Pearce, T. (2016) Including indigenous knowledge and experience in IPCC assessment reports. *Nature Climate Change*, 6, 349-353.
- Ford, J. D., Smit, B. et Wandel, J. (2006a) Vulnerability to climate change in the Arctic: a case study from Arctic Bay, Canada. *Global Environmental Change*, 16, 145-160.
- Ford, J. D., Smit, B. et Wandel, J. (2006b) Vulnerability to climate change in the Arctic: A case study from Arctic Bay, Canada. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 16, 145-160.
- Fox, S. (2002) These are things that are really happening. Dans I. Krupnik et D. Jolly (dir.), *The Earth is faster now: indigenous observations of Arctic environmental change* (p. 13-53). Fairbanks : Arctic Research Consortium of the United States.
- Gadgil, M., Olsson, P., Berkes, F. et Folke, C. (2003) Exploring the role of local ecological knowledge in ecosystem management: three case studies. Dans F. Berkes, J. Colding et C. Folke (dir.), *Navigating social-ecological systems: building resilience for complexity and change* (chap. 8, p. 189-209). Cambridge : Cambridge university press.
- Gagnon, C.-A. et Berteaux, D. (2009) Integrating traditional ecological knowledge and ecological science: a question of scale. *Ecology and Society*, 14, 19. [Disponible en ligne] Adresse URL: <https://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss12/art19/>.
- Gaillard, J.-M., Festa-Bianchet, M., Yoccoz, N. G., Loison, A. et Toïgo, C. (2000) Temporal variation in fitness components and population dynamics of large herbivores. *Annual review in ecology and systematics*, 31, 367-393.

- Gaillard, J. M., Festa-Bianchet, M. et Yoccoz, N. G. (1998) Population dynamics of large herbivores: variable recruitment with constant adult survival. *Trends in Ecology & Evolution*, 13, 58-63.
- Gamon, J. A., Huemmrich, K. F., Stone, R. S. et Tweedie, C. E. (2013) Spatial and temporal variation in primary productivity (NDVI) of coastal Alaskan tundra: Decreased vegetation growth following earlier snowmelt. *Remote Sensing of Environment*, 129, 144–153.
- Gearheard, S. et Shirley, J. (2007) Challenges in community-research relationships: learning from natural science in Nunavut. *Arctic*, 60, 62-74.
- Gearheard, S. F., Holm, L. K., Huntington, H., Leavitt, J. M., Mahoney, A. R. et Opie, M. (Éds.). (2013) *The meaning of ice: people and sea ice in three Arctic communities*. University of New England : International Polar Institute. 366 p.
- Gilchrist, G., Heath, J., Arragutainaq, L., Robertson, G., Allard, K., Gilliland, S. et Mallory, M. (2006) Combining scientific and local knowledge to study common eider ducks wintering in Hudson Bay. Dans R. Riewe et J. Oakes (dir.), *Climate change: integrating traditional and scientific knowledge* (p. 189-201). Winnipeg, Manitoba, Canada : Aboriginal Issues Press.
- Gilchrist, G., Mallory, M. et Merkel, F. (2005) Can local ecological knowledge contribute to wildlife management? Case studies of migratory birds. *Ecology and Society*, 10, 20. [Disponible en ligne] Adresse URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol10/iss21/art20/>.
- Gilchrist, G. et Mallory, M. L. (2007) Comparing expert-based science with local ecological knowledge: what are we afraid of? *Ecology and Society*, 12, r1. [Disponible en ligne] Adresse URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol12/iss11/resp11/>.
- Godfrey-Smith, P. (2003) *Theory and reality: an introduction to the philosophy of science* (1st éd.). Chicago : University of Chicago Press. 288 p.
- Gofman, V. (2010) *Community based monitoring handbook: Lessons from the Arctic*. CAFF CBMP Report No. 21. Akureyri, Iceland : CAFF International Secretariat. 46 p.

- Green, A. J. (2001) Mass/Length residuals: measures of body condition or generators of spurious results? *Ecology*, 82, 1473-1483.
- Griffith, B., Douglas, D. C., Walsh, N. E., Young, D. D., McCabe, T. R., Russell, D. E., White, R. G., Cameron, R. D. et Whitten, K. R. (2002) The Porcupine caribou herd. Dans D. C. Douglas, P. E. Reynolds et E. B. Rhode (dir.), *Arctic Refuge coastal plain terrestrial wildlife research summaries* (p. 8-37). U. S. Geological Survey, Biological Resources Division, Biological Science Report USGS/BRD BSR-2002-0001.
- Gunn, A. (2003) Voles, lemmings and caribou : population cycles revisited? *Rangifer, Special Issue 14*, 105-111.
- Gunn, A. et Miller, F. L. (1986) Traditional behaviour and fidelity to caribou calving grounds by barren-ground caribou. *Rangifer*, 6, 151-158.
- Gunn, A., Miller, F. L., Barry, S. J. et Buchan, A. (2006) A near-total decline in caribou on Prince of Wales, Somerset, and Russell islands, Canadian Arctic. *Arctic*, 59, 1-13.
- Gunn, A., Russell, D., White, R. G. et Kofinas, G. (2009) Facing a future of change: wild migratory caribou and reindeer. *Arctic*, 62, III-VI.
- Hagemoen, R. I. M. et Reimers, E. (2002) Reindeer summer activity pattern in relation to weather and insect harassment. *Journal of Animal Ecology*, 71, 883-892.
- Hansen, B. B., Aanes, R., Herfindal, I., Kohler, J. et Sæther, B.-E. (2011) Climate, icing, and wild arctic reindeer: past relationships and future prospects. *Ecology*, 92, 1917-1923.
- Hansen, B. B., Aanes, R. et Saether, B. E. (2010) Feeding-crater selection by high-arctic reindeer facing ice-blocked pastures. *Canadian Journal of Zoology*, 88, 170-177.
- Hansen, B. B., Grotan, V., Aanes, R., Saether, B.-E., Stien, A., Fuglei, E., Ims, R. A., Yoccoz, N. G. et Pedersen, A. O. (2013) Climate events synchronize the dynamics of a resident vertebrate community in the High Arctic. *Science*, 339, 313-315.

- Haskell, S. P., Nielson, R. M., Ballard, W. B., Cronin, M. A. et McDonald, T. L. (2006) Dynamic Responses of Calving Caribou to Oilfields in Northern Alaska. *Arctic*, 59, 179-190.
- Hegemoen, R. I. M. et Reimers, E. (2002) Reindeer summer activity pattern in relation to weather and insect harassment. *Journal of Animal Ecology*, 71, 883-892.
- Holling, C. S. (Éds.). (1978) *Adaptive Environmental Assessment and Management*. London : Wiley. 377 p.
- Holling, C. S. et Gunderson, L. H. (2002) Resilience and adaptive cycles. Dans L. H. Gunderson et C. S. Holling (dir.), *Panarchy: understanding transformations in human and natural systems* (p. 25-62). Washington, D.C. : Island Press.
- Hosmer, D. W. et Lemeshow, S. (2000) *Applied logistic regression. Second edition*. New York : John Wiley & Sons, Inc. 375 p.
- Huntington, H. P. (2011) The local perspective. *Nature*, 478, 182-183.
- Huntington, H. P., Suydam, R. S. et Rosenberg, D. H. (2004) Traditional knowledge and satellite tracking as complementary approaches to ecological understanding. *Environmental Conservation*, 31, 177-180.
- ICC, ELOKA et ITK. (2017) *Atlas of community-based monitoring in a changing Arctic*. Page consultée le 20 décembre 2017. Adresse URL : <http://www.arcticcbm.org/index.html#eyJ0IjoieCIslmkiOiJkZTEzMGU0OGQxMDU1NTFmMDdlNjE1ODg3OTQ5NDVlZCJ9>.
- Indigenous Knowledge and Peoples. (2004) *Workshop on bridging epistemologies - indigenous views* Millennium Ecosystem Assessment. 4 p.
- IPCC. (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Dans T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P. M. Midgley (dir.). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA :. 1535 p.

- IPCC. (2014) *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Dans R. K. Pachauri et L. A. Meyer (dir.). Geneva, Switzerland : IPCC. 151 p.
- ITK et NRI. (2007) *Negotiating research relationships with Inuit communities: a guide for researchers*. Dans S. Nickels, J. Shirley et G. Laidler (dir.). Ottawa and Iqaluit : Inuit Tapiriit Kanatami and Nunavut Research Institute. 38 p.
- Johnson, N., Alessa, L., Behe, C., Danielsen, F., Gearheard, S., Gofman-Wallingford, V., Kliskey, A., Krümmel, E.-M., Lynch, A., Mustonen, T., Pulsifer, P. et Svoboda, M. (2015) The contributions of community-based monitoring and traditional knowledge to Arctic observing networks: reflections on the state of the field. *Arctic*, 68, 28-40.
- Johnston, B. (2005) *Arctic Borderlands Ecological Knowledge Co-op: making the data relevant to policy and decision-makers*. Environmental Conservation Branch. 24 p.
- Jolliffe, I. T. (1986) *Principal component analysis. Springer series in statistics*. New York. USA : Springer-Verlag. 234 p.
- Jolliffe, I. T. (2005) Principal component analysis. Dans B. S. Everitt et D. C. Howell (dir.), *Encyclopedia of Statistics in Behavioral Science*. New York, USA : Wiley.
- Joly, K., Klein, D. R., Verbyla, D. L., Rupp, T. S. et Chapin III, F. S. (2011) Linkages between large-scale climate patterns and the dynamics of Arctic caribou populations. *Ecography*, 34, 345-352.
- Keen, M. et Mahanty, S. (2006) Learning in sustainable natural resource management: challenges and opportunities in the Pacific. *Society & Natural Resources*, 19, 497-513.
- Kendrick, A. (2003) Caribou co-management in northern Canada: fostering multiple ways of knowing. Dans F. Berkes, J. Colding et C. Folke (dir.), *Navigating social-ecological systems: building resilience for complexity and change* (p. 241-267). Cambridge, UK : Cambridge University Press.

- Kendrick, A. et Lyver, P. O. B. (2005) Denesoline (Chipewyan) knowledge of barren-ground caribou (*Rangifer tarandus groenlandicus*) movements. *Arctic*, 58, 175-191.
- Kendrick, A., Lyver, P. O. B. et Lutsel Ke Dene First, N. (2005) Denesoline (Chipewyan) knowledge of barren-ground caribou (*Rangifer tarandus groenlandicus*) movements. *Arctic*, 58, 175-191.
- Kendrick, A. et Manseau, M. (2008) Representing traditional knowledge: resource management and Inuit knowledge of barren-ground caribou. *Society and Natural Resources*, 21, 404-418.
- Klein, D. R. (1968) The introduction, increase, and crash of reindeer on St. Matthew Island. *The Journal of Wildlife Management*, 32, 350-367.
- Kliskey, A., Alessa, L. et Barr, B. (2009) Integrating local and traditional ecological knowledge. Dans K. McLeod et H. Leslie (dir.), *Ecosystem-based management for the oceans* (p. 145 – 161). Washington, D.C. : Island Press Publishers.
- Kofinas, G., Aklavik, Arctic Village, Old Crow et McPherson, F. (2002) Community contributions to ecological monitoring: knowledge co-production in the U.S.-Canada Arctic Borderlands. Dans I. Krupnik et D. Jolly (dir.), *The earth is faster now: indigenous observations of Arctic environmental change* (p. 55-91). Fairbanks, USA : Arctic Research Consortium of the United States.
- Kofinas, G., Lyver, P. O., Russell, D., White, R. G., Nelson, A. et FLanders, N. (2003) Towards a protocol for community monitoring of caribou body condition. *Rangifer*, 14, 43-52.
- Kofinas, G., Osherenko, G., Klein, D. et Forbes, B. (2000) Research planning in the face of change: the human role in reindeer/caribou systems. *Polar Research*, 19, 3-21.
- Kofinas, G. P. (1998) *The costs of power sharing: community involvment in canadian Porcuine caribou co-management*. [PhD thesis in Interdisciplinary Studies in Resource Management Science]. Vancouver : University of British Columbia. 471 p.



- Krishna, A. et Shrader, E. (1999) *Social capital assessment tool, Conference on social capital and poverty reduction (June 22-24, 1999)*. Washington, D.C. : The World Bank. 21 p.
- Krupnik, I. et Jolly, D. (Éds.). (2002) *The Earth is faster now: indigenous observations of Arctic environmental change*. Fairbanks, AK : Arctic Research Consortium of the United States. 384 p.
- Kuhnlein, H. V., McDonald, M., Spigelski, D., Vittrekwa, E. et Erasmus, B. (2009) Gwich'in traditional food for health: Phase 1. Dans H. V. Kuhnlein, B. Erasmus et D. Spigelski (dir.), *Indigenous Peoples' food systems: the many dimensions of culture, diversity and environment for nutrition and health* (chap. 3, p. 45-58). Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations; Centre for Indigenous Peoples' Nutrition and Environment.
- Laidler, G. J. (2006) Inuit and scientific perspectives on the relationship between sea ice and climate change: The ideal complement? *Climatic Change*, 78, 407-444.
- Langlois, A., Johnson, C.-A., Montpetit, B., Royer, A., Blukacz-Richards, E. A., Neave, E., Dolant, C., Roy, A., Arhonditsis, G., Kim, D.-K., Kaluskar, S. et Brucker, L. (2017) Detection of rain-on-snow (ROS) events and ice layer formation using passive microwave radiometry: A context for Peary caribou habitat in the Canadian Arctic. *Remote Sensing of Environment*, 189, 84-95.
- LaPerriere, A. J. et Lent, P. C. (1977) Caribou feeding sites in relation to snow characteristics in northeastern Alaska. *Arctic*, 30, 101-108.
- Laveault, D. (2012) Soixante ans de bons et mauvais usages du alpha de Cronbach. *Mesure et évaluation en éducation*, 35, [Disponible en ligne] Adresse URL : <https://www.erudit.org/fr/revues/mee/2012-v2035-n2012-mee01367/1024716ar.pdf>.
- Le Blanc, R. J. (2015) *The Canadian Encyclopedia. Northern Yukon caribou fences*. Page consultée le 12 février 2018. Adresse URL : <http://www.thecanadianencyclopedia.ca/en/article/northern-yukon-caribou-fences/>.
- Le Corre, M., Dussault, C. et Côté, S. D. (2017) Weather conditions and variation in timing of spring and fall migrations of migratory caribou. *Journal of Mammalogy*, 98, 260-271.

- Lefcheck, J. S. (2016) piecewise SEM: Piecewise structural equation modelling in R for ecology, evolution and systematics. *Methods in Ecology and Evolution*, 7, 573-579.
- Lenart, E. A., Bowyer, R. T., Hoef, J. V. et Ruess, R. W. (2002) Climate change and caribou: effects of summer weather on forage. *Canadian Journal of Zoology*, 80, 664-678.
- Likert, R. (1932) A technique for the measurement of attitudes. *Archives of Psychology*, 22, 5-55.
- Loison, A., Langvatn, R. et Solberg, E. J. (1999) Body mass and winter mortality in red deer calves: disentangling sex and climate effects. *Ecography*, 22, 20-30.
- Lynch, A. et Hammer, C. (2013) Editorial: protecting and sustaining indigenous people's traditional environmental knowledge and cultural practice. *Policy Sciences*, 46, 105-108.
- Lyver, P. O. et Lutsël K'é dene first nation. (2005) Monitoring barren-ground caribou body condition with Denésôâiné traditional knowledge. *Arctic*, 58, 44-54.
- Lyver, P. O., Moller, H. et Thompson, C. (1999) Changes in sooty shearwater *Puffinus griseus* chick production and harvest precede ENSO events. *Marine Ecology-Progress Series*, 188, 237-248.
- Lyver, P. O. B. et Gunn, A. (2004) Calibration of hunters' impressions with female caribou body condition indices to predict probability of pregnancy. *Arctic*, 57, 233-241.
- Lyver, P. O. B. et Lutsel K'E Dene First, N. (2005) Monitoring barren-ground caribou body condition with Denesoline traditional knowledge. *Arctic*, 58, 44-54.
- Mahoney, S. P. et Schaefer, J. A. (2002) Hydroelectric development and the disruption of migration in caribou. *Biological Conservation*, 107, 147-153.
- Mallory, C. D., Campbell, M. W. et Boyce, M. S. (2018) Climate influences body condition and synchrony of barren-ground caribou abundance in Northern Canada. *Polar Biology*, 41, 855-864.

- Mallory, M., Akearok, J. et Gilchrist, G. (2006) Local ecological knowledge of the Sleeper and Split Islands. Dans R. Riewe et J. Oakes (dir.), *Climate change: integrating traditional and scientific knowledge* (p. 203-208). Winnipeg, Manitoba, Canada : Aboriginal Issues Press.
- Mallory, M. L., Gilchrist, H. G., Fontaine, A. J. et Akearok, J. A. (2003) Local Ecological Knowledge of Ivory Gull Declines in Arctic Canada. *Arctic*, 56, 293-298.
- Manseau, M., Huot, J. et Crete, M. (1996) Effects of summer grazing by caribou on composition and productivity of vegetation: Community and landscape level. *Journal of Ecology*, 84, 503-513.
- Mary-Rousselière, G. (1984-1985) Factors affecting human occupation of the land in the Pond Inlet region from prehistoric to contemporary time. *Eskimo*, 8-24.
- Mauro, F. et Hardison, P. D. (2000) Traditional knowledge of indigenous and local communities: International debate and policy initiatives. *Ecological Applications*, 10, 1263-1269.
- McGhee, R. (2006) *Une histoire du monde arctique: le dernier territoire imaginaire*. St-Laurent : Fides. 320 p.
- McLoughlin, P. D., Dzus, E., Wynes, B. et Boutin, S. (2003) Declines in populations of woodland caribou. *Journal of Wildlife Management*, 67, 755-761.
- McNeil, P., Russell, D. E., Griffith, B., Gunn, A. et Kofinas, G. (2005) Where the wild things are: seasonal variation in caribou distribution in relation to climate change. *Rangifer, Special Issue 16*, 51-63.
- Merriam-Webster's collegiate dictionary. (1998). *Merriam-Webster's collegiate dictionary*.
- Messier, F., Huot, J., Lehenaff, D. et Luttich, S. (1988) Demography of the George River caribou herd: evidence of population regulation by forage exploitation and range expansion *Arctic*, 41, 279-287.

- Miles, M. B. et Huberman, M. A. (2003) *Analyse de données qualitatives* (2e édition éd.). Bruxelles : De Boeck. 626 p.
- Millenium Ecosystem Assessment. (2005) *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Washington, D.C. : World Resources Institute. 137 p.
- Miller, F. L. et Barry, S. J. (2009) Long-term control of Peary caribou numbers by unpredictable, exceptionally severe snow or ice conditions in a non-equilibrium grazing system. *Arctic*, 62, 175-189.
- Mircioiu, C. et Atkinson, J. (2017) A Comparison of Parametric and Non-Parametric Methods Applied to a Likert Scale. *Pharmacy*, 5, 26. [Disponible en ligne] Adresse URL : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5597151/>.
- Moller, H., Berkes, F., Lyver, P. O. et Kislalioglu, M. (2004) Combining science and traditional ecological knowledge: monitoring populations for co-management. *Ecology and Society*, 9, 2. [Disponible en ligne] Adresse URL : <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss3/art2>.
- Morneau, C. et Payette, S. (1998) A dendroecological method to evaluate past caribou (*Rangifer tarandus L.*) activity. *Ecoscience*, 5, 64-76.
- Morneau, C. et Payette, S. (2000) Long-term fluctuations of a caribou population revealed by tree-ring data. *Canadian Journal of Zoology*, 78, 1784-1790.
- Morrissette, M., Bêty, J., Gauthier, G., Reed, A. et Lefebvre, J. (2010) Climate, trophic interactions, density dependence and carry-over effects on the population productivity of a migratory Arctic herbivorous bird. *Oikos*, 119, 1181-1191.
- Morschel, F. M. (1999) Use of climatic data to model the presence of oestrid flies in caribou herds. *Journal of Wildlife Management*, 63, 588-593.
- Mörschel, F. M. et Klein, D. R. (1997) Effects of weather and parasitic insects on behavior and group dynamics of caribou of the Delta Herd, Alaska. *Canadian Journal of Zoology*, 75, 1659-1670.

- Mowat, G. et Heard, D. C. (2006) Major components of grizzly bear diet across North America. *Canadian Journal of Zoology*, 84, 473-489.
- Musiani, M., Leonard, J. A., Cluff, H. D., Gates, C., Mariani, S., Paquet, P. C., Vila, C. et Wayne, R. K. (2007) Differentiation of tundra/taiga and boreal coniferous forest wolves: genetics, coat colour and association with migratory caribou. *Molecular Ecology*, 16, 4149-4170.
- Myers-Smith, I. H., Hik, D. S., Kennedy, C., Cooley, D., Johnstone, J. F., Kenney, A. J. et Krebs, C. J. (2011) Expansion of canopy-forming willows over the twentieth century on Herschel Island, Yukon Territory, Canada. *Ambio*, 40, 610–623.
- Mysterud, A., Yoccoz, N. G., Langvatn, R., Pettorelli, N. et Stenseth, N. C. (2008) Hierarchical path analysis of deer responses to direct and indirect effects of climate in northern forest. *Philosophical transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363, 2357-2366.
- Nadasdy, P. (1999) The politics of TEK: power and the 'integration' of knowledge. *Arctic Anthropology*, 36, 1-18.
- Nadasdy, P. (2003) Reevaluating the co-management success story. *Arctic*, 56, 367-380.
- Nakashima, D. J., Galloway McLean, K., Thulstrup, H. D., Ramos Castillo, A. et Rubis, J. T. (2012) *Weathering uncertainty: traditional knowledge for climate change assessment and adaptation*. Paris and Drawin : UNESCO and UNU. 120 p.
- Nakashima, D. J. et Roué, M. (2002) Indigenous knowledge, peoples and sustainable practice. Dans P. Timmerman (dir.), *Social and economic dimensions of global environmental change, Encyclopedia of Global Environmental Change* (vol. 5, p. 314-324). Chichester, UK : John Wiley & Sons, Ltd.
- NASA. (2017) *Global Modeling and Assimilation Office. Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications (MERRA)*. Page consultée le 20 novembre 2017. Adresse URL : <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA/>.

- Nath, T. K., Inoue, M. et Pretty, J. (2010) Formation and Function of Social Capital for Forest Resource Management and the Improved Livelihoods of Indigenous People in Bangladesh. *Journal of Rural and Community Development*, 5, 104-122.
- National Weather Service. (2017) *Monitoring weather and climate*. Page consultée le 5 juin 2017. Adresse URL : [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily\\_ao\\_index/ao\\_index.html](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao_index.html).
- Nations Unies. (1992) No. 30619. *Convention sur la diversité biologique, conclue à Rio de Janeiro le 5 juin 1992*. (Vol. 1760 A-30619). Rio de Janeiro : Nations Unies. 30 p.
- Nguyen, L. (2016) *The use of local ecological knowledge for analyzing changes in muskox*. Parks Canada. 9 p.
- Nichols, T., Berkes, F., Jolly, D. et Snow, N. B. (2004) Climate change and sea ice: Local observations from the Canadian Western Arctic. *Arctic*, 57, 68-79.
- Nicolson, C., Berman, M., Thor West, C., Kofinas, G. P., Griffith, B., Russell, D. et Dugan, D. (2013) Seasonal climate variation and caribou availability: modeling sequential movement using satellite-relocation data. *Ecology and Society*, 18, 1.
- NWT Bureau of Statistics. (2017) *Average Household Expenditure, Summary Statistics: 2012, Canada, Northwest Territories and Yellowknife*. Page consultée le 12 June 2017. Adresse URL : [http://www.statsnwt.ca/prices-expenditures/household\\_expenditures/](http://www.statsnwt.ca/prices-expenditures/household_expenditures/).
- OECD. (2001) *The wellbeing of nations: The role of human and social capital*. Paris : Organization for Economic Cooperation and Development. Educational Research and Innovation. 118 p.
- Ostrom, E. (2007) Traditions and trends in the study of the commons. *International Journal of the Commons*, 1, 3-28.
- Ostrom, E. et Ahn, T. K. (2001) *A social science perspective on social capital: social capital and collective action*. Bloomington, IN : Workshop in political theory and policy analysis, Indiana university. 58 p.

- Ostrom, E. et Ahn, T. K. (2003) Introduction. Dans E. Ostrom et T. K. Ahn (dir.), *Foundations of Social Capital*. Northampton, MA : Edward Elgar.
- Ouellet, J. P., Heard, D. C., Boutin, S. et Mulders, R. (1997) A comparison of body condition and reproduction of caribou on two predator-free Arctic islands. *Canadian Journal of Zoology*, 75, 11-17.
- Pachkowski, M., Côté, S. D. et Festa-Bianchet, M. (2013) Spring-loaded reproduction: effects of body condition and population size on fertility in migratory caribou (*Rangifer tarandus*). *Canadian Journal of Zoology*, 91, 473-479.
- Pahl-Wostl, C., Craps, M., Dewulf, A., Mostert, E., Tabara, D. et Taillieu, T. (2007) Social learning and water resources management. *Ecology and Society*, 12, 5. [ Disponible en ligne] Adresse URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol12/iss12/art15/>.
- Parker, K. L., Barboza, P. S. et Gillingham, M. P. (2009) Nutrition integrates environmental responses of ungulates. *Functional Ecology*, 23, 57-69.
- Parlee, B. L., Sandlos, J. et Natcher, D. C. (2018) Undermining subsistence: barren-ground caribou in a “tragedy of open access”. *Science Advances*, 4, e1701611.
- Payette, S., Boudreau, S., Morneau, C. et Pitre, N. (2004) Long-term interactions between migratory caribou, wildfires and nunavik hunters inferred from tree rings. *Ambio*, 33, 482-486.
- Pearce, T., Ford, J., Cunsolo Willox, A. et Smit, B. (2015) Inuit traditional ecological knowledge (TEK), subsistence hunting and adaptation to climate change in the Canadian Arctic. *Arctic*, 68, 233-245.
- Pebesma, E. J. et Bivand, R. S. (2005) Classe and methods for spatial data in R. *R News*, 5.
- Peig, J. et Green, A. J. (2009) New perspectives for estimating body condition from mass/length data: the scaled mass index as an alternative method. *Oikos*, 118, 1883-1891.

- Peig, J. et Green, A. J. (2010) The paradigm of body condition: a critical reappraisal of current methods based on mass and length. *Functional Ecology*, 24, 1323-1332.
- Pettorelli, N., Weladji, R. B., Holand, Ø., Mysterud, A., Breie, H. et Stenseth, N. C. (2005) The relative role of winter and spring conditions: linking climate and landscape-scale plant phenology to alpine reindeer body mass. *Biology Letters*, 1, 24-26.
- Pierotti, R. et Wildcat, D. (2000) Traditional Ecological Knowledge: The third alternative (commentary). *Ecological Applications*, 10, 1333-1340.
- Pilon, J.-L. (2017) *The Gwich'in*. Page consultée le 22 novembre 2017. Adresse URL : <http://www.historymuseum.ca/cmce/exhibitions/archeo/nogap/plgwic.html>.
- Plummer, R. et FitzGibbon, J. (2006a) People matter: the importance of social capital in the co-management of natural resources. *Natural Resources Forum*, 30, 51-62.
- Plummer, R. et FitzGibbon, J. (2006b) People matter: The importance of social capital in the co-management of natural resources. *Natural Resources Forum*, 30, 51-62.
- Plummer, R. et FitzGibbon, J. (2007) Connecting adaptive co-management, social learning, and social capital through theory and practice. Dans D. Armitage, F. Berkes et N. Doubleday (dir.), *Adaptive co-management* (chap. 3, p. 38-61). Vancouver : UBC Press.
- Pohl, C., Rist, S., Zimmermann, A., Fry, P., Gurung, G. S., Schneider, F., Speranza, C. I., Kiteme, B., Boillat, S., Serrano, E., Hadorn, G. H. et Wiesmann, U. (2010) Researchers' roles in knowledge co-production: experience from sustainability research in Kenya, Switzerland, Bolivia and Nepal. *Science and Public Policy*, 37, 267-281.
- Porcupine Caribou Management Board. *Video Series Teacher's Manuals Unit two: The Value of Caribou*. 57 p.
- Porcupine Caribou Management Board. (2004) *Uses of caribou*. Page consultée le 11 mai 2009. Adresse URL : <http://www.taiga.net/pcmb/uses.html>.



- Porcupine Caribou Management Board. (2010) *Setting a good trail for the youger generation. Harvest Management Plan for the Porcupine Caribou Herd in Canada*. First Nation of NaCho Nyäk Dun, Gwich'in Tribal Council, Inuvialuit Game Council, Tr'ondëk Hwëch'in, Vuntut Gwitchin Government, Government of the Northwest Territories, Government of Yukon, Government of Canada. 45 p.
- Porcupine Caribou Management Board. (2018a) *About us*. Page consultée le 22 mars 2018. Adresse URL : <http://www.pcmb.ca/about>.
- Porcupine Caribou Management Board. (2018b) *Porcupine Caribou harvest management plan. Annual Harvest Meeting 2018. PCMB recommendations to the Parties*. Whitehorse, Yukon : Porcupine Caribou Management Board. 6 p.
- Porcupine Caribou Technical Committee. (2014) *Porcupine Caribou annual summary report 2014*. Porcupine Caribou Management Board. 47 p.
- Porcupine Caribou Technical Committee. (2016) *Porcupine Caribou anual summary report 2016*. Porcupine Caribou Management Board. 42 p.
- Post, E. (2005) Large-scale spatial gradients in herbivore population dynamics. *Ecology*, 86, 2320-2328.
- Post, E. et Forchhammer, M. C. (2002) Synchronization of animal population dynamics by large-scale climate. *Nature*, 420, 168-171.
- Post, E. et Forchhammer, M. C. (2008) Climate change reduces reproductive success of an Arctic herbivore through trophic mismatch. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363, 2369-2375.
- Post, E. et Pedersen, C. (2008) Opposing plant community responses to warming with and without herbivores. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105, 12353–12358.
- Post, E. et Stenseth, N. C. (1999) Climatic variability, plant phenology, and northern ungulates. *Ecology*, 80, 1322-1339.

Pretty, J. et Ward, H. (2001) Social capital and the environment. *World Development*, 29, 209-227.

Qiqiktani Inuit Association. (2017) *Inuit myths and legends*. Page consultée le 20 mars 2017.  
Adresse URL : <http://www.inuitmyths.com/index.htm>.

R Development Core Team. (2011) *R: A language and environment for statistical computing*.  
Vienna, Austria : R Foundation for Statistical Computing. Adresse URL :  
<http://www.R-project.org/>.

R Development Core Team. (2017) *R: A language and environment for statistical computing*.  
Vienna, Austria : R Foundation for Statistical Computing. Adresse URL :  
<http://www.R-project.org/>.

Rathwell, K. J., Armitage, D. et Berkes, F. (2015) Bridging knowledge systems to enhance governance of the environmental commons: a typology of settings. *International Journal of the Commons*, 9, 851-880.

Reed, M. S., Evely, A. C., Cundill, G., Fazey, I., Glass, J., Laing, A., Newig, J., Parrish, B., Prell, C., Raymond, C. et Stringer, L. C. (2010) What is social learning? Response to Pahl-Wostl. 2006. "The Importance of Social Learning in Restoring the Multifunctionality

of Rivers and Floodplains". *Ecology and Society*, 15, r1. [Disponible en ligne] Adresse URL : <http://www.ecologyandsociety.org/volXX/issYY/artZZ/>.

Reid, W. V., Berkes, F., Wilbanks, T. et Capistrano, D. (Éds.). (2006) *Bridging scales and knowledge systems : concepts and applications in ecosystem assessment*. Washington, D.C. : Island Press. 351 p.

Reimers, E. (1983) Growth rate and body size differences in *Rangifer*, a study of causes and effects. *Rangifer*, 3, 141-149.

Renecker, L. A. et Samuel, W. M. (1991) Growth and seasonal weight changes as they relate to spring and autumn set points in mule deer. *Canadian Journal of Zoology*, 69, 744-747.

- Revelle, W. (2017) *psych: Procedures for Personality and Psychological Research. Version = 1.7.8*. Northwestern University, Evanston, Illinois, USA. Adresse URL: <https://CRAN.R-project.org/package=psych> p.
- Riedlinger, D. et Berkes, F. (2001) Contributions of traditional knowledge to understanding climate change in the Canadian Arctic. *Polar record*, 37, 315-328.
- Rosseel, Y. (2012) lavaan: An R Package for Structural Equation Modeling. *Journal of Statistical Software*, 48, 1-36.
- Roué, M. et Molnár, Z. (2016) *Indigenous and local knowledge of biodiversity and ecosystem services in Europe and Central Asia*. (Knowledges of Nature 9). Paris : UNESCO. 152 p.
- Ruseva, T. B., Farmer, J. R. et Chancellor, C. (2016) Networking for conservation: social capital and perceptions of organizational success among land trust boards. *Ecology and Society*, 21, 50. [Disponible en ligne] Adresse URL : <http://dx.doi.org/10.5751/ES-08618-210250>.
- Russell, D. E., Gerhart, K. L., White, R. G. et Van De Wetering, D. (1998) Detection of early pregnancy in caribou: evidence for embryonic mortality. *The Journal of Wildlife Management*, 62, 1066-1075.
- Russell, D. E., Gunn, A. et White, R. g. (2015) CircumArctic collaboration to monitor caribou and wild reindeer. *Arctic*, 68, 1-5.
- Russell, D. E., Martell, A. M. et Nixon, W. A. C. (1993) Range ecology of the Porcupine Caribou Herd in Canada. *Rangifer, Special Issue 8*, 1-168.
- Russell, D. E. et McNeil, P. (2005) *Summer ecology of the Porcupine Caribou Herd*. Whitehorse : Porcupine Caribou Management Board. 14 p.
- Russell, D. E., Svoboda, M. Y., Arokium, J. et Cooley, D. (2013a) Arctic Borderlands Ecological Knowledge Cooperative: can local knowledge inform caribou management? *Rangifer*, 33, 71-78.

- Russell, D. E., Whitfield, P. H., Cai, J., Gunn, A., White, R. G. et Poole, K. (2013b) CARMA's MERRA-based caribou range climate database. *Ranfiger*, 33, 145-152.
- Saether, B. E., Andersen, R., Hjeljord, O. et Heim, M. (1996) Ecological correlates of regional variations in life history of a large herbivore, the moose *Alces alces*. *Ecology*, 77, 1493-1500.
- Savard, R. (1985) *La voix des autres*. Montréal : L'Hexagone. 353 p.
- Schielzeth, H. (2010) Simple means to improve the interpretability of regression coefficients. *Methods in Ecology and Evolution*, 593, 103-113.
- Schulte-Hostedde, A. I., Zinner, B., Millar, J. S. et Hickling, G. J. (2005) Restitution of mass-size residuals: validating body condition indices. *Ecology*, 86, 155-163.
- Shipley, B. (2000) *Cause and Correlation in Biology: A User's Guide to Path Analysis, Structural Equations and Causal Inference*. Cambridge : Cambridge University Press p.
- Shipley, B. (2009) Confirmatory path analysis in a generalized multilevel context. *Ecology*, 90, 363-368.
- Shipley, B. (2013) The AIC model selection method applied to path analytic models compared using a d-separation test. *Ecology*, 94, 560-564.
- Simard, M.-A., Coulson, T., Gingras, A. et Côté, S. D. (2010) Influence of density and climate on population dynamics of a large herbivore under harsh environmental conditions. *Journal of Wildlife Management*, 74, 1671-1685.
- Singh, N. J., Gravech, I. A., Bekenov, A. B. et Milner-Gulland, E. J. (2010) Saiga antelope calving site selection is increasingly driven by human disturbance. *Biological Conservation*, 143, 1770-1779.
- Skogland, T. (1985) The effects of density-dependent resource limitations on the demography of wild reindeer. *Journal of Animal Ecology*, 54, 359-374.

- Smith, J. W., Leahy, J., Anderson, D. H. et Davenport, M. A. (2013a) Community/agency trust: a measurement instrument. *Society & Natural Resources: An International journal of biometeorology*, 26, [Disponible en ligne] Adresse URL: <http://dx.doi.org/10.1080/08941920.08942012.08742606>.
- Smith, J. W., Leahy, J. E., Anderson, D. H. et Davenport, M. A. (2013b) Community/agency trust and public involvement in resource planning. *Society & Natural Resources: An International journal of biometeorology*, 26, [Disponible en ligne] Adresse URL : <http://dx.doi.org/10.1080/08941920.08942012.08678465>.
- Solberg, E. J., Jordhoy, P., Strand, O., Aanes, R., Loison, A., Saether, B. E. et Linnell, J. D. C. (2001) Effects of density-dependence and climate on the dynamics of a Svalbard reindeer population. *Ecography*, 24, 441-451.
- Stenseth, N. C. (1999) Population cycles in voles and lemmings: density dependence and phase dependence in a stochastic world. *Oikos*, 87, 427-461.
- Stenseth, N. C., Ottersen, G., Hurrell, J. W., Mysterud, A., Lima, M., Chan, K. S., Yoccoz, N. G. et Adlandsvik, B. (2003) Studying climate effects on ecology through the use of climate indices: the North Atlantic Oscillation, El Nino Southern Oscillation and beyond. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 270, 2087-2096.
- Stien, A., Ims, R. A., Albon, S. D., Fuglei, E., Irvine, R. J., Ropstad, E., Halvorsen, O., Langvatn, R., Loe, L. E., Veiberg, V. et Yoccoz, N. G. (2012) Congruent responses to weather variability in high arctic herbivores. *Biology Letters*, 8, 1002-1005.
- Stien, A., Loe, L. E., Mysterud, A., Severinsen, T., Kohler, J. et Langvatn, R. (2010a) Icing events trigger range displacement in a high-arctic ungulate. *Ecology*, 91, 915-920.
- Stien, A., Loe, L. E., Mysterud, A., Severinsen, T., Kohler, J. et Langvatn, R. (2010b) Icing events trigger range displacement in a high-arctic ungulate. *Ecology*, 91, 915-920.
- Stone, W. et Hughes, J. (2002) *Social capitao: empirical meaning and measurement validity*. (Research paper no. 27). Melbourne : Australian Institute of Family Studies. 64 p.

- Stuart Chapin III, F., Zavaleta, E. S., Eviner, V. T., Naylor, R. L., Vitousek, P. M., Reynolds, H. L., Hooper, D. U., Lavorel, S., Sala, O. E., Hobbie, S. E., Mack, M. C. et Diaz, S. (2000) Consequences of changing biodiversity. *Nature*, 405, 234-242.
- Sullivan, G. M. et Artina, A. R. (2013) Analyzing and Interpreting Data From Likert-Type Scales. *Journal of Graduate Medical Education*, 5, 541-542.
- Svoboda, M. (2015) *Northern ecosystem governance: making use of traditional knowledge for ecosystem-based decision-making. Case studies: Porcupine caribou harvest management plan and North Slope management plan.* f : Arctic Borderlands Ecological Knowledge Society. 3 p.
- Symbion Consultants. (2008) *A review and discussion of the Arctic Borderlands Ecological Knowledge Co-op's community monitoring program database.* Winnipeg : Prepared for the Wildlife Management Advisory Council (North Slope). 40 p.
- Taillon, J. (2013) *Condition physique, allocation maternelle et utilisation spatio-temporelle des aires de mise bas du caribou migrateur, Rangifer tarandus.* [Thèse de doctorat en biologie]. Québec : Université Laval. 233 p.
- Taillon, J., Brodeur, V., Festa-Bianchet, M. et Côté, S. D. (2011) Variation in body condition of migratory caribou at calving and weaning: which measures should we use? *Ecoscience*, 13, 295-303.
- Taillon, J., Festa-Bianchet, M. et Côté, S. D. (2012) Shifting targets in the tundra: protection of migratory caribou calving grounds must account for spatial changes over time. *Biological Conservation*, 147, 163-173.
- Tengö, M., Brondizio, E. S., Elmqvist, T., Malmer, P. et Spierenburg, M. (2014) Connecting diverse knowledge systems for enhanced ecosystem governance: the multiple evidence base approach. *Ambio*, 43, 579–591.
- Thaman, R., Lyver, P., Mpande, R., Perez, E., Cariño, J. et Takeuchi, K. (2013) *The contribution of indigenous and local knowledge systems to IPBES: building synergies with science.* IPBES Expert Meeting Report, UNESCO/UNU. Paris : UNESCO. 49 p.

- Thomas, D. W., Shipley, B., Blondel, J., Perret, P., Simon, A. et Lambrechts, M. M. (2007) Common paths link food abundance and ectoparasite loads to physiological performance and recruitment in nestling blue tits. *Functional Ecology*, *21*, 947-955.
- Thompson, D. W. J. et Wallace, J. M. (1998) The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical research letters*, *25*, 1297-1300.
- Turnhout, E., Bloomfield, B., Hulme, M., Vogel, J. et Wynne, B. (2012) Listen to the voices of experience. *Nature*, *488*, 454-455.
- Tyler, N. J. C. (2010) Climate, snow, ice, crashes, and declines in populations of reindeer and caribou (*Rangifer tarandus L.*). *Ecological Monographs*, *80*, 197-219.
- U.S. Fish and Wildlife Service. (2017) *Arctic National Wildlife Refuge. Alaska*. Page consultée le 20 novembre 2017. Adresse URL : <https://www.fws.gov/refuge/Arctic/about.html>.
- Uboni, A., Horstkotte, T., Kaarlejärvi, E., Sévêque, A., Stammer, F., Olofsson, J., Forbes, B. C. et Moen, J. (2016) Long-term trends and role of climate in the population dynamics of Eurasian reindeer. *PLOS ONE*, *11*, e0158359.
- Ulambar, T., Fernández-Giménez, M. E., Baival, B. et Batjav, B. (2016) Social outcomes of community-based rangeland management in mongolian steppe ecosystems. *Conservation Letters*, *00*, 1-11.
- United Nations Environment Programme. (2012) *Report of the second session of the plenary meeting to determine modalities and institutional arrangements for an intergovernmental science-policy platform on biodiversity and ecosystem services*. (UNEP/IPBES.MI/2/9). United Nations and Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. 26 p.
- van der Wal, R. et Stien, A. (2014) High-arctic plants like it hot: a long-term investigation of between-year variability in plant biomass. *Ecology*, *95*, 3414-3427.

- Veiberg, V., Loe, L. E., Albon, S. D., Irvine, R. J., Tveraa, T., Ropstad, E. et Stien, A. (2017) Maternal winter body mass and not spring phenology determine annual calf production in an Arctic herbivore. *Oikos*, *126*, 980-987.
- Vors, L. S. et Boyce, M. S. (2009) Global declines of caribou and reindeer. *Global Change Biology*, *15*, 2626-2633.
- Wagner, C. L. et Fernandez-Gimenez, M. (2008) Does community-based collaborative resource management increase social capital? *Society & Natural Resources*, *21*, 324-344.
- Wagner, M. W., Kreuter, U. P., Kaiser, R. A. et Wilkins, R. N. (2007) Collective action and social capital of wildlife management associations. *Journal of Wildlife Management*, *71*, 1729-1738.
- Walsh, N. E., Fancy, S. G., McCabe, T. R. et Pank, L. F. (1992) Habitat use by the Porcupine Caribou Herd during predicted insect harassment. *Journal of Wildlife Management*, *56*, 465-473.
- Watkins, W. G., Hudson, R. J. et Fargey, P. L. J. (1991) Compensatory growth of wapiti (*Cervus elaphus*) on aspen parkland ranges. *Canadian Journal of Zoology*, *69*, 1682 - 1688.
- Weladji, R. B. et Holand, O. (2003) Global climate change and reindeer: effects of winter weather on the autumn weight and growth of calves. *Oecologia*, *136*, 317-323.
- Weladji, R. B., Holand, O. et Almoy, T. (2003) Use of climatic data to assess the effect of insect harassment on the autumn weight of reindeer (*Rangifer tarandus*) calves. *Journal of Zoology*, *260*, 79-85.
- Weladji, R. B., Klein, D. R., Holland, O. et Mysterud, A. (2002) Comparative response of *Rangifer tarandus* and other northern ungulates to climatic variability. *Rangifer*, *22*, 33-50.
- Wenzel, G. (2004) From TEK to IQ: Inuit qaujimatugangit and Inuit cultural ecology. *Arctic Anthropology*, *41*, 238-250.



- White, T. C. R. (2008) The role of food, weather and climate in limiting the abundance of animals. *Biological Reviews*, 83, 227-248.
- Whitelaw, G., Vaughan, H., Craig, B. et Atkinson, D. (2003) Establishing the Canadian Community Monitoring Network. *Environmental Monitoring and Assessment* 88, 409-418.
- Wildlife Management Advisory Council (North Slope) et Aklavik Hunters and Trappers Committee. (2018) *Inuvialuit Traditional Knowledge of Wildlife Habitat, Yukon North Slope*. . Whitehorse, Yukon : Wildlife Management Advisory Council (North Slope). 74 p.
- Wildlife Management Advisory Council Yukon North Slope. (2008) *Response to « a review and discussion of the Arctic Borderlands Ecological Knowledge Co-op's community monitoring program database »*. Whitehorse, Yukon : WMACNS. 3 p.
- Wildlife Management Advisory Council Yukon North Slope. (2018) *We are the Wildlife Management Advisory Council for the Yukon North Slope*. Page consultée le 22 mars 2018. Adresse URL : <https://wmacns.ca/about-us/>.
- Williams, S. M. (2003) Tradition and change in the sub-arctic : Sami reindeer herding in the modern era. *Scandinavian Studies*, 75, 229-256.
- Wilson, D. C., Raakjær, J. et Degnbol, P. (2006) Local ecological knowledge and practical fisheries management in the tropics: a policy brief. *Marine Policy*, 30, 794-801.
- World Commission on Environment and Development. (1987) *Our Common Future*. Oxford : Oxford University Press. 400 p.
- Zalatan, R., Gunn, A. et Henry, G. H. R. (2006) Long-term abundance patterns of barren-ground caribou using trampling scars on roots of *Picea mariana* in the Northwest Territories, Canada. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 38, 624-630.
- Zamparo, J. (1996) Informing the fact: Inuit traditional knowledge contributes another perspective. *Geoscience Canada*, 23, 261-266.

Zhou, S., Miller, A. J., Wang, J. et Angell, J. K. (2001) Trends of NAO and AO and their associations with stratospheric processes. *Geophysical research letters*, 28, 4107-4110.