



**ÉVALUATION DES REFUGES THERMIQUES :
CROISEMENT DE MESURES IN SITU ET DE DONNÉES
CLIMATIQUES À GRANDE ÉCHELLE**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en biologie
en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences

PAR

© LAZARE BERTHELOT

Janvier 2026

Composition du jury :

Guillaume de Lafontaine, président du jury, Université du Québec à Rimouski

Martin-Hugues St-Laurent, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski

Mathieu Leblond, codirecteur de recherche, Environnement et Changement

Climatique Canada

Alexis Maximilien Berg, examinateur externe, Université de Montréal

Dépôt initial le 4 septembre 2025

Dépôt final le 29 janvier 2026

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 Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier mon directeur, Martin-Hugues St-Laurent, et mon co-directeur, Mathieu Leblond. Merci de m'avoir accompagné tout au long de ce projet, merci pour votre aide et vos bons mots aux bons moments. MH, Mathieu, un grand merci à vous deux !

Papa, Maman, je ne suis pas la personne qui s'exprime le plus dans la famille et je ne vous ai jamais vraiment remercié pour tout. Merci de m'avoir fait comprendre qu'il fallait bien travailler à l'école, merci de m'avoir donné la possibilité de découvrir le monde, merci de m'avoir laissé choisir mon parcours et de m'avoir soutenu jusqu'au bout. Je sais que ça a été plus long que prévu, j'ai pris pas mal de « rallongis » et de retours en arrière mais ça y est ! J'ai fini !!

Ensuite, je voudrais remercier Alexandre Dionne-Larin, Rebecca Lacerte, Laurie Derguy et Léo Moulin pour avoir effectué une grande partie du terrain avant mon arrivée dans le labo, ainsi que Fabien Saint-Pierre et Rebecca pour m'avoir accompagné pendant la dernière récolte des thermochrons. Merci également à Alain Caron pour les conseils et l'aide précieuse pendant mes analyses statistiques et à Kimberly Malcolm pour la révision des textes en anglais.

Fabien et Rebecca, merci pour votre apport scientifique, pour l'aide en statistique et pour l'interprétation de mes résultats. Jessica et Sophie, merci de m'avoir supporté dans notre bureau « récré », on aura bien rigolé. Jess, on a « sauvé » ta maîtrise mais tu as aussi sauvé la mienne. Un grand merci aux autres membres du labo (Alexandre, Brendan, Chloé, Jérôme, Marilou et Timothée), tant pour les activités sociales et les rigolades que pour l'entraide dans nos projets respectifs.

Je tiens également à remercier les différents évaluateurs de mon devis et de mon mémoire, François Vézina, Yan Boulanger, Guillaume de Lafontaine et Alexis Maximilien Berg pour leurs commentaires constructifs tout au long de mon cheminement.

Finalemant, un grand merci aux organismes subventionnaires qui ont permis de financer cette étude, à savoir Environnement et Changement climatique Canada, ainsi que le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada, pour les subventions à la découverte #2016-05196 et #2022-04307 octroyées à mon directeur de recherche, Martin-Hugues St-Laurent.

RÉSUMÉ

Les changements climatiques exposent plus régulièrement les espèces sauvages à des conditions thermiques extrêmes. En réponse à la hausse des températures, l'aire de répartition de certaines espèces se déplace vers les pôles ou les sommets de montagne, à la recherche de refuges thermiques. Notre connaissance des refuges thermiques demeure toutefois limitée, dû à la difficulté de les cartographier. Les étudier requiert d'utiliser des capteurs de température *in situ* qui récoltent des données précises, bien que sur des zones restreintes. À l'inverse, les données de réanalyses climatiques permettent de couvrir de vastes régions sur de longues périodes temporelles, mais avec une résolution spatiale plus grossière. Il existe donc une avenue prometteuse consistant à coupler ces sources de données pour la modélisation des refuges thermiques au sein des habitats fauniques. Dans cette perspective, mon étude visait à 1) évaluer comment la végétation et la topographie influencent la température de l'air afin d'identifier des combinaisons représentatives des refuges thermiques, et 2) explorer l'intégration de données ERA5-Land, un modèle de réanalyses climatiques largement utilisé, dans des modèles de températures locales pour mieux caractériser les variations de température à fine échelle, le tout dans l'habitat du caribou forestier (*Rangifer tarandus caribou*), une espèce en péril au Canada. De 2020 à 2023, 273 capteurs de température ont été déployés dans plusieurs combinaisons de couvert végétal, d'élévation et d'orientation de pente. J'ai élaboré des modèles intégrant les variables locales (couvert, topographie) seules et combinées à ERA5-Land (température et rayonnement solaire). Mes résultats montrent que les forêts matures pourraient constituer des refuges thermiques pour le caribou le jour en été et la nuit en hiver. Inversement, les milieux humides seraient de bons refuges thermiques la nuit en été et le jour en hiver. L'ajout d'ERA5-Land a permis d'améliorer la performance des modèles mensuels de prédiction des températures de manière notable, et sa combinaison aux variables locales a permis de préciser l'estimation des valeurs de température. L'approche développée dans mon projet offre des perspectives méthodologiques prometteuses pour la description des microclimats et la cartographie des refuges thermiques. Elle pourra guider la conservation des espèces soumises aux effets négatifs des changements climatiques.

Mots clés : Caribou boréal ; Changements climatiques ; ERA5-Land ; Microclimat ; Réanalyse climatique ; Température de l'air

ABSTRACT

Climate change is increasingly exposing wildlife to extreme thermal conditions. In response to rising temperatures, some species distributions have shifted towards the poles or mountain tops in search of thermal refugia. Our knowledge of thermal refugia remains limited, however, due to the challenges of mapping them. Their study requires *in situ* temperature loggers that collect precise data, though only over small areas. In contrast, climate reanalysis data and remote sensing offer coverage of vast regions over long time periods, but with coarser spatial resolution. This opens a promising avenue for combining these data sources to model thermal refugia within wildlife habitats. In this context, my study aimed to 1) assess how vegetation and topography influence air temperature to identify combinations representative of thermal refugia, and 2) explore how ERA5-Land can be integrated into local temperature models to better characterize fine-scale temperature variability, all within the habitat of the boreal woodland caribou (*Rangifer tarandus caribou*), a threatened species in Canada. Between 2020 and 2023, 273 temperature loggers were deployed across various combinations of vegetation cover, elevation, and slope orientation. I developed models incorporating local variables (cover, topography), both alone and in combination with ERA5-Land variables (temperature and solar radiation). My results show that mature forests could act as thermal refugia for caribou during the daytime in summer and during the nighttime in winter. Conversely, wetlands could function as thermal refugia during summer nights and winter days. The inclusion of ERA5-Land data significantly improved the performance of monthly temperature prediction models, and its combination with local variables improved the estimation of temperature values. The approach developed in this project offers a promising method for describing microclimates and mapping thermal refuges that could be applied to the conservation of species exposed to the negative effects of climate change.

Keywords: Air temperature; Boreal caribou; Climate change; Climate Reanalysis; ERA5-Land; Microclimate.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	vii
RÉSUMÉ	ix
ABSTRACT.....	x
TABLE DES MATIÈRES	xi
LISTE DES TABLEAUX	xiii
LISTE DES FIGURES	xiv
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
Échanges de chaleur et thermorégulation	2
Microclimats et influence sur la température.....	5
Enregistreurs de données et télédétection : complémentarités et contraintes.....	7
Objectifs, hypothèses et survol des méthodes et principaux résultats	9
CHAPITRE 1 COMBINAISON DE DONNÉES LOCALES ET ISSUES DE RÉANALYSES CLIMATIQUES pour l'IDENTIFICATION DE REFUGES THERMIQUES DANS LES HABITATS FAUNIQUES	13
RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE	13
COMBINING DATA FROM IN SITU LOGGERS AND CLIMATE REANALYSES TO IDENTIFY THERMAL REFUGIA IN WILDLIFE HABITAT	15
Abstract	15
Introduction.....	16
Material and methods.....	19
Results.....	27
Discussion	34
Acknowledgement	38
LITERATURE CITED	40
SUPPLEMENTARY MATERIALS.....	49
Supplementary Materials 1	49
Supplementary Materials 2	50
Supplementary Materials 3	51
Supplementary Materials 4	57
Supplementary Materials 5	81

CONCLUSION GÉNÉRALE	94
Retour sur le contexte et les principaux résultats	94
Contributions théoriques	95
Contributions appliquées	96
Limites et perspectives	98
Conclusion.....	100
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	102

LISTE DES TABLEAUX

- Table 1: Candidate models used to assess the effect of various vegetation, topographic, and climatic variables on above-ground air temperatures measured by data loggers. ERA5-L T° is the temperature at 2 m above the ground based on ERA5-Land reanalyses. Land cover types were old coniferous forests (≥ 90 years), young coniferous forests (50–70 years), old mixed/deciduous forests (≥ 50 years), wetlands, ≤ 5 -year-old cutblocks, 6–20-year-old cutblocks, 20–50-year-old natural disturbances, 20–50-year-old regenerating stands, non-regenerating areas, and road rights-of-way. The number of parameters in a model is represented by k.....25
- Table 2: Candidate models ranked by AIC for each month with their R2 (rank|R2, with rank 1 = most parsimonious). “NA” means that the model did not converge. “=” means ΔAIC was < 229

LISTE DES FIGURES

- Figure 1: Study area in Québec, Canada, where 273 data loggers were deployed to measure above-ground air temperature in the range of the Charlevoix boreal caribou. Data loggers were distributed across multiple combinations of land cover types (see legend), elevation, and aspect (not represented here). 19
- Figure 2: Variations in the predicted mean of above-ground air temperature ($\pm 95\%$ confidence intervals) as a function of time of day and land cover types during the summer months (June-September). 31
- Figure 3: Variations in the predicted mean of above-ground air temperature ($\pm 95\%$ confidence intervals) as a function of time of day and land cover types during the winter months (December-March). 32
- Figure 4: Variations in the predicted mean of above-ground air temperature ($\pm 95\%$ confidence intervals) as a function of time of day and land cover types during the spring (April-May) and autumn months (October-November). 33

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'environnement est aujourd'hui profondément et rapidement modifié par plusieurs menaces, compromettant le maintien de larges pans de la biodiversité (Pereira et al., 2012 ; IPCC, 2013). Outre la perte d'habitat induite par les perturbations anthropiques et naturelles, les espèces invasives, la surexploitation des ressources et la pollution, on compte également les changements climatiques parmi les grandes menaces pesant sur le vivant, et ce dernier moteur d'érosion a récemment gagné en importance (IPCC, 2021). En plus de l'augmentation globale des températures, les changements climatiques devraient se traduire par des étés plus longs et plus chauds, ainsi que par des hivers plus courts et plus doux (Vincent et al., 2018 ; IPCC, 2021). Ces tendances seront particulièrement marquées dans l'hémisphère Nord et aux hautes latitudes, et s'accompagneront d'une hausse de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes, tels que les sécheresses et les vagues de chaleur (IPCC, 2021).

Les changements climatiques risquent de pousser les espèces sauvages et leurs habitats au-delà des marges de variabilité climatique naturelle précédemment rencontrées (Traill et al., 2010 ; Vicente-Serrano et al., 2020). Bien que la faune et la flore des régions nordiques et tempérées soient adaptées au passage des saisons, on observe un déplacement des niches climatiques de plusieurs espèces animales et végétales vers les hautes latitudes et élévations (Hickling et al., 2006 ; Sittaro et al., 2017). Par exemple, aux États-Unis, la limite méridionale du gros-bec errant (*Hesperiphona vespertina*) s'est déplacée vers le nord de 10,9 km par an entre 1960 et 2020 (Widick et al., 2023). Les déplacements vers les plus hautes élévations, bien que présents chez plusieurs espèces, s'avèrent moins marqués (c.-à-d. 12,2 m par décennie en moyenne ; Chen et al., 2011). De plus, il est pressenti que la vitesse à laquelle ces changements se produisent — et continueront de se produire dans l'avenir — soit trop élevée pour que la plupart des espèces puissent s'y adapter (Quintero et Wiens, 2013). Toutefois, des ajustements seraient possibles grâce à des réponses physiologiques et comportementales (Berteaux et al., 2004).

ÉCHANGES DE CHALEUR ET THERMORÉGULATION

Les animaux gagnent ou perdent de la chaleur (c.-à-d. de l'énergie calorifique) de différentes façons (Da Silva et Maia, 2013). D'abord, ces échanges peuvent avoir lieu par conduction (c.-à-d. par contact direct avec une surface) qui est fonction de la conductance thermique des surfaces mises en contact (Mills, 1992). Notamment, certains lézards se prélassent sur des pierres plates pour en soutirer l'énergie accumulée par le rayonnement solaire (Martin et al., 1995). La chaleur peut également s'échanger par convection, c.-à-d. par le déplacement d'air autour du corps, comme celui du vent ou les déplacements d'air forcés lors des mouvements (Mitchell, 1974). Chez les endothermes, ce type d'échange peut impliquer une perte de chaleur puisque l'air réchauffé par l'animal est remplacé par un air plus froid. Enfin, la chaleur peut s'échanger par radiation, à savoir des pertes de chaleur liées aux rayonnements infrarouges émis par le corps et des gains provenant principalement des rayons du soleil, directs ou réfléchis, et des rayonnements infrarouges provenant de la Terre (Porter et Gates, 1969).

L'environnement thermique ou paysage thermique, comme défini par Elmore et al. (2017), correspond aux températures ambiantes présentes dans les différents habitats utilisés par un organisme. Chez les endothermes, l'environnement thermique influe sur la capacité des individus à thermoréguler, c.-à-d. à réguler leur température corporelle (Mitchell et al., 2018). Les endothermes ont des plages de tolérance de température ambiante plus ou moins grandes selon l'espèce ; ces plages peuvent être divisées en différentes parties (Angilletta, 2009 ; Mitchell et al., 2018). En premier lieu, la plage de température dite « idéale » (aussi appelée « zone de thermoneutralité ») est définie comme l'intervalle de températures ambiantes pour laquelle le taux métabolique d'un individu est minimal et la thermorégulation est seulement effectuée par l'entremise de processus physiques non-évaporatifs (Bligh et Johnson, 1973). Mitchell et al. (2018) discutent d'une seconde plage plus large englobant la zone de thermoneutralité, dans laquelle la température corporelle varie principalement dû à l'action métabolique, et peu en fonction de la température ambiante. Dans cette zone, nommée « *prescriptive zone* » (ci-après « zone normative »), une exposition prolongée à des températures se trouvant en-dehors de la zone de thermoneutralité y est soutenable mais

implique que l'expression de mécanismes de thermorégulation par l'animal soit possible. Au-delà des marges de cette zone normative, une exposition prolongée à des températures extrêmement basses ou élevées augmentera les risques respectifs d'hypothermie et d'hyperthermie (Precht et al., 1973), pouvant entraîner des conséquences graves sur l'état de santé et la survie de l'individu. Par exemple, lorsque les tissus sont froids, le métabolisme fonctionne au ralenti et certaines enzymes ne peuvent plus être activées pour déclencher la réaction qu'elles catalysent (Hochachka et Somero, 2002 ; Willmer et al., 2005). À titre d'exemple, Valeri et al. (1987) de même que Rohrer et al. (1992) ont montré que la cascade enzymatique associée à la coagulation sanguine était fortement inhibée par l'hypothermie. À l'inverse, quand la température corporelle est trop élevée, les protéines risquent de se dénaturer (Willmer et al., 2005). Ainsi, la capacité à thermoréguler protège les animaux de plusieurs dérèglements cellulaires pouvant entraîner la mort des cellules (Streffer, 1985) et, ultimement, celle de l'individu.

Les endothermes disposent de plusieurs stratégies pour s'ajuster à des températures situées dans les limites de la zone normative. Sur le plan physiologique, ils peuvent lutter contre les températures chaudes en haletant et en transpirant (Fuller et al., 2016), mettant à profit le processus d'évaporation de l'eau pour se débarrasser de la chaleur excessive. Ces méthodes sont efficaces mais nécessitent un accès régulier et suffisant à l'eau pour remplacer celle perdue dans le processus (Mitchell et al., 2018). Une limite importante de ces méthodes est l'humidité ambiante, puisque l'évaporation de l'eau est fortement réduite par la pression de vapeur d'eau dans l'air (Luber et McGeehin, 2008). À l'autre extrême, en réponse au froid, la génération de chaleur débute par le frissonnement. Si l'exposition au froid se prolonge, la thermogénèse bascule vers l'utilisation des tissus adipeux bruns (Cannon et Nedergaard, 2004). Contrairement au frissonnement, qui résulte de l'activité musculaire, la chaleur générée lors de l'utilisation de tissus adipeux bruns est issue des mitochondries que renferment en grand nombre ces cellules adipeuses (Cannon et Nedergaard, 2004). Cependant, ces deux méthodes requièrent de l'énergie et, par conséquent, un apport alimentaire soutenu pour être maintenues dans le temps (Angilletta, 2009 ; Townsend et Tseng, 2014).

Face à des températures extrêmes ou pendant une exposition plus longue, les ajustements physiologiques peuvent ne pas suffire, forçant les endothermes à exprimer des comportements favorables à la thermorégulation ; ce concept est appelé thermorégulation comportementale (Terrien et al., 2011). Par exemple, les espèces grégaires, comme le manchot empereur (*Aptenodytes forsteri*), expriment des comportements sociaux visant à former des groupes compacts (Gilbert et al., 2006). Ce type de comportement permet de limiter l'exposition au vent, de limiter la dissipation de la chaleur et d'augmenter localement la température entre les individus (Gilbert et al., 2010). Les endothermes peuvent également adopter une posture qui favorise la conservation de la chaleur, par exemple se recroqueviller quand il fait froid, ou au contraire étendre leurs membres quand il fait chaud, faisant ainsi varier la circulation de l'air autour du corps et ajustant par conséquent les échanges de chaleur par convection (Maloney et al., 2005 ; Gestich et al., 2014). Certains individus peuvent également modifier leur période d'activité au cours de la journée pour éviter les températures plus extrêmes (Maloney et al., 2005 ; Davimes et al., 2017 ; Zhou et al., 2022) ou changer leur utilisation de l'habitat en sélectionnant des sites plus frais (Renecker et Hudson, 1986 ; Cain et al., 2008). Par exemple, Thompson et al. (2021) ont montré que le niveau d'activité des orignaux (*Alces alces*) atteignait son maximum durant les heures crépusculaires en été, probablement pour se nourrir de végétation fraîche. Les orignaux sélectionnaient également des habitats ouverts tôt le matin, lorsque les températures étaient plus fraîches, plutôt qu'en milieu de journée (Thompson et al., 2021). La thermorégulation comportementale consiste, par un ajustement des patrons d'utilisation dans l'espace et le temps, à tirer profit de conditions environnementales spécifiques. Ces conditions favorables créent ce qu'on appelle un refuge thermique, qui peut être défini comme un endroit, dans l'espace et le temps, où les effets négatifs des conditions météorologiques locales sont moins marqués que dans les zones adjacentes ou environnantes (Lancaster et Belyea, 1997 ; Magoulick et Kobza, 2003 ; Keppel et Wardell-Johnson, 2012). Les refuges thermiques sont donc fortement associés aux conditions microclimatiques d'un habitat.

MICROCLIMATS ET INFLUENCE SUR LA TEMPÉRATURE

L'Organisation météorologique mondiale définit le climat comme les conditions météorologiques moyennes présentes sur une zone donnée et sur une durée allant de plusieurs mois à des milliers d'années, bien qu'elle utilise une période de référence de 30 ans pour déterminer le climat normal d'une zone (World Meteorological Organization, 2025). Ce concept est modulé selon l'échelle spatiale et temporelle considérée. À l'échelle la plus large, le macroclimat décrit les conditions atmosphériques générales observées sur de vastes territoires, tels que des continents, et sur de longues périodes, souvent de l'ordre du siècle (Orlanski, 1975 ; Hidore et al., 2010). À une échelle intermédiaire, le mésoclimat renvoie à des régions géographiques où des caractéristiques physiques communes — telles que le relief, la proximité d'un plan d'eau ou la structure paysagère — contribuent à l'établissement de conditions climatiques relativement homogènes (Hidore et al., 2010).

À des échelles encore plus fines, les microclimats correspondent à des variations locales des conditions atmosphériques, notamment de la température de l'air, du rayonnement ou du vent, sur des distances de quelques mètres et des périodes pouvant varier de quelques minutes à quelques heures (Geiger et al., 1995 ; Orlanski, 1975). Contrairement aux échelles climatiques supérieures, les microclimats sont fortement influencés par des caractéristiques immédiates de l'environnement et peuvent varier de manière marquée sur de très courtes distances. Certains auteurs proposent d'ailleurs d'aborder le microclimat non seulement comme une entité physique, mais aussi comme un concept écologique, dépendant du niveau de perception et des capacités de déplacement des organismes (Mislan et Helmuth, 2008). Ainsi, un petit gastéropode étant en mesure de parcourir 50 m par mois (Dahirel et al., 2014) ressentirait des changements de microclimat sur de plus courtes distances (p. ex., la distance entre la face ensoleillée d'un rocher et sa face ombragée) qu'un grand ongulé ayant un domaine vital de 100 km² ou plus (McCulley et al., 2017).

La température de l'air à l'échelle des microclimats résulte de l'interaction de plusieurs facteurs biophysiques, parmi lesquels la topographie et la couverture végétale jouent un rôle central (Geiger et al., 1995 ; Dobrowski, 2011). L'élévation constitue l'un des déterminants

majeurs de la distribution spatiale des températures, celles-ci diminuant avec l'augmentation de l'élévation. Ce gradient thermique est principalement attribué à la baisse de la pression atmosphérique à haute élévation, qui entraîne une expansion et un refroidissement de l'air, un processus décrit par le coefficient adiabatique moyen d'environ $-6,5$ °C par kilomètre (Lee, 1978 ; Benson, 2015). Toutefois, ce taux de décroissance thermique n'est ni constant ni universel, et peut varier en fonction des saisons, des conditions atmosphériques locales et du contexte régional (Du et al., 2018 ; Navarro-Serrano et al., 2020)

Au-delà de l'élévation, la configuration du relief influence fortement les bilans énergétiques locaux. L'inclinaison des pentes et leur orientation par rapport à la trajectoire apparente du soleil modulent la quantité de rayonnement solaire reçue par le sol, ce qui se répercute directement sur la température de l'air près de la surface (Geiger et al., 1995 ; Fu, 2000 ; Tian et al., 2001). Ainsi, par rapport à une surface plane, augmenter l'inclinaison face au soleil augmentera la quantité d'énergie reçue avec un maximum d'énergie à 60° d'inclinaison. À l'inverse, pour des pentes orientées à 90° par rapport au soleil ou opposées au soleil, l'augmentation de l'inclinaison entraînera une diminution de la quantité d'énergie reçue (Temps et Coulson, 1977). Quant à elle, l'orientation de la pente détermine la durée d'ensoleillement d'une surface selon la course du soleil au cours de la journée (Geiger et al., 1995 ; Fu, 2000 ; Tian et al., 2001). Par exemple, dans l'hémisphère nord, une pente faisant face au nord recevra moins de rayonnement direct qu'une pente orientée au sud (Rorison et al., 1986). Les formes de relief complexes, telles que les collines et les massifs montagneux, modifient également la circulation de l'air en perturbant les vents dominants, favorisant localement la formation de nuages et influençant la distribution spatiale des précipitations (Lee, 1978 ; Houze, 2012). La topographie peut en outre accroître l'obstruction du ciel, réduisant l'apport en rayonnement solaire direct, notamment dans les vallées encaissées (Fu, 2000). Durant la nuit, les dynamiques thermiques sont aussi fortement influencées par le relief : l'air froid, plus dense, a tendance à s'écouler vers les zones basses, entraînant l'accumulation de températures plus basses dans les fonds de vallée par rapport aux versants intermédiaires ou aux sommets (Dobrowski, 2011).

Outre la topographie, la température des microclimats est également influencée par la couverture végétale, en particulier dans les systèmes forestiers. Le degré d'ouverture de la canopée influence directement les échanges d'énergie entre le sol et l'atmosphère (De Frenne et al., 2021). Les branches et le feuillage des arbres limitent la pénétration du rayonnement solaire direct et interceptent une partie des radiations infrarouges émises par la surface terrestre, contribuant ainsi à modérer les températures sous couvert forestier (Geiger et al., 1995 ; De Frenne et al., 2021 ; Klein et al., 2021). La structure complexe des arbres et arbustes réduit la vitesse du vent, et cet effet augmente à mesure qu'on s'enfonce en forêt loin des bordures (Kovács et al., 2017 ; De Frenne et al., 2021). Le couvert forestier intercepte également de façon non négligeable les précipitations (Aussenac et al., 2000 ; Geiger et al., 2009 ; Huerta et al., 2019). La pluie fine traverse difficilement la canopée et atteint le sol principalement en ruisselant sur le tronc des arbres, ou s'évapore avant d'y arriver. Les arbres interceptent aussi de 20 à 80% des chutes de neige selon le type de couvert (Storck et al., 2002 ; Huerta et al., 2019 ; Ge et al., 2022). L'ensemble de ces mécanismes contribue à amortir les fluctuations thermiques sous couvert forestier, générant des conditions plus fraîches durant la saison estivale et plus douces en hiver par rapport aux milieux ouverts ou aux forêts à canopée clairsemée (De Frenne et al., 2019). Ces effets tampon persistent également lors des transitions journalières. Durant la nuit, les structures végétales continuent de limiter les pertes de chaleur par rayonnement, ce qui ralentit le refroidissement de l'air sous la canopée par rapport aux zones ouvertes. À l'inverse, au lever du soleil, l'augmentation de la température de l'air y est généralement plus progressive, se traduisant en une inertie thermique accrue des milieux forestiers (Granberg et al., 1993 ; De Frenne et al., 2021).

ENREGISTREURS DE DONNÉES ET TÉLÉDÉTECTION : COMPLÉMENTARITÉS ET CONTRAINTES

L'étude des microclimats nécessite de mesurer avec précision les variables météorologiques à des échelles spatiotemporelles fines. Les données météorologiques à fine échelle peuvent permettre de caractériser les microclimats (Greiser et al., 2018 ; Vandewiele et al., 2023), et peuvent être mises en relation avec l'utilisation de l'espace par les animaux afin de mieux comprendre leur utilisation des refuges thermiques (McGinn et al., 2023). Ce

défi a récemment gagné en popularité parmi les écologistes de la faune (Gilbert et al., 2022 ; McGinn et al., 2023), une initiative largement soutenue par l'avènement de nouvelles technologies. Les enregistreurs de données modernes sont plus précis et peuvent mesurer et enregistrer des données météorologiques à des fréquences plus élevées et sur une période plus longue que les générations plus anciennes, et sont peu coûteux (Bramer et al., 2018). Malgré ces avancées, il subsiste un manque de connaissances dans la littérature scientifique quant à l'environnement thermique retrouvé au sein des habitats fauniques, les études existantes étant spatiotemporellement limitées et ne décrivant qu'une petite partie de l'habitat utilisé comme les sites de nidification ou de repos (McCann et al., 2016 ; McGinn et al., 2023). Il faut savoir que la portée de détection limitée des enregistreurs de données nécessite d'en installer un grand nombre afin de couvrir l'ensemble de l'aire couverte par les domaines vitaux des individus suivis.

En revanche, les outils de télédétection et les réanalyses climatiques (qui proviennent de la fusion de modèles climatique et d'observations, par l'assimilation d'observations lors des simulations) permettent aux chercheurs d'accéder à une grande quantité de variables climatiques complémentaires, telles que la température de l'air près du sol, la quantité de radiation solaire arrivant au sol ou les précipitations, et ce presque partout sur le globe, et loin dans le passé (Rodell et al., 2004 ; Muñoz Sabater, 2019 ; Wan et al., 2021). De tels outils ont néanmoins une résolution spatiotemporelle moins fine que les enregistreurs de données déployés *in situ*. À titre d'exemple, MODIS propose une mesure satellitaire de la température de surface à une résolution spatiale de 250 m à 1 km et à un intervalle de temps variant de 1 à 16 jours depuis l'an 2000 (Wan et al., 2021).

Certaines réanalyses sont particulièrement prometteuses pour l'étude de l'utilisation des microclimats par la faune. C'est le cas de la dernière réanalyse climatique ERA5-Land du European Center for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF ; Muñoz Sabater, 2019) qui disponibilise des données horaires de température de l'air ainsi que plusieurs autres variables environnementales (p. ex. rayonnement solaire, couverture neigeuse, vitesse du vent) de 1950 à aujourd'hui à une résolution spatiale de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (environ 81 km²). Cet outil s'appuie sur un modèle météorologique couplé à de multiples observations provenant

de stations météorologiques, de satellites d'observation et d'autres bases de données. Les moyennes de température quotidiennes et mensuelles ont été validées et se sont avérées fiables lorsque comparées à des données de stations météorologiques (Vanella et al., 2022 ; Gheysari et al., 2024). ERA5-Land a principalement été utilisé pour étudier les variations de température à l'échelle du macroclimat, bien que certaines comparaisons aient été faites à des échelles plus fines (Santos et al., 2024 ; Auvinen et al., 2024). Toutefois, à ma connaissance, aucune étude ne s'est penchée sur le gain apporté par ERA5-Land lors de la modélisation des microclimats au sein d'habitats fauniques. Cette connaissance serait particulièrement utile pour l'étude des patrons d'utilisation de l'espace et de la sélection d'habitat d'espèces endothermes en réponse aux variations de température dans leur environnement, et plus particulièrement d'espèces aux grandes capacités de déplacement.

OBJECTIFS, HYPOTHÈSES ET SURVOL DES MÉTHODES ET PRINCIPAUX RÉSULTATS

La disponibilité des microclimats revêt une importance particulière pour certaines espèces fauniques sensibles au stress thermique, notamment le caribou des bois (*Rangifer tarandus caribou*). Ce grand cervidé, déjà affaibli par la perte et la fragmentation de son habitat (Festa-Bianchet et al., 2011 ; Nagy-Reis et al., 2021), présente une faible tolérance aux températures élevées (Koellen 2015). La capacité de dissipation de la chaleur des caribous étant limitée, ils doivent fréquemment recourir à la thermorégulation comportementale, ajustant leur utilisation de l'espace à des conditions microclimatiques favorables. Certaines études récentes montrent que les caribous sélectionnent des forêts matures et densément couvertes lors des épisodes de chaleur, et modifient leurs déplacements quotidiens afin de minimiser les coûts métaboliques associés au stress thermique (Leclerc et al., 2019 ; Lessard et al., 2025). À l'échelle de leur vaste domaine vital, il appert donc que les variations fines de température liées à la topographie et au couvert végétal puissent être déterminantes dans le choix de composantes d'habitat et la gestion du budget énergétique. Ainsi, l'étude des microclimats et l'intégration de données météorologiques fines, notamment issues de réanalyses climatiques, apparaissent essentielles pour mieux

documenter les conditions thermiques auxquelles sont exposés les caribous et pour éclairer les efforts de conservation pour cette espèce.

L'objectif principal de mon projet de maîtrise était d'évaluer comment différents types de couvert végétal et différentes conditions topographiques influençaient la température de l'air à proximité du sol, de manière à identifier d'éventuelles combinaisons de variables environnementales pouvant mener à la création de refuges thermiques. À ce titre, j'ai émis l'hypothèse que la température de l'air est influencée d'une part par les différentes combinaisons de conditions topographiques, notamment l'élévation et l'orientation de la pente, et d'autre part par les interférences liées au couvert végétal, le tout générant de potentiels refuges thermiques pour la faune. Mon deuxième objectif visait quant à lui à intégrer des données provenant de ERA5-Land à des modèles de température développés à partir de données locales afin de mieux caractériser les variations de température à fine échelle. L'hypothèse associée à ce deuxième objectif stipulait que la capacité d'ERA5-Land à bien représenter les conditions thermiques locales dépend des facteurs environnementaux locaux, tels que la topographie et la végétation.

Pour atteindre mes objectifs, j'ai utilisé les mesures de température faites entre 2020 et 2023 par 273 enregistreurs de type « thermochron » déployés dans des sites offrant plusieurs combinaisons de couvert végétal, d'élévation et d'orientation de la pente. J'ai ensuite généré plusieurs modèles candidats permettant d'expliquer les variations de température de l'air mesurées localement à l'aide des thermochrons en combinant diverses variables dont le type de couvert, la topographie, la température mesurée par ERA5-Land et la radiation solaire, et ce pour chaque mois de l'année séparément. Les modèles ainsi générés ont montré l'apport de ERA5-Land par rapport aux modèles ne contenant que des variables locales ainsi que l'influence des caractéristiques topographiques et de couvert sur la température locale. Les milieux ouverts étaient jusqu'à 4 °C plus chauds que les forêts le jour en été ; en revanche les différences étaient plus faibles en hiver. L'élévation avait un effet négatif significatif mais faible, et les radiations solaires avaient un effet positif plus important en hiver qu'en été. L'ajout des variables provenant d'ERA5-Land a amélioré l'ajustement des modèles pour tous les mois de l'année. Mes résultats montrent que les habitats composés de vieilles forêts et de

milieux humides offrent des opportunités de thermorégulation grâce à des refuges thermiques complémentaires en été et en hiver. Ces résultats ouvrent la porte à l'utilisation de données de température issues de la réanalyse ERA5-Land pour l'étude des microclimats pour la faune, à condition qu'elles soient ajustées afin de mieux prendre en compte l'influence de variables de couvert et de topographie locales.

CHAPITRE 1

COMBINAISON DE DONNÉES LOCALES ET ISSUES DE RÉANALYSES CLIMATIQUES POUR L'IDENTIFICATION DE REFUGES THERMIQUES DANS LES HABITATS FAUNIQUES

RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE

Les variations de température locale peuvent influencer la distribution des mammifères sauvages et pourraient expliquer leur utilisation de refuges thermiques pour la thermorégulation. L'identification de microrefuges nécessite des informations de haute précision, comme celles fournies par des enregistreurs de données. Les données de réanalyses climatiques, caractérisées par une résolution spatiale plus grossière comparée à celle des enregistreurs, sont disponibles sur de vastes territoires et de longues séries temporelles, ce qui les rend potentiellement utiles pour décrire les refuges thermiques et orienter la gestion et la conservation de la faune. Nous avons cherché à évaluer l'influence de la végétation, de la topographie et du rayonnement solaire sur les variations à fine échelle de la température de l'air au-dessus du sol dans l'habitat du caribou boréal (*Rangifer tarandus caribou*), une espèce en péril au Canada. Nous avons aussi exploré si les réanalyses ERA5-Land pouvaient améliorer les estimations de températures locales. De 2020 à 2023, nous avons mesuré la température de l'air à l'aide de 273 enregistreurs répartis dans différents types de couverts terrestres présentant des élévations et des orientations de pente variables. Nous avons intégré ces variables, la température et le rayonnement solaire issus d'ERA5-Land, et le moment de la journée dans des modèles mensuels expliquant les variations de température mesurées par les enregistreurs. Les variations locales de température présentaient des amplitudes journalières différentes selon le type de couvert, et nos résultats suggèrent que les forêts matures à couvert fermé ainsi que les milieux naturellement ouverts (p. ex. milieux humides) pourraient servir de refuges thermiques pour le caribou en été et en hiver, respectivement. Les variables issues d'ERA5-Land ont amélioré l'ajustement de tous les modèles mensuels, appuyant l'importance de combiner les données issues de réanalyses climatiques et celles récoltées localement pour identifier les microrefuges dans les habitats fauniques. Notre approche méthodologique pourrait être utilisée pour orienter les stratégies de conservation d'autres espèces menacées par les changements climatiques.

Mots-clés : Caribou boréal ; Changements climatiques ; ERA5-Land ; Microclimat ; Microrefuge ; Réanalyse climatique ; Température de l'air ; Thermorégulation.

Ce premier article, intitulé « *Combining data from in situ loggers and climate reanalyses to identify thermal refugia in wildlife habitat* », a été corédigé par moi-même ainsi que par le professeur Martin-Hugues St-Laurent et le chercheur Mathieu Leblond. Cet article sera soumis à la revue avec comité de révision par les pairs Journal of Thermal Biology. En tant que premier auteur, ma contribution à ce travail a été l'essentiel de la recherche, du développement de la méthode, de l'exécution des analyses et de la rédaction de l'article. Le professeur Martin-Hugues St-Laurent et le chercheur Mathieu Leblond ont fourni l'idée originale, révisé et commenté les analyses ainsi que le texte de l'article, et ils ont également financé ce projet.

COMBINING DATA FROM IN SITU LOGGERS AND CLIMATE REANALYSES TO IDENTIFY THERMAL REFUGIA IN WILDLIFE HABITAT

ABSTRACT

Variations in local temperatures can modify the distribution of wild mammals and may influence their use of thermal refugia for thermoregulation. Identifying microrefugia requires high-precision information such as data provided by data loggers. Climate reanalyses, which have a coarser spatial resolution compared to data loggers, are available over broad areas and long time series, making them potentially useful tools for describing thermal refugia and informing wildlife management and conservation. We sought to assess the influence of vegetation, topography, and solar radiation on fine-scale variations in above-ground air temperature in the habitat of boreal caribou (*Rangifer tarandus caribou*), a species at risk in Canada. We also explored whether ERA5-Land reanalyses could improve local temperature estimations. From 2020 to 2023, we measured above-ground air temperatures using 273 data loggers located in different land cover types with variable elevation and slope orientation. We included these variables, temperature and solar radiation from ERA5-Land, and time of day in monthly models explaining variations in the temperature measured by data loggers. Variations in local temperature had different daily amplitudes depending on land cover type, and our results suggest that mature closed-canopy forests and naturally open areas (e.g., wetlands) could provide thermal refugia for caribou during summer and winter, respectively. ERA5-Land variables improved the fit of all monthly models, substantiating the importance of combining data from climate reanalyses with in situ data to identify microrefugia in wildlife habitat. Our methodological approach could be leveraged to inform conservation of other species threatened by climate change.

Keywords: Air temperature; Boreal caribou; Climate change; Climate reanalysis; ERA5-Land; Microclimate; Microrefugia; Thermoregulation.

INTRODUCTION

Habitat loss induced by anthropogenic disturbances and climate change can push wildlife and their habitats beyond the margins of natural variability (Traill et al., 2010; IPCC 2013; Vicente-Serrano et al., 2020), exacerbating the erosion of biodiversity worldwide (Nunez et al., 2019; Habibullah et al., 2022). In many regions of the world, the rate of change in temperatures is far too high for most species to adapt (Quintero and Wiens, 2013), but some species have been able to acclimate, at least partly, through physiological and behavioural responses (Berteaux et al., 2004). Mammals, in particular, use a wide range of strategies to cope with variations in temperature. Under hot conditions, they can pant or sweat—provided they have sufficient access to food and water (Fuller et al., 2016; Mitchell et al., 2018); in the cold, they can shiver or metabolize brown adipose tissues (Angilletta, 2009). When temperatures reach extremes and exposure is protracted, however, physiological adjustments may not be sufficient, forcing individuals to express thermoregulatory behaviours such as adopting a posture that favors or limits the dissipation of heat (Maloney et al., 2005; Gestich et al., 2014). They can also modify their period of activity (Maloney et al., 2005; Davimes et al., 2017) or alter their space use patterns, for example, by using windswept areas or moving under the canopy (Cain et al., 2008; Campbell et al., 2018; Zhou et al., 2022). Thermal refugia thus play an important role for the thermoregulation of endotherms.

Macroclimates represent the general weather over broad regions (continents) and long time periods (centuries; Orlanski 1975; Hidore et al., 2010), whereas mesoclimates refer to geographic locations with specific physical conditions regulating relatively homogeneous weather patterns (Hidore et al., 2010). In contrast, microclimates are the result of fine-scale variations of meteorological parameters such as air temperature and humidity close to the ground (Geiger et al., 1995). Air temperature in microclimates is influenced by multiple biophysical attributes, including topography and vegetation (Geiger et al., 1995; Dobrowski, 2011). Air temperature decreases with elevation at an adiabatic coefficient of approximately $-6.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (Lee, 1978) that varies seasonally and geographically (Du et al.,

2018; Navarro-Serrano et al., 2020). The slope and its orientation (aspect) influence the amount of precipitation (Lee, 1978; Houze, 2012) and sunlight reaching the ground (Geiger et al., 1995; Fu, 2000; Tian et al., 2001), which also affect temperature. Tree branches and leaves block sunlight, trap the heat from longwave radiation (Geiger et al., 1995; De Frenne et al., 2021; Klein et al., 2021), and intercept wind and precipitation (Aussenac et al., 2000; Huerta et al., 2019). The canopy thus buffers temperature variations in the understory, resulting in colder and warmer temperatures in summer and winter, respectively, compared to more open areas (De Frenne et al., 2019). Similar mechanisms are at play during the transition from day to night, with air temperatures in forests decreasing less rapidly than in more open areas (Granberg et al., 1993; De Frenne et al., 2021), and this process is then reversed at sunrise.

The study of thermal refugia offered by microclimates (microrefugia) has gained popularity among animal ecologists (Gilbert et al., 2022; McGinn et al., 2023), largely due to the advent of new technologies. Modern data loggers can record precise temperatures at higher frequencies and for longer periods compared to older generations of equipment (Zellweger et al., 2019). Due to their limited range of detection, however, a large quantity of data loggers may need to be deployed to cover the habitat of wide-ranging animals, and monitoring schedules are constrained by battery life. In contrast, remote sensing tools such as MODIS (Wan et al., 2021) or climate reanalyses such as ERA5 (Muñoz Sabater, 2019) allow researchers to explore climatic and structural variables over most emerged land surfaces of the world. Reanalysis data are available at increasingly fine temporal scales (Vandewiele et al., 2023) and for historical periods going as far back as the 1950s. Nevertheless, their relatively coarse spatial resolution may hinder the measuring of temperatures at the scale of microclimates.

The European Center for Medium-Range Weather Forecast's (ECMRWF) latest ERA5-Land product (Muñoz Sabater, 2019) provides hourly information about air temperature and other environmental variables, such as incoming solar radiation, at a resolution of $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, from 1950 to 5 days prior to the consultation date. Daily and monthly temperature averages from this dataset have been successfully validated with data

from weather stations (Vanella et al., 2022; Clelland et al., 2024; Gheysari et al., 2024), mainly in the context of agricultural sciences. ERA5-Land data have been used to describe macro- to mesoclimate temperatures (Vanella et al., 2022), and some authors have relied on temperature differences between ERA5-Land and microclimate measurements as a comparative metric to assess the buffering capacity of different forest types (Auvinen et al. 2024; Santos et al. 2024). Despite these advancements, to our knowledge no studies have yet quantified the benefits of including ERA5-Land data in fine-scale predictions of above-ground air temperatures; this investigation would be particularly relevant for the management of species potentially threatened by climate change. Furthermore, most studies have focused on small temporal scales (i.e., a few months) rather than the whole year (McGinn et al., 2023) or have ignored the effect of vegetation cover (Rivrud et al., 2010). The interplay between temperature and cover could be key to our understanding of the thermal landscape in which animals live year-round, as shown by Lessard et al. (2025) at a relatively coarse spatial scale.

In this study we assessed how different vegetation associations and topographical conditions influenced air temperatures close to the ground at very fine spatial scales and over the entire year. Moreover, we explored how ERA5-Land could improve the fit of models developed using data from *in situ* loggers. We addressed these objectives in the range of a boreal population of woodland caribou (*Rangifer tarandus caribou*; hereafter boreal caribou), a cold-adapted ungulate that can show signs of heat stress when air temperatures rise above 12 °C (see Kolloen, 2015 for the Svalbard reindeer, *R. t. platyrhynchus*). Like all mammals, they also need to expend energy for thermoregulation at very cold temperatures (Angilletta, 2009). Boreal caribou are declining due to the negative impacts of human disturbance, and alterations to their thermal landscape resulting from climate change could further threaten their long-term persistence.

MATERIAL AND METHODS

Study area

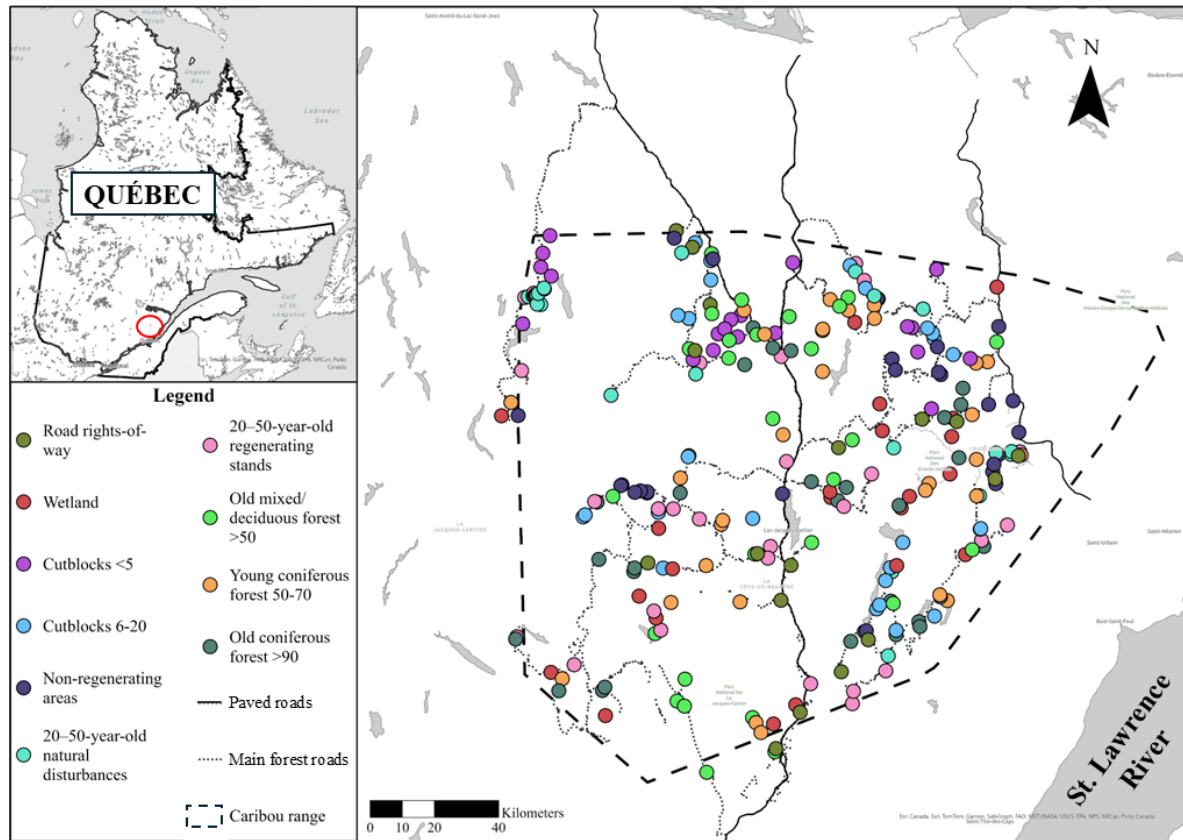


Figure 1: Study area in Québec, Canada, where 273 data loggers were deployed to measure above-ground air temperature in the range of the Charlevoix boreal caribou. Data loggers were distributed across multiple combinations of land cover types (see legend), elevation, and aspect (not represented here).

The study area covered approximately 6,000 km² and encompassed the range of the Charlevoix boreal caribou herd, a reintroduced population at the southern edge of the species' distribution in Québec, Canada (St-Laurent and Dussault, 2012; Fig. 1). In this region, elevation ranges between 400 and 1,100 m, and the area is characterized by rolling topography with multiple hills and valleys. Valleys are dominated by balsam fir (*Abies balsamea*) and yellow birch (*Betula alleghaniensis*), whereas higher elevations are dominated by black spruce (*Picea mariana*) and balsam fir. The area receives between 1,000

and 1,600 mm of precipitation each year, half of it as snow (Environment and Climate Change Canada, 2023). July is the warmest month of the year and January the coldest. Average temperatures reach 13.5 and -13.7 °C during summer and winter, respectively. During the 1981–2010 period, temperature extremes ranged between -42.0 and 33.9 °C (Environment and Climate Change Canada, 2023).

Data collection

a) Logger data

We measured above-ground air temperature using DS1922L-F5 thermochron (iButton) 8K data loggers (Maxim Integrated, San José, USA), which have an accuracy of 0.5 °C and a temperature range of -40 to 85 °C. We programmed loggers to record the temperature every 210 minutes (3½ h) for their entire battery life, which was expected to last >2 years. Using a method inspired by Zellweger et al. (2019), we placed each data logger between two pieces of insulating foam (SOPRA-XPS 30 by Soprema, Drummondville, Canada) inside a white plastic pill jar (S17037 by Uline, Pleasant Prairie, USA) to buffer against solar radiation. We attached jars to living trees approximately 2 m above the ground to avoid having them completely covered by snow during winter (Suppl. Mat. 1).

We sought to distribute loggers over a wide variety of environmental conditions. To do so, we used 1:20,000 annual ecoforest maps published by the Québec government. Based on photo interpretation, these maps characterized forest stands according to various variables, the most important of which (for our study) are species composition, density, type of disturbance, and age class. These maps group trees into 20-year age classes, identified by their average value; for example, a 70-year-old stand contains trees between 60 and 80 years of age. We thus used these variables to regroup polygons into 11 land cover types, largely inspired by previous studies describing caribou habitat selection in the same region (Leblond et al., 2011; Leclerc et al., 2014): old coniferous forests (≥ 90 years old), young coniferous forests (50–70 years old), old mixed/deciduous forests (≥ 50 years old), open woodlands (low-density coniferous stands favorable to lichen growth), wetlands, ≤ 5 -year-old cutblocks, 6–20-year-old cutblocks, 20–50-year-old natural disturbances (i.e., fires, windthrows, spruce

budworm *Choristoneura fumiferana* outbreaks), 20–50-year-old regenerating stands, non-regenerating areas (i.e., where forests did not re-establish >20 years after a disturbance), and road rights-of-way. During field work, open woodlands were scarcer than expected and most were inaccessible, so we ended up removing this category. We generated three evenly weighted elevation classes from the frequency distribution of raw values: 251–725 m (‘low’ elevation), 726–825 m (‘intermediate’), and 826–1156 m (‘high’). We also generated two aspect classes: ‘North, Northeast, East’ (N_NE_E), and ‘South, Southwest, West’ (S_SW_W), which receive contrasting levels of sunlight at that latitude. These 10 land cover types, 3 elevation classes, and 2 aspect classes generated 60 combinations ($10 \times 3 \times 2$) in which we sought to place 4 to 5 data loggers.

To maximise efficiency during the deployment of data loggers, we used a GIS to generate 300 m buffer strips on each side of access roads and randomly picked 5 locations within each of the land cover–elevation–aspect combinations that fell inside that buffer. This allowed to limit travel in difficult terrain, but we also made sure that locations were >50 m away from roads to reduce edge effects (Boucher et al., 2011). In 13 locations we installed a second logger to assess the variability in temperature measurement across loggers, which we used as an estimate of their accuracy. We also placed one logger next to a weather station for validation purposes. We installed 89 loggers in July 2020 and 184 in July 2021 and retrieved them in July 2022 and August 2023, respectively. Seven data loggers were lost (six when the forest stand in which they were installed was harvested by a forestry company, and one completely lost) and two malfunctioned. In the end we used data from 264 data loggers, including 250 for modelling and 14 for validation purposes.

Upon collecting data loggers from the field, we removed values colder than the minimum tolerance of the device ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$). For three data loggers, we also detected long, stable periods with values $\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ during the winter of 2021–2022. We censored these data, as we suspected they were caused by the units being entirely covered by snow. Finally, we rounded the measurement times of the data loggers to the nearest hour to match data provided by ERA5-Land.

b) ERA5-Land data

ERA5 is a global climate reanalysis of the atmosphere at a 30 x 30 km resolution (Hersbach et al., 2023), while ERA5-Land is a higher resolution version specialized on land surface processes. ERA5-Land is therefore a reanalysis combining land components with meteorological forcing derived from ERA5 surface climate data, and with a finer spatiotemporal resolution. It thus provides a continuous record of land surface meteorological variables from January 1950 to near-present, with an hourly temporal resolution and a spatial resolution of $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ (approximately 9×9 km). Empirical data influence ERA5-Land indirectly through the ERA5 atmospheric forcing, which is derived from the assimilation of global observational datasets. The land surface in ERA5-Land represents the interface between the atmosphere and the terrestrial environment, including soil, vegetation, snow, and surface water, where exchanges of energy and moisture are simulated by the land surface model. ERA5-Land relies on several fixed surface fields (e.g. lake cover and depth, soil type, vegetation type). Consequently, each ERA5-Land grid cell is associated with a single vegetation type, whose properties vary only according to a prescribed, repeating seasonal cycle that is constant across years (Munoz-Sabatier et al., 2021).

Hourly ERA5-Land air temperature data at 2 m above the land surface were extracted at the location of each data logger using Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017). Surface net solar radiation was also extracted and converted from J m^{-2} to MJ m^{-2} . ERA5-Land timestamps were adjusted to match the time zone of the data loggers (UTC-4). Given the spatial resolution of ERA5-Land, multiple data loggers were often associated with the same ERA5-Land grid cell.

c) Environmental covariates

We extracted precise elevation, slope angle and slope orientation at the location of each data logger using the High-Resolution Digital Elevation Model by Natural Resources Canada (2023) with a 2 m resolution. Following Bennie et al. (2010), we measured relative elevation, i.e., the difference between the elevation at the location of the data logger and the lowest

elevation in a 500 m radius. We used the equations below to transform time of day (Eq. 1 and 2) and slope orientation (Eq. 3 and 4) into radians, thereby accounting for their circularity (Cox, 2006).

$$\text{Eq. 1: } \cos\left(\frac{2\pi h}{24}\right)$$

$$\text{Eq. 2: } \sin\left(\frac{2\pi h}{24}\right)$$

$$\text{Eq. 3: } \cos\left(\frac{2\pi\theta}{360}\right)$$

$$\text{Eq. 4: } \sin\left(\frac{2\pi\theta}{360}\right)$$

where h = hour (ranging from 0 to 23) and θ = slope orientation (ranging from 0 to 359).

Data analysis

To assess the accuracy of data loggers, we performed a Pearson correlation test on each set of duplicate data collected in the 13 sites where we had placed two loggers. We also used Pearson correlation to compare the data collected by the logger placed close to a weather station and the data from that station. We report the average Pearson correlation coefficient of each pair across all hourly measurements over the study period.

We built several candidate models to assess the effect of different environmental covariates and ERA5-Land data on variations in above-ground air temperature measured by data loggers across the study area. A first set of candidate models used local variables describing topography (elevation, slope angle, slope orientation, and relative elevation), time of day (hours), and land cover types as covariates (models Local.1 to 12 in Table 1). A second set of models combined local variables and ERA5-Land temperatures (models ERA5-L.T.1 to 7 in Table 1), and a third set combined local variables, ERA5-Land temperatures, and ERA5-Land solar radiation (models ERA5-L.T.+Sol.1 to 6 in Table 1) to assess whether reanalysis data improved model fit. The most parameterized models from these sets also

included interactions between land cover types and elevation, time of day, or ERA5-Land temperatures.

We ran mixed-effect linear models using the *lmer* function (Bates et al., 2015) in R (R Core Team, 2023) separately for each month of the year. The 10 land cover types were dummy variables, and we used old coniferous forests as the reference category. We included the ID of data loggers and year as random intercepts in all models. We checked model assumptions using the *check_model* function (Lüdtke et al., 2021) and selected the most parsimonious model for each month using Akaike's Information Criterion (AIC; Zuur et al., 2007). We used R^2 to assess the fit of the most parsimonious models and the *predict* function in R to plot the effects of time of day and land cover types while fixing the influence of other covariates at their average values. We calculated 95% confidence intervals by performing model-based bootstrap with the *bootMer* function in R (Bates et al., 2015).

Table 1: Candidate models used to assess the effect of various vegetation, topographic, and climatic variables on above-ground air temperatures measured by data loggers. ERA5-L T° is the temperature at 2 m above the ground based on ERA5-Land reanalyses. Land cover types were old coniferous forests (≥ 90 years), young coniferous forests (50–70 years), old mixed/deciduous forests (≥ 50 years), wetlands, ≤ 5 -year-old cutblocks, 6–20-year-old cutblocks, 20–50-year-old natural disturbances, 20–50-year-old regenerating stands, non-regenerating areas, and road rights-of-way. The number of parameters in a model is represented by k.

Models	Covariates	k
Local.1	Elevation	5
Local.2	Aspect	6
Local.3	Elevation + Aspect	7
Local.4	Elevation + Relative elevation	6
Local.5	Elevation + Relative elevation + Aspect + Slope	9
Local.6	Elevation + Time of day	7
Local.7	Time of day + Land cover types	15
Local.8	Elevation + Time of day + Land cover types	16
Local.9	Elevation + Relative elevation + Aspect + Slope + Time of day	11
Local.10	Elevation + Relative elevation + Aspect + Slope + Time of day + Land cover types	18
Local.11	Elevation + Time of day + Land cover types + Elevation x Land cover types	26
Local.12	Elevation + Time of day + Land cover types + Time of day x Land cover types	34
ERA5-L.T.1	ERA5-L T°	5
ERA5-L.T.2	ERA5-L T° + Elevation	6
ERA5-L.T.3	ERA5-L T° + Elevation + Time of day	8
ERA5-L.T.4	ERA5-L T° + Elevation + Time of day + Land cover types	17
ERA5-L.T.5	ERA5-L T° + Elevation + Time of day + Land cover types + Time of day x Land cover types	35
ERA5-L.T.6	ERA5-L T° + Elevation + Time of day + Land cover types + Time of day x Land cover types + ERA5-L T° x Land cover types	44
ERA5-L.T.7	ERA5-L T° + Elevation + Time of day + Land cover types + Aspect + Time of day x Land cover types + ERA5-L T° x Land cover types	46

ERA5-L.T.+Sol.1	ERA5-L T° + Elevation + Solar radiation	7
ERA5-L.T.+Sol.2	ERA5-L T° + Elevation + Time of day + Solar radiation	9
ERA5-L.T.+Sol.3	ERA5-L T° + Elevation + Time of day + Land covers + Solar radiation	18
ERA5-L.T.+Sol.4	ERA5-L T° + Elevation + Time of day + Land cover types + Time of day x Land cover types + Solar radiation	36
ERA5-L.T.+Sol.5	ERA5-L T° + Elevation + Time of day + Land cover types + Solar radiation + Time of day x Land cover types + ERA5-L T° x Land cover types	45
ERA5-L.T.+Sol.6	ERA5-L T° + Elevation + Aspect + Time of day + Land cover types + Solar radiation + Time of day x Land cover types + ERA5-L T° x Land cover types	47

RESULTS

The Pearson correlations linking temperatures measured by the 13 pairs of data loggers that had been placed at the same sites were very strong (average = 0.999 ± 0.001 standard deviation, SD), as was the Pearson correlation between temperature values recorded by one data logger and the Montmorency weather station (0.977; see Suppl. Mat. 2), suggesting that data logger measurements were consistent and representative of the precision and accuracy of a weather station.

For all months except November, the most parsimonious models combined land cover types, time of day (as sines and cosines), elevation, temperature and solar radiation from ERA5-Land, and interactions between land cover types and time of day or ERA5-Land temperature (ERA5-L.T.+Sol.5, Table 2). In November this model did not converge; instead, the most parsimonious model for this month included all the same variables but excluded solar radiation (ERA5-L.T.6, Table 2). Model adjustment (conditional R^2 values) for the most parsimonious models varied between 0.864 and 0.916 (Suppl. Mat. 3), suggesting a good fit to the data. Models with local variables only (Local.1 to 12) had the lowest AIC scores, lower than the model containing ERA5-Land temperature only (ERA5-L.T.1; Table 2).

Closed-canopy land cover types, namely old and young coniferous forests, old mixed/deciduous forests, and 20–50-year-old regenerating stands were up to 4 °C cooler during the day and warmer at night than open-canopy land cover types such as wetlands, cutblocks, and road rights-of-way (Fig. 2–4). These daily variations were more pronounced during summer but remained across all months. Among closed-canopy land cover types, old mixed/deciduous forests were 1 °C cooler during the day (summer only, Fig. 2) and 1 °C warmer at night (summer and winter, Figs. 2–3) compared to both types of coniferous forests. Wetlands showed the strongest daily variations of all land cover types: they were always the coolest land cover type at night (up to 2° C cooler than the second coolest), and the warmest during the day (up to 1.5 °C warmer than the second warmest; Figs. 2-4).

Among the topographical variables tested, elevation was the only one that contributed to explain variations in temperatures recorded by data loggers. Its effect was significant for all months, with an adiabatic coefficient range of -0.6 to -2.2 °C/km depending on the month (Suppl. Mat. 4). Solar radiation was in the most parsimonious model for all months, except November, and generally helped improve model fit, albeit only slightly (Table 2). Solar radiation was positively related to the temperature measured by data loggers (Suppl. Mat. 3).

Interactions between ERA5-Land temperature and land cover types were significant for most land cover types across all months; young coniferous forests, regenerating stands and road rights-of-way were the exception, generally showing no effect (Suppl. Mat. 4). From April to September, predicted temperatures in ≤ 5 -year-old cutblocks were 2–6 °C warmer than in closed-canopy land cover types (Suppl. Mat. 5). During fall, winter, and spring, differences in temperature between land cover types could reach 2–3°C during periods of extreme lows or extreme highs, but were much less pronounced at intermediate temperatures.

Table 2: Candidate models ranked by AIC for each month with their R2 (rank|R2, with rank 1 = most parsimonious). “NA” means that the model did not converge. “=” means ΔAIC was <2 .

Models	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Local.1	21 0.31	21 0.03	20 0.03	21 0.06	23 0.03	22 0.03	21 0.14	22 0.18	21 0.05	22 0.20	20 0.02	20 0.39
Local.2	25 0.31	25 0.03	25 0.03	25 0.06	25 0.03	25 0.03	25 0.14	25 0.18	25 0.05	24 0.20	24 0.02	24 0.39
Local.3	23 0.31	23 0.03	22 0.03	23 0.06	24 0.03	23 0.03	23 0.14	23 0.18	23 0.05	23 0.20	21 0.02	22 0.39
Local.4	20 0.31	20 0.03	21 0.03	22 0.06	21 0.03	21 0.03	22 0.14	21 0.18	20 0.05	19 0.20	19 0.02	19 0.39
Local.5	22 0.31	22 0.03	23 0.03	24 0.06	22 0.03	24 0.03	24 0.14	24 0.18	24 0.05	20 0.20	22 0.02	21 0.39
Local.6	15 0.36	15 0.11	15 0.15	16 0.29	17 0.36	16 0.36	16 0.53	16 0.48	16 0.28	16 0.33	14 0.04	14 0.44
Local.7	18 0.36	19 0.11	19 0.15	19 0.29	19 0.36	19 0.36	19 0.53	19 0.48	19 0.28	18 0.33	18 0.04	18 0.44
Local.8	17 0.36	17 0.11	16 0.15	15 0.29	15 0.36	15 0.36	15 0.53	15 0.48	15 0.28	15 0.33	15 0.04	16 0.44
Local.9	16 0.36	16 0.11	17 0.15	17 0.29	16 0.36	17 0.36	17 0.53	17 0.48	17 0.28	14 0.33	16 0.04	15 0.44
Local.10	24 0.31	24 0.03	24 0.03	20 0.06	20 0.03	20 0.03	20 0.14	20 0.18	22 0.05	21 0.20	23 0.02	23 0.39
Local.11	19 0.36	18 0.11	18 0.15	18 0.29	18 0.36	18 0.36	18 0.53	18 0.48	18 0.28	17 0.33	17 0.04	17 0.44
Local.12	14 0.36	14 0.11	14 0.16	14 0.30	14 0.37	14 0.37	14 0.54	14 0.50	14 0.29	13 0.34	13 0.05	13 0.44
ERA5-L.T.1	12 0.91	12 0.91	13 0.90	13 0.86	12 0.86	13 0.85	13 0.84	12 0.85	12 0.85	12= 0.88	12 0.94	12= 0.91
ERA5-L.T.2	13 0.91	13 0.91	12 0.90	12 0.86	13 0.86	12 0.85	12 0.84	13 0.86	13 0.85	12= 0.88	10 0.94	12= 0.91
ERA5-L.T.3	11 0.91	9 0.91	10 0.90	10 0.86	10 0.86	10 0.86	10 0.85	10 0.86	9 0.86	9 0.88	6 0.94	10 0.91
ERA5-L.T.4	10 0.91	10 0.91	11 0.90	11 0.86	9 0.86	9 0.86	9 0.85	9 0.86	10 0.86	10 0.88	8 0.94	11 0.91
ERA5-L.T.5	6 0.91	6 0.91	6 0.90	6 0.87	6 0.87	6 0.87	6 0.86	6 0.87	6 0.86	6 0.89	4 0.94	6 0.92
ERA5-L.T.6	4 0.91	4 0.91	4 0.90	4 0.87	4 0.87	4 0.87	4 0.86	3 0.87	3 0.86	3 0.89	1 0.94	3 0.92
ERA5-L.T.7	5 0.91	5 0.91	5 0.90	5 0.87	5 0.87	5 0.87	5 0.86	4 0.87	4 0.86	4 0.89	2 0.94	4 0.92
ERA5-L.T.+Sol.1	9 0.91	11 0.91	9 0.90	9 0.87	11 0.86	11 0.86	11 0.85	11 0.86	11 0.85	11 0.88	11 0.94	9 0.91
ERA5-L.T.+Sol.2	8 0.91	7 0.91	7 0.90	7 0.87	8 0.87	8 0.86	8 0.85	8 0.86	7 0.86	7 0.88	7 0.94	7 0.91

ERA5- L.T.+Sol.3	7 0.91	8 0.91	8 0.90	8 0.87	7 0.87	7 0.86	7 0.85	7 0.86	8 0.86	8 0.88	9 0.94	8 0.91
ERA5- L.T.+Sol.4	3 0.91	3 0.91	3 0.90	3 0.87	3 0.87	3 0.87	3 0.86	5 0.87	5 0.86	5 0.89	5 0.94	5 0.92
ERA5- L.T.+Sol.5	1 0.91	1 0.91	1 0.90	1 0.87	1 0.87	1 0.87	1 0.86	1 0.87	1 0.86	1 0.89	NA	1 0.92
ERA5- L.T.+Sol.6	2 0.91	2 0.91	2 0.90	2 0.87	2 0.87	2 0.87	2 0.86	2 0.87	2 0.86	2 0.89	3 0.90	2 0.92

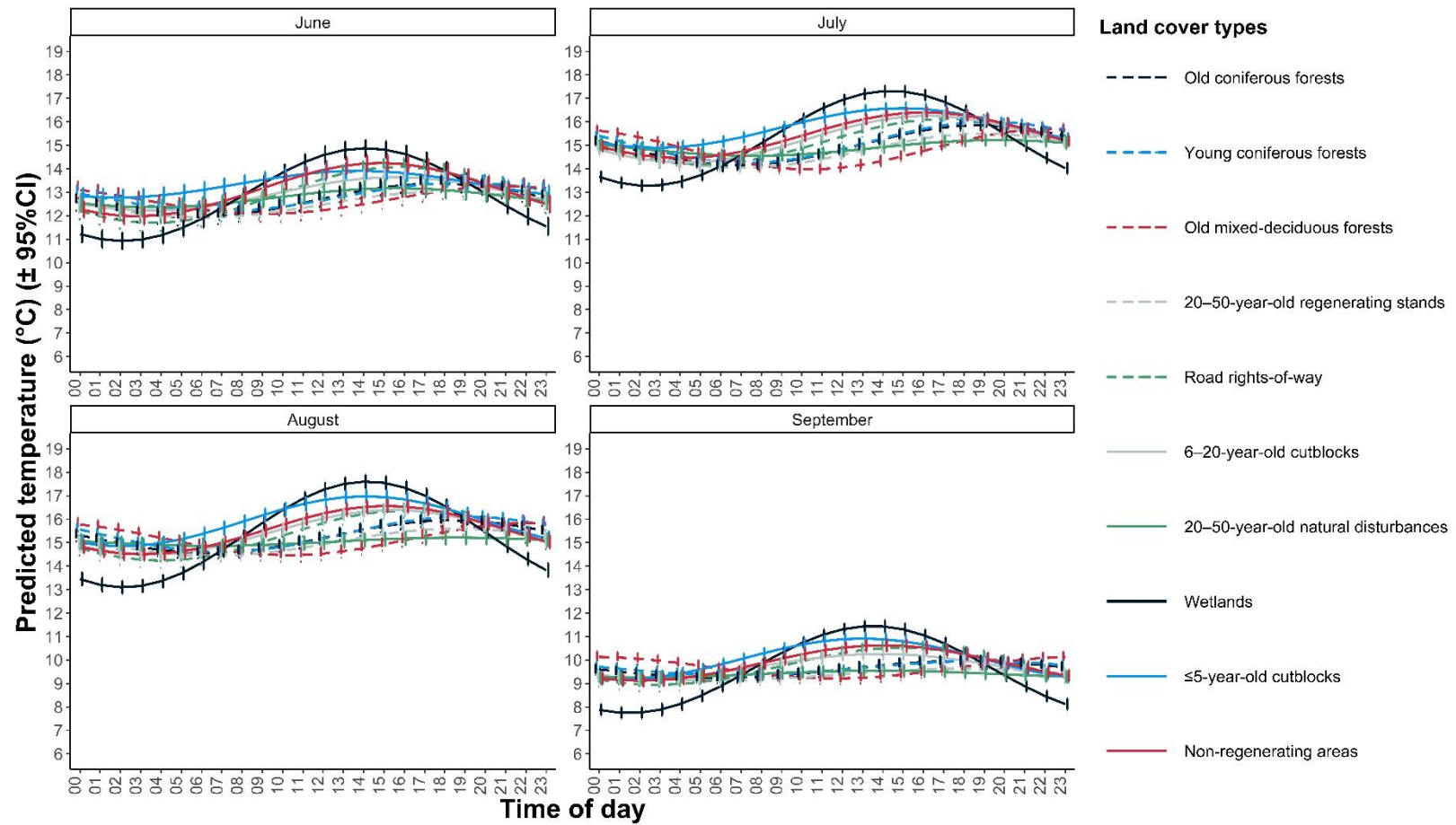


Figure 2: Variations in the predicted mean of above-ground air temperature (\pm 95% confidence intervals) as a function of time of day and land cover types during the summer months (June-September).

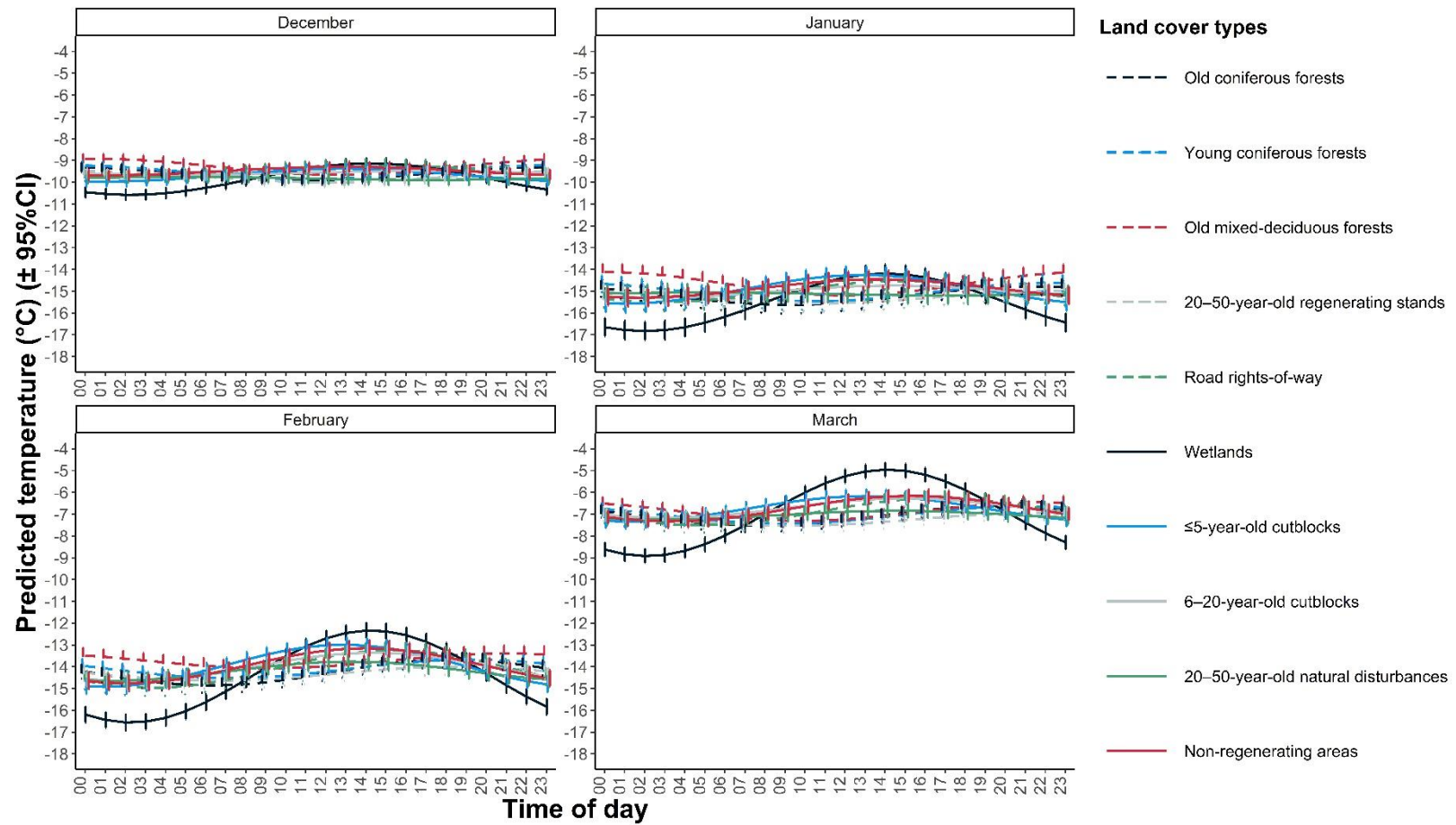


Figure 3: Variations in the predicted mean of above-ground air temperature (\pm 95% confidence intervals) as a function of time of day and land cover types during the winter months (December-March).

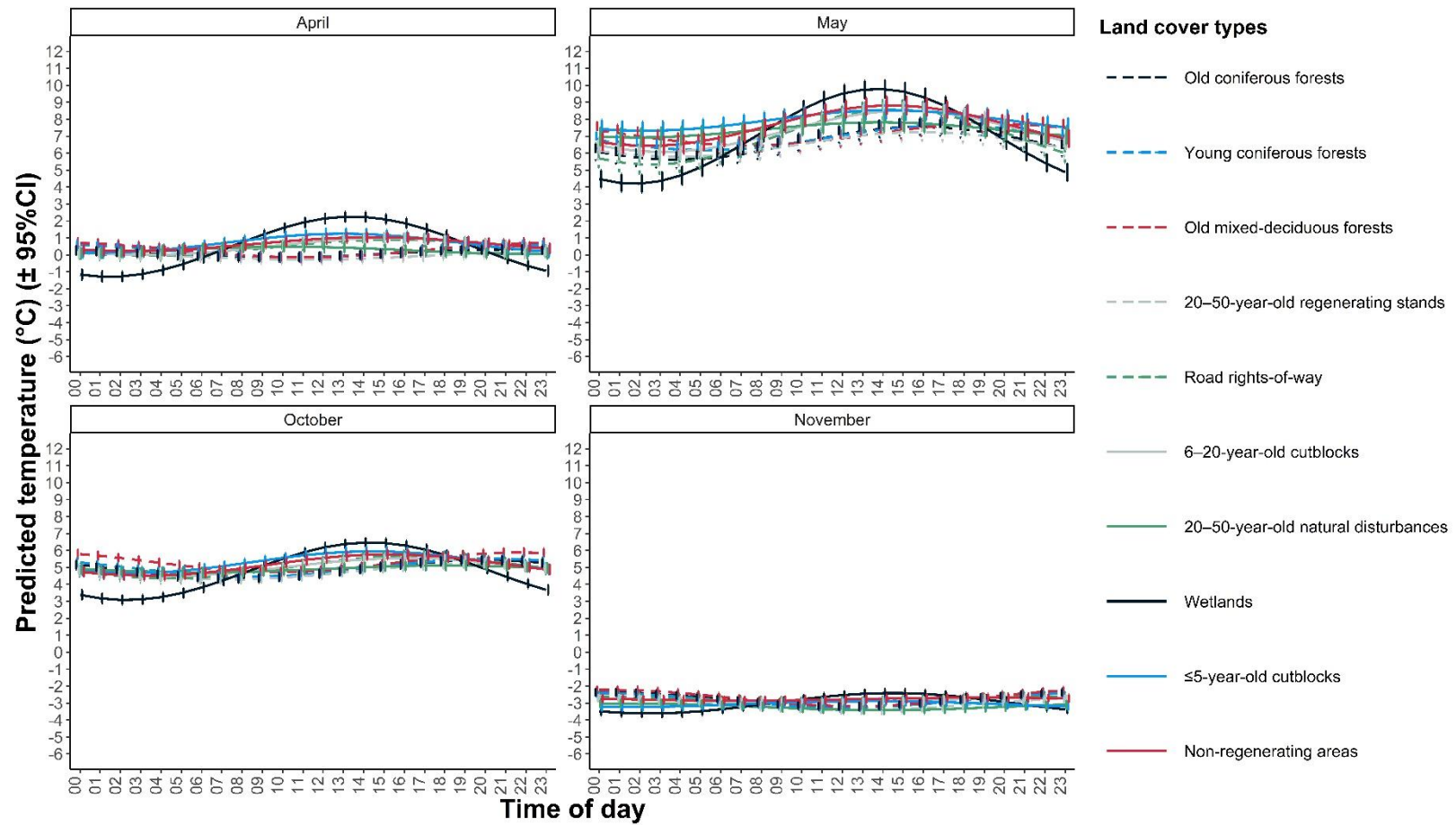


Figure 4: Variations in the predicted mean of above-ground air temperature (\pm 95% confidence intervals) as a function of time of day and land cover types during the spring (April-May) and autumn months (October-November).

DISCUSSION

We were successful in identifying combinations of land cover, topographical, and weather variables that were representative of thermal refugia in the habitat of a large wildlife species living in a heterogenous landscape. We also demonstrated how climate reanalysis data could improve our capacity to identify potential thermal refugia by improving predictions of local above-ground air temperatures.

Land cover types had a strong influence on variations in above-ground air temperature, stronger than topographic variables, a finding that is in accordance with results by Greiser et al. (2018). Temperatures predictably varied along a gradient of canopy openness, with open areas being warmer during the day, and cooler at night—especially in summer. Site characteristics are known to influence microclimate, with open areas being more exposed to weather conditions (i.e., sun, wind, precipitation) compared to closed-canopy forests where dense vegetation accumulates heat or catches sun rays (De Frenne et al., 2021; Frey et al., 2016). In addition to canopy closure, Frey et al. (2016) showed that the high biomass and structural complexity of the forest understory (e.g., high densities of live or dead trees, fallen logs, or underbrush) buffered temperature more so than open areas. In our study, old mixed/deciduous forests were cooler during the day and warmer at night compared to both classes of coniferous forests, and we suspect that this was caused by the sparser sub-canopy shrub layer present in these stands compared to coniferous forests. Deciduous forests also have a higher albedo compared to coniferous forests (Lukeš et al., 2013); as such, the lower daytime temperatures in old mixed/deciduous forests could be the result of a higher dissipation of heat through the canopy. Still, the differences in temperature between old mixed/deciduous forests and coniferous forests were relatively small in our study (≤ 1 °C), supporting results by Díaz-Calafat et al. (2023).

The largest daily variations in above-ground air temperatures were in wetlands, which were also the most open land cover type in our study area. The absence of trees in wetlands means that sun rays reach the ground directly during the day, and heat is quickly released at night. Moreover, wetlands are often located in lowlands, where cold air accumulates at night;

their low elevation also makes them warmer during the day, compared to upland forests (Geiger et al., 2009).

Monthly variations in temperature

Variations in above-ground air temperatures across land cover types and throughout the daily cycle were dampened during the coldest months of fall, winter and spring (November to April). During winter, solar radiation hits the ground at a lower angle and for a shorter period of time, and snow-covered surfaces exhibit high albedo, limiting the amount of energy that reaches the ground (Hall, 2012). In our study area, snow accumulation begins as early as November and can last until early May, explaining the relative homogenization of air temperatures across land cover types during that period. This difference in solar radiation intensity also influences the effect of vegetation, as demonstrated by Zellweger et al. (2019) who reported that the temperature difference between open areas and closed-canopy forests reached 2.1 °C on average in summer but only 0.4 °C in winter.

Effect of topography

Elevation had a small but significant effect on variations in above-ground air temperature in our study. As predicted, temperature decreased with elevation, resulting in higher temperatures in valley bottoms than on summits. Studies conducted in boreal forest along a relatively similar elevation gradient have also detected the influence of elevation at the scale of microclimates (Vanwalleghem and Meentemeyer, 2009; Meineri et al., 2015; Greiser et al., 2018; Macek et al., 2019). We excluded relative elevation and slope orientation from more complex models because they were clearly outperformed by elevation. We used aspect classes in this study to help with the deployment of data loggers across the most diverse set of conditions possible, and because of this we decided to include slope orientation as a variable in our models. In the end, solar radiation from ERA5-Land, when put in combination with other local-scale topographical variables, proved to be a much better measure of the energy reaching the ground compared to slope orientation. In fact, except for November, adding solar radiation in models always improved AIC scores.

Contribution of ERA5-Land

Models combining local variables and ERA5-Land temperature always outperformed models composed of local variables only, and always had a better fit (i.e., R^2). The ERA5-Land-only model consistently outperformed models relying solely on local variables, although it still fell short of the more complex models that incorporated both *in situ* and remote-sensed variables. The strong performance of ERA5-Land-based models is consistent with the hierarchical nature of temperature drivers, whose effects can be measured across a wide range of scales. This underscores the strong standalone effect of ERA5-Land, while also highlighting the added benefit of integrating local variables for obtaining good estimates of local above-ground air temperatures.

It was reassuring to see that temperatures measured by ERA5-Land and data loggers followed the same trend. These results echo those of Vanella et al. (2022), who, using 66 points of comparison over 12 years, showed that ERA5-Land data could be used to accurately predict the temperature measured by weather stations. However, local variables helped explain the residual variation that remained after accounting for the large-scale meteorological signals captured by ERA5-Land.

Studies have shown that ERA5-Land tended to underestimate maximum temperatures and overestimate minimum ones (Clelland et al., 2024; Gheysari et al., 2024). In our study, temperatures could differ by up to 6 °C among land cover types found within the same ERA5-Land grid cell. We surmise that it is the combination of data from both *in situ* loggers and climate reanalyses that should provide the best estimates of temperatures in microrefugia.

Limits and perspectives

In our attempt to identify thermal refugia in wildlife habitat, we focused our attention on just one facet of microclimate, i.e., above-ground air temperature. We recognize that (micro)climates are influenced by several other factors such as humidity, wind speed, precipitation, or snow cover (Lee, 1978; Geiser et al., 2009). For instance, high concentrations of water vapor in the air can reduce the evaporation of sweat and subsequent cooling of the body (Luber and McGeehin, 2008; Mitchell et al., 2018). Estimates of

operative temperature, i.e., the integrated measure of radiative and convective heat exchanges between the animal and its environment (Bakken, 1976), would better inform on the conditions perceived by animals than measures of air temperature do, but would require animal models mimicking an individual's body size, heat conductivity, and insulation (Dzialowski 2005). This would be a challenging metric to obtain for a large mammal such as caribou. Nevertheless, above-ground air temperature remains one of the most studied metrics of microclimates and is a valuable indicator of an animal's thermal environment (Dussault et al., 2004; Thompson et al., 2021; Stark et al. 2022; Stark et al., 2023). Finally, our pairing of local and remote-sensed data forced us to round local measures to the nearest hour, which involved a time lag of up to 30 minutes. This time lag could be significant during periods of quick temperature drops or peaks, such as at dawn or dusk, but was likely negligible during mid-day/night hours.

Implications for conservation

We showed that older mixed/deciduous and coniferous forests (i.e., >50 years old) dampened variations in air temperature during summer, providing cooler microclimatic conditions compared to more open areas. In winter, open areas such as wetlands accumulated a lot of heat during the day, providing warmer conditions compared to closed-canopy forests. Such land cover types could act as thermal refugia for wildlife, especially in the future as climate change intensifies.

For a cold-adapted species like caribou, coniferous forests could become particularly important during hot summer days. Lessard et al. (2025) showed that caribou selected more strongly for old coniferous forests when air temperatures increased. Moose (*Alces americana*), another large iconic ungulate of the Canadian boreal forest, also uses old-growth forests during warm days to regulate their body temperature (Renecker and Hudson, 1986; Dussault et al., 2004; Thompson et al., 2021). In addition to their relevance for thermoregulation, old coniferous forests are recognized as a crucial component of boreal caribou habitat, providing food and shelter from predation (Wittmer et al., 2007; Briand et al., 2008). Caribou populations already suffer from the consequences of habitat alteration and

loss (Festa-Bianchet et al., 2011), and climate change is expected to exacerbate their decline (Anderegg et al., 2013; Gauthier et al., 2015). Our findings suggest that protecting old coniferous forests could have the double benefit of providing suitable habitat to caribou while maintaining thermal refugia to cope with ongoing climate change. Importantly, these mature forests already play this dual role under current climate conditions, reinforcing the urgency of their conservation regardless of future warming trajectories.

Finally, we highlighted the benefits of using climate reanalyses for the prediction of local above-ground air temperature in wildlife habitat. This substantiates the use of climate reanalysis data in wildlife space use or distribution models, with the caveat that they did not replace, only complement, in situ measurements. Climate reanalyses could be used, if possible in combination with local data, to generate “heat maps” in the current, historical, or future distribution of thermally sensitive species. Given that caribou habitat selection patterns are influenced by temperature (Lessard et al., 2025), and that their time spent in any given area tends to decrease as temperatures increase in winter and spring (Leclerc et al., 2019), we believe that such heat maps could be integrated into habitat selection models (George et al., 2017; Alston et al., 2020; Green et al., 2025) to improve range planning for this species. Such tools could also be valuable for the creation of protection zones with high thermoregulatory potential for wildlife species (Elmore et al., 2017). Moreover, our results raise concerns about the negative impacts of recent cutblocks on the thermal landscape of caribou in a warmer future. While our study has direct implications for caribou conservation, it also provides a methodological protocol for the study of thermal microrefugia for other endotherms living in forested landscapes.

ACKNOWLEDGEMENT

We thank A. M. Berg, Y. Boulanger, A. Caron, L. Derguy, A. Dionne-Larin, R. Lacerte, G. de Lafontaine, K. Malcolm, L. Moulin, F. Saint-Pierre, and F. Vezina for their comments on previous versions of this manuscript. We also thank the Société des Établissements de Plein Air du Québec for giving us access to their parks. This project was

funded by Environment and Climate Change Canada and the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada through the Discovery Grants #2016-05196 and #2022-04307 to Martin-Hugues St-Laurent.

LITERATURE CITED

- Alston, J. M., Joyce, M. J., Merkle, J. A., & Moen, R. A. (2020). Temperature shapes movement and habitat selection by a heat-sensitive ungulate. *Landscape Ecology*, *35*, 1961-1973. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01072-y>
- Anderegg, W. R., Kane, J. M., & Anderegg, L. D. (2013). Consequences of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress. *Nature Climate Change*, *3*(1), 30-36. <https://doi.org/10.1038/nclimate1635>
- Angilletta, M. J. (2009). *Thermal adaptation: a theoretical and empirical synthesis*. Oxford University Press.
- Aussenac, G. (2000). Interactions between forest stands and microclimate: ecophysiological aspects and consequences for silviculture. *Annals of Forest Science*, *57*(3), 287-301. <https://doi.org/10.1051/forest:2000119>
- Auvinen, A. (2024). *Reforestation Scotland: The impact of different forest types on the formation of microclimates* [Master's thesis]. University of Helsinki, Helsinki.
- Bakken, G. S. (1976). A heat transfer analysis of animals: unifying concepts and the application of metabolism chamber data to field ecology. *Journal of Theoretical Biology*, *60*(2), 337-384. [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(76\)90063-1](https://doi.org/10.1016/0022-5193(76)90063-1)
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, *67*(1), 1-48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Bennie, J. J., Wiltshire, A. J., Joyce, A. N., Clark, D., Lloyd, A. R., Adamson, J., Parr, T., Baxter, R., & Huntley, B. (2010). Characterising inter-annual variation in the spatial pattern of thermal microclimate in a UK upland using a combined empirical–physical model. *Agricultural and Forest Meteorology*, *150*(1), 12-19. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.07.014>
- Berteaux, D., Réale, D., McAdam, A. G., & Boutin, S. (2004). Keeping pace with fast climate change: can arctic life count on evolution?. *Integrative and Comparative Biology*, *44*(2), 140-151. <https://doi.org/10.1093/icb/44.2.140>
- Boucher, Y., St-Laurent, M.-H., & Grondin, P. (2011). Logging-induced edge and configuration of old-growth forest remnants in the eastern North American boreal forests. *Natural Areas Journal*, *31*(3), 300-306. <https://doi.org/10.3375/043.031.0313>
- Briand, Y., Ouellet, J.-P., Dussault, C., & St-Laurent, M.-H. (2009). Fine-scale habitat selection by female forest-dwelling caribou in managed boreal forest: Empirical evidence of a seasonal shift between foraging opportunities and antipredator strategies. *Écoscience*, *16*(3), 330-340. <https://doi.org/10.2980/16-3-3248>

- Cain, J. W., Jansen, B. D., Wilson, R. R., & Krausman, P. R. (2008). Potential thermoregulatory advantages of shade use by desert bighorn sheep. *Journal of Arid Environments*, 72(8), 1518-1525. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2008.02.010>
- Campbell, L. A., Tkaczynski, P. J., Mouna, M., Derrou, A., Oukannou, L., Majolo, B., & Van Lavieren, E. (2018). Behavioural thermoregulation via microhabitat selection of winter sleeping areas in an endangered primate: implications for habitat conservation. *Royal Society Open Science*, 5(12), 181113. <https://doi.org/10.1098/rsos.181113>
- Clelland, A. A., Marshall, G. J., & Baxter, R. (2024). Evaluating the performance of key ERA-Interim, ERA5 and ERA5-Land climate variables across Siberia. *International Journal of Climatology*, 44(7), 2318–2342. <https://doi.org/10.1002/joc.8456>
- Cox, N. J. (2006). Speaking Stata: in praise of trigonometric predictors. *The Stata Journal*, 6(4), 561-579. <https://doi.org/10.1177/1536867X0600600408>
- Davimes, J. G., Alagaili, A. N., Bertelsen, M. F., Mohammed, O. B., Hemingway, J., Bennett, N. C., Bennett, N. C., & Gravett, N. (2017). Temporal niche switching in Arabian oryx (*Oryx leucoryx*): Seasonal plasticity of 24 h activity patterns in a large desert mammal. *Physiology & Behavior*, 177, 148-154. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2017.04.014>
- De Frenne, P., Zellweger, F., Rodríguez-Sánchez, F., Scheffers, B. R., Hylander, K., Luoto, M., Vellend, M., Verheyen, K., & Lenoir, J. (2019). Global buffering of temperatures under forest canopies. *Nature Ecology & Evolution*, 3(5), 744-749. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0842-1>
- De Frenne, P., Lenoir, J., Luoto, M., Scheffers, B.R., Zellweger, F., Aalto, J., Ashcroft, M.B., Christiansen, D. M., Decocq, G., De Pauw, K., Govaert, S., Greiser, C., Gril, E., Hampe, A., Jucker, T., Klinges, D. H., Koelemeijer, I. A., Lembrechts, J. J., Marrec, R., Meeussen, C., Ogée, J., Tyystjärvi, V., Vangansbeke, P., & Hylander, K. (2021). Forest microclimates and climate change: Importance, drivers and future research agenda. *Global Change Biology*, 27(11), 2279-2297. <https://doi.org/10.1111/gcb.15569>
- Díaz-Calafat, J., Uria-Diez, J., Brunet, J., De Frenne, P., Vangansbeke, P., Felton, A., Öckinger, E., Cousins, S.A.O., Bauhus, J., Ponette, Q., & Hedwall, P. O. (2023). From broadleaves to conifers: The effect of tree composition and density on understory microclimate across latitudes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 341, 109684. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109684>
- Dobrowski, S. Z. (2011). A climatic basis for microrefugia: the influence of terrain on climate. *Global Change Biology*, 17(2), 1022-1035. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02263.x>
- Du, M., Zhang, M., Wang, S., Zhu, X., & Che, Y. (2018). Near-surface air temperature lapse rates in Xinjiang, northwestern China. *Theoretical and Applied Climatology*, 131(3), 1221-1234. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2040-x>

- Dussault, C., Ouellet, J. P., Courtois, R., Huot, J., Breton, L., & Larochelle, J. (2004). Behavioural responses of moose to thermal conditions in the boreal forest. *Écoscience*, *11*(3), 321-328. <https://doi.org/10.1080/11956860.2004.11682839>
- Elmore, R. D., Carroll, J. M., Tanner, E. P., Hovick, T. J., Grisham, B. A., Fuhlendorf, S. D., & Windels, S. K. (2017). Implications of the thermal environment for terrestrial wildlife management. *Wildlife Society Bulletin*, *41*(2), 183-193. <https://doi.org/10.1002/wsb.772>
- Environnement and Climate Change Canada. 2023. *Climate Normals and Averages 1981-2010 Foret Montmorency station*. Canadian Climate Normals 1981-2010 Station Data. (Accessed on 29-09-2023).
- Festa-Bianchet, M., Ray, J. C., Boutin, S., Côté, S. D., & Gunn, A. (2011). Conservation of caribou (*Rangifer tarandus*) in Canada: an uncertain future. *Canadian Journal of Zoology*, *89*(5), 419-434. <https://doi.org/10.1139/z11-025>
- Frey, S. J., Hadley, A. S., Johnson, S. L., Schulze, M., Jones, J. A., & Betts, M. G. (2016). Spatial models reveal the microclimatic buffering capacity of old-growth forests. *Science Advances*, *2*(4), e1501392. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501392>
- Fu, P. (2000) A Geometric Solar Radiation Model with Application in Landscape Ecology [Ph.D. thesis]. University of Kansas.
- Fuller, A., Mitchell, D., Maloney, S. K., & Hetem, R. S. (2016). Towards a mechanistic understanding of the responses of large terrestrial mammals to heat and aridity associated with climate change. *Climate Change Responses*, *3*, 1-19. <https://doi.org/10.1186/s40665-016-0024-1>
- Gauthier, S., Bernier, P., Kuuluvainen, T., Shvidenko, A. Z., & Schepaschenko, D. G. (2015). Boreal forest health and global change. *Science*, *349*(6250), 819-822. <https://doi.org/10.1126/science.aaa9092>
- Geiger, R., Aron, R. H., & Todhunter, P. (1995). *The climate near the ground*. Rowman & Littlefield. <https://doi.org/10.1007/978-3-322-86582-3>
- Geiger, R., Aron, R. H., & Todhunter, P. (2009). *The climate near the ground* (7th ed.). Rowman & Littlefield.
- George, A. D., Connette, G. M., Thompson III, F. R., & Faaborg, J. (2017). Resource selection by an ectothermic predator in a dynamic thermal landscape. *Ecology and evolution*, *7*(22), 9557-9566. <https://doi.org/10.1002/ece3.3440>
- Gestich, C.C., Caselli, C.B. & Setz, E.Z.F. (2014), Behavioural Thermoregulation in a Small Neotropical Primate. *Ethology*, *120*(4), 331-339. <https://doi.org/10.1111/eth.12203>

- Gheysari, A.F., Maghoul, P., Ojo, E. R., & Shalaby, A. (2024). Reliability of ERA5 and ERA5-Land reanalysis data in the Canadian Prairies. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(4), 3087-3098. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04771-z>
- Gilbert, N. A., Anich, N. M., Worland, M., & Zuckerberg, B. (2022). Microclimate complexities at the trailing edge of the boreal forest. *Forest Ecology and Management*, 524, 120533. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120533>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Granberg, H. B., Ottosson-Löfvenius, M., & Odin, H. (1993). Radiative and aerodynamic effects of an open pine shelterwood on calm, clear nights. *Agricultural and Forest Meteorology*, 63(3-4), 171-188. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(93\)90059-Q](https://doi.org/10.1016/0168-1923(93)90059-Q)
- Green, B. R., Tanner, E. P., Chandler, R. B., Abernathy, H. N., Conner, L. M., Garrison, E. P., Shindle, D. B., Miller, K. V., & Cherry, M. J. (2025). Temperature influences resource selection and predation risk tolerance in a climate generalist. *Landscape Ecology*, 40(2), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s10980-025-02056-6>
- Greiser, C., Meineri, E., Luoto, M., Ehrlén, J., & Hylander, K. (2018). Monthly microclimate models in a managed boreal forest landscape. *Agricultural and Forest Meteorology*, 250, 147-158. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.252>
- Habibullah, M. S., Din, B. H., Tan, S. H., & Zahid, H. (2022). Impact of climate change on biodiversity loss: global evidence. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(1), 1073-1086. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15702-8>
- Hall, D. (2012). *Remote sensing of ice and snow*. Springer Science & Business Media.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. (2023): ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). [10.24381/cds.adbb2d47](https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47)
- Hidore, J. J., Snow, M. B., Snow, R. E., & Oliver, J. E. (2010). *Climatology: an atmospheric science* (3rd ed.). Prentice Hall.
- Houze Jr, R. A. (2012). Orographic effects on precipitating clouds. *Reviews of Geophysics*, 50(1). <https://doi.org/10.1029/2011RG000365>
- Huerta, M. L., Molotch, N. P., & McPhee, J. (2019). Snowfall interception in a deciduous Nothofagus Forest and implications for spatial snowpack distribution. *Hydrological Processes*, 33(13), 1818-1834. <https://doi.org/10.1002/hyp.13439>

- 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* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Klein, M., Garvelmann, J., & Förster, K. (2021). Revisiting Forest Effects on Winter Air Temperature and Wind Speed—New Open Data and Transfer Functions. *Atmosphere*, 12(6), 710. <https://doi.org/10.3390/atmos12060710>
- Kolloen, M. R. (2015). *Effects of weather on summer and winter activity level of the high arctic ungulate Svalbard reindeer (Rangifer tarandus platyrhynchus)* [Master's thesis]. Norwegian University of Life Sciences, Ås.
- Leblond, M., Frair, J., Fortin, D., Dussault, C., Ouellet, J. P., & Courtois, R. (2011). Assessing the influence of resource covariates at multiple spatial scales: an application to forest-dwelling caribou faced with intensive human activity. *Landscape Ecology*, 26(10), 1433-1446. <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9647-6>
- Leclerc, M., Dussault, C., & St-Laurent, M.-H. (2014). Behavioural strategies towards human disturbances explain individual performance in woodland caribou. *Oecologia*, 176(1), 297-306. <https://doi.org/10.1007/s00442-014-3012-9>
- Leclerc, M., Tarroux, A., Fauchald, P., Stien, A., Tveraa, T., & St-Laurent, M.-H. (2019). Effects of human-induced disturbances and weather on herbivore movement. *Journal of Mammalogy*, 100(5), 1490-1500. <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyz101>
- Lee, R. (1978). *Forest microclimatology*. Columbia University Press.
- Lessard, É., Johnson, C. J., & St-Laurent, M.-H. (2025). Local weather interacts with human disturbances to shape the behaviour of boreal caribou across a large climate gradient. *Biodiversity and Conservation*, 34, 1115–1138. <https://doi.org/10.1007/s10531-025-03012-1>
- Luber, G., & McGeehin, M. (2008). Climate change and extreme heat events. *American Journal of Preventive Medicine*, 35(5), 429-435. <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2008.08.021>
- Lüdecke, D., Ben-Shachar, M., Patil, I., Waggoner, P., & Makowski, D. (2021). performance: An R Package for Assessment, Comparison and Testing of Statistical Models. *Journal of Open Source Software*, 6(60), 3139. <https://doi.org/10.21105/joss.03139>

- Lukeš, P., Stenberg, P., & Rautiainen, M. (2013). Relationship between forest density and albedo in the boreal zone. *Ecological Modelling*, 261, 74-79. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.04.009>
- Macek, M., Kopecký, M., & Wild, J. (2019). Maximum air temperature controlled by landscape topography affects plant species composition in temperate forests. *Landscape Ecology*, 34(11), 2541-2556. <https://doi.org/10.1007/s10980-019-00903-x>
- Maloney, S. K., Moss, G., Cartmell, T., & Mitchell, D. (2005). Alteration in diel activity patterns as a thermoregulatory strategy in black wildebeest (*Connochaetes gnou*). *Journal of Comparative Physiology A*, 191(11), 1055-1064. <https://doi.org/10.1007/s00359-005-0030-4>
- McGinn, K. A., Peery, M. Z., Zulla, C. J., Berigan, W. J., Wilkinson, Z. A., Barry, J. M., Keane, J.J. & Zuckerberg, B. (2023). A climate-vulnerable species uses cooler forest microclimates during heat waves. *Biological Conservation*, 283, 110132. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.110132>
- Meineri, E., Dahlberg, C. J., & Hylander, K. (2015). Using Gaussian Bayesian Networks to disentangle direct and indirect associations between landscape physiography, environmental variables and species distribution. *Ecological Modelling*, 313, 127-136. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.06.028>
- Mitchell, D., Snelling, E. P., Hetem, R. S., Maloney, S. K., Strauss, W. M., & Fuller, A. (2018). Revisiting concepts of thermal physiology: predicting responses of mammals to climate change. *Journal of Animal Ecology*, 87(4), 956-973. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12818>
- Muñoz Sabater, J. (2019): ERA5-Land hourly data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac>. (Accessed on 06-11-2023).
- Natural Resources Canada. (2023). *High Resolution Digital Elevation Model (HRDEM) - CanElevation Series - Product Specifications*. [HRDEM Product Specification.pdf](#)
- Navarro-Serrano, F., López-Moreno, J. I., Domínguez-Castro, F., Alonso-González, E., Azorin-Molina, C., El-Kenawy, A., & Vicente-Serrano, S. M. (2020). Maximum and minimum air temperature lapse rates in the Andean region of Ecuador and Peru. *International Journal of Climatology*, 40(14), 6150-6168. <https://doi.org/10.1002/joc.6574>
- Nunez, S., Arets, E., Alkemade, R., Verwer, C., & Leemans, R. (2019). Assessing the impacts of climate change on biodiversity: is below 2° C enough?. *Climatic Change*, 154, 351-365. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02420-x>

- Orlanski, I. (1975). A Rational Subdivision of Scales for Atmospheric Processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 56(5), 527–530. <http://www.jstor.org/stable/26216020>
- Quintero, I., & Wiens, J. J. (2013). Rates of projected climate change dramatically exceed past rates of climatic niche evolution among vertebrate species. *Ecology Letters*, 16(8), 1095-1103. <https://doi.org/10.1111/ele.12144>
- R Core Team (2023). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Renecker, L. A., & Hudson, R. J. (1986). Seasonal energy expenditures and thermoregulatory responses of moose. *Canadian Journal of Zoology*, 64(2), 322-327. <https://doi.org/10.1139/z86-052>
- Rivrud, I. M., Loe, L. E., & Mysterud, A. (2010). How does local weather predict red deer home range size at different temporal scales?. *Journal of Animal Ecology*, 79(6), 1280-1295. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2010.01731.x>
- Santos, E. G., Svátek, M., Nunes, M. H., Aalto, J., Senior, R. A., Matula, R., Plichta, R., & Maeda, E. E. (2024). Structural changes caused by selective logging undermine the thermal buffering capacity of tropical forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 348, 109912. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.109912>
- Stark, J. R., & Fridley, J. D. (2022). Microclimate-based species distribution models in complex forested terrain indicate widespread cryptic refugia under climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 31(3), 562-575. <https://doi.org/10.1111/geb.13447>
- Stark, G., Ma, L., Zeng, Z. G., Du, W. G., & Levy, O. (2023). Cool shade and not-so-cool shade: How habitat loss may accelerate thermal stress under current and future climate. *Global Change Biology*, 29(22), 6201-6216. <https://doi.org/10.1111/gcb.16802>
- St-Laurent, M.-H., & Dussault, C. (2012). The reintroduction of boreal caribou as a conservation strategy: A long-term assessment at the southern range limit. *Rangifer*, 32(2), 127-138. <https://doi.org/10.7557/2.32.2.2261>
- Thompson, D. P., Crouse, J. A., Barboza, P. S., Spathelf, M. O., Herberg, A. M., Parker, S. D., & Morris, M. A. (2021). Behaviour influences thermoregulation of boreal moose during the warm season. *Conservation Physiology*, 9(1), coaa130. <https://doi.org/10.1093/conphys/coaa130>
- Tian, Y. Q., Davies-Colley, R. J., Gong, P., & Thorrold, B. W. (2001). Estimating solar radiation on slopes of arbitrary aspect. *Agricultural and Forest Meteorology*, 109(1), 67-74. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(01\)00245-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(01)00245-3)

- Traill, L. W., Lim, M. L., Sodhi, N. S., & Bradshaw, C. J. (2010). Mechanisms driving change: altered species interactions and ecosystem function through global warming. *Journal of Animal Ecology*, 79(5), 937-947. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2010.01695.x>
- Vanella, D., Longo-Minnolo, G., Belfiore, O. R., Ramírez-Cuesta, J. M., Pappalardo, S., Consoli, S., D'Urso, G., Chirico, G. B., Coppola, A., Comegna, A., Tosacano, A., Quarta, R., Provenzano, G., Ippolito, M., Castagna, A., & Gandolfi, C. (2022). Comparing the use of ERA5 reanalysis dataset and ground-based agrometeorological data under different climates and topography in Italy. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 42, 101182. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101182>
- Vandewiele, M., Geres, L., Lotz, A., Mandl, L., Richter, T., Seibold, S., Seidl, R., & Senf, C. (2023). Mapping spatial microclimate patterns in mountain forests from LiDAR. *Agricultural and Forest Meteorology*, 341, 109662. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109662>
- Vanwallegem, T., & Meentemeyer, R. K. (2009). Predicting forest microclimate in heterogeneous landscapes. *Ecosystems*, 12, 1158-1172. <https://doi.org/10.1007/s10021-009-9281-1>
- Vicente-Serrano, S. M., Quiring, S. M., Pena-Gallardo, M., Yuan, S., & Dominguez-Castro, F. (2020). A review of environmental droughts: Increased risk under global warming?. *Earth-Science Reviews*, 201, 102953. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102953>
- Wan, Z., Hook, S., & Hulley, G. (2021). *MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V061* [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. Accessed 2025-01-15 from <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A1.061>
- Wittmer, H. U., McLellan, B. N., Serrouya, R., & Apps, C. D. (2007). Changes in landscape composition influence the decline of a threatened woodland caribou population. *Journal of Animal Ecology*, 76(3), 568-579. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2007.01220.x>
- Zellweger, F., De Frenne, P., Lenoir, J., Rocchini, D., & Coomes, D. (2019). Advances in microclimate ecology arising from remote sensing. *Trends in Ecology & Evolution*, 34(4), 327-341. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2018.12.012>
- Zhou, W., Wang, M., Gao, K., Gao, H., Wei, F., & Nie, Y. (2022). Behavioural thermoregulation by montane ungulates under climate warming. *Diversity and Distributions*, 28(10), 2229-2238. <https://doi.org/10.1111/ddi.13626>
- Zuur, A., E. N. Ieno & G. M. Smith, 2007. Analyzing ecological data. Springer Science & Business Media, New York, 672 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-45972-1>

SUPPLEMENTARY MATERIALS

SUPPLEMENTARY MATERIALS 1

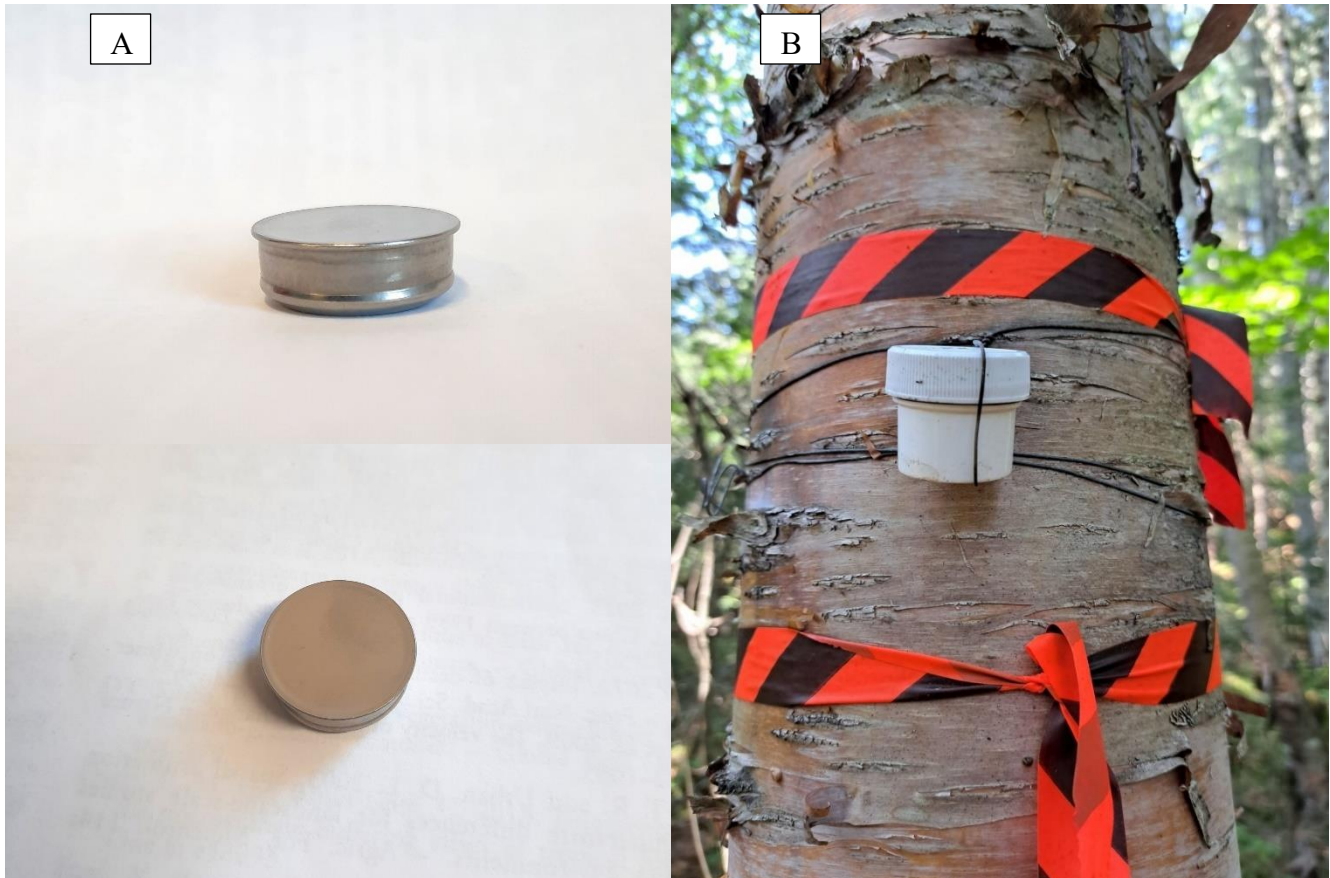


Figure S1.1: Photo of A) a thermochron data logger (Maxim Integrated, San José, USA, DS1922L-F5 thermochron 8K) and B) its installation in a white plastic pill jar attached to a living tree approximately 2 m above the ground.

SUPPLEMENTARY MATERIALS 2

Table S2.1: Results of Pearson correlation tests on above-ground air temperatures collected by 13 pairs of data loggers located in the same study sites and near the Montmorency weather station. Data were recorded between 2021 and 2023 in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada.

Data logger ID pair	Pearson r	P-value
194-195	0.997	<0.001
196-197	0.999	<0.001
200-201	0.999	<0.001
216-217	0.999	<0.001
220-221	0.999	<0.001
223-224	0.998	<0.001
226-227	0.999	<0.001
236-237	0.999	<0.001
256-257	0.999	<0.001
259-260	0.999	<0.001
261-262	0.999	<0.001
265-266	0.997	<0.001
274-275	0.999	<0.001
Montmorency weather station	0.977	<0.001

SUPPLEMENTARY MATERIALS 3

Table S3.1: Candidate models used to explain variations in above-ground air temperature in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the months of January and February. Candidate models were ranked by AIC with marginal (m) and conditional (c) R^2 . The composition of candidate models is described in the main text, in Table 1.

January				February			
Models	ΔAIC	R^2_m	R^2_c	Models	ΔAIC	R^2_m	R^2_c
ERA5-L.T+Sol.5	0.000	0.909	0.914	ERA5-L.T+Sol.5	0.000	0.910	0.915
ERA5-L.T+Sol.6	12.312	0.909	0.914	ERA5-L.T+Sol.6	12.171	0.910	0.915
ERA5-L.T+Sol.4	856.906	0.909	0.914	ERA5-L.T+Sol.4	860.829	0.910	0.914
ERA5-L.T.6	1495.542	0.908	0.913	ERA5-L.T.6	985.610	0.909	0.914
ERA5-L.T.7	1507.829	0.908	0.913	ERA5-L.T.7	997.754	0.909	0.914
ERA5-L.T.5	2327.756	0.907	0.912	ERA5-L.T.5	1835.971	0.909	0.913
ERA5-L.T+Sol.3	3594.623	0.906	0.911	ERA5-L.T+Sol.2	4457.336	0.906	0.911
ERA5-L.T+Sol.2	3597.424	0.906	0.911	ERA5-L.T+Sol.3	4460.922	0.906	0.911
ERA5-L.T+Sol.1	3722.866	0.906	0.911	ERA5-L.T.3	5393.406	0.905	0.910
ERA5-L.T.4	5016.479	0.905	0.91	ERA5-L.T.4	5397.138	0.905	0.910
ERA5-L.T.3	5018.506	0.904	0.91	ERA5-L.T+Sol.1	5591.015	0.905	0.910
ERA5-L.T.1.	9284.894	0.901	0.907	ERA5-L.T1	12769.064	0.897	0.902
ERA5-L.T.2	9296.372	0.901	0.907	ERA5-L.T.2	12775.580	0.898	0.902
Local.12	216602.061	0.052	0.362	Local.12	224113.889	0.087	0.110
Local.6	216851.574	0.050	0.360	Local.6	224356.024	0.083	0.107
Local.9	216855.148	0.050	0.360	Local.9	224359.334	0.084	0.107
Local.8	216866.945	0.050	0.360	Local.8	224371.339	0.083	0.107
Local.7	216907.385	0.049	0.360	Local.11	224466.150	0.084	0.106
Local.11	216948.129	0.051	0.360	Local.7	224475.790	0.081	0.107
Local.4	224522.093	0.002	0.311	Local.4	232536.227	0.003	0.027
Local.1	224537.480	0.001	0.311	Local.1	232552.251	0.003	0.027
Local.5	224541.531	0.002	0.311	Local.5	232555.795	0.003	0.026
Local.3	224548.459	0.001	0.311	Local.3	232564.206	0.003	0.027
Local.10	224568.912	0.002	0.311	Local.10	232586.252	0.003	0.026
Local.2	224587.703	0.002	0.311	Local.2	232668.444	0.003	0.027

Table S3.2: Candidate models used to explain variations in above-ground air temperature in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the months of March and April. Candidate models were ranked by AIC with marginal (m) and conditional (c) R^2 . The composition of candidate models is described in the main text, in Table 1.

March				April			
Models	ΔAIC	R^2_m	R^2_c	Models	ΔAIC	R^2_m	R^2_c
ERA5-L.T+Sol.5	0.000	0.897	0.903	ERA5-L.T+Sol.5	0.000	0.862	0.873
ERA5-L.T+Sol.6	8.904	0.897	0.903	ERA5-L.T+Sol.6	7.857	0.863	0.873
ERA5-L.T+Sol.4	440.772	0.896	0.903	ERA5-L.T+Sol.4	670.704	0.862	0.873
ERA5-L.T.6	860.784	0.896	0.902	ERA5-L.T.6	1258.833	0.861	0.872
ERA5-L.T.7	869.705	0.896	0.902	ERA5-L.T.7	1266.667	0.861	0.872
ERA5-L.T.5	1280.424	0.895	0.902	ERA5-L.T.5	1913.658	0.860	0.871
ERA5-L.T+Sol.2	5129.903	0.891	0.898	ERA5-L.T+Sol.2	5913.639	0.854	0.866
ERA5-L.T+Sol.3	5146.769	0.892	0.898	ERA5-L.T+Sol.3	5917.437	0.855	0.866
ERA5-L.T+Sol.1	5824.307	0.891	0.898	ERA5-L.T+Sol.1	6191.203	0.853	0.865
ERA5-L.T.3	5930.008	0.890	0.897	ERA5-L.T.3	7085.462	0.852	0.864
ERA5-L.T.4	5947.170	0.891	0.897	ERA5-L.T.4	7089.328	0.853	0.864
ERA5-L.T.2	11524.854	0.885	0.892	ERA5-L.T.2	10756.641	0.847	0.859
ERA5-L.T.1	11552.895	0.883	0.892	ERA5-L.T.1	10773.681	0.844	0.858
Local.12	227025.811	0.140	0.157	Local.12	175222.661	0.253	0.295
Local.6	227472.348	0.135	0.152	Local.8	176073.172	0.247	0.289
Local.8	227482.886	0.135	0.152	Local.6	176105.306	0.245	0.289
Local.9	227502.565	0.135	0.152	Local.9	176130.919	0.245	0.289
Local.11	227589.625	0.136	0.153	Local.11	176170.210	0.248	0.289
Local.7	227692.119	0.128	0.153	Local.7	176337.264	0.232	0.290
Local.1	242155.350	0.008	0.025	Local.10	204496.012	0.018	0.058
Local.4	242163.585	0.008	0.025	Local.1	204499.940	0.016	0.058
Local.3	242166.587	0.008	0.025	Local.4	204505.139	0.016	0.058
Local.5	242185.535	0.008	0.025	Local.3	204509.893	0.016	0.059
Local.10	242197.366	0.008	0.025	Local.5	204525.429	0.016	0.058
Local.2	242369.386	0.008	0.025	Local.2	204744.870	0.016	0.058

Table S3.3: Candidate models used to explain variations in above-ground air temperature in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the months of May and June. Candidate models were ranked by AIC with marginal (m) and conditional (c) R^2 . The composition of candidate models is described in the main text, in Table 1.

May				June			
Models	ΔAIC	R^2_m	R^2_c	Models	ΔAIC	R^2_m	R^2_c
ERA5-L.T+Sol.5	0.000	0.858	0.874	ERA5-L.T+Sol.5	0.000	0.861	0.869
ERA5-L.T+Sol.6	8.581	0.858	0.874	ERA5-L.T+Sol.6	9.809	0.861	0.869
ERA5-L.T+Sol.4	903.009	0.857	0.873	ERA5-L.T+Sol.4	543.319	0.860	0.868
ERA5-L.T.6	2696.265	0.855	0.871	ERA5-L.T.6	931.164	0.860	0.868
ERA5-L.T.7	2704.835	0.855	0.871	ERA5-L.T.7	940.898	0.860	0.868
ERA5-L.T.5	3568.048	0.854	0.870	ERA5-L.T.5	1450.845	0.859	0.867
ERA5-L.T+Sol.3	5511.468	0.851	0.867	ERA5-L.T+Sol.3	5232.938	0.854	0.862
ERA5-L.T+Sol.2	5539.911	0.848	0.867	ERA5-L.T+Sol.2	5250.191	0.852	0.862
ERA5-L.T.4	8039.478	0.848	0.864	ERA5-L.T.4	6089.565	0.853	0.860
ERA5-L.T.3	8068.501	0.845	0.864	ERA5-L.T.3	6106.499	0.851	0.860
ERA5-L.T+Sol.1	8717.009	0.844	0.863	ERA5-L.T+Sol.1	7507.071	0.849	0.859
ERA5-L.T.1	22558.721	0.823	0.844	ERA5-L.T.2	13714.994	0.840	0.850
ERA5-L.T.2	22567.570	0.824	0.844	ERA5-L.T.1	13721.529	0.838	0.849
Local.12	168806.588	0.355	0.368	Local.12	160616.015	0.350	0.368
Local.8	169686.295	0.349	0.362	Local.8	161590.168	0.344	0.361
Local.9	169742.675	0.346	0.362	Local.6	161650.281	0.341	0.361
Local.6	169756.718	0.344	0.361	Local.9	161668.349	0.341	0.361
Local.11	169786.498	0.350	0.362	Local.11	161692.526	0.344	0.361
Local.7	169840.443	0.338	0.362	Local.7	161844.147	0.333	0.361
Local.10	213821.156	0.019	0.030	Local.10	204190.262	0.015	0.030
Local.4	213863.953	0.015	0.029	Local.4	204227.585	0.012	0.030
Local.5	213881.744	0.015	0.029	Local.1	204229.895	0.011	0.030
Local.1	213895.950	0.015	0.029	Local.3	204241.396	0.012	0.030
Local.3	213903.873	0.015	0.029	Local.5	204247.978	0.012	0.030
Local.2	214026.897	0.015	0.029	Local.2	204446.701	0.012	0.030

Table S3.4: Candidate models used to explain variations in above-ground air temperature in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the months of July and August. Candidate models were ranked by AIC with marginal (m) and conditional (c) R^2 . The composition of candidate models is described in the main text, in Table 1.

July				August			
Models	ΔAIC	R^2_m	R^2_c	Models	ΔAIC	R^2_m	R^2_c
ERA5-L.T+Sol.5	0.000	0.853	0.861	ERA5-L.T+Sol.5	0.000	0.864	0.873
ERA5-L.T+Sol.6	10.223	0.853	0.861	ERA5-L.T+Sol.6	9.951	0.864	0.873
ERA5-L.T+Sol.4	282.399	0.852	0.861	ERA5-L.T.6	250.291	0.864	0.873
ERA5-L.T.6	734.673	0.852	0.861	ERA5-L.T.7	260.201	0.864	0.873
ERA5-L.T.7	744.764	0.852	0.861	ERA5-L.T+Sol.4	279.174	0.863	0.872
ERA5-L.T.5	1017.842	0.851	0.860	ERA5-L.T.5	530.355	0.863	0.872
ERA5-L.T+Sol.3	8219.936	0.841	0.850	ERA5-L.T+Sol.3	8096.830	0.853	0.862
ERA5-L.T+Sol.2	8248.679	0.838	0.849	ERA5-L.T+Sol.2	8107.589	0.852	0.862
ERA5-L.T.4	8900.631	0.840	0.849	ERA5-L.T.4	8328.837	0.853	0.862
ERA5-L.T.3	8928.800	0.838	0.849	ERA5-L.T.3	8339.513	0.851	0.862
ERA5-L.T+Sol.1	10981.369	0.834	0.845	ERA5-L.T+Sol.1	10122.168	0.849	0.860
ERA5-L.T.2	18727.999	0.825	0.837	ERA5-L.T.1	14748.467	0.842	0.854
ERA5-L.T.1	18739.745	0.823	0.836	ERA5-L.T.2	14756.857	0.843	0.855
Local.12	129106.955	0.417	0.536	Local.12	149122.306	0.336	0.492
Local.8	131417.692	0.406	0.525	Local.8	150964.724	0.326	0.482
Local.6	131467.722	0.401	0.525	Local.6	151006.039	0.323	0.483
Local.9	131494.810	0.401	0.525	Local.9	151023.422	0.324	0.482
Local.11	131528.462	0.406	0.526	Local.11	151079.036	0.326	0.483
Local.7	131563.148	0.394	0.526	Local.7	151124.698	0.318	0.483
Local.10	193642.895	0.017	0.136	Local.10	199506.094	0.012	0.175
Local.1	193669.213	0.012	0.135	Local.4	199529.905	0.009	0.175
Local.4	193676.894	0.012	0.135	Local.1	199533.259	0.008	0.175
Local.3	193680.477	0.012	0.135	Local.3	199544.264	0.008	0.175
Local.5	193696.351	0.012	0.136	Local.5	199550.204	0.009	0.175
Local.2	193796.290	0.012	0.135	Local.2	199674.727	0.009	0.175

Table S3.5: Candidate models used to explain variations in above-ground air temperature in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the months of September and October. Candidate models were ranked by AIC with marginal (_m) and conditional (_c) R². The composition of candidate models is described in the main text, in Table 1.

September				October			
Models	ΔAIC	R^2_m	R^2_c	Models	ΔAIC	R^2_m	R^2_c
ERA5-L.T+Sol.5	0.000	0.855	0.864	ERA5-L.T+Sol.5	0.000	0.876	0.885
ERA5-L.T+Sol.6	10.920	0.855	0.864	ERA5-L.T+Sol.6	11.694	0.876	0.885
ERA5-L.T.6	117.036	0.855	0.864	ERA5-L.T.6	19.303	0.876	0.885
ERA5-L.T.7	127.923	0.855	0.864	ERA5-L.T.7	30.993	0.876	0.885
ERA5-L.T+Sol.4	295.584	0.854	0.863	ERA5-L.T+Sol.4	481.992	0.875	0.885
ERA5-L.T.5	412.049	0.854	0.863	ERA5-L.T.5	500.826	0.875	0.885
ERA5-L.T+Sol.2	5857.840	0.846	0.855	ERA5-L.T+Sol.2	4710.622	0.870	0.880
ERA5-L.T+Sol.3	5866.083	0.846	0.855	ERA5-L.T+Sol.3	4723.516	0.871	0.880
ERA5-L.T.3	5971.154	0.845	0.855	ERA5-L.T.3	4733.544	0.870	0.880
ERA5-L.T.4	5979.475	0.846	0.855	ERA5-L.T.4	4746.485	0.870	0.880
ERA5-L.T+Sol.1	6985.203	0.844	0.854	ERA5-L.T+Sol.1	5902.277	0.869	0.879
ERA5-L.T.1	8880.682	0.840	0.851	ERA5-L.T.2	7789.547	0.866	0.877
ERA5-L.T.2	8888.095	0.841	0.851	ERA5-L.T.1	7790.596	0.865	0.876
Local.12	168947.922	0.256	0.292	Local.12	194256.901	0.148	0.337
Local.8	170062.255	0.248	0.284	Local.9	194981.333	0.143	0.332
Local.6	170077.615	0.246	0.284	Local.8	194991.572	0.143	0.331
Local.9	170094.425	0.247	0.284	Local.6	195002.985	0.141	0.331
Local.11	170178.775	0.248	0.284	Local.11	195099.825	0.143	0.332
Local.7	170256.853	0.239	0.284	Local.7	195152.581	0.136	0.332
Local.4	199292.271	0.010	0.047	Local.4	214210.955	0.009	0.198
Local.1	199298.182	0.010	0.047	Local.5	214232.641	0.009	0.198
Local.10	199302.244	0.012	0.048	Local.10	214243.180	0.010	0.198
Local.3	199309.588	0.010	0.047	Local.1	214254.361	0.008	0.197
Local.5	199315.025	0.010	0.047	Local.3	214265.084	0.008	0.197
Local.2	199482.834	0.010	0.047	Local.2	214416.833	0.009	0.197

Table S3.6: Candidate models used to explain variations in above-ground air temperature in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the months of November and December. Candidate models were ranked by AIC with marginal (_m) and conditional (_c) R². «NA» means that the model did not converge. The composition of candidate models is described in the main text, in Table 1.

<i>November</i>				<i>December</i>			
Models	ΔAIC	R²_m	R²_c	Models	ΔAIC	R²_m	R²_c
ERA5-L.T.6	0.000	0.931	0.938	ERA5-L.T+Sol.5	0.000	0.911	0.916
ERA5-L.T.7	11.822	0.931	0.938	ERA5-L.T+Sol.6	12.141	0.911	0.916
ERA5-L.T+Sol.6	22.260	0.931	0.938	ERA5-L.T.6	404.717	0.910	0.916
ERA5-L.T.5	778.279	0.931	0.937	ERA5-L.T.7	416.849	0.910	0.916
ERA5-L.T+Sol.4	788.509	0.931	0.937	ERA5-L.T+Sol.4	1292.603	0.910	0.915
ERA5-L.T.3	2563.064	0.930	0.936	ERA5-L.T.5	1685.441	0.909	0.915
ERA5-L.T+Sol.2	2573.115	0.930	0.936	ERA5-L.T+Sol.2	2846.942	0.908	0.914
ERA5-L.T.4	2579.280	0.930	0.936	ERA5-L.T+Sol.3	2860.350	0.908	0.914
ERA5-L.T+Sol.3	2589.344	0.930	0.936	ERA5-L.T+Sol.1	2887.629	0.908	0.914
ERA5-L.T.2	3172.044	0.929	0.936	ERA5-L.T.3	3226.861	0.908	0.913
ERA5-L.T+Sol.1	3177.732	0.929	0.936	ERA5-L.T.4	3240.245	0.908	0.913
ERA5-L.T.1	3198.568	0.928	0.935	ERA5-L.T.1	4285.100	0.906	0.912
Local.12	278412.320	0.035	0.045	ERA5-L.T.2	4285.578	0.907	0.912
Local.6	278436.267	0.034	0.044	Local.12	251271.357	0.024	0.435
Local.8	278451.310	0.034	0.044	Local.6	251311.803	0.023	0.436
Local.9	278457.220	0.034	0.044	Local.9	251323.237	0.023	0.436
Local.11	278577.293	0.034	0.044	Local.8	251335.124	0.023	0.437
Local.7	278775.248	0.026	0.044	Local.11	251448.614	0.024	0.437
Local.4	281058.677	0.009	0.019	Local.7	251535.427	0.020	0.436
Local.1	281062.709	0.009	0.019	Local.4	254936.606	0.004	0.391
Local.3	281076.313	0.009	0.019	Local.1	254948.928	0.004	0.391
Local.5	281083.630	0.009	0.019	Local.5	254960.419	0.004	0.391
Local.10	281104.532	0.009	0.019	Local.3	254960.931	0.004	0.390
Local.2	281390.675	0.009	0.019	Local.10	254993.693	0.004	0.392
ERA5-L.T+Sol.5	NA	NA	NA	Local.2	255159.428	0.004	0.391

SUPPLEMENTARY MATERIALS 4

Table S4.1: Parameter estimates (β) and associated 95% confidence intervals (95% CI, [lower : upper]) of the variables included in the most parsimonious model explaining variations in above-ground air temperature in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the month of January. Statistically significant variables (i.e., 95% CI excluding 0) are shown in bold.

Variables	β	95% CI
Intercept	1.483	[0.916 : 2.049]
<i>Topography</i>		
Elevation	-0.0006	[-0.0011 : 0.0000]
<i>Time of the day</i>		
Cosine (hour)	0.319	[0.259 : 0.378]
Sine(hour)	-0.281	[-0.345 : -0.218]
<i>Land covers</i>		
Wetlands	0.551	[0.239 : 0.863]
≤5-year-old cutblocs	-0.581	[-0.901 : -0.260]
6–20-year-old cutblocs	-0.171	[-0.471 : 0.129]
Non-regenerating areas	0.364	[0.056 : 0.672]
Road rights-of-way	0.650	[0.308 : 0.991]
20–50-year-old natural disturbances	-0.345	[-0.662 : -0.029]
20–50-year-old regenerating stands	-0.447	[-0.745 : -0.149]
Old mixed/deciduous	-0.333	[-0.632 : -0.033]
Young coniferous	-0.206	[-0.495 : 0.082]
<i>ERA5-Land</i>		
ERA5-Land.T°	1.093	[1.087 : 1.099]
Solar radiation	0.276	[0.262 : 0.290]
<i>Interactions Land covers : Time of the day</i>		
Wetlands:cosine(hour)	-1.458	[-1.548 : -1.368]
Wetlands:sine(hour)	-0.386	[-0.476 : -0.296]
≤5-year-old cutblocs:cosine(hour)	-0.960	[-1.052 : -0.868]
≤5-year-old cutblocs:sine(hour)	0.130	[0.038 : 0.223]
6–20-year-old cutblocs:cosine(hour)	-0.543	[-0.629 : -0.457]
6–20-year-old cutblocs:sine(hour)	0.117	[0.030 : 0.203]
Non-regenerating areas:cosine(hour)	-0.700	[-0.788 : -0.611]

Non-regenerating areas:sine(hour)	0.102	[0.014 : 0.191]
Road rights-of-way:cosine(hour)	-0.667	[-0.765 : -0.569]
Road rights-of-way:sine(hour)	-0.046	[-0.144 : 0.052]
20–50-year-old natural disturbances:cosine(hour)	-0.303	[-0.395 : -0.212]
20–50-year-old natural disturbances:sine(hour)	0.347	[0.256 : 0.438]
20–50-year-old regenerating stands:cosine(hour)	-0.052	[-0.138 : 0.033]
20–50-year-old regenerating stands:sine(hour)	0.187	[0.101 : 0.273]
Old mixed/deciduous:cosine(hour)	0.216	[0.131 : 0.302]
Old mixed/deciduous:sine(hour)	0.288	[0.203 : 0.374]
Young coniferous:cosine(hour)	0.063	[-0.02 : 0.145]
Young coniferous:sine(hour)	0.098	[0.015 : 0.181]
<i>Interactions Land covers : ERA5-Land.T°</i>		
Wetlands: ERA5-Land.T°	0.056	[0.047 : 0.065]
≤5-year-old cutbloccs: ERA5-Land.T°	-0.058	[-0.067 : -0.048]
6–20-year-old cutbloccs: ERA5-Land.T°	-0.024	[-0.032 : -0.015]
Nonregen: ERA5-Land.T°	0.002	[-0.007 : 0.011]
Road rights-of-way:ERA5-Land.T°	0.030	[0.021 : 0.04]
20–50-year-old natural disturbances: ERA5-Land.T°	-0.028	[-0.037 : -0.019]
20–50-year-old regenerating stands: ERA5-Land.T°	-0.025	[-0.034 : -0.017]
Old mixed/deciduous: ERA5-Land.T°	-0.058	[-0.067 : -0.05]
Young coniferous: ERA5-Land.T°	-0.024	[-0.032 : -0.016]

Table S4.2: Parameter estimates (β) and associated 95% confidence intervals (95% CI, [lower : upper]) of the variables included in the most parsimonious model explaining variations in above-ground air temperature in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the month of February. Statistically significant variables (i.e., 95% CI excluding 0) are shown in bold.

Variable	β	95% CI
Intercept	0.903	[0.371 : 1.434]
<i>Topography</i>		
Elevation	-0.0009	[-0.0015 : -0.0004]
<i>Time of the day</i>		
Cosine (hour)	0.048	[-0.015 : 0.111]
Sine(hour)	-0.586	[-0.654 : -0.518]
<i>Land covers</i>		
Wetlands	0.759	[0.452 : 1.066]
≤5-year-old cutblocs	-0.413	[-0.728 : -0.098]
6–20-year-old cutblocs	0.045	[-0.25 : 0.340]
Non-regenerating areas	0.237	[-0.065 : 0.540]
Road rights-of-way	0.334	[-0.001 : 0.670]
20–50-year-old natural disturbances	-0.343	[-0.654 : -0.031]
20–50-year-old regenerating stands	-0.335	[-0.628 : -0.041]
Old mixed/deciduous	-0.387	[-0.682 : -0.092]
Young coniferous	-0.125	[-0.409 : 0.159]
<i>ERA5-Land</i>		
ERA5-Land.T°	1.050	[1.044 : 1.056]
Solar radiation	0.159	[0.149 : 0.168]
<i>Interactions Land covers : Time of the day</i>		
Wetlands:cosine(hour)	-1.795	[-1.890 : -1.700]
Wetlands:sine(hour)	-0.598	[-0.695 : -0.502]
≤5-year-old cutblocs:cosine(hour)	-0.988	[-1.086 : -0.890]
≤5-year-old cutblocs:sine(hour)	0.358	[0.259 : 0.457]
6–20-year-old cutblocs:cosine(hour)	-0.586	[-0.678 : -0.495]
6–20-year-old cutblocs:sine(hour)	0.208	[0.116 : 0.300]
Non-regenerating areas:cosine(hour)	-0.745	[-0.840 : -0.651]
Non-regenerating areas:sine(hour)	0.184	[0.089 : 0.280]
Road rights-of-way:cosine(hour)	-0.594	[-0.699 : -0.490]

Road rights-of-way:sine(hour)	-0.083	[-0.188 : 0.023]
20–50-year-old natural disturbances:cosine(hour)	-0.467	[-0.564 : -0.370]
20–50-year-old natural disturbances:sine(hour)	0.450	[0.351 : 0.548]
20–50-year-old regenerating stands:cosine(hour)	-0.009	[-0.100 : 0.083]
20–50-year-old regenerating stands:sine(hour)	0.269	[0.177 : 0.362]
Old mixed/deciduous:cosine(hour)	0.201	[0.110 : 0.292]
Old mixed/deciduous:sine(hour)	0.358	[0.266 : 0.450]
Young coniferous:cosine(hour)	0.082	[-0.006 : 0.170]
Young coniferous:sine(hour)	0.179	[0.090 : 0.267]
<i>Interactions Land covers : ERA5-Land.T°</i>		
Wetlands: ERA5-Land.T°	0.067	[0.057 : 0.076]
≤5-year-old cutblocs: ERA5-Land.T°	-0.052	[-0.061 : -0.042]
6–20-year-old cutblocs: ERA5-Land.T°	-0.015	[-0.024 : -0.006]
Nonregen: ERA5-Land.T°	-0.005	[-0.014 : 0.003]
Road rights-of-way:ERA5-Land.T°	0.012	[0.003 : 0.022]
20–50-year-old natural disturbances: ERA5-Land.T°	-0.029	[-0.038 : -0.020]
20–50-year-old regenerating stands: ERA5-Land.T°	-0.020	[-0.029 : -0.011]
Old mixed/deciduous: ERA5-Land.T°	-0.066	[-0.074 : -0.057]
Young coniferous: ERA5-Land.T°	-0.021	[-0.030 : -0.012]

Table S4.3: Parameter estimates (β) and associated 95% confidence intervals (95% CI, [lower : upper]) of the variables included in the most parsimonious model explaining variations in above-ground air temperature in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the month of March. Statistically significant variables (i.e., 95% CI excluding 0) are shown in bold.

Variable	β	95% CI
Intercept	1.252	[0.737 : 1.766]
<i>Topography</i>		
Elevation	-0.0021	[-0.0026 : -0.0015]
<i>Time of the day</i>		
Cosine (hour)	0.208	[0.154 : 0.261]
Sine(hour)	-0.404	[-0.462 : -0.346]
<i>Land covers</i>		
Wetlands	0.376	[0.075 : 0.678]
≤5-year-old cutblocs	0.258	[-0.051 : 0.567]
6–20-year-old cutblocs	0.374	[0.087 : 0.661]
Non-regenerating areas	0.502	[0.203 : 0.800]
Road rights-of-way	0.426	[0.094 : 0.758]
20–50-year-old natural disturbances	0.036	[-0.271 : 0.342]
20–50-year-old regenerating stands	-0.204	[-0.492 : 0.083]
Old mixed/deciduous	-0.200	[-0.489 : 0.089]
Young coniferous	-0.143	[-0.420 : 0.134]
<i>ERA5-Land</i>		
ERA5-Land.T°	1.002	[0.996 : 1.009]
Solar radiation	0.086	[0.080 : 0.091]
<i>Interactions Land covers : Time of the day</i>		
Wetlands:cosine(hour)	-1.889	[-1.970 : -1.809]
Wetlands:sine(hour)	-0.643	[-0.726 : -0.560]
≤5-year-old cutblocs:cosine(hour)	-0.765	[-0.848 : -0.681]
≤5-year-old cutblocs:sine(hour)	0.240	[0.154 : 0.325]
6–20-year-old cutblocs:cosine(hour)	-0.525	[-0.602 : -0.448]
6–20-year-old cutblocs:sine(hour)	0.084	[0.005 : 0.163]
Non-regenerating areas:cosine(hour)	-0.585	[-0.665 : -0.504]
Non-regenerating areas:sine(hour)	-0.042	[-0.124 : 0.040]
Road rights-of-way:cosine(hour)	-0.411	[-0.500 : -0.322]

Road rights-of-way:sine(hour)	-0.182	[-0.274 : -0.091]
20–50-year-old natural disturbances:cosine(hour)	-0.363	[-0.446 : -0.281]
20–50-year-old natural disturbances:sine(hour)	0.275	[0.190 : 0.359]
20–50-year-old regenerating stands:cosine(hour)	0.020	[-0.058 : 0.097]
20–50-year-old regenerating stands:sine(hour)	0.221	[0.142 : 0.301]
Old mixed/deciduous:cosine(hour)	0.152	[0.075 : 0.229]
Old mixed/deciduous:sine(hour)	0.176	[0.097 : 0.255]
Young coniferous:cosine(hour)	0.067	[-0.008 : 0.141]
Young coniferous:sine(hour)	0.111	[0.035 : 0.187]
<i>Interactions Land covers : ERA5-Land.T°</i>		
Wetlands: ERA5-Land.T°	0.035	[0.026 : 0.045]
≤5-year-old cutblocs: ERA5-Land.T°	-0.008	[-0.018,0.001]
6–20-year-old cutblocs: ERA5-Land.T°	0.004	[-0.004 : 0.013]
Nonregen: ERA5-Land.T°	0.026	[0.015 : 0.036]
Road rights-of-way:ERA5-Land.T°	0.035	[0.023 : 0.047]
20–50-year-old natural disturbances: ERA5-Land.T°	0.002	[-0.008,0.012]
20–50-year-old regenerating stands: ERA5-Land.T°	-0.004	[-0.013 : 0.005]
Old mixed/deciduous: ERA5-Land.T°	-0.056	[-0.065 : -0.047]
Young coniferous: ERA5-Land.T°	-0.025	[-0.034 : -0.017]

Table S4.4: Parameter estimates (β) and associated 95% confidence intervals (95% CI, [lower : upper]) of the variables included in the most parsimonious model explaining variations in above-ground air temperature in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the month of April. Statistically significant variables (i.e., 95% CI excluding 0) are shown in bold.

Variable	β	95% CI
Intercept	1.435	[0.879 : 1.992]
<i>Topography</i>		
Elevation	-0.0022	[-0.0028 : -0.0015]
<i>Time of the day</i>		
Cosine (hour)	0.179	[0.123 : 0.236]
Sine(hour)	-0.152	[-0.213 : -0.092]
<i>Land covers</i>		
Wetlands	0.397	[0.057 : 0.737]
≤5-year-old cutblocs	0.601	[0.251 : 0.951]
6–20-year-old cutblocs	0.411	[0.086 : 0.736]
Non-regenerating areas	0.546	[0.211 : 0.882]
Road rights-of-way	0.344	[-0.029 : 0.716]
20–50-year-old natural disturbances	0.185	[-0.161 : 0.532]
20–50-year-old regenerating stands	-0.158	[-0.483 : 0.167]
Old mixed/deciduous	0.197	[-0.130 : 0.524]
Young coniferous	0.145	[-0.168 : 0.459]
<i>ERA5-Land</i>		
ERA5-Land.T°	1.010	[1.002 : 1.019]
Solar radiation	0.075	[0.071 : 0.080]
<i>Interactions Land covers : Time of the day</i>		
Wetlands:cosine(hour)	-1.829	[-1.914 : -1.744]
Wetlands:sine(hour)	-0.501	[-0.588 : -0.414]
≤5-year-old cutblocs:cosine(hour)	-0.723	[-0.811 : -0.634]
≤5-year-old cutblocs:sine(hour)	0.009	[-0.081 : 0.099]
6–20-year-old cutblocs:cosine(hour)	-0.502	[-0.584 : -0.420]
6–20-year-old cutblocs:sine(hour)	-0.225	[-0.308 : -0.141]
Non-regenerating areas:cosine(hour)	-0.506	[-0.590 : -0.421]
Non-regenerating areas:sine(hour)	-0.100	[-0.185 : -0.014]
Road rights-of-way:cosine(hour)	-0.484	[-0.578 : -0.390]

Road rights-of-way:sine(hour)	-0.209	[-0.304 : -0.114]
20–50-year-old natural disturbances:cosine(hour)	-0.369	[-0.456 : -0.282]
20–50-year-old natural disturbances:sine(hour)	0.246	[0.158 : 0.334]
20–50-year-old regenerating stands:cosine(hour)	0.019	[-0.063 : 0.101]
20–50-year-old regenerating stands:sine(hour)	0.095	[0.012 : 0.179]
Old mixed/deciduous:cosine(hour)	0.235	[0.153 : 0.317]
Old mixed/deciduous:sine(hour)	0.049	[-0.034 : 0.132]
Young coniferous:cosine(hour)	0.160	[0.081 : 0.239]
Young coniferous:sine(hour)	0.028	[-0.052 : 0.108]
<i>Interactions Land covers : ERA5-Land.T°</i>		
Wetlands: ERA5-Land.T°	0.123	[0.100 : 0.136]
≤5-year-old cutblocs: ERA5-Land.T°	0.080	[0.067 : 0.093]
6–20-year-old cutblocs: ERA5-Land.T°	0.058	[0.046 : 0.071]
Nonregen: ERA5-Land.T°	0.070	[0.057 : 0.083]
Road rights-of-way:ERA5-Land.T°	0.060	[0.045 : 0.074]
20–50-year-old natural disturbances: ERA5-Land.T°	0.023	[0.010 : 0.036]
20–50-year-old regenerating stands: ERA5-Land.T°	0.014	[0.001 : 0.026]
Old mixed/deciduous: ERA5-Land.T°	-0.015	[-0.027 : -0.002]
Young coniferous: ERA5-Land.T°	-0.005	[-0.018 : 0.007]

Table S4.5: Parameter estimates (β) and associated 95% confidence intervals (95% CI, [lower : upper]) of the variables included in the most parsimonious model explaining variations in above-ground air temperature in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the month of May. Statistically significant variables (i.e., 95% CI excluding 0) are shown in bold.

Variable	β	95% CI
Intercept	0.659	[-0.153 : 1.472]
<i>Topography</i>		
Elevation	-0.0014	[-0.0022 : -0.0005]
<i>Time of the day</i>		
Cosine (hour)	-0.522	[-0.589 : -0.456]
Sine(hour)	-0.821	[-0.890 : -0.752]
<i>Land covers</i>		
Wetlands	0.014	[-0.436 : 0.464]
≤5-year-old cutblocs	0.145	[-0.319 : 0.609]
6–20-year-old cutblocs	0.165	[-0.266 : 0.596]
Non-regenerating areas	0.354	[-0.090 : 0.798]
Road rights-of-way	0.233	[-0.260 : 0.726]
20–50-year-old natural disturbances	-0.087	[-0.547 : 0.372]
20–50-year-old regenerating stands	-0.327	[-0.758 : 0.104]
Old mixed/deciduous	0.301	[-0.132 : 0.733]
Young coniferous	0.106	[-0.309 : 0.521]
<i>ERA5-Land</i>		
ERA5-Land.T°	0.885	[0.877 : 0.893]
Solar radiation	0.088	[0.085 : 0.091]
<i>Interactions Land covers : Time of the day</i>		
Wetlands:cosine(hour)	-1.995	[-2.096 : -1.895]
Wetlands:sine(hour)	-0.397	[-0.496 : -0.297]
≤5-year-old cutblocs:cosine(hour)	0.019	[-0.084 : 0.123]
≤5-year-old cutblocs:sine(hour)	0.481	[0.378 : 0.584]
6–20-year-old cutblocs:cosine(hour)	-0.311	[-0.407 : -0.215]
6–20-year-old cutblocs:sine(hour)	-0.063	[-0.159 : 0.032]
Non-regenerating areas:cosine(hour)	-0.446	[-0.545 : -0.346]
Non-regenerating areas:sine(hour)	0.117	[0.018 : 0.215]
Road rights-of-way:cosine(hour)	-0.741	[-0.851 : -0.631]

Road rights-of-way:sine(hour)	-0.212	[-0.322 : -0.103]
20–50-year-old natural disturbances:cosine(hour)	0.127	[0.025 : 0.229]
20–50-year-old natural disturbances:sine(hour)	0.612	[0.511 : 0.714]
20–50-year-old regenerating stands:cosine(hour)	0.140	[0.044 : 0.236]
20–50-year-old regenerating stands:sine(hour)	0.196	[0.101 : 0.292]
Old mixed/deciduous:cosine(hour)	0.751	[0.655 : 0.847]
Old mixed/deciduous:sine(hour)	0.213	[0.117 : 0.308]
Young coniferous:cosine(hour)	0.376	[0.284 : 0.469]
Young coniferous:sine(hour)	0.101	[0.009 : 0.193]
<i>Interactions Land covers : ERA5-Land.T°</i>		
Wetlands: ERA5-Land.T°	0.053	[0.040 : 0.066]
≤5-year-old cutblocs: ERA5-Land.T°	0.163	[0.150 : 0.176]
6–20-year-old cutblocs: ERA5-Land.T°	0.072	[0.060 : 0.085]
Nonregen: ERA5-Land.T°	0.093	[0.080 : 0.105]
Road rights-of-way:ERA5-Land.T°	0.018	[0.004 : 0.032]
20–50-year-old natural disturbances: ERA5-Land.T°	0.118	[0.106 : 0.131]
20–50-year-old regenerating stands: ERA5-Land.T°	0.035	[0.023 : 0.047]
Old mixed/deciduous: ERA5-Land.T°	0.029	[0.017 : 0.041]
Young coniferous: ERA5-Land.T°	0.029	[0.018 : 0.041]

Table S4.6: Parameter estimates (β) and associated 95% confidence intervals (95% CI, [lower : upper]) of the variables included in the most parsimonious model explaining variations in above-ground air temperature in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the month of June. Statistically significant variables (i.e., 95% CI excluding 0) are shown in bold.

Variable	β	95% CI
Intercept	0.436	[-0.069 : 0.941]
<i>Topography</i>		
Elevation	-0.0016	[-0.0020 : -0.0011]
<i>Time of the day</i>		
Cosine (hour)	-0.078	[-0.135 : -0.021]
Sine(hour)	-0.715	[-0.774 : -0.656]
<i>Land covers</i>		
Wetlands	-0.479	[-0.788 : -0.169]
≤5-year-old cutblocs	-0.776	[-1.098 : -0.455]
6–20-year-old cutblocs	-1.088	[-1.386 : -0.789]
Non-regenerating areas	0.151	[-0.152 : 0.453]
Road rights-of-way	0.530	[0.194 : 0.867]
20–50-year-old natural disturbances	-0.155	[-0.472 : 0.161]
20–50-year-old regenerating stands	-0.482	[-0.780 : -0.183]
Old mixed/deciduous	0.298	[-0.001 : 0.596]
Young coniferous	-0.449	[-0.735 : -0.164]
<i>ERA5-Land</i>		
ERA5-Land.T°	0.994	[0.985 : 1.003]
Solar radiation	0.043	[0.040 : 0.045]
<i>Interactions Land covers : Time of the day</i>		
Wetlands:cosine(hour)	-1.604	[-1.691 : -1.518]
Wetlands:sine(hour)	-0.319	[-0.405 : -0.232]
≤5-year-old cutblocs:cosine(hour)	-0.434	[-0.523 : -0.345]
≤5-year-old cutblocs:sine(hour)	0.461	[0.373 : 0.550]
6–20-year-old cutblocs:cosine(hour)	-0.343	[-0.426 : -0.260]
6–20-year-old cutblocs:sine(hour)	0.144	[0.061 : 0.227]
Non-regenerating areas:cosine(hour)	-0.764	[-0.849 : -0.678]
Non-regenerating areas:sine(hour)	-0.048	[-0.133 : 0.037]
Road rights-of-way:cosine(hour)	-0.605	[-0.700 : -0.510]

Road rights-of-way:sine(hour)	-0.264	[-0.358 : -0.170]
20–50-year-old natural disturbances:cosine(hour)	-0.158	[-0.245 : -0.070]
20–50-year-old natural disturbances:sine(hour)	0.386	[0.299 : 0.473]
20–50-year-old regenerating stands:cosine(hour)	0.084	[0.001 : 0.167]
20–50-year-old regenerating stands:sine(hour)	0.156	[0.074 : 0.239]
Old mixed/deciduous:cosine(hour)	0.510	[0.427 : 0.593]
Old mixed/deciduous:sine(hour)	0.318	[0.236 : 0.401]
Young coniferous:cosine(hour)	0.217	[0.137 : 0.297]
Young coniferous:sine(hour)	0.121	[0.041 : 0.200]
<i>Interactions Land covers : ERA5-Land.T°</i>		
Wetlands: ERA5-Land.T°	0.055	[0.041 : 0.069]
≤5-year-old cutblocs: ERA5-Land.T°	0.111	[0.096 : 0.125]
6–20-year-old cutblocs: ERA5-Land.T°	0.103	[0.090 : 0.117]
Nonregen: ERA5-Land.T°	0.023	[0.010 : 0.037]
Road rights-of-way:ERA5-Land.T°	-0.022	[-0.037 : -0.007]
20–50-year-old natural disturbances: ERA5-Land.T°	0.021	[0.006 : 0.035]
20–50-year-old regenerating stands: ERA5-Land.T°	0.024	[0.010 : 0.037]
Old mixed/deciduous: ERA5-Land.T°	-0.021	[-0.035 : -0.008]
Young coniferous: ERA5-Land.T°	0.045	[0.032 : 0.058]

Table S4.7: Parameter estimates (β) and associated 95% confidence intervals (95% CI, [lower : upper]) of the variables included in the most parsimonious model explaining variations in above-ground air temperature in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the month of July. Statistically significant variables (i.e., 95% CI excluding 0) are shown in bold.

Variable	β	95% CI
Intercept	-0.331	[-0.791 : 0.130]
<i>Topography</i>		
Elevation	-0.0019	[-0.0024 : -0.0014]
<i>Time of the day</i>		
Cosine (hour)	0.182	[0.127 : 0.236]
Sine(hour)	-0.833	[-0.889 : -0.777]
<i>Land covers</i>		
Wetlands	-0.954	[-1.327 : -0.580]
≤5-year-old cutblocs	-0.696	[-1.077 : -0.316]
6–20-year-old cutblocs	-0.762	[-1.114 : -0.410]
Non-regenerating areas	-0.336	[-0.705 : 0.034]
Road rights-of-way	0.036	[-0.390 : 0.462]
20–50-year-old natural disturbances	-0.276	[-0.654 : 0.101]
20–50-year-old regenerating stands	-0.410	[-0.763 : -0.057]
Old mixed/deciduous	0.516	[0.157 : 0.876]
Young coniferous	-0.041	[-0.381 : 0.299]
<i>ERA5-Land</i>		
ERA5-Land.T°	1.051	[1.040 : 1.062]
Solar radiation	0.041	[0.038 : 0.044]
<i>Interactions Land covers : Time of the day</i>		
Wetlands:cosine(hour)	-1.821	[1.905 : -1.738]
Wetlands:sine(hour)	-0.352	[-0.433 : -0.272]
≤5-year-old cutblocs:cosine(hour)	-0.797	[-0.883 : -0.711]
≤5-year-old cutblocs:sine(hour)	0.256	[0.172 : 0.340]
6–20-year-old cutblocs:cosine(hour)	-0.625	[-0.706 : -0.545]
6–20-year-old cutblocs:sine(hour)	-0.062	[-0.140 : 0.016]
Non-regenerating areas:cosine(hour)	-0.654	[-0.737 : -0.572]
Non-regenerating areas:sine(hour)	-0.020	[-0.099 : 0.060]
Road rights-of-way:cosine(hour)	-0.406	[-0.500 : -0.312]

Road rights-of-way:sine(hour)	-0.114	[-0.204 : -0.024]
20–50-year-old natural disturbances:cosine(hour)	-0.044	[-0.128 : 0.04]
20–50-year-old natural disturbances:sine(hour)	0.526	[0.444 : 0.608]
20–50-year-old regenerating stands:cosine(hour)	0.003	[-0.076 : 0.083]
20–50-year-old regenerating stands:sine(hour)	0.125	[0.049 : 0.202]
Old mixed/deciduous:cosine(hour)	0.606	[0.525 : 0.687]
Old mixed/deciduous:sine(hour)	0.468	[0.390 : 0.547]
Young coniferous:cosine(hour)	0.101	[0.023 : 0.179]
Young coniferous:sine(hour)	-0.002	[-0.077 : 0.073]
<i>Interactions Land covers : ERA5-Land.T°</i>		
Wetlands: ERA5-Land.T°	0.079	[0.062 : 0.096]
≤5-year-old cutblocs: ERA5-Land.T°	0.091	[0.073 : 0.108]
6–20-year-old cutblocs: ERA5-Land.T°	0.065	[0.048 : 0.081]
Nonregen: ERA5-Land.T°	0.048	[0.031 : 0.065]
Road rights-of-way:ERA5-Land.T°	0.007	[-0.012 : 0.027]
20–50-year-old natural disturbances: ERA5-Land.T°	0.010	[-0.007 : 0.027]
20–50-year-old regenerating stands: ERA5-Land.T°	0.011	[-0.005 : 0.027]
Old mixed/deciduous: ERA5-Land.T°	-0.043	[-0.060 : -0.027]
Young coniferous: ERA5-Land.T°	0.010	[-0.005 : 0.026]

Table S4.8: Parameter estimates (β) and associated 95% confidence intervals (95% CI, [lower : upper]) of the variables included in the most parsimonious model explaining variations in above-ground air temperature in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the month of August. Statistically significant variables (i.e., 95% CI excluding 0) are shown in bold.

Variable	β	95% CI
Intercept	-1.662	[-2.16 : -1.163]
<i>Topography</i>		
Elevation	-0.0012	[-0.0016 : -0.0006]
<i>Time of the day</i>		
Cosine (hour)	0.058	[0.003 : 0.113]
Sine(hour)	-0.692	[-0.749 : -0.635]
<i>Land covers</i>		
Wetlands	-0.772	[-1.144 : -0.400]
≤5-year-old cutblocs	-0.417	[-0.794 : -0.039]
6–20-year-old cutblocs	-0.139	[-0.484 : 0.207]
Non-regenerating areas	-0.192	[-0.563 : 0.180]
Road rights-of-way	0.289	[-0.145 : 0.723]
20–50-year-old natural disturbances	-0.424	[-0.801 : -0.046]
20–50-year-old regenerating stands	-0.276	[-0.626 : 0.075]
Old mixed/deciduous	0.931	[0.576 : 1.286]
Young coniferous	0.231	[-0.104 : 0.566]
<i>ERA5-Land</i>		
ERA5-Land.T°	1.098	[1.088 : 1.108]
Solar radiation	0.028	[0.024 : 0.031]
<i>Interactions Land covers : Time of the day</i>		
Wetlands:cosine(hour)	-1.959	[-2.043 : -1.875]
Wetlands:sine(hour)	-0.515	[-0.598 : -0.432]
≤5-year-old cutblocs:cosine(hour)	-0.965	[-1.05 : -0.879]
≤5-year-old cutblocs:sine(hour)	0.139	[0.055 : 0.224]
6–20-year-old cutblocs:cosine(hour)	-0.641	[-0.720 : -0.563]
6–20-year-old cutblocs:sine(hour)	-0.053	[-0.130 : 0.025]
Non-regenerating areas:cosine(hour)	-0.768	[-0.853 : -0.683]
Non-regenerating areas:sine(hour)	-0.058	[-0.141 : 0.026]
Road rights-of-way:cosine(hour)	-0.592	[-0.693 : -0.490]

Road rights-of-way:sine(hour)	-0.233	[-0.333 : -0.133]
20–50-year-old natural disturbances:cosine(hour)	-0.033	[-0.117 : 0.052]
20–50-year-old natural disturbances:sine(hour)	0.519	[0.435 : 0.603]
20–50-year-old regenerating stands:cosine(hour)	0.033	[-0.046 : 0.112]
20–50-year-old regenerating stands:sine(hour)	0.116	[0.038 : 0.193]
Old mixed/deciduous:cosine(hour)	0.561	[0.480 : 0.643]
Old mixed/deciduous:sine(hour)	0.393	[0.313 : 0.473]
Young coniferous:cosine(hour)	0.138	[0.062 : 0.214]
Young coniferous:sine(hour)	-0.040	[-0.115 : 0.035]
<i>Interactions Land covers : ERA5-Land.T°</i>		
Wetlands: ERA5-Land.T°	0.054	[0.038 : 0.069]
≤5-year-old cutblocs: ERA5-Land.T°	0.067	[0.051 : 0.082]
6–20-year-old cutblocs: ERA5-Land.T°	0.020	[0.007 : 0.034]
Nonregen: ERA5-Land.T°	0.029	[0.013 : 0.045]
Road rights-of-way:ERA5-Land.T°	-0.015	[-0.035 : 0.004]
20–50-year-old natural disturbances: ERA5-Land.T°	0.013	[-0.003 : 0.028]
20–50-year-old regenerating stands: ERA5-Land.T°	0.002	[-0.012 : 0.017]
Old mixed/deciduous: ERA5-Land.T°	-0.064	[-0.079 : -0.05]
Young coniferous: ERA5-Land.T°	-0.008	[-0.021 : 0.006]

Table S4.9: Parameter estimates (β) and associated 95% confidence intervals (95% CI, [lower : upper]) of the variables included in the most parsimonious model explaining variations in above-ground air temperature in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the month of September. Statistically significant variables (i.e., 95% CI excluding 0) are shown in bold.

Variable	β	95% CI
	Intercept	-0.882 [-1.342 : -0.422]
<i>Topography</i>	Elevation	-0.0010 [-0.0017 : -0.0004]
<i>Time of the day</i>	Cosine (hour)	-0.003 [-0.056 : 0.050]
	Sine(hour)	-0.357 [-0.412 : -0.301]
<i>Land covers</i>	Wetlands	-0.745 [-1.054 : -0.437]
	≤5-year-old cutblocs	-0.378 [-0.695 : -0.061]
	6–20-year-old cutblocs	-0.371 [-0.664 : -0.077]
	Non-regenerating areas	-0.015 [-0.319 : 0.289]
	Road rights-of-way	0.161 [-0.177 : 0.500]
	20–50-year-old natural disturbances	-0.261 [-0.576 : 0.054]
	20–50-year-old regenerating stands	-0.355 [-0.650 : -0.059]
	Old mixed/deciduous	0.420 [0.124 : 0.715]
	Young coniferous	0.006 [-0.277 : 0.289]
<i>ERA5-Land</i>	ERA5-Land.T°	1.042 [1.033 : 1.051]
	Solar radiation	0.022 [0.018 : 0.025]
<i>Interactions Land covers : Time of the day</i>	Wetlands:cosine(hour)	-1.711 [-1.790 : -1.631]
	Wetlands:sine(hour)	-0.351 [-0.430 : -0.271]
	≤5-year-old cutblocs:cosine(hour)	-0.844 [-0.926 : -0.763]
	≤5-year-old cutblocs:sine(hour)	0.129 [0.048 : 0.211]
	6–20-year-old cutblocs:cosine(hour)	-0.469 [-0.545 : -0.393]
	6–20-year-old cutblocs:sine(hour)	0.103 [0.027 : 0.179]
	Non-regenerating areas:cosine(hour)	-0.647 [-0.726 : -0.568]
	Non-regenerating areas:sine(hour)	-0.025 [-0.104 : 0.054]
	Road rights-of-way:cosine(hour)	-0.567 [-0.655 : -0.479]

Road rights-of-way:sine(hour)	-0.192	[-0.279 : -0.105]
20–50-year-old natural disturbances:cosine(hour)	-0.129	[-0.209 : -0.048]
20–50-year-old natural disturbances:sine(hour)	0.292	[0.211 : 0.372]
20–50-year-old regenerating stands:cosine(hour)	-0.008	[-0.085 : 0.068]
20–50-year-old regenerating stands:sine(hour)	0.108	[0.031 : 0.184]
Old mixed/deciduous:cosine(hour)	0.459	[0.383 : 0.535]
Old mixed/deciduous:sine(hour)	0.316	[0.240 : 0.392]
Young coniferous:cosine(hour)	0.062	[-0.012 : 0.135]
Young coniferous:sine(hour)	0.059	[-0.014 : 0.132]
<i>Interactions Land covers : ERA5-Land.T°</i>		
Wetlands: ERA5-Land.T°	0.069	[0.055 : 0.083]
≤5-year-old cutblocs: ERA5-Land.T°	0.076	[0.062 : 0.090]
6–20-year-old cutblocs: ERA5-Land.T°	0.046	[0.033 : 0.059]
Nonregen: ERA5-Land.T°	0.027	[0.013 : 0.040]
Road rights-of-way:ERA5-Land.T°	-0.003	[-0.018 : 0.012]
20–50-year-old natural disturbances: ERA5-Land.T°	0.006	[-0.008 : 0.019]
20–50-year-old regenerating stands: ERA5-Land.T°	0.013	[-0.001 : 0.026]
Old mixed/deciduous: ERA5-Land.T°	-0.032	[-0.046 : -0.019]
Young coniferous: ERA5-Land.T°	0.004	[-0.009 : 0.017]

Table S4.10: Parameter estimates (β) and associated 95% confidence intervals (95% CI, [lower : upper]) of the variables included in the most parsimonious model explaining variations in above-ground air temperature in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the month of October. Statistically significant variables (i.e., 95% CI excluding 0) are shown in bold.

Variable	β	95% CI
Intercept	-0.054	[-0.566 : 0.457]
<i>Topography</i>		
Elevation	-0.0012	[-0.0017 : -0.0006]
<i>Time of the day</i>		
Cosine (hour)	0.265	[0.212 : 0.318]
Sine(hour)	-0.476	[-0.531 : -0.421]
<i>Land covers</i>		
Wetlands	-0.411	[-0.728 : -0.095]
≤5-year-old cutblocs	-0.034	[-0.359 : 0.291]
6–20-year-old cutblocs	-0.038	[-0.339 : 0.263]
Non-regenerating areas	-0.083	[-0.396 : 0.230]
Road rights-of-way	0.014	[-0.334 : 0.363]
20–50-year-old natural disturbances	-0.304	[-0.626 : 0.019]
20–50-year-old regenerating stands	-0.179	[-0.480 : 0.123]
Old mixed/deciduous	0.556	[0.252 : 0.859]
Young coniferous	0.116	[-0.175 : 0.406]
<i>ERA5-Land</i>		
ERA5-Land.T°	1.001	[0.993 : 1.008]
Solar radiation	0.015	[0.010 : 0.020]
<i>Interactions Land covers : Time of the day</i>		
Wetlands:cosine(hour)	-1.661	[-1.741 : -1.581]
Wetlands:sine(hour)	-0.483	[-0.562 : -0.404]
≤5-year-old cutblocs:cosine(hour)	-0.788	[-0.869 : -0.706]
≤5-year-old cutblocs:sine(hour)	0.094	[0.012 : 0.175]
6–20-year-old cutblocs:cosine(hour)	-0.512	[-0.588 : -0.437]
6–20-year-old cutblocs:sine(hour)	0.003	[-0.073 : 0.078]
Non-regenerating areas:cosine(hour)	-0.676	[-0.756 : -0.597]
Non-regenerating areas:sine(hour)	0.003	[-0.076 : 0.081]
Road rights-of-way:cosine(hour)	-0.530	[-0.619 : -0.442]
Road rights-of-way:sine(hour)	-0.136	[-0.223 : -0.048]

20–50-year-old natural disturbances:cosine(hour)	-0.263	[-0.343 : -0.182]
20–50-year-old natural disturbances:sine(hour)	0.273	[0.193 : 0.353]
20–50-year-old regenerating stands:cosine(hour)	-0.106	[-0.182 : -0.030]
20–50-year-old regenerating stands:sine(hour)	0.047	[-0.029 : 0.122]
Old mixed/deciduous:cosine(hour)	0.220	[0.144 : 0.296]
Old mixed/deciduous:sine(hour)	0.155	[0.080 : 0.231]
Young coniferous:cosine(hour)	0.047	[-0.027 : 0.120]
Young coniferous:sine(hour)	0.046	[-0.027 : 0.119]
<i>Interactions Land covers : ERA5-Land.T°</i>		
Wetlands: ERA5-Land.T°	0.052	[0.040 : 0.063]
≤5-year-old cutblocs: ERA5-Land.T°	0.078	[0.066 : 0.089]
6–20-year-old cutblocs: ERA5-Land.T°	0.029	[0.019 : 0.040]
Nonregen: ERA5-Land.T°	0.059	[0.048 : 0.071]
Road rights-of-way:ERA5-Land.T°	0.021	[0.008 : 0.034]
20–50-year-old natural disturbances: ERA5-Land.T°	0.057	[0.045 : 0.068]
20–50-year-old regenerating stands: ERA5-Land.T°	0.007	[-0.004 : 0.018]
Old mixed/deciduous: ERA5-Land.T°	-0.024	[-0.035 : -0.014]
Young coniferous: ERA5-Land.T°	-0.003	[-0.013 : 0.008]

Table S4.11: Parameter estimates (β) and associated 95% confidence intervals (95% CI, [lower : upper]) of the variables included in the most parsimonious model explaining variations in above-ground air temperature in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the month of November. Statistically significant variables (i.e., 95% CI excluding 0) are shown in bold.

Variable	β	95% CI
Intercept	1.146	[0.704 : 1.589]
<i>Topography</i>		
Elevation	-0.0018	[-0.0023 : -0.0013]
<i>Time of the day</i>		
Cosine (hour)	0.403	[0.364 : 0.442]
Sine(hour)	-0.003	[-0.042 : 0.036]
<i>Land covers</i>		
Wetlands	-0.115	[-0.383 : 0.153]
≤5-year-old cutblocks	-0.151	[-0.426 : 0.125]
6–20-year-old cutblocks	0.047	[-0.210 : 0.303]
Non-regenerating areas	0.064	[-0.201 : 0.328]
Road rights-of-way	0.025	[-0.269 : 0.318]
20–50-year-old Natural disturbances	-0.368	[-0.640 : -0.095]
20–50-year-old Regenerating stands	-0.244	[-0.500 : 0.012]
Old mixed-deciduous	-0.018	[-0.275 : 0.240]
Young coniferous	-0.070	[-0.317 : 0.177]
<i>ERA5-Land</i>		
ERA5-Land.T°	0.977	[0.972 : 0.981]
Solar radiation	-	-
<i>Interactions Land covers : Time of the day</i>		
Wetlands:cosine(hour)	-0.853	[-0.913 : -0.794]
Wetlands:sine(hour)	-0.338	[-0.398 : -0.278]
≤5-year-old cutblocks:cosine(hour)	-0.535	[-0.597 : -0.474]
≤5-year-old cutblocks:sine(hour)	-0.033	[-0.095 : 0.028]
6–20-year-old cutblocks:cosine(hour)	-0.273	[-0.331 : -0.216]
6–20-year-old cutblocks:sine(hour)	-0.048	[-0.106 : 0.009]
Non-regenerating areas:cosine(hour)	-0.381	[-0.441 : -0.322]
Non-regenerating areas:sine(hour)	-0.088	[-0.147 : -0.029]
Road rights-of-way:cosine(hour)	-0.254	[-0.319 : -0.188]
Road rights-of-way:sine(hour)	-0.054	[-0.120 : 0.011]

20–50-year-old Natural disturbances:cosine(hour)	-0.221	[-0.281 : -0.160]
20–50-year-old Natural disturbances:sine(hour)	0.110	[0.050 : 0.171]
20–50-year-old Regenerating stands:cosine(hour)	-0.048	[-0.105 : 0.009]
20–50-year-old Regenerating stands:sine(hour)	0.063	[0.006 : 0.120]
Old mixed-deciduous:cosine(hour)	0.013	[-0.044 : 0.070]
Old mixed-deciduous:sine(hour)	0.017	[-0.040 : 0.074]
Young coniferous:cosine(hour)	0.004	[-0.051 : 0.059]
Young coniferous:sine(hour)	-0.026	[-0.081 : 0.029]
<i>Interactions Land covers : ERA5-Land.T°</i>		
Wetlands: ERA5-Land.T°	0.039	[0.032 : 0.046]
≤5-year-old cutblocks: ERA5-Land.T°	0.048	[0.041 : 0.056]
6–20-year-old cutblocks: ERA5-Land.T°	0.039	[0.032 : 0.046]
Nonregen: ERA5-Land.T°	0.015	[0.009 : 0.022]
Road rights-of-way:ERA5-Land.T°	0.005	[-0.002 : 0.012]
20–50-year-old Natural disturbances: ERA5-Land.T°	0.029	[0.022 : 0.036]
20–50-year-old Regenerating stands: ERA5-Land.T°	0.010	[0.003 : 0.016]
Old mixed-deciduous: ERA5-Land.T°	-0.037	[-0.044 : -0.030]
Young coniferous: ERA5-Land.T°	-0.006	[-0.012 : 0.001]

Table S4.12: Parameter estimates (β) and associated 95% confidence intervals (95% CI, [lower : upper]) of the variables included in the most parsimonious model explaining variations in above-ground air temperature in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the month of December. Statistically significant variables (i.e., 95% CI excluding 0) are shown in bold.

Variable	β	95% CI
Intercept	0.650	[0.208 : 1.092]
<i>Topography</i>		
Elevation	-0.0011	[-0.0015 : -0.0005]
<i>Time of the day</i>		
Cosine (hour)	0.289	[0.241 : 0.337]
Sine(hour)	-0.080	[-0.132 : -0.028]
<i>Land covers</i>		
Wetlands	0.478	[0.200 : 0.757]
≤5-year-old cutblocs	-0.233	[-0.518 : 0.052]
6–20-year-old cutblocs	0.062	[-0.203 : 0.328]
Non-regenerating areas	0.233	[-0.043 : 0.508]
Road rights-of-way	0.202	[-0.103 : 0.508]
20–50-year-old natural disturbances	-0.298	[-0.581 : -0.016]
20–50-year-old regenerating stands	-0.296	[-0.561 : -0.030]
Old mixed/deciduous	-0.417	[-0.684 : -0.150]
Young coniferous	-0.150	[-0.407 : 0.106]
<i>ERA5-Land</i>		
ERA5-Land.T°	0.996	[0.990 : 1.001]
Solar radiation	0.163	[0.148 : 0.179]
<i>Interactions Land covers : Time of the day</i>		
Wetlands:cosine(hour)	-0.887	[-0.959 : -0.815]
Wetlands:sine(hour)	-0.323	[-0.397 : -0.250]
≤5-year-old cutblocs:cosine(hour)	-0.578	[-0.652 : -0.503]
≤5-year-old cutblocs:sine(hour)	0.011	[-0.064 : 0.086]
6–20-year-old cutblocs:cosine(hour)	-0.313	[-0.382 : -0.244]
6–20-year-old cutblocs:sine(hour)	-0.009	[-0.079 : 0.061]
Non-regenerating areas:cosine(hour)	-0.481	[-0.553 : -0.410]
Non-regenerating areas:sine(hour)	0.033	[-0.039 : 0.106]
Road rights-of-way:cosine(hour)	-0.502	[-0.581 : -0.422]
Road rights-of-way:sine(hour)	-0.070	[-0.150 : 0.010]

20–50-year-old natural disturbances:cosine(hour)	-0.270	[-0.344 : -0.196]
20–50-year-old natural disturbances:sine(hour)	0.148	[0.074 : 0.223]
20–50-year-old regenerating stands:cosine(hour)	-0.030	[-0.099 : 0.040]
20–50-year-old regenerating stands:sine(hour)	0.086	[0.016 : 0.157]
Old mixed/deciduous:cosine(hour)	0.074	[0.004 : 0.143]
Old mixed/deciduous:sine(hour)	0.137	[0.067 : 0.207]
Young coniferous:cosine(hour)	0.014	[-0.052 : 0.081]
Young coniferous:sine(hour)	0.005	[-0.062 : 0.073]
<i>Interactions Land covers : ERA5-Land.T°</i>		
Wetlands: ERA5-Land.T°	0.076	[0.068 : 0.084]
≤5-year-old cutblocs: ERA5-Land.T°	-0.017	[-0.026 : -0.009]
6–20-year-old cutblocs: ERA5-Land.T°	0.002	[-0.005 : 0.010]
Nonregen: ERA5-Land.T°	0.012	[0.004 : 0.020]
Road rights-of-way:ERA5-Land.T°	0.006	[-0.003 : 0.015]
20–50-year-old natural disturbances: ERA5-Land.T°	-0.009	[-0.017 : 0.000]
20–50-year-old regenerating stands: ERA5-Land.T°	-0.016	[-0.024 : -0.008]
Old mixed/deciduous: ERA5-Land.T°	-0.076	[-0.084 : -0.069]
Young coniferous: ERA5-Land.T°	-0.023	[-0.031 : -0.016]

SUPPLEMENTARY MATERIALS 5

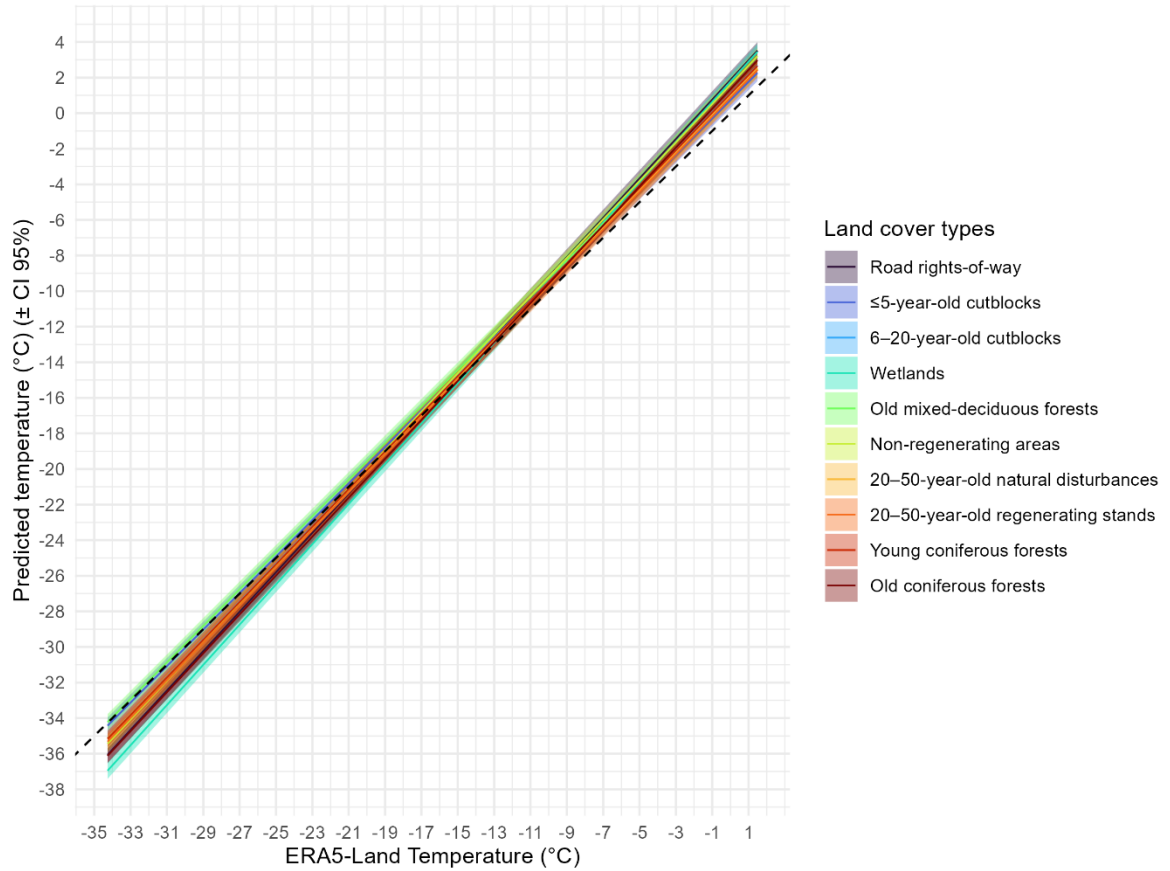


Figure S5.1: Variations in predicted above-ground air temperature (coloured lines) and associated 95% confidence intervals (shaded coloured areas) as a function of ERA5-Land temperature for different land cover types in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the month of January. The dotted line represents the 1:1 slope.

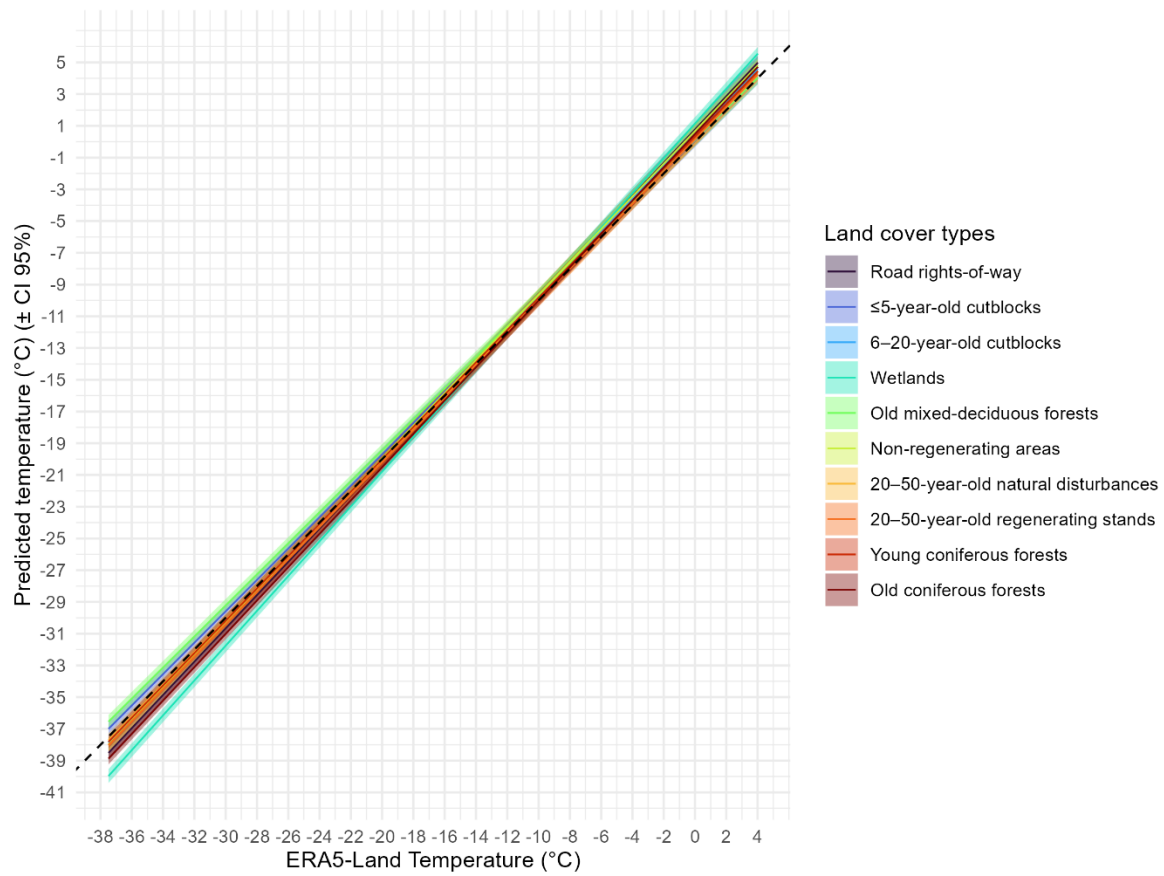


Figure S5.2: Variations in predicted above-ground air temperature (coloured lines) and associated 95% confidence intervals (shaded coloured areas) as a function of ERA5-Land temperature for different land cover types in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the month of February. The dotted line represents the 1:1 slope.

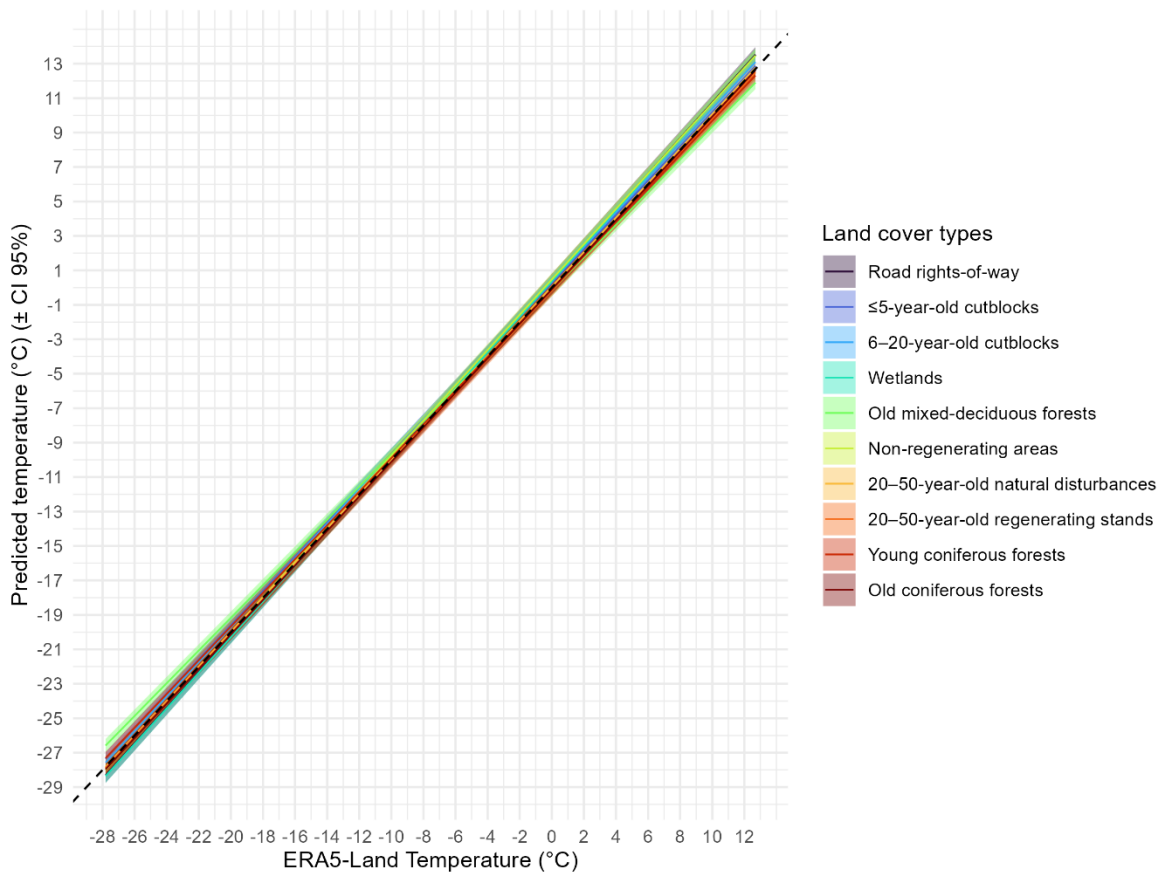


Figure S5.3: Variations in predicted above-ground air temperature (coloured lines) and associated 95% confidence intervals (shaded coloured areas) as a function of ERA5-Land temperature for different land cover types in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the month of March. The dotted line represents the 1:1 slope.

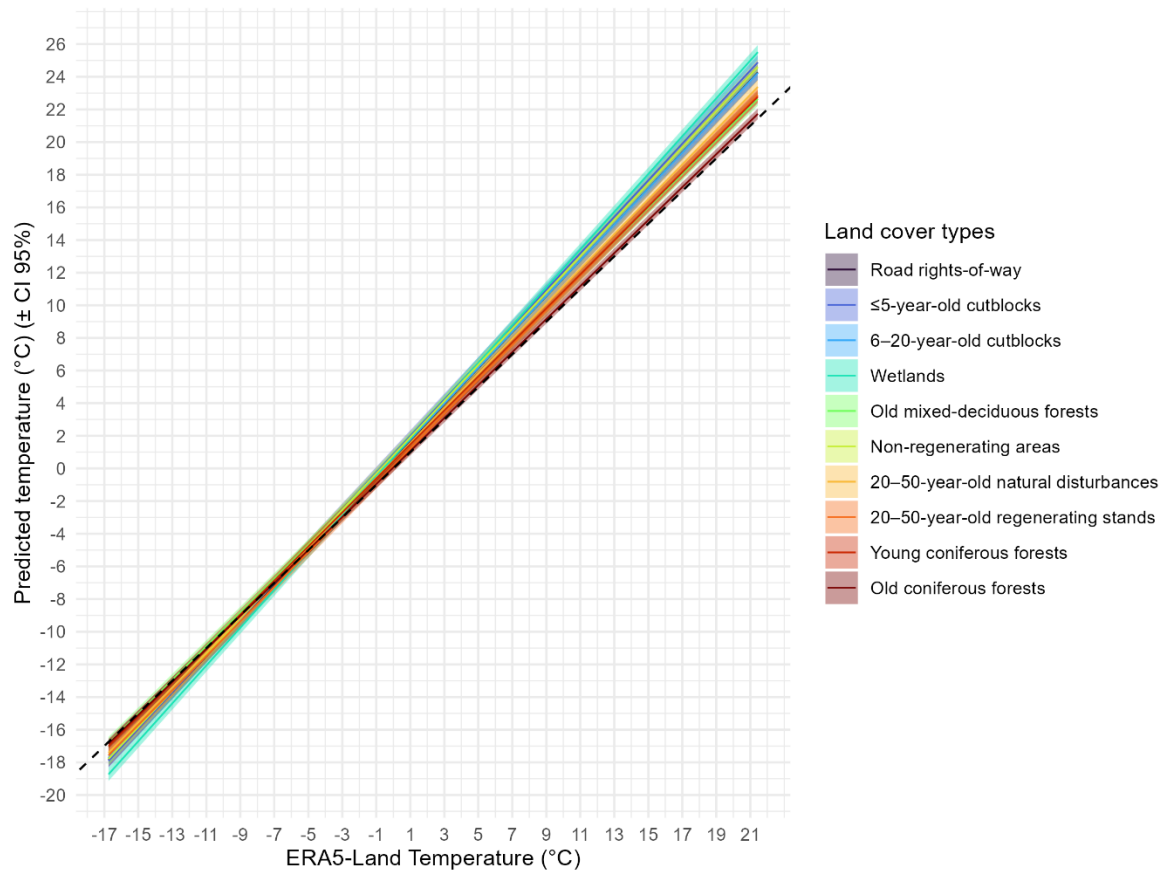


Figure S5.4: Variations in predicted above-ground air temperature (coloured lines) and associated 95% confidence intervals (shaded coloured areas) as a function of ERA5-Land temperature for different land cover types in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the month of April. The dotted line represents the 1:1 slope.

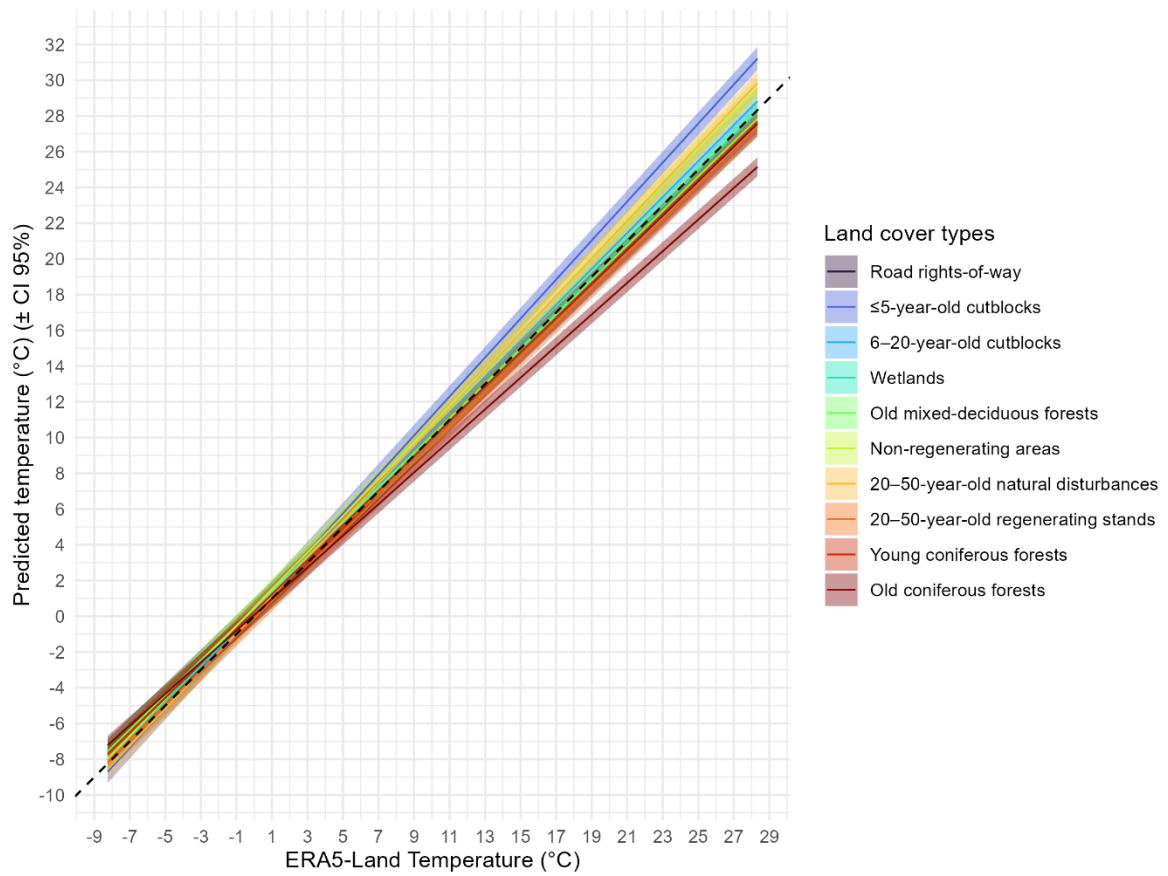


Figure S5.5: Variations in predicted above-ground air temperature (coloured lines) and associated 95% confidence intervals (shaded coloured areas) as a function of ERA5-Land temperature for different land cover types in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the month of May. The dotted line represents the 1:1 slope.

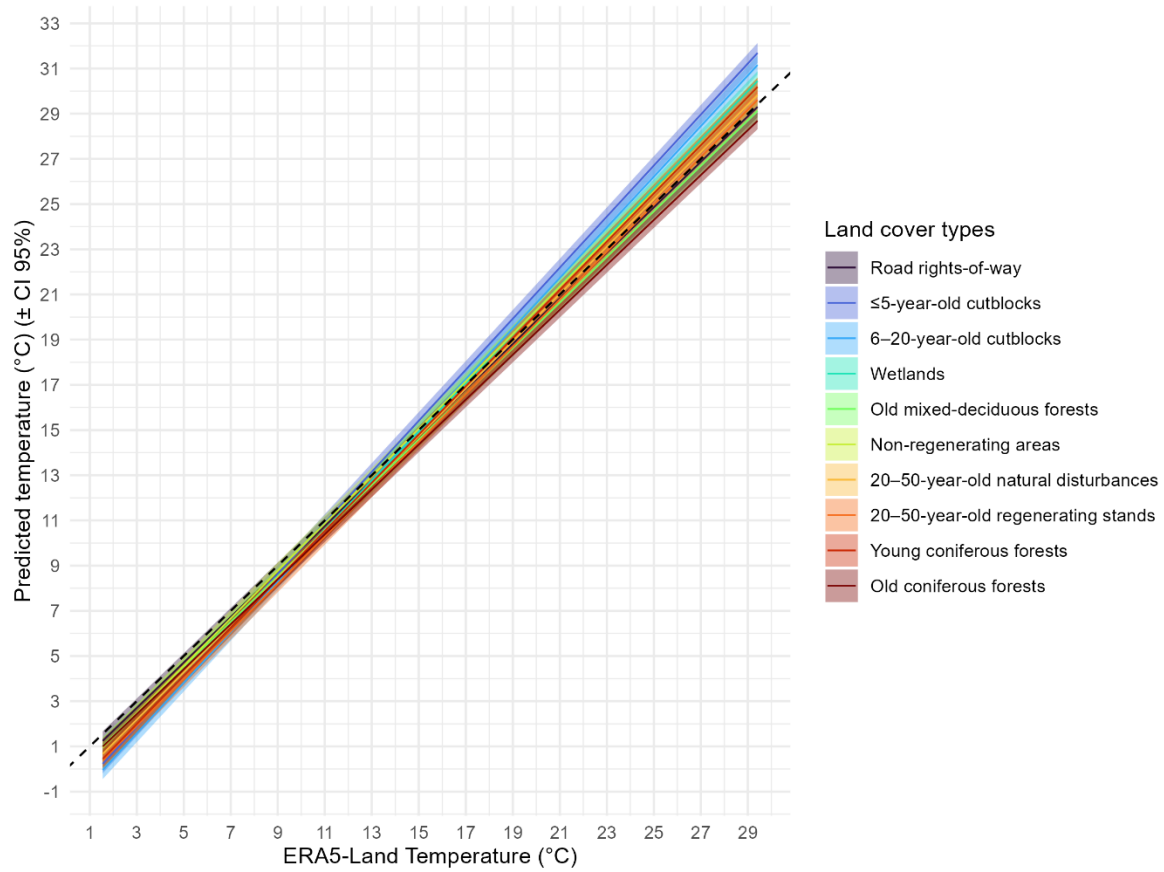


Figure S5.6: Variations in predicted above-ground air temperature (coloured lines) and associated 95% confidence intervals (shaded coloured areas) as a function of ERA5-Land temperature for different land cover types in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the month of June. The dotted line represents the 1:1 slope.

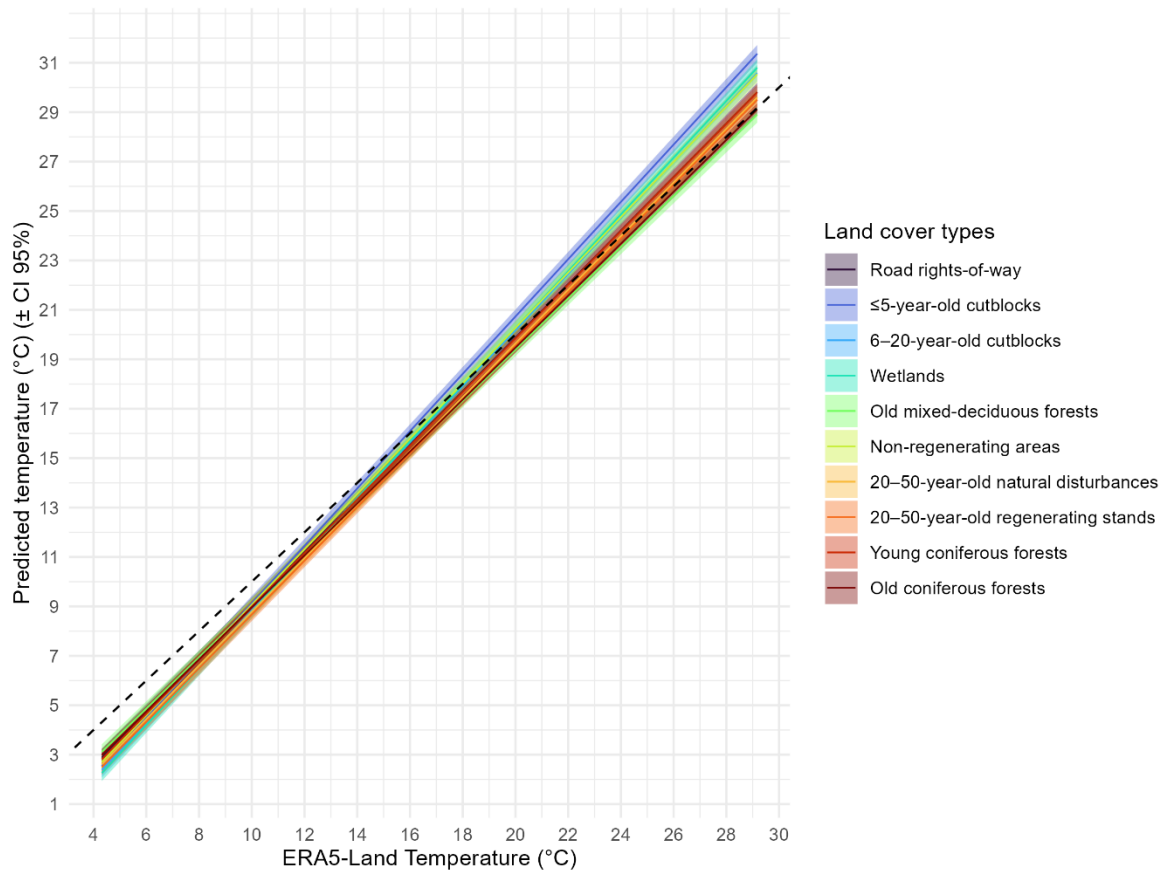


Figure S5.7: Variations in predicted above-ground air temperature (coloured lines) and associated 95% confidence intervals (shaded coloured areas) as a function of ERA5-Land temperature for different land cover types in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the month of July. The dotted line represents the 1:1 slope.

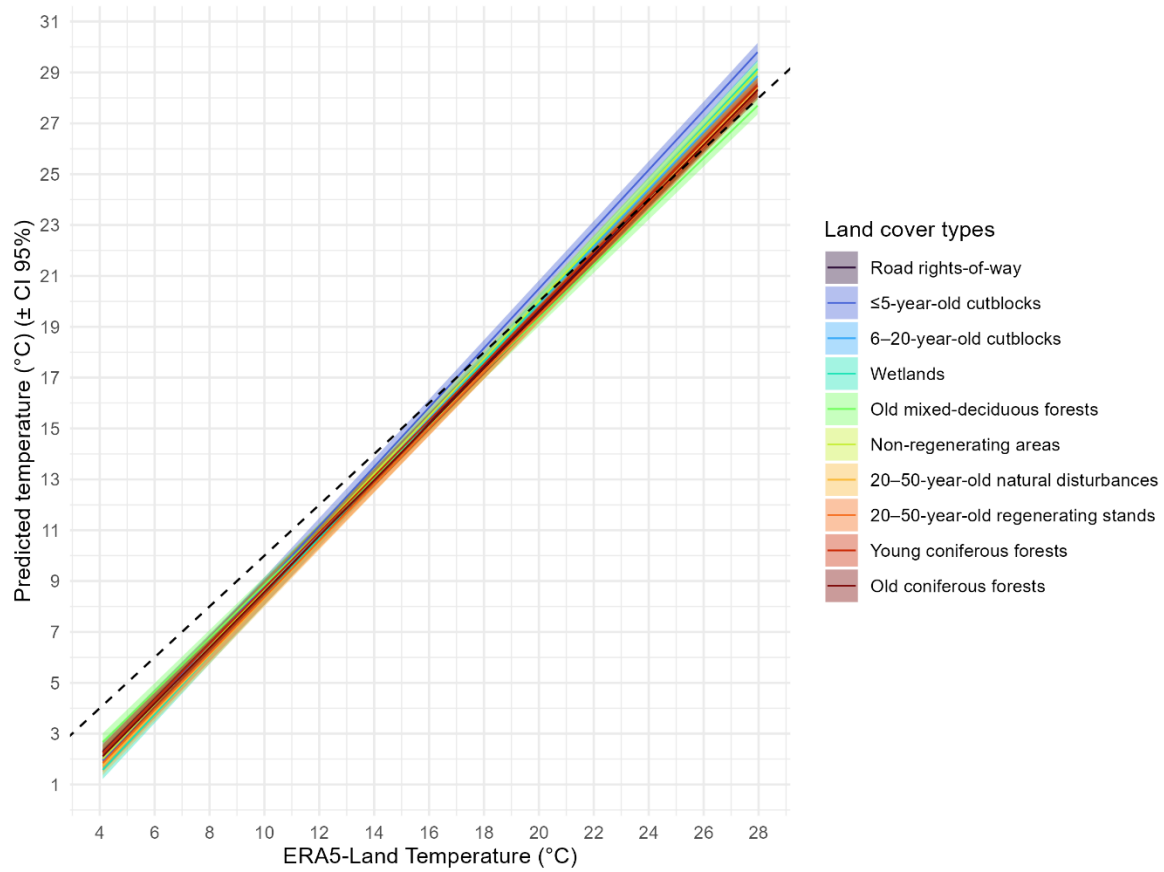


Figure S5.8: Variations in predicted above-ground air temperature (coloured lines) and associated 95% confidence intervals (shaded coloured areas) as a function of ERA5-Land temperature for different land cover types in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the month of August. The dotted line represents the 1:1 slope.

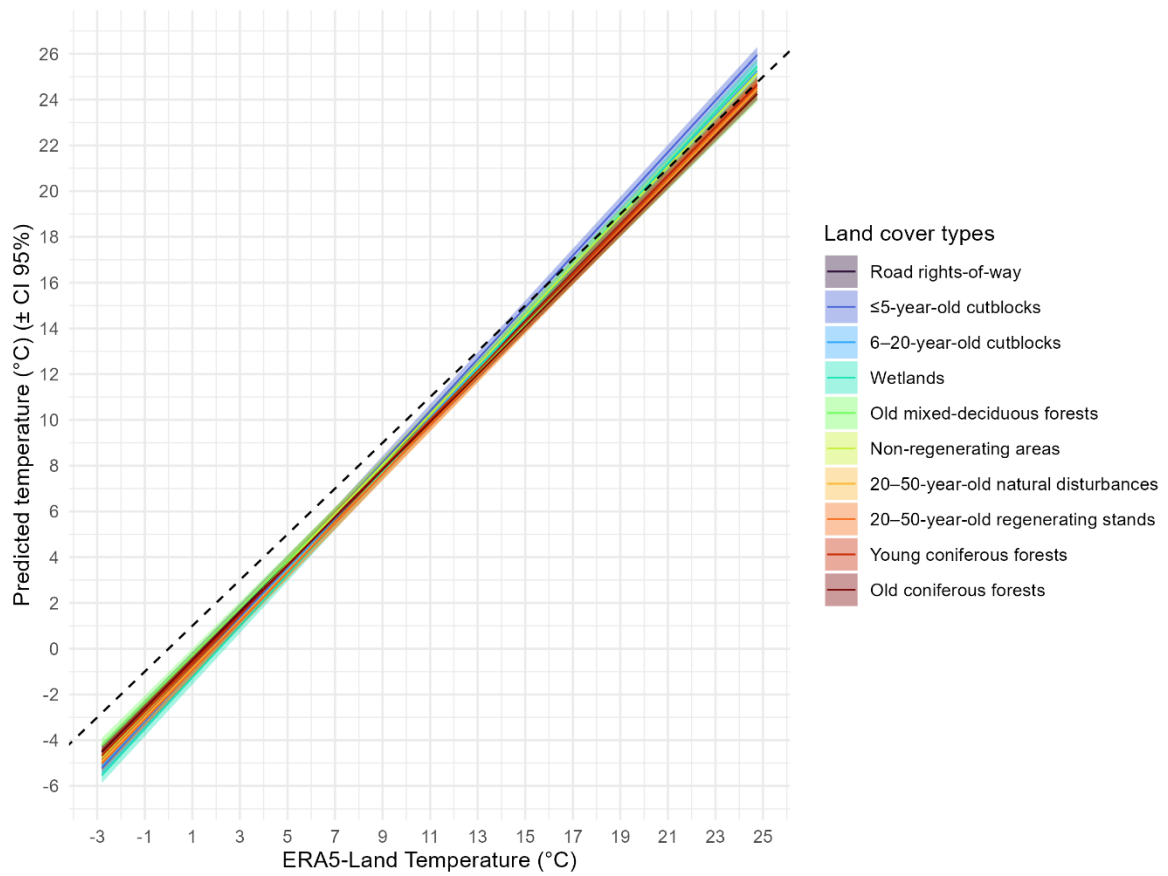


Figure S5.9: Variations in predicted above-ground air temperature (coloured lines) and associated 95% confidence intervals (shaded coloured areas) as a function of ERA5-Land temperature for different land cover types in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the month of September. The dotted line represents the 1:1 slope.

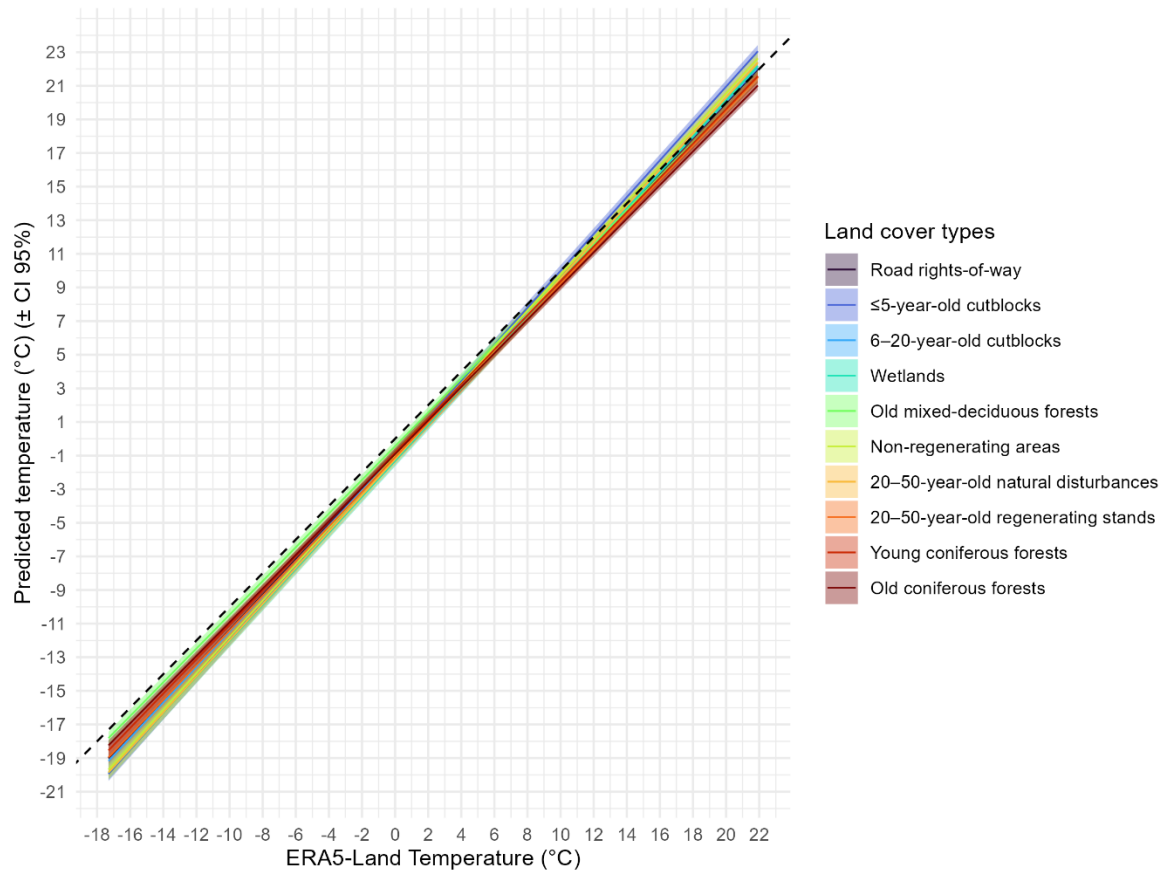


Figure S5.10: Variations in predicted above-ground air temperature (coloured lines) and associated 95% confidence intervals (shaded coloured areas) as a function of ERA5-Land temperature for different land cover types in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the month of October. The dotted line represents the 1:1 slope.

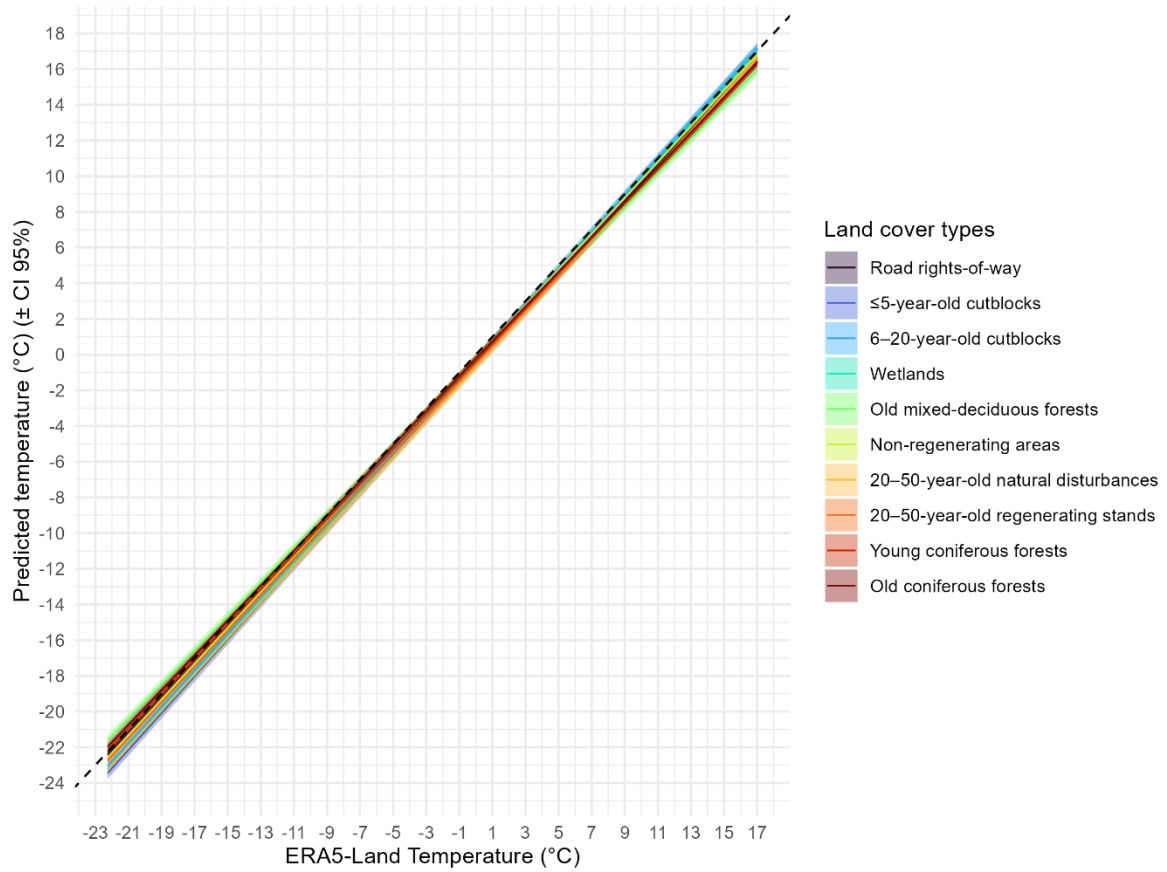


Figure S5.11: Variations in predicted above-ground air temperature (coloured lines) and associated 95% confidence intervals (shaded coloured areas) as a function of ERA5-Land temperature for different land cover types in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the month of November. The dotted line represents the 1:1 slope.

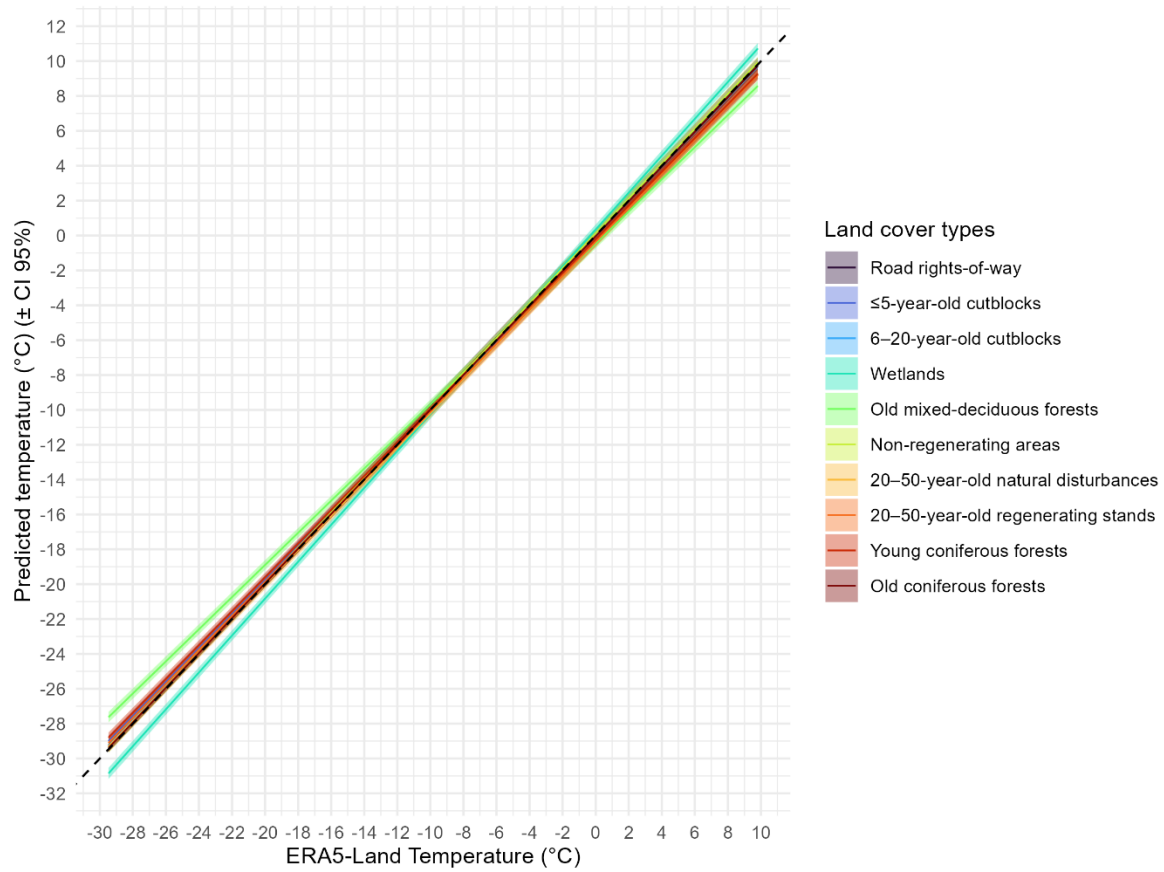


Figure S5.12: Variations in predicted above-ground air temperature (coloured lines) and associated 95% confidence intervals (shaded coloured areas) as a function of ERA5-Land temperature for different land cover types in the range of the Charlevoix boreal caribou, Québec, Canada, during the month of December. The dotted line represents the 1:1 slope.

CONCLUSION GÉNÉRALE

RETOUR SUR LE CONTEXTE ET LES PRINCIPAUX RÉSULTATS

Les habitats fauniques sont soumis à des conditions thermiques de plus en plus extrêmes et imprévisibles, mettant en péril plusieurs espèces animales (Pereira et al., 2012 ; IPCC, 2022). Les refuges thermiques peuvent atténuer les effets des changements climatiques en offrant des opportunités de thermorégulation (Ashcroft et al., 2012 ; Shoo et al., 2010 ; Elmore et al., 2017). Leur identification repose toutefois sur une bonne compréhension des conditions environnementales qui favorisent leur présence. Des mesures précises des variations de température sont ainsi nécessaires pour caractériser les facteurs permettant de prédire leur distribution dans le paysage (Ashcroft, 2010 ; Suggitt et al., 2011). Pour ce faire, les enregistreurs de température *in situ* offrent des mesures à une résolution spatiale élevée bien que sur des territoires restreints (p. ex. des centaines de dispositifs doivent être utilisés pour couvrir l'aire utilisée par une population de grands mammifères). À l'inverse, les produits de télédétection et les réanalyses climatiques comme ERA5-Land couvrent de vastes territoires sur de longues périodes temporelles, mais ont une résolution spatiale plus grossière. La combinaison des deux types de données constitue donc une approche prometteuse pour décrire et cartographier les refuges thermiques, base nécessaire à l'élaboration de stratégies de conservation réussies (Elmore et al., 2017).

Le premier objectif de mon étude était d'évaluer l'influence de différentes associations végétales, strates d'élévation et classe d'orientation de la pente sur la température de l'air mesurée à fine échelle afin d'identifier des conditions représentatives de refuges thermiques pour le caribou boréal sur un cycle annuel. Pour ce faire, 273 thermochrons ont été distribués dans l'aire de répartition du caribou de Charlevoix, ceux-ci récoltant une mesure de température toutes les 210 minutes sur une période de 3 ans. Mon deuxième objectif visait à explorer si les données de la réanalyse ERA5-Land permettraient d'améliorer l'ajustement des modèles de température construits à partir de données locales. J'ai ainsi comparé des modèles contenant des variables locales seulement (dont le type de couvert, l'élévation et l'orientation de la pente), des modèles combinant des variables locales et des variables tirées

d'ERA5-Land (température et radiations solaires) et un modèle s'appuyant seulement sur les données de température d'ERA5-Land.

Mes résultats ont montré que les forêts décidues, mixtes et résineuses matures (c.-à-d. de plus de 50 ans) offraient des températures journalières plus fraîches en été (jusqu'à 4 °C plus fraîches que les milieux ouverts), ainsi que des variations de température moindres entre le jour et la nuit. Parallèlement, les milieux humides agissaient comme des zones plus fraîches la nuit en été, mais s'avéraient plus chaudes le jour en hiver en raison d'une plus forte exposition aux rayons du soleil. L'élévation avait un effet significatif – quoique faible – sur la température à tous les mois, avec une perte de température par kilomètre d'élévation allant de -0.6 °C à -2.2 °C. Les radiations solaires avaient un effet positif sur la température mesurée localement pour tous les mois, à l'exception du mois de novembre, soulignant la capacité d'interception des rayons solaires par la canopée foliée. D'autre part, l'intégration de données issues d'ERA5-Land a grandement et systématiquement amélioré l'ajustement des modèles. En effet, les modèles comprenant ces données (combinées aux variables locales ou non) s'avéraient toujours plus parcimonieux et offraient des ajustements (R^2) élevés (variant entre 0,864 et 0,916, selon le mois), suggérant un gain significatif dans l'explication des variations de la température locale.

CONTRIBUTIONS THÉORIQUES

D'un point de vue théorique, mon étude offre une meilleure compréhension des variations de la température de l'air en fonction de la couverture végétale en forêt boréale, en mettant en évidence différentes dynamiques spatiales et temporelles. Bien que la relation entre le couvert végétal et la température de l'air, ainsi que les différences de température entre les forêts et les milieux ouverts, soient bien documentées dans la littérature (p. ex. Geiger et al., 2009 ; Frey et al., 2016 ; De Frenne et al., 2021), mes travaux étendent ces connaissances en examinant ces variations le long d'un gradient d'ouverture du couvert forestier et à différentes périodes du jour et de l'année. Plus précisément, j'ai mesuré, tout au long de l'année, la température de l'air dans trois types de forêts d'âges variés, trois types de zones en régénération suivant des perturbations plus ou moins récentes, et quatre types de

milieux ouverts. Mon étude détaille les variations horaires de la température de l'air pour chaque mois de l'année, offrant une perspective temporelle fine souvent absente dans la littérature (par rapport à, par exemple, Greiser et al., 2018 ; Macek et al., 2019 ; Vandewiele et al., 2023).

En plus d'enrichir notre compréhension de la variation de la température en forêt boréale, mon étude met en lumière l'impact des perturbations anthropiques, telles que les coupes forestières, sur la répartition des zones chaudes et des refuges thermiques. En effet, mes résultats indiquent que les coupes forestières présentent des températures plus élevées en été et plus basses en hiver par rapport aux forêts matures (jusqu'à 4 et 2 °C, respectivement), ce qui pourrait avoir des conséquences pour la thermorégulation d'espèces endothermes. En effet, ces habitats altérés par l'aménagement forestier présentaient des conditions thermiques plus variables et plus extrêmes, susceptibles de pousser certains individus hors des zones de thermoneutralité et normative (Mitchell et al. 2018).

Le gain amené par l'intégration des données provenant des réanalyses ERA5-Land apporte de nouvelles perspectives à l'étude des refuges thermiques. À ma connaissance, cette réanalyse n'avait, jusqu'à présent, qu'éte comparée aux données de stations météorologiques (Vanella et al., 2022 ; Clelland et al., 2024 ; Gheysari et al., 2024) ou qu'utilisée pour décrire la température à l'échelle du macroclimat (Auvinen et al., 2024 ; Santos et al., 2024). Mon étude montre que les données tirées des réanalyses ERA5-Land peuvent également servir à prédire la température des microclimats, malgré leur résolution spatiale plutôt grossière pour cette échelle d'étude du climat.

CONTRIBUTIONS APPLIQUÉES

Mes résultats ont également un écho concret lorsqu'appliqués à la situation précise d'une espèce endotherme à statut précaire comme la population boréale du caribou des bois. En effet, le caribou est reconnu comme étant sensible aux températures élevées (Kolloen, 2015), et doit pouvoir compter sur des refuges thermiques pour faire face aux changements climatiques en cours et futurs (Environnement Canada 2011). Par conséquent, mes résultats

montrent que les forêts décidues, mixtes et résineuses matures de même que les milieux humides offrent des opportunités de thermorégulation intéressantes, à condition d'en conserver suffisamment à l'échelle des aires de répartition des différentes populations. De tels refuges thermiques s'avéreront d'autant importants que l'énergie non investie en thermorégulation pourra être réaffectée à d'autres fonctions physiologiques (p. ex. croissance et reproduction ; Campagna et Le Bœuf, 1988 ; Angilletta, 2009 ; Woodroffe et al., 2017). Ultimement, ces refuges devraient favoriser la survie des individus, d'autant que ces catégories d'habitat sont également associées à des ressources alimentaires abondantes (Lesica et al., 1991 ; Briand et al., 2008) et des risques de prédation moindres (Leclerc et al., 2014 ; Losier et al., 2015 ; Leblond et al., 2016). Par conséquent, favoriser la conservation (ou la restauration) de grandes superficies de forêts matures, protéger les milieux humides et limiter la représentation des coupes forestières dans le paysage contribueraient au maintien de populations autosuffisantes de caribous. De plus, mes résultats montrent que les coupes forestières sont sujettes à de plus grandes variations de température ; par conséquent, diminuer leur représentation à l'échelle du paysage pourrait contribuer à modérer les hausses locales de températures de l'air, particulièrement durant les périodes de fortes chaleurs estivales.

Bien que ma récolte de données se soit concentrée dans l'aire de répartition du caribou de Charlevoix, mes résultats peuvent également s'appliquer aux autres espèces endothermes de cette région. En effet, la perception des microclimats et des refuges thermiques par les animaux dépend en partie de leur taille et de leur capacité de dispersion (Mislán et Helmuth, 2008). Mes résultats pourraient donc s'appliquer à la grande faune dont la taille approche celle du caribou, comme l'orignal (*Alces alces americana*). D'autre part, plusieurs grands mammifères sont connus pour être sensibles au stress thermique, notamment l'ours noir (*Ursus americanus*), le grizzly (*Ursus arctos horribilis*), ou le bison (*Bison bison athabasca*), diverses études ayant montré que la température était un facteur déterminant dans le comportements d'utilisation de l'espace, de taux activité et de sélection de ressources exprimés par ces trois espèces (Lara-Díaz et al., 2018 ; Rogers et al., 2021 ; Sheppard et al., 2025). Ainsi, les retombées de mon étude dépassent le seul cas du caribou et pourraient

s'appliquer à un ensemble plus vaste de grands mammifères boréaux. Mon approche associant des données in situ et des données de réanalyse serait facilement transposable à d'autres écosystèmes, sachant que la réanalyse d'ERA5-Land couvrent toutes les terres émergées de la planète (Muñoz Sabater, 2019). Elle pourrait également être adaptée à d'autres taxons ; par exemple, une étude des refuges thermiques pour les petits mammifères pourrait mesurer la température très près du sol (premiers 30 cm), ou encore une étude sur les oiseaux forestiers pourrait prendre des mesures de température dans la canopée.

L'intégration des données de température et de radiations issues des réanalyses d'ERA5-Land dans mes modèles a montré que cet outil permettait d'améliorer significativement l'estimation de la température de l'air à fine échelle, particulièrement lorsqu'associé à des variables locales de végétation et de topographie. Ainsi, une version corrigée des réanalyses d'ERA5-Land, comme celle utilisée dans mon étude, pourrait servir à cartographier les refuges thermiques ou à analyser l'utilisation de l'espace par des espèces endothermes caractéristiques de la forêt boréale, en s'appuyant sur les coefficients obtenus ou en répliquant la même démarche méthodologique. Cette approche permettrait notamment de valoriser des données télémétriques passées ou issues d'autres aires d'étude, p. ex. en générant des modèles comportementaux intégrant la température locale. De telles données pourraient s'avérer précieuses dans le cadre de l'expansion ou de la création de nouvelles aires protégées basées sur la délimitation de refuges thermiques, permettant de mieux anticiper les impacts des changements climatiques sur la faune. De plus, cette méthodologie pourrait être étendue à d'autres domaines bioclimatiques, sous réserve d'une validation appropriée, offrant ainsi un outil flexible pour la conservation dans divers contextes écologiques.

LIMITES ET PERSPECTIVES

Dans mon étude, je me suis concentré sur la température de l'air. Or, pour estimer plus efficacement les conditions thermiques ressenties par les animaux, il serait pertinent de considérer la température opérante, qui correspond à la température ressentie par les individus (Bakken, 1976). Cette dernière intègre des facteurs tels que la vitesse du vent, les

radiations solaires directes et diffuses, l'humidité de l'air, et idéalement, la conductance thermique de l'espèce cible qui peut être mesurée avec des modèles animaux (Dzialowski, 2005). Ces variables n'étaient pas disponibles pour mon étude. Néanmoins, l'utilisation de la température de l'air pour l'étude de la thermorégulation reste pertinente car elle est corrélée à la température corporelle chez les ectothermes (Fierro-Estrada, 2019) et est un des principaux déterminant de la thermorégulation chez les endothermes (Rezende et Bacigalupe, 2015).

Dans l'aire d'étude, les coupes forestières étaient majoritairement des coupes avec protection de la régénération et des sols (CPRS), dans lesquelles plus de 95% des tiges sont récoltées. Bien que mon analyse ait permis de mettre en évidence l'effet de l'âge de ces perturbations sur la température de l'air, je n'ai pas pu examiner l'impact d'autres types de coupes (p. ex. coupes partielles). Or, plusieurs travaux ont montré que la fragmentation des habitats forestiers pouvait influencer le climat local (Arroyo-Rodríguez et al., 2017 ; Mendes et Prevedello, 2020). Des recherches futures pourraient ainsi caractériser et comparer l'effet de différents types de coupes forestières sur la température locale, afin de guider les pratiques sylvicoles vers des approches plus compatibles avec la conservation des espèces sensibles au réchauffement climatique, spécifiquement dans des habitats fortement anthropisés.

Une autre limite potentielle de mon étude réfère à l'appariement temporel entre les données de température issues des thermochrons et celles des réanalyses d'ERA5-Land. Puisque les données d'ERA5-Land ne sont disponibles qu'à chaque heure, j'ai dû arrondir l'heure d'enregistrement des thermochrons à l'heure la plus proche, introduisant par le fait même un décalage potentiel pouvant aller jusqu'à 30 minutes. Ce décalage pourrait avoir eu un impact plus marqué sur la correction des températures (donc sur les estimés de coefficients) aux périodes de transition que sont l'aube et le crépuscule. Néanmoins, il serait utile de vérifier si ce décalage est biologiquement significatif, ce qui nécessiterait des mesures prises à une fréquence de 30 minutes ou moins.

Par ailleurs, les réanalyses climatiques telles qu'ERA5-Land offrent des opportunités intéressantes pour estimer la température de l'air et autres variables météorologiques (vitesse

du vent, précipitations, etc.) mais présentent également certaines limites. Par exemple, sa résolution spatiale d'environ 81 km² (Muñoz Sabater, 2019) demeure limitante pour l'étude de processus à fine échelle. Cette caractéristique pourrait être la source de différences de température entre les données d'ERA5-Land et celles issues des capteurs déployés *in situ* (Santos et al., 2024 ; Auvinen et al., 2024). Cependant, comme le montre mon étude, la combinaison des données de réanalyse d'ERA5-Land à des données locales pourrait résoudre cette problématique. La prochaine étape serait de générer et valider des modèles prédictifs basés sur ces deux sources de données afin d'obtenir des estimés de température à une échelle plus fine et sur de longues périodes temporelles.

CONCLUSION

Les changements climatiques, notamment par l'augmentation des températures, rendent la thermorégulation plus exigeante pour de nombreuses espèces (Oswald et Arnold, 2012). Face au constat du nombre grandissant d'espèce en danger, plusieurs états, dont le Canada et le Québec, se sont engagés à protéger 30 % de leur territoire d'ici 2030. Toutefois, pour répondre efficacement aux défis posés par le réchauffement global, ces nouvelles aires protégées devront tenir compte des projections climatiques futures. En particulier, elles devront inclure des refuges thermiques afin de soutenir les besoins physiologiques des espèces ciblées. Cette réflexion devra aussi être transposée aux aires protégées déjà existantes, qui, sans aménagements adéquats, pourraient devenir inhospitalières aux espèces les plus sensibles aux fortes chaleurs ou aux variations thermiques marquées. J'émet même que l'accès à des habitats où la plage de température rencontrée favorise la thermorégulation pourrait désormais être considérée comme une ressource essentielle, au même titre que l'eau, la nourriture ou le couvert de fuite. La protection de la biodiversité à l'échelle globale sera ultimement garante de notre capacité à identifier les refuges thermiques, actuels et futurs, et à les intégrer dans les stratégies de conservation.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Angilletta, M. J. (2009). *Thermal adaptation: a theoretical and empirical synthesis*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198570875.001.1>
- Arroyo-Rodríguez, V., Saldana-Vazquez, R. A., Fahrig, L., & Santos, B. A. (2017). Does forest fragmentation cause an increase in forest temperature?. *Ecological Research*, 32, 81-88. <https://doi.org/10.1007/s11284-016-1411-6>
- Ashcroft, M. B. (2010). Identifying refugia from climate change. *Journal of Biogeography*, 37(8), 1407-1413. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02300.x>
- Ashcroft, M. B., Gollan, J. R., Warton, D. I., & Ramp, D. (2012). A novel approach to quantify and locate potential microrefugia using topoclimate, climate stability, and isolation from the matrix. *Global Change Biology*, 18(6), 1866-1879. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02661.x>
- Aussenac, G. (2000). Interactions between forest stands and microclimate: ecophysiological aspects and consequences for silviculture. *Annals of Forest Science*, 57(3), 287-301. <https://doi.org/10.1051/forest:2000119>
- Auvinen, A. (2024). *Reforestation Scotland: The impact of different forest types on the formation of microclimates* [Master's thesis]. University of Helsinki, Helsinki.
- Bakken, G. S. (1976). A heat transfer analysis of animals: unifying concepts and the application of metabolism chamber data to field ecology. *Journal of Theoretical Biology*, 60(2), 337-384. [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(76\)90063-1](https://doi.org/10.1016/0022-5193(76)90063-1)
- Benson, H., Lachance, M., Séguin, M., Villeneuve, B., & Marcheterre, B. (2015). *Physique. I, Mécanique* (5e édition). Pearson; ERPI.
- Berteaux, D., Réale, D., McAdam, A. G., & Boutin, S. (2004). Keeping pace with fast climate change: can arctic life count on evolution? *Integrative and Comparative Biology*, 44(2), 140-151. <https://doi.org/10.1093/icb/44.2.140>
- Bligh, J., & Johnson, K. G. (1973). Glossary of terms for thermal physiology. *Journal of Applied Physiology*, 35(6), 941-961. <https://doi.org/10.1152/jappl.1973.35.6.941>
- Bramer, I., Anderson, B. J., Bennie, J., Bladon, A. J., De Frenne, P., Hemming, D., Hill, R. A., Kearney, M. R., Körner, C., Korstjens, A. H., Lenoir, J., Maclean, I. M. D., Marsh, C. D., Morecroft, M. D., Ohlemüller, R., Slater, H. D., Suggitt, A. J., Zellweger, F., & Gillingham, P. K. (2018). Advances in Monitoring and Modelling Climate at Ecologically Relevant Scales. In D. A. Bohan, A. J. Dumbrell, G. Woodward, & M. Jackson (Eds.), *Next Generation Biomonitoring: Part 1* (pp. 101-161). (Advances in Ecological Research; Vol. 58). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2017.12.005>
- Briand, Y., Ouellet, J.-P., Dussault, C., & St-Laurent, M.-H. (2009). Fine-scale habitat selection by female forest-dwelling caribou in managed boreal forest: Empirical

- evidence of a seasonal shift between foraging opportunities and antipredator strategies. *Écoscience*, 16(3), 330-340. <https://doi.org/10.2980/16-3-3248>
- Cain, J. W., Jansen, B. D., Wilson, R. R., & Krausman, P. R. (2008). Potential thermoregulatory advantages of shade use by desert bighorn sheep. *Journal of Arid Environments*, 72(8), 1518-1525. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2008.02.010>
- Campagna, C., & Le Boeuf, B. J. (1988). Reproductive behaviour of southern sea lions. *Behaviour*, 104(3-4), 233-261. <https://doi.org/10.1163/156853988X00539>
- Cannon, B., & Nedergaard, J. A. N. (2004). Brown adipose tissue: function and physiological significance. *Physiological Reviews*, 84(1), 277-359. <https://doi.org/10.1152/physrev.00015.2003>
- Clelland, A. A., Marshall, G. J., & Baxter, R. (2024). Evaluating the performance of key ERA-Interim, ERA5 and ERA5-Land climate variables across Siberia. *International Journal of Climatology*, 44(7), 2318–2342. <https://doi.org/10.1002/joc.8456>
- Chen, I. C., Hill, J. K., Ohlemüller, R., Roy, D. B., & Thomas, C. D. (2011). Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*, 333(6045), 1024-1026. <https://doi.org/10.1126/science.1206432>
- Dahirel, M., Ansart, A., & Madec, L. (2014). Stage-and weather-dependent dispersal in the brown garden snail *Cornu aspersum*. *Population Ecology*, 56, 227-237. <https://doi.org/10.1007/s10144-013-0407-0>
- Da Silva, R.G., & Maia, A.S.C. (2013). Heat Exchange Between Animals and Environment: Mammals and Birds. In: *Principles of Animal Biometeorology. Biometeorology*, vol 2. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5733-2_4
- Davimes, J. G., Alagaili, A. N., Bertelsen, M. F., Mohammed, O. B., Hemingway, J., Bennett, N. C., Manger, P. R., & Gravett, N. (2017). Temporal niche switching in Arabian oryx (*Oryx leucoryx*): Seasonal plasticity of 24 h activity patterns in a large desert mammal. *Physiology & Behavior*, 177, 148-154. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2017.04.014>
- De Frenne, P., Zellweger, F., Rodríguez-Sánchez, F., Scheffers, B. R., Hylander, K., Luoto, M., Vellend, M., Verheyen, K., & Lenoir, J. (2019). Global buffering of temperatures under forest canopies. *Nature Ecology & Evolution*, 3(5), 744-749. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0842-1>
- De Frenne, P., Lenoir, J., Luoto, M., Scheffers, B.R., Zellweger, F., Aalto, J., Ashcroft, M.B., Christiansen, D.M., Decocq, G., De Pauw, K., Govaert, S., Greiser, C., Gril, E., Hampe, A., Jucker, T., Klings, D.H., Koelemeijer, I.A., Lembrechts, J.J., Marrec, R., Meeussen, C., Ogée, J., Tyystjärvi, V., Vangansbeke, P., & Hylander, K. (2021). Forest microclimates and climate change: Importance, drivers and future research agenda. *Global Change Biology*, 27(11), 2279-2297. <https://doi.org/10.1111/gcb.15569>

- Dobrowski, S. Z. (2011). A climatic basis for microrefugia: the influence of terrain on climate. *Global Change Biology*, 17(2), 1022-1035. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02263.x>
- Du, M., Zhang, M., Wang, S., Zhu, X., & Che, Y. (2018). Near-surface air temperature lapse rates in Xinjiang, northwestern China. *Theoretical and Applied Climatology*, 131(3), 1221-1234. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2040-x>
- Dzialowski, E. M. (2005). Use of operative temperature and standard operative temperature models in thermal biology. *Journal of Thermal Biology*, 30(4), 317-334. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2005.01.005>
- Elmore, R. D., Carroll, J. M., Tanner, E. P., Hovick, T. J., Grisham, B. A., Fuhlendorf, S. D., & Windels, S. K. (2017). Implications of the thermal environment for terrestrial wildlife management. *Wildlife Society Bulletin*, 41(2), 183-193. <https://doi.org/10.1002/wsb.772>
- Environnement Canada, 2011, Évaluation scientifique aux fins de la désignation de l'habitat essentiel de la population boréale du caribou des bois (*Rangifer tarandus* caribou) au Canada : Mise à jour 2011. 116 p. et annexes. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/registre-public-especes-peril/renseignements-connexes/evaluation-scientifique-habitat-essentiel-boreale-caribou-bois-mise-jour-2011-tdm.html>
- Festa-Bianchet, M., Ray, J. C., Boutin, S., Côté, S. D., & Gunn, A. (2011). Conservation of caribou (*Rangifer tarandus*) in Canada: an uncertain future. *Canadian Journal of Zoology*, 89(5), 419-434. <https://doi.org/10.1139/z11-025>
- Fierro-Estrada, N., González González, Y. G., Miles, D. B., Martínez Gómez, M., García, A., Salgado-Ugarte, I. H., & Méndez-de la Cruz, F. R. (2019). Thermoregulation of the lizard *Barisia imbricata* at altitudinal extremes. *Amphibia-Reptilia*, 40(3), 349-360. <https://doi.org/10.1163/15685381-20191155>
- Frey, S. J., Hadley, A. S., Johnson, S. L., Schulze, M., Jones, J. A., & Betts, M. G. (2016). Spatial models reveal the microclimatic buffering capacity of old-growth forests. *Science Advances*, 2(4), e1501392. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501392>
- Fu, P. (2000). A geometric solar radiation model with applications in landscape ecology. Ph.D. Dissertation, Department of Geography. University of Kansas, Lawrence, Kan. 150 p.
- Fuller, A., Mitchell, D., Maloney, S. K., & Hetem, R. S. (2016). Towards a mechanistic understanding of the responses of large terrestrial mammals to heat and aridity associated with climate change. *Climate Change Responses*, 3, 1-19. <https://doi.org/10.1186/s40665-016-0024-1>
- Ge, X., Zhu, J., Lu, D., Wu, D., Yu, F., & Wei, X. (2022). Effects of canopy composition on snow depth and below-the-snow temperature regimes in the temperate secondary forest

- ecosystem, Northeast China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 313, 108744. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108744>
- Geiger, R., Aron, R. H., & Todhunter, P. (1995). *The climate near the ground*. Rowman & Littlefield. <https://doi.org/10.1007/978-3-322-86582-3>
- Geiger, R., Aron, R. H., & Todhunter, P. (2009). *The climate near the ground* (7th ed.). Rowman & Littlefield.
- Gestich, C.C., Caselli, C.B. & Setz, E.Z.F. (2014), Behavioural Thermoregulation in a Small Neotropical Primate. *Ethology*, 120(4), 331-339. <https://doi.org/10.1111/eth.12203>
- Gheysari, F.A., Maghoul, P., Ojo, E. R., & Shalaby, A. (2024). Reliability of ERA5 and ERA5-Land reanalysis data in the Canadian Prairies. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(4), 3087-3098. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04771-z>
- Gilbert, C., Robertson, G., Le Maho, Y., Naito, Y., & Ancel, A. (2006). Huddling behavior in emperor penguins: dynamics of huddling. *Physiology & Behavior*, 88(4-5), 479-488. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2006.04.024>
- Gilbert, C., McCafferty, D., Le Maho, Y., Martrette, J. M., Giroud, S., Blanc, S., & Ancel, A. (2010). One for all and all for one: the energetic benefits of huddling in endotherms. *Biological Reviews*, 85(3), 545-569. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2009.00115.x>
- Gilbert, N. A., Anich, N. M., Worland, M., & Zuckerberg, B. (2022). Microclimate complexities at the trailing edge of the boreal forest. *Forest Ecology and Management*, 524, 120533. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120533>
- Granberg, H. B., Ottosson-Löfvenius, M., & Odin, H. (1993). Radiative and aerodynamic effects of an open pine shelterwood on calm, clear nights. *Agricultural and Forest Meteorology*, 63(3-4), 171-188. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(93\)90059-Q](https://doi.org/10.1016/0168-1923(93)90059-Q)
- Greiser, C., Meineri, E., Luoto, M., Ehrlén, J., & Hylander, K. (2018). Monthly microclimate models in a managed boreal forest landscape. *Agricultural and Forest Meteorology*, 250, 147-158. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.252>
- Hickling, R., Roy, D. B., Hill, J. K., Fox, R., & Thomas, C. D. (2006). The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards. *Global Change Biology*, 12(3), 450-455. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01116.x>
- Hidore, J. J., Snow, M. B., Snow, R. E., & Oliver, J. E. (2010). *Climatology: an atmospheric science* (3rd ed.). Prentice Hall.
- Hochachka, P. W., & Somero, G. N. (2002). *Biochemical adaptation: mechanism and process in physiological evolution*. Oxford university press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195117028.001.0001>
- Houze Jr, R. A. (2012). Orographic effects on precipitating clouds. *Reviews of Geophysics*, 50(1). <https://doi.org/10.1029/2011RG000365>

- Huerta, M. L., Molotch, N. P., & McPhee, J. (2019). Snowfall interception in a deciduous Nothofagus Forest and implications for spatial snowpack distribution. *Hydrological Processes*, 33(13), 1818-1834. <https://doi.org/10.1002/hyp.13439>
- 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* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*[Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press.. <https://dx.doi.org/10.1017/9781009157896>.
- IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp.. <https://dx.doi.org/10.1017/9781009325844>.
- Keppel, G., & Wardell-Johnson, G. W. (2012). Refugia: keys to climate change management. *Global Change Biology*, 18(8), 2389-2391. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02729.x>
- Klein, M., Garvelmann, J., & Förster, K. (2021). Revisiting Forest Effects on Winter Air Temperature and Wind Speed—New Open Data and Transfer Functions. *Atmosphere*, 12(6), 710. <https://doi.org/10.3390/atmos12060710>
- Kolloen, M. R. (2015). *Effects of weather on summer and winter activity level of the high arctic ungulate Svalbard reindeer (Rangifer tarandus platyrhynchus)* (Master's thesis, Norwegian University of Life Sciences, Ås). <http://hdl.handle.net/11250/294198>
- Kovács, B., Tinya, F., & Ódor, P. (2017). Stand structural drivers of microclimate in mature temperate mixed forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 234, 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.11.268>
- Lancaster, J., & Belyea, L. R. (1997). Nested hierarchies and scale-dependence of mechanisms of flow refugium use. *Journal of the North American Benthological Society*, 16(1), 221-238. <https://doi.org/10.2307/1468253>
- Lara-Díaz, N. E., Coronel-Arellano, H., López-González, C. A., Sánchez-Rojas, G., & Martínez-Gómez, J. E. (2018). Activity and resource selection of a threatened carnivore:

- the case of black bears in northwestern Mexico. *Ecosphere*, 9(1), e01923. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1923>
- Leblond, M., Dussault, C., Ouellet, J. P., & St-Laurent, M. H. (2016). Caribou avoiding wolves face increased predation by bears—Caught between Scylla and Charybdis. *Journal of Applied Ecology*, 53(4), 1078-1087. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12658>
- Leclerc, M., Dussault, C., & St-Laurent, M. H. (2014). Behavioural strategies towards human disturbances explain individual performance in woodland caribou. *Oecologia*, 176(1), 297-306. <https://doi.org/10.1007/s00442-014-3012-9>
- Leclerc, M., Tarrow, A., Fauchald, P., Stien, A., Tveraa, T., & St-Laurent, M.-H. (2019). Effects of human-induced disturbances and weather on herbivore movement. *Journal of Mammalogy*, 100(5), 1490-1500. <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyz101>
- Lee, R. (1978). Forest microclimatology. Columbia University Press.
- Lesica, P., McCune, B., Cooper, S. V., & Hong, W. S. (1991). Differences in lichen and bryophyte communities between old-growth and managed second-growth forests in the Swan Valley, Montana. *Canadian Journal of Botany*, 69(8), 1745-1755. <https://doi.org/10.1139/b91-222>
- Lessard, É., Johnson, C. J., & St-Laurent, M.-H. (2025). Local weather interacts with human disturbances to shape the behaviour of boreal caribou across a large climate gradient. *Biodiversity and Conservation*, 34, 1115–1138. <https://doi.org/10.1007/s10531-025-03012-1>
- Losier, C. L., Couturier, S., St-Laurent, M. H., Drapeau, P., Dussault, C., Rudolph, T., Brodeur, V., Merkle, J. A., & Fortin, D. (2015). Adjustments in habitat selection to changing availability induce fitness costs for a threatened ungulate. *Journal of applied Ecology*, 52(2), 496-504. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12400>
- Luber, G., & McGeehin, M. (2008). Climate change and extreme heat events. *American Journal of Preventive Medicine*, 35(5), 429-435. <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2008.08.021>
- Macek, M., Kopecký, M., & Wild, J. (2019). Maximum air temperature controlled by landscape topography affects plant species composition in temperate forests. *Landscape Ecology*, 34(11), 2541-2556. <https://doi.org/10.1007/s10980-019-00903-x>
- Maloney, S. K., Moss, G., Cartmell, T., & Mitchell, D. (2005). Alteration in diel activity patterns as a thermoregulatory strategy in black wildebeest (*Connochaetes gnou*). *Journal of Comparative Physiology A*, 191(11), 1055-1064. <https://doi.org/10.1007/s00359-005-0030-4>
- Magoulick, D. D., & Kobza, R. M. (2003). The role of refugia for fishes during drought: a review and synthesis. *Freshwater Biology*, 48(7), 1186-1198. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2003.01089.x>

- Martin, J., López, P., Carrascal, L. M., & Salvador, A. (1995). Adjustment of basking postures in the high-altitude Iberian rock lizard (*Lacerta monticola*). *Canadian Journal of Zoology*, 73(6), 1065-1068. <https://doi.org/10.1139/z95-126>
- McCann, N. P., Moen, R. A., Windels, S. K., & Harris, T. R. (2016). Bed sites as thermal refuges for a cold-adapted ungulate in summer. *Wildlife Biology*, 22(5), 228-237. <https://doi.org/10.2981/wlb.00216>
- McCulley, A. M., Parker, K. L., & Gillingham, M. P. (2017). Yukon moose: II. Range sizes, movement rates, and use of elevation and land cover by males and females. *Alces*, 53, 137-157. Retrieved from <https://www.alcesjournal.org/index.php/alces/article/view/174>
- McGinn, K. A., Peery, M. Z., Zulla, C. J., Berigan, W. J., Wilkinson, Z. A., Barry, J. M., Keane, J.J., & Zuckerberg, B. (2023). A climate-vulnerable species uses cooler forest microclimates during heat waves. *Biological Conservation*, 283, 110132. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.110132>
- Mendes, C. B., & Prevedello, J. A. (2020). Does habitat fragmentation affect landscape-level temperatures? A global analysis. *Landscape Ecology*, 35(8), 1743-1756. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01041-5>
- Mills, A. F. (1992). *Heat transfer* (pp.8-11). CRC Press.
- Mislan, K. A. S., & Helmuth, B. (2008). Microclimate. In S. E. Jørgensen & B. D. Fath (Eds.), *Encyclopedia of ecology* (pp. 2389-2393). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00520-6>
- Mitchell, D. (1974). Convective heat transfer in man and other animals. In J. L. Monteith, & L. E. Mount (Eds.), *Heat loss from animals and man: Assessment and control* (pp. 59-76). London, UK: Butterworth Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-408-70652-0.50010-X>
- Mitchell, D., Snelling, E. P., Hetem, R. S., Maloney, S. K., Strauss, W. M., & Fuller, A. (2018). Revisiting concepts of thermal physiology: predicting responses of mammals to climate change. *Journal of Animal Ecology*, 87(4), 956-973. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12818>
- Muñoz Sabater, J. (2019): ERA5-Land hourly data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac> (Accessed on 06-11-2023)
- Nagy-Reis, M., Dickie, M., Calvert, A. M., Hebblewhite, M., Hervieux, D., Seip, D. R., Gilbert, S. L., Venter, O., DeMars, C., Boutin, S., & Serrouya, R. (2021). Habitat loss accelerates for the endangered woodland caribou in western Canada. *Conservation Science and Practice*, 3(7), e437. <https://doi.org/10.1111/csp2.437>
- Navarro-Serrano, F., López-Moreno, J. I., Domínguez-Castro, F., Alonso-González, E., Azorin-Molina, C., El-Kenawy, A., & Vicente-Serrano, S. M. (2020). Maximum and minimum air temperature lapse rates in the Andean region of Ecuador and Peru.

- International Journal of Climatology, 40(14), 6150-6168.
<https://doi.org/10.1002/joc.6574>
- Orlanski, I. (1975). A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 56(5), 527-530.
<https://www.jstor.org/stable/26216020>
- Oswald, S. A., & Arnold, J. M. (2012). Direct impacts of climatic warming on heat stress in endothermic species: seabirds as bioindicators of changing thermoregulatory constraints. *Integrative Zoology*, 7(2), 121-136. <https://doi.org/10.1111/j.1749-4877.2012.00287.x>
- Pereira, H. M., Navarro, L. M., & Martins, I. S. (2012). Global biodiversity change: the bad, the good, and the unknown. *Annual Review of Environment and Resources*, 37(1), 25-50. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-042911-093511>
- Porter, W. P., & Gates, D. M. (1969). Thermodynamic equilibria of animals with environment. *Ecological Monographs*, 39(3), 227-244. <https://doi.org/10.2307/1948545>
- Precht, H., Christopheren, J., Henssel, H., & L. Larcher. Temperature and life (Rev. ed). (1973). Springer-Verlag.
- Quintero, I., & Wiens, J. J. (2013). Rates of projected climate change dramatically exceed past rates of climatic niche evolution among vertebrate species. *Ecology Letters*, 16(8), 1095-1103. <https://doi.org/10.1111/ele.12144>
- Renecker, L. A., & Hudson, R. J. (1986). Seasonal energy expenditures and thermoregulatory responses of moose. *Canadian Journal of Zoology*, 64(2), 322-327. <https://doi.org/10.1139/z86-052>
- Rezende, E. L., & Bacigalupe, L. D. (2015). Thermoregulation in endotherms: physiological principles and ecological consequences. *Journal of Comparative Physiology B*, 185(7), 709-727. <https://doi.org/10.1007/s00360-015-0909-5>
- Rodell, M., P.R. Houser, U. Jambor, J. Gottschalck, K. Mitchell, C.-J. Meng, K. Arsenault, B. Cosgrove, J. Radakovich, M. Bosilovich, J.K. Entin, J.P. Walker, D. Lohmann, & D. Toll (2004). The Global Land Data Assimilation System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3), 381-394. <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-3-381>
- Rogers, S. A., Robbins, C. T., Mathewson, P. D., Carnahan, A. M., van Manen, F. T., Haroldson, M. A., Porter, W. P., Rogers, T. R., Soule, T. & Long, R. A. (2021). Thermal constraints on energy balance, behaviour and spatial distribution of grizzly bears. *Functional Ecology*, 35(2), 398-410. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13727>
- Rohrer, M. J., & NATALE, A. M. (1992). Effect of hypothermia on the coagulation cascade. *Critical Care Medicine*, 20(10), 1402-1405.
- Rorison, I. H., Gupta, P. L., & Hunt, R. (1986). Local climate, topography and plant growth in Lathkill Dale NNR. II. Growth and nutrient uptake within a single season. *Plant, Cell & Environment*, 9(1), 57-64. <https://doi.org/10.1111/1365-3040.ep11613478>

- Santos, E. G., Svátek, M., Nunes, M. H., Aalto, J., Senior, R. A., Matula, R., Plichta, R., & Maeda, E. E. (2024). Structural changes caused by selective logging undermine the thermal buffering capacity of tropical forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 348, 109912. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.109912>
- Sheppard, A. C., Hollik, E. Z., Hecker, L. J., Jung, T. S., Edwards, M. A., & Nielsen, S. E. (2025). Beat the heat: Movements of a cold-adapted ungulate during a record-breaking heat wave. *Ecosphere*, 16(2), e70202. <https://doi.org/10.1002/ecs2.70202>
- Shoo, L. P., Storlie, C., Williams, Y. M., & Williams, S. E. (2010). Potential for mountaintop boulder fields to buffer species against extreme heat stress under climate change. *International Journal of Biometeorology*, 54(4), 475-478. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0286-4>
- Sittaro, F., Paquette, A., Messier, C., & Nock, C. A. (2017). Tree range expansion in eastern North America fails to keep pace with climate warming at northern range limits. *Global Change Biology*, 23(8), 3292-3301. <https://doi.org/10.1111/gcb.13622>
- Storck, P., Lettenmaier, D. P., & Bolton, S. M. (2002). Measurement of snow interception and canopy effects on snow accumulation and melt in a mountainous maritime climate, Oregon, United States. *Water Resources Research*, 38(11), 5-1. <https://doi.org/10.1029/2002WR001281>
- Streffler, C. (1985). Metabolic changes during and after hyperthermia. *International Journal of Hyperthermia*, 1(4), 305-319. <https://doi.org/10.3109/02656738509029295>
- Suggitt, A. J., Gillingham, P. K., Hill, J. K., Huntley, B., Kunin, W. E., Roy, D. B., & Thomas, C. D. (2011). Habitat microclimates drive fine-scale variation in extreme temperatures. *Oikos*, 120(1), 1-8. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2010.18270.x>
- Temps, R. C., & Coulson, K. L. (1977). Solar radiation incident upon slopes of different orientations. *Solar Energy*, 19(2), 179-184. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(77\)90056-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(77)90056-1)
- Terrien, J., Perret, M., & Aujard, F. (2011). Behavioral thermoregulation in mammals: a review. *Frontiers in Bioscience (Landmark edition)*, 16(4), 1428-1444. <https://doi.org/10.2741/3797>
- Thompson, D. P., Crouse, J. A., Barboza, P. S., Spathelf, M. O., Herberg, A. M., Parker, S. D., & Morris, M. A. (2021). Behaviour influences thermoregulation of boreal moose during the warm season. *Conservation Physiology*, 9(1), coaa130. <https://doi.org/10.1093/conphys/coaa130>
- Tian, Y. Q., Davies-Colley, R. J., Gong, P., & Thorrold, B. W. (2001). Estimating solar radiation on slopes of arbitrary aspect. *Agricultural and Forest Meteorology*, 109(1), 67-74. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(01\)00245-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(01)00245-3)
- Townsend, K. L., & Tseng, Y. H. (2014). Brown fat fuel utilization and thermogenesis. *Trends in Endocrinology & Metabolism*, 25(4), 168-177. <https://doi.org/10.1016/j.tem.2013.12.004>

- Trails, L. W., Lim, M. L., Sodhi, N. S., & Bradshaw, C. J. (2010). Mechanisms driving change: altered species interactions and ecosystem function through global warming. *Journal of Animal Ecology*, 79(5), 937-947. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2010.01695.x>
- Valeri, C. R., Feingold, H., Cassidy, G., Ragno, G., Khuri, S., & Altschule, M. D. (1987). Hypothermia-induced reversible platelet dysfunction. *Annals of Surgery*, 205(2), 175. <https://doi.org/10.1097/00000658-198702000-00012>
- Vanella, D., Longo-Minnolo, G., Belfiore, O. R., Ramírez-Cuesta, J. M., Pappalardo, S., Consoli, S., D'Urso, G., Chirico, G. B., Coppola, A., Comegna, A., Tosacano, A., Quarta, R., Provenzano, G., Ippolito, M., Castagna, A., & Gandolfi, C. (2022). Comparing the use of ERA5 reanalysis dataset and ground-based agrometeorological data under different climates and topography in Italy. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 42, 101182. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101182>
- Vandewiele, M., Geres, L., Lotz, A., Mandl, L., Richter, T., Seibold, S., Seidl, R., & Senf, C. (2023). Mapping spatial microclimate patterns in mountain forests from LiDAR. *Agricultural and Forest Meteorology*, 341, 109662. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109662>
- Vincent, L. A., Zhang, X., Mekis, É., Wan, H., & Bush, E. J. (2018). Changes in Canada's climate: trends in indices based on daily temperature and precipitation data. *Atmosphere-Ocean*, 56(5), 332-349. <https://doi.org/10.1080/07055900.2018.1514579>
- Vicente-Serrano, S. M., Quiring, S. M., Pena-Gallardo, M., Yuan, S., & Dominguez-Castro, F. (2020). A review of environmental droughts: Increased risk under global warming?. *Earth-Science Reviews*, 201, 102953. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102953>
- Wan, Z., Hook, S., & Hulley, G. (2021). *MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V061* [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. Accessed 2025-05-12 from <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A1.061>
- Widick, I. V., Young, M. A., LaMontagne, J. M., Strong, C., & Zuckerberg, B. (2023). Poleward shifts and altered periodicity in boreal bird irruptions over six decades. *Journal of Animal Ecology*, 92(5). <https://doi.org/10.1111/1365-2656.13917>
- Willmer, P., Stone, G., & Johnston, I. A. (2005). *Environmental physiology of animals* (2nd ed). Blackwell Pub.
- Woodroffe, R., Groom, R., & McNutt, J. W. (2017). Hot dogs: High ambient temperatures impact reproductive success in a tropical carnivore. *Journal of Animal Ecology*, 86(6), 1329-1338. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12719>
- World Meteorological Organization (2025). Règlement technique, Volume I: Pratiques météorologiques générales normalisées et recommandées. OMM-N° 49. <https://library.wmo.int/idurl/4/32054>

Zhou, W., Wang, M., Gao, K., Gao, H., Wei, F., & Nie, Y. (2022). Behavioural thermoregulation by montane ungulates under climate warming. *Diversity and Distributions*, 28(10), 2229-2238. <https://doi.org/10.1111/ddi.13626>

