



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

GÉOMATIQUE CANADA DOSSIER PUBLIC 97f

Cercle de feu : surveillance par satellite des indicateurs environnementaux



**W. Chen, D. Janzen, M.T. Bonney, R.A. Fernandes, R.H. Fraser, L. He,
J. Li, F. Mohammadimanesh, N.H. Short, J.J. van der Sanden, Y. Zhang,
B.-H. Choe, N. Djamai, H. Drouin, G. Hong, S.G. Leblanc, S. Leipe,
G. Richardson, S. Samsonov, L. Sun et S. Wang**

2025

GÉOMATIQUE CANADA
DOSSIER PUBLIC 97f

Cercle de feu : surveillance par satellite des indicateurs environnementaux

W. Chen, D. Janzen, M.T. Bonney, R.A. Fernandes, R.H. Fraser, L. He, J. Li, F. Mohammadimanesh, N.H. Short, J.J. van der Sanden, Y. Zhang, B.-H. Choe, N. Djamai, H. Drouin, G. Hong, S.G. Leblanc, S. Leipe, G. Richardson, S. Samsonov, L. Sun et S. Wang

Ressources naturelles Canada, Centre canadien de cartographie et d'observation de la Terre, 580, rue Booth, Ottawa (Ontario) K1A 0E4

2025

© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par le ministre des Ressources naturelles, 2025

Le contenu de cette publication ou de ce produit peut être reproduit en tout ou en partie, et par quelque moyen que ce soit, sous réserve que la reproduction soit effectuée uniquement à des fins personnelles ou publiques mais non commerciales, sans frais ni autre permission, à moins d'avis contraire.

On demande seulement :

- de faire preuve de diligence raisonnable en assurant l'exactitude du matériel reproduit;
- d'indiquer le titre complet du matériel reproduit et le nom de l'organisation qui en est l'auteur;
- d'indiquer que la reproduction est une copie d'un document officiel publié par Ressources naturelles Canada (RNCAN) et que la reproduction n'a pas été faite en association avec RNCAN ni avec l'appui de celui-ci.

La reproduction et la distribution à des fins commerciales sont interdites, sauf avec la permission écrite de RNCAN.

Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec RNCAN à copyright-droitdauteur@rncan-rncan.gc.ca.

On peut télécharger cette publication gratuitement à partir du Dépôt ouvert des sciences et technologie de RNCAN (<https://ostrnrncan-dostrncan.canada.ca/>).

Notation bibliographique conseillée

Chen, W., Janzen, D., Bonney, M.T., Fernandes, R.A., Fraser, R.H., He, L., Li, J., Mohammadimanesh, F., Short, N.H., van der Sanden, J.J., Zhang, Y., Choe, B.-H., Djamai, N., Drouin, H., Hong, G., Leblanc, S.G., Leipe, S., Richardson, G., Samsonov, S., Sun, L., et Wang, S., 2025. Cercle de feu : surveillance par satellite des indicateurs environnementaux; Géomatique Canada, Dossier public 97f, 42 p. <https://doi.org/10.4095/pna0zfmx>

Les publications de cette série ne sont pas révisées; elles sont publiées telles que soumises par l'auteur.

ISBN 978-0-660-97622-8
N° de catalogue M103-3/97-2025F-PDF
<https://doi.org/10.4095/pna0zfmx>

Table des matières

Résumé	i
Indicateur 1. Dynamique des eaux de surface	1
Indicateur 2. Phénologie de l'enneigement	4
Indicateur 3. Épaisseur de la neige	8
Indicateur 4. Étendue de la glace de lac	12
Indicateur 5. Stockage terrestre de l'eau	16
Indicateur 6. Disponibilité du lichen pour le caribou	20
Indicateur 7. Ingénierie des castors	24
Indicateur 8. Couverture terrestre	27
Indicateur 9. Couverture et densité de la végétation	31
Indicateur 10. Pergélisol	35
Indicateur 11. Déformation du terrain	38
Remerciements	41

Illustration de la page couverture : Une vue du paysage du nord de l'Ontario. Photo de R.H. Fraser

Résumé

Le Canada doit élaborer des stratégies fondées sur des données probantes pour soutenir le développement durable et la prospérité à long terme dans le cadre de ses objectifs d'édification de la nation. L'une de ces approches est la Stratégie sur les minéraux critiques qui vise à renforcer la sécurité des ressources nationales et la résilience économique. La zone d'évaluation du Cercle de feu dans le nord de l'Ontario a été désignée comme une région ayant un important potentiel d'exploitation de minéraux critiques. Pour atteindre un équilibre entre la croissance économique, la gestion responsable de l'environnement et l'équité sociale, il est essentiel de mener des évaluations d'impact rigoureuses.

Le mandat de l'Évaluation régionale dans la région du Cercle de feu définit quatre grandes priorités en matière d'évaluation : le bien-être de la collectivité, le bien-être culturel et spirituel, l'équité sociale et économique et les relations avec un environnement sain. Ces priorités ont été établies au moyen de vastes processus de consultation et sont orientées par les perspectives et les préoccupations exprimés par les communautés autochtones de la région.

La priorité en matière d'évaluation pour les « relations avec un environnement sain » comprend « l'eau et les réseaux hydrographiques, y compris l'écoulement des eaux », « la faune et son habitat, y compris les espèces en péril, les oiseaux migrateurs et les poissons et leur habitat », « les tourbières et autres environnements uniques », « les écosystèmes forestiers, y compris les plantes », « les changements climatiques et l'adaptation aux changements climatiques », « la biodiversité » et « la qualité de l'air ». À l'aide d'observations satellitaires, le Centre canadien de cartographie et d'observation de la Terre, en collaboration avec ses partenaires, a développé onze indicateurs environnementaux qui contribuent à évaluer les relations avec un environnement sain. En particulier, nous avons créé cinq indicateurs pour la catégorie « l'eau et les réseaux hydrographiques » : l'eau de surface, la phénologie de l'enneigement, l'épaisseur de neige, l'étendue de glace de lac et le stockage terrestre de l'eau. Pour ce qui est de « la faune et son habitat », nous fournissons deux indicateurs : la disponibilité du lichen pour le caribou et l'ingénierie des castors. Deux indicateurs, la couverture terrestre et la couverture et densité de la végétation, contribuent à plusieurs priorités en matière d'évaluation, notamment les « écosystèmes forestiers », les « tourbières et autres environnements uniques » et la « biodiversité ». De plus, nous avons élaboré deux indicateurs pour appuyer « les changements climatiques et l'adaptation aux changements climatiques » : le pergélisol et la déformation du terrain.

Pour chacun de ces onze indicateurs environnementaux, nous déterminons d'abord leur pertinence par rapport aux priorités en matière d'évaluation qu'ils visent à soutenir. Cet exercice est suivi d'une brève description de la méthodologie utilisée pour déterminer l'indicateur au moyen d'observations par satellite et de certains résultats préliminaires. Les communautés autochtones jouent un rôle crucial dans ce processus : elles ont contribué à cerner les priorités et les préoccupations, fourni des connaissances et un contexte local et collaboré à la collecte et à la validation de données de vérité terrain.

Comme le démontre le rapport, les images satellites peuvent couvrir de grandes étendues de manière répétée et sont donc tout particulièrement appropriées pour une évaluation régionale en temps opportun. Compte tenu de longues archives historiques remontant aux années 1980, d'une précision spectrale et géospatiale croissante et des données prêtes pour l'application, les données satellitaires d'observation de la Terre sont appelées à jouer un rôle important dans les évaluations régionales. Une intégration plus poussée des connaissances autochtones peut améliorer l'exactitude et l'impact de ces indicateurs obtenus par satellite, ce qui les rend plus utiles pour la prise de décisions à l'échelle locale. Les résultats finaux des onze indicateurs environnementaux seront présentés en détail dans des publications subséquentes. Nous mettrons également ces produits de données complémentaires à la disposition du public.

Le présent rapport et les données qui y sont décrites seront utilisés, en partenariat avec les communautés autochtones et d'autres intervenants, pour orienter les évaluations environnementales, orienter la prise de décisions et soutenir la gestion durable des ressources naturelles de la région.

Indicateur 1. Dynamique des eaux de surface

Pertinence pour les priorités d'évaluation du Cercle de feu

La région d'évaluation du Cercle de feu (CdF) est dominée par de vastes écosystèmes d'eau douce qui renferment des milliers de lacs et de cours d'eau. Selon la base de données HydroLAKE [1], on compte environ 19 000 lacs de plus de 0,1 km² dans cette région. La région abrite également plusieurs rivières importantes, dont les rivières Albany, Moose, Winisk, Ekwana et Attawapiskat. Cependant, les développements routiers et les explorations minières dans la région peuvent perturber les écosystèmes d'eau douce, modifiant l'évapotranspiration, les interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines, et le rôle des eaux de surface dans le bilan hydrique régional global. Ces processus peuvent entraîner des changements dans la répartition et le niveau de l'eau des lacs ainsi que dans certains cas, la formation et la disparition de lacs entiers.

L'une des principales priorités de l'évaluation des relations environnementales saines est « l'eau et les réseaux hydrographiques, y compris l'écoulement de l'eau », telle qu'énoncée dans le « Mandat de l'évaluation régionale de la région du Cercle de feu ». La conservation et la gestion efficaces des ressources en eaux de surface dans cette région sont donc essentielles. Une surveillance précise est cruciale pour suivre les changements et guider le processus décisionnel. Une connaissance détaillée de la dynamique des eaux de surface est la base de la compréhension des changements concernant l'eau dans cette région. Les progrès des technologies de télédétection fournissent des outils pour cartographier et surveiller efficacement les changements des eaux de surface.

Parmi les divers capteurs satellitaires optiques et radar à synthèse d'ouverture (RSO), les capteurs optiques Landsat constituent la source de données la plus importante pour détecter et surveiller les changements des eaux de surface grâce à leur résolution spatiale relativement haute (30 m), à leur grande couverture spatiale et à leurs enregistrements de données sur une longue période (plus de 40 ans).

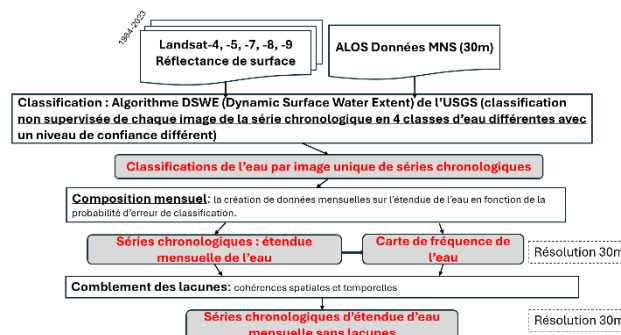


Figure 1. Schéma des étapes de la génération des données sur les eaux de surface à l'aide de l'imagerie Landsat.

Les archives de données Landsat en accès libre ont permis de générer quelques produits relatifs aux eaux de surface mondiales et continentales [2, 3], notamment l'ensemble de données sur les eaux de surface mondiales (Global Surface Water, GSW), produit par le Centre commun de recherche (CCR) de la Commission européenne, qui a été largement reconnu et adopté. Cependant, ce produit comporte d'importants problèmes de qualité, surtout pour le nord du Canada. Par exemple, notre examen du produit mensuel de l'eau sur la masse terrestre canadienne a révélé des erreurs de classification notables entre le sol et l'eau pour les pixels touchés par des nuages et des anomalies dues aux capteurs [4]. Il est donc difficile d'obtenir la superficie réelle des eaux de surface à partir de l'ensemble de données GSW et des autres produits disponibles pour les applications de l'évaluation du CdF, qui nécessitent une haute résolution temporelle et des ensembles de données continues (p. ex. mensuelles).

Méthodologie

Afin de tenir compte des limites des produits d'eaux de surface actuellement disponibles, nous avons élaboré une nouvelle approche, fondée sur la plateforme infonuagique Google Earth Engine (GEE), pour générer des produits mensuels de grande qualité et sans lacunes à partir des données Landsat. La figure 1 décrit cette approche, composée de trois éléments clés : 1) Classifications de l'eau d'une seule image de la série chronologique : l'étendue dynamique des eaux de surface (Dynamic Surface

Water Extent, DSWE), élaborée à l'origine par l'Institut d'études géologiques des États-Unis (USGS) [5], a été améliorée pour classer chaque image Landsat de la série chronologique en quatre classes d'eau différentes avec divers niveaux de confiance; 2) Composition mensuelle : on utilise un nouvel algorithme fondé sur les probabilités d'erreur de classification pour créer des cartes mensuelles de l'étendue des eaux pour la période de 1984 à 2023. Soulignons que les données mensuelles serviront à générer une carte de fréquence des eaux de surface sur une région, la fréquence des eaux étant définie comme le pourcentage d'un pixel qui apparaît comme de l'eau dans le nombre total des observations disponibles pendant une période donnée. Cette carte de fréquence des eaux permettra de combler les lacunes dans les produits mensuels; 3) Comblement des lacunes mensuelles : on applique un nouvel algorithme de cohérence spatiale et temporelle pour combler les lacunes et produire une série chronologique continue de cartes mensuelles de l'étendue des eaux de surface. Ces cartes sont également utilisées pour obtenir des statistiques mensuelles sur la superficie des eaux de surface à diverses échelles spatiales (p. ex. bassins versants, écorégions). Pour obtenir de plus amples renseignements sur l'approche, consultez Li *et al.* [6].

Définition de l'indicateur et premiers résultats

La figure 2(a) illustre l'étendue mensuelle composée des eaux de surface dans la région du CdF. On peut constater des lacunes dues à l'absence de données en raison de la couverture nuageuse dans de grandes parties de certaines zones. La figure 2(b) présente la carte de l'étendue des eaux de surface avec les lacunes comblées à l'aide de notre algorithme de cohérences spatiales et temporelles. Notre approche a permis de générer une longue série chronologique (de 1984 à 2023) de données mensuelles sur l'étendue des eaux de surface dans la région du CdF à une résolution de 30 m. Cet ensemble de données fournit des données de référence sur l'eau pour l'analyse d'évaluation dans la région du CdF.

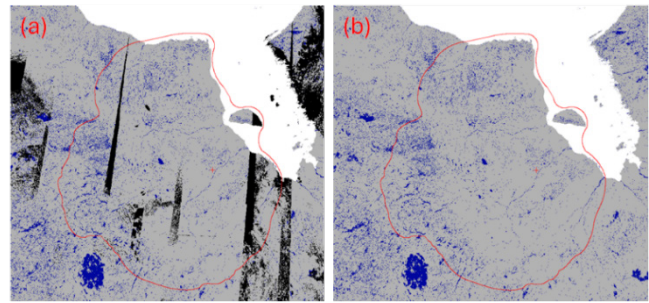


Figure 2. Carte de l'étendue des eaux de surface dans la région d'évaluation du CdF pour juillet 2000 : a) avant de combler les lacunes, b) après. La couleur noire indique les lacunes dans les données.

Pour l'évaluation régionale de l'eau de la région du CdF, il est essentiel de répondre à une question clé : « Où est l'eau? ». Un indicateur qui aide à répondre à cette question est la fréquence (ou probabilité) des eaux de surface [7]. La figure 3 montre la fréquence des eaux de surface de 1991 à 2020, et nous informe sur la dynamique globale des eaux de surface dans la région du CdF. Sur cette carte, les pixels dont la valeur est de 0 % et de 100 % désignent respectivement les surfaces terrestres permanentes et les eaux permanentes pendant la période de 30 ans. Les zones dont la fréquence varie de 1 % à 99 % représentent des zones d'inondation, qui apparaissent comme des surfaces terrestres et des eaux à différents moments au cours des 30 années.

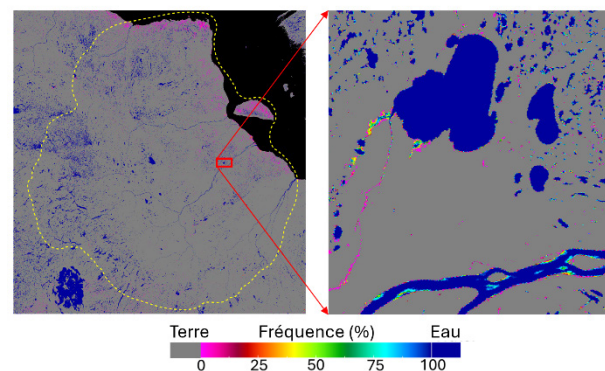


Figure 3. Carte de fréquence (probabilité) des eaux de surface dans la région d'évaluation du CdF (polygone jaune) pour la période de 1991 à 2020.

À partir de la carte de fréquence des eaux de surface, nous avons calculé la superficie des eaux permanentes et la zone d'inondation dans la région du CdF, ainsi que les superficies pour les lacs de tailles différentes selon la base de données HydroLAKES (tableau 1).

Tableau 1 Résumé de la superficie des lacs, de l'étendue des zones d'inondation et du nombre de lacs des différentes catégories de taille (de $\geq 0,1 \text{ km}^2$ à $\geq 50 \text{ km}^2$) dans la région d'évaluation du CdF.

Taille du lac	0,1 km ²	1 km ²	5 km ²	10 km ²	50 km ²	Tous *
Nombre de lacs	18 909	2 056	287	118	19	
Eaux permanentes (km ²)	11 730	8 161	4 907	3 810	1 935	14 700
Inondation maximale* (km ²)	2 368	894	432	330	153	8 990
Inondation moyenne* (km ²)	897	390	200	153	72	2 470

* « Tous » désigne la superficie des eaux de surface pour tous les lacs et rivières dans la région d'évaluation du CdF. L'inondation maximale et l'inondation moyenne désignent les zones d'inondation dont la fréquence est supérieure à 0 % et 50 %, respectivement.

Veuillez noter que ces statistiques sur la superficie des eaux de surface peuvent changer au fil des périodes.

Conclusions et prochaines étapes

Des ensembles de données mensuelles continues sur 40 ans (de 1984 à 2023) sur l'étendue des eaux de surface dans la région d'évaluation du CdF, à une résolution de 30 m, ont été générés à partir des données Landsat à l'aide de l'approche élaborée par le Centre canadien de cartographie et d'observation de la Terre (CCCOT). Une carte de fréquence des eaux de surface a été produite à partir des données mensuelles à une résolution de 30 m, illustrant la dynamique des eaux de surface de cette région entre 1991 et 2020.

Pour les prochaines étapes, nous examinerons les tendances des changements de la superficie des eaux de surface dans la région d'évaluation du CdF. Les tendances sur la période de 40 ans seront analysées au niveau du sous-bassin et une carte des tendances sera générée. Les données mensuelles continues sur l'étendue des eaux de surface seront analysées pour certains sous-bassins afin de dégager les tendances

locales et saisonnières. L'analyse et les résultats devraient être terminés en 2026.

Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec :

Junhua.Li@NRCan-RNCan.gc.ca,
Shusen.Wang@NRCan-RNCan.gc.ca.

Références

- [1] Messenger, M.L., B. Lehner, G. Grill, I. Nedeva et O. Schmitt, 2016. Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach. *Natural Communications*, 7, 13603, doi:10.1038/ncomms13603.
- [2] Pekel, J.-F., A. Cottam, N. Gorelick et A.S. Belward, 2016. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature* 540, 418-422.
- [3] Donchyts, G., F. Baart, H. Winsemius, N. Gorelick, J. Kwadijk et N. van de Giesen, 2016. Earth's surface water change over the past 30 years. *Nature Clim Change* 6, 810-813 (2016). <https://doi.org/10.1038/nclimate3111>
- [4] Wang, Shusen, Junhua Li et Hazen A. J. Russell, 2023, Methods for Estimating Surface Water Storage Changes and Their Evaluations. *Journal of Hydrometeorology*, DOI: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-22-0098.1>.
- [5] Jones, J.W., 2019. Improved automated detection of subpixel-scale inundation—Revised dynamic surface water extent (DSWE) partial surface water tests. *Remote Sensing* 11, 374.
- [6] Li, J., S. Wang et L. Sun, 2025, Landsat-derived long-term monthly surface water datasets over Canada's landmass. Géomatique Canada, Fichier public XXXX, 1.zip file. Doi:10.4095/xxxx
- [7] Ressources naturelles Canada, 2023. *Fréquence d'apparition de l'eau de surface au Canada*. <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/2b76d117-d940-4ebb-bf26-91f768081c5f>

Indicateur 2. Phénologie de l'enneigement

Pertinence pour les priorités d'évaluation du Cercle de feu

La neige est une variable climatique essentielle qui reflète la plus grande partie du rayonnement solaire, contribuant à atténuer le réchauffement climatique et isolant le sol des températures de l'air hivernales dans les régions froides comme les parties nord de la région d'évaluation du Cercle de feu (CdF), ce qui se répercute sur la répartition du pergélisol [1]. La phénologie de l'enneigement (p. ex. les dates de début et de fin de l'enneigement saisonnier) est importante pour les plantes, notamment en raison de son influence sur le début de la croissance de différentes espèces au printemps, et pour les animaux, en influant sur les schémas migratoires et le moment de la migration. La neige est également importante pour la société, en particulier en fournissant de l'eau douce pour la consommation et l'agriculture. Dans la région d'évaluation, les routes d'hiver sont des infrastructures essentielles pour la plupart des communautés des Premières Nations Mushkegowuk et Matawa, ainsi que pour les activités d'extraction des ressources (figure 1). La phénologie de la neige et de la glace dicte la durée pendant laquelle ces connexions vitales sont viables chaque hiver. La perte de neige et de glace au printemps peut également causer des inondations le long des rivières, comme l'inondation de 1986 qui a forcé la relocalisation de la Première Nation Weenusk. Par ailleurs, la fonte de la neige au printemps permet d'emprunter d'autres infrastructures de transport (p. ex. routes, pistes d'atterrissage) qui facilitent les déplacements.

Le Mandat de l'évaluation régionale de la région du Cercle de feu reconnaît l'importance de bon nombre de ces aspects dans les priorités d'évaluation. Le développement des infrastructures et le développement économique sont des composantes de la priorité *Bien-être de la collectivité*, et la phénologie des neiges (p. ex. les routes d'hiver) en est un aspect important. C'est également le cas pour la priorité *Équité sociale et économique*, en particulier les composantes visant à fournir des avantages économiques et l'accès aux terres. La phénologie de la neige est également essentielle aux

Relations avec un environnement sain, en particulier les composantes liées à l'eau, à la faune, aux plantes et aux changements climatiques.

Nous avons mis au point cet indicateur pour surveiller la neige à une résolution spatiale plus fine (pixels de 30 m) que celle des autres produits de la phénologie de l'enneigement actuellement disponibles au Canada (p. ex. pixels de 250+ m [2]). Il n'était pas possible d'étudier la phénologie de la neige à l'échelle du paysage au Canada avant la création de ce produit.

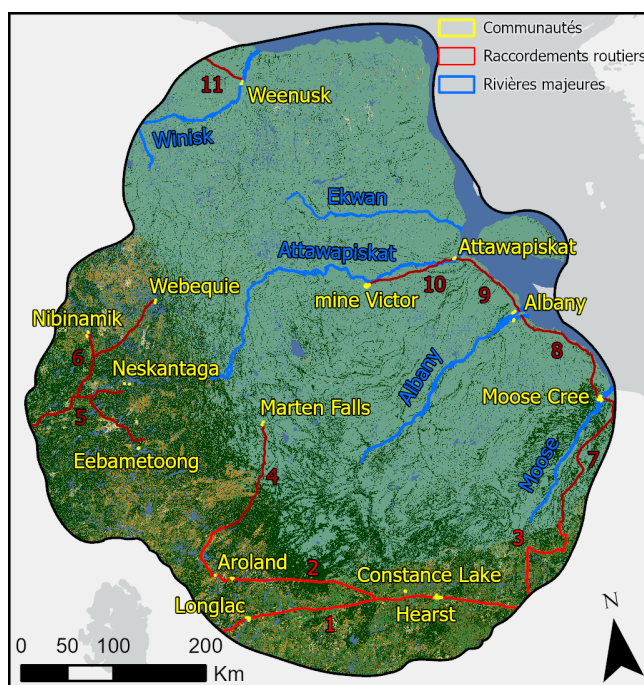


Figure 1. Région d'évaluation, avec les emplacements d'intérêt. Les classes de couverture terrestre correspondent à l'indicateur 8. Les groupes de routes ont été numérotés, avec les routes permanentes indiquées en rouge pâle et les routes d'hiver en rouge foncé.

Méthodologie

Notre méthodologie repose sur deux constellations de satellites : le programme européen Sentinel-2 et le programme américain Landsat. Ensemble, ces constellations recueillent des images sur presque toute la surface terrestre mondiale (et les océans côtiers) à tous les deux ou trois jours depuis 2018 [3]. Nous rassemblons toutes les images acquises au-

dessus du Canada et déterminons l'état de chaque observation de pixel de 30 m à la date d'acquisition de l'image : neige (et glace), non-neige (c.-à-d. terre, eau), indéterminé (c.-à-d. nuages, ombres).

Nous avons élaboré un algorithme [4] pour calculer les indicateurs de l'enneigement pour chaque pixel pendant chaque hiver :

- **Début** : Date de début de la première (ou de la plus grande) période d'enneigement.
- **Fin** : Date de fin de la dernière (ou de la plus grande) période d'enneigement.
- **Durée** : Nombre total de jours où une couverture de neige est présente (ou de la plus grande période enneigée).
- **Périodes** : Nombre de périodes de neige (nombre de fois distinctes avec plusieurs observations confirmées de neige).
- **État** : Classification (p. ex. continue, sans neige).

Nous n'obtenons pas une observation claire tous les jours en raison des fréquences des orbites satellitaires et des nuages. Ainsi, les indicateurs temporels (le début, la fin et la durée) sont déterminés avant la date du milieu entre deux observations claires, l'incertitude étant quantifiée comme la moitié de la durée de l'intervalle ($\pm$ jours).

Notre algorithme a été mis à l'essai dans diverses régions de l'Amérique du Nord et tient compte de profils inhabituels de phénologie de la neige. Nous calculons des indicateurs pour chaque hiver depuis 2018-2019 et pouvons également fournir des moyennes pluriannuelles. Les évaluations de validation ont montré que la date de la fin de l'enneigement donne de bons résultats dans tous les essais et que la fonte tardive de la neige correspond généralement à des zones où l'accumulation de neige est plus épaisse. Nous utilisons donc les dates de la fin de l'enneigement pour modéliser et cartographier l'épaisseur de la neige (indicateur 2). La fin de l'enneigement présente généralement une incertitude plus faible que le début (et la durée) de l'enneigement, puisque la fonte de la neige se produit habituellement dans des conditions moins nuageuses que les chutes de neige.

Pour préparer ce rapport, nous avons traité la phénologie de la couverture neigeuse à une

résolution de 30 m dans l'ensemble de la région d'évaluation en utilisant la plus récente version de notre méthodologie. Nous nous concentrons sur les dates de la fin de l'enneigement dont l'incertitude est inférieure à 15 jours par rapport à la couverture terrestre et aux emplacements d'intérêt dans la région d'évaluation (figure 1). Les emplacements d'intérêt sont les zones aménagées de 14 communautés (y compris la mine Victor), 11 raccordements routiers (Transcanadienne, deux embranchements permanents de routes hivernales et huit routes d'hiver) et les principaux chenaux de cinq rivières majeures dont la largeur est supérieure à 100 m.

Résultats

Les dates de la fin de l'enneigement varient généralement selon la latitude dans l'ensemble de la région d'évaluation, la fonte étant plus précoce (p. ex. à la mi-avril) dans le sud et plus tardive (p. ex. à la fin mai) dans le nord (figure 2). La couverture terrestre n'a pas une forte influence sur la fonte de la neige à l'échelle régionale dans ce paysage principalement plat, sauf dans les comparaisons entre l'eau et la terre (figure 3). La glace sur les plus grands lacs et le littoral de la baie d'Hudson en particulier peut persister pendant une bonne partie du mois de juin. Par ailleurs, les courants peuvent provoquer une fonte précoce, la glace de mer près de l'embouchure de la rivière Attawapiskat au sud de l'île Akimiski fondant habituellement en mars. Les dates de la fin de l'enneigement peuvent différer considérablement en raison de la variabilité annuelle du climat dans les parties méridionales de la région d'évaluation, avec des printemps plus chauds (comme ceux de 2021 et de 2024) qui déclenchent la disparition de la neige près d'un mois plus tôt que les printemps plus froids (comme celui de 2020).

La variabilité locale du moment de la disparition de la neige est une caractéristique unique de cet indicateur. Par exemple, dans de nombreux paysages de toundra du nord de la région d'évaluation, le terrain local a une influence sur les dates de la fin de l'enneigement. Nous pouvons voir sur la figure 2A que les dates de la fin de l'enneigement diffèrent de près d'un mois entre les zones plus abritées où la neige s'accumule (p. ex. rive sud-est des lacs) et les

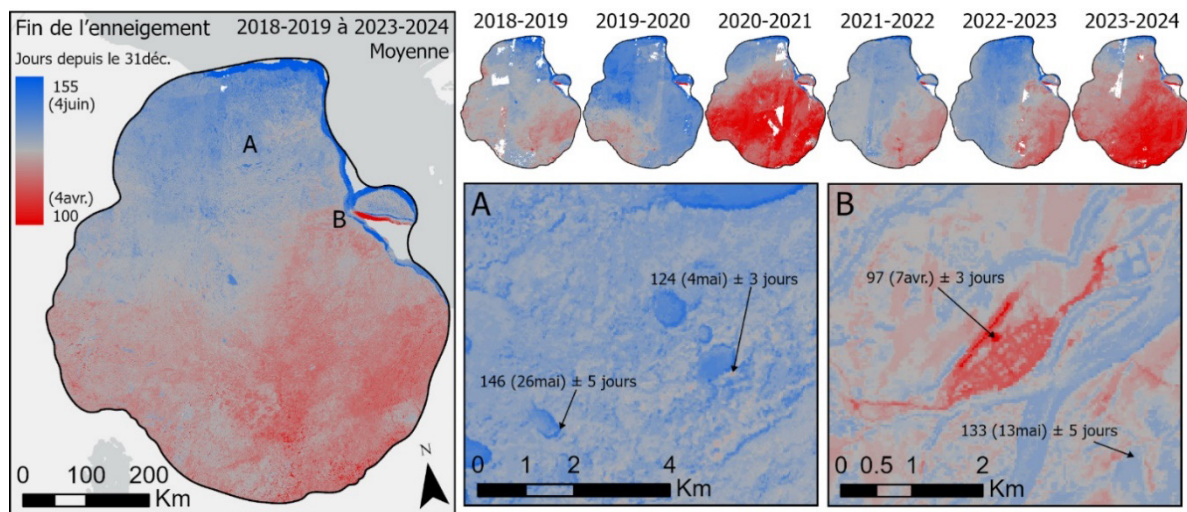


Figure 2. Date de la fin de l'enneigement cartographiée dans la région d'évaluation. À gauche : Moyenne des six hivers observés. En haut à droite : Cartographiée pour chaque hiver. En bas à droite : Vues locales de la date moyenne de la fin de l'enneigement pour une zone humide de la toundra (A; 84.24 °O, 54.23 °N) et Attawapiskat (B; 82.43 °O, 52.92 °N), avec des exemples de dates $\pm$ les incertitudes. Les résultats n'ont pas été fournis pour l'océan à 10 km ou plus de la côte et lorsque l'incertitude était supérieure à 15 jours.

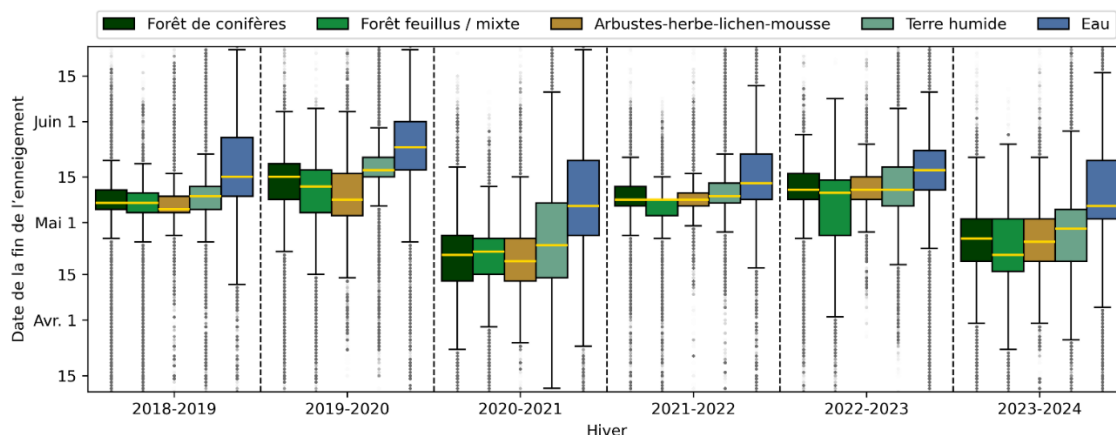


Figure 3. Diagrammes de quartiles des dates de la fin de l'enneigement par type de couverture terrestre pour chaque hiver cartographié dans la région d'évaluation. Voir plus de détails sur la couverture terrestre dans pour l'indicateur 7. Certaines classes sont combinées pour simplifier la visualisation.

zones voisines exposées où elle est emportée par le vent. La figure 2B montre Attawapiskat, où l'aéroport et les infrastructures communautaires sont déneigés plus tôt que les terres humides environnantes, qui à leur tour sont généralement libres de neige avant que la glace ait fondu sur la rivière Attawapiskat.

Nous pouvons surveiller la dynamique de la fin de l'enneigement dans des lieux d'intérêt, notamment les communautés comme Attawapiskat, les raccordements routiers et les grandes rivières (figure 4). La plupart suivent une trajectoire semblable à celle de l'ensemble de la région, sauf

pour les zones situées dans la Première Nation Weenusk, qui sont moins touchées par la variabilité du climat printanier du sud. Les communautés sont généralement libres de neige en premier, tandis que les routes d'hiver restent enneigées plus longtemps et que la glace sur les rivières qui persiste plus longtemps. Une évaluation supplémentaire montre que les efforts de déneigement des infrastructures sont observés, les communautés étant libres de neige une semaine plus tôt en moyenne que leur environnement naturel immédiat (autre que les milieux aquatiques; date moyenne de déneigement la plus précoce : 12 jours plus tôt à Attawapiskat; la plus tardive : deux jours plus tôt dans les

communautés Cries de Moose). En isolant les pistes d'aéroport, on constaterait même un déneigement relativement plus précoce. Ces périodes temporelles obtenus par observations satellitaires peuvent également fournir des renseignements précieux sur la viabilité annuelle des routes d'hiver et sur pour les périodes où les rivières sont plus à risque d'inondation causée par la fonte des glaces.

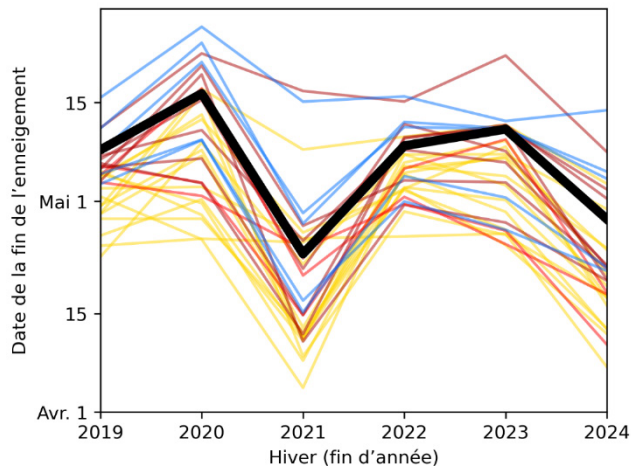


Figure 4. Dates médianes annuelles de la fin de l'enneigement pour les emplacements d'intérêt. Les couleurs correspondent à celles de la figure 1. La ligne noire représente toute la région d'évaluation.

Conclusions et prochaines étapes

La phénologie annuelle de la neige, cartographiée à une résolution de 30 m, fournit des renseignements précieux pour les régions d'intérêt comme la région d'évaluation du CdF. Nous montrons ici comment la date de la fin de l'enneigement peut être utilisée pour étudier la variabilité des pertes de neige à l'échelle du paysage dans les milieux naturels et développés. La date de la fin de l'enneigement est un indicateur

de l'épaisseur maximale de la neige, qui a une incidence sur la stabilité du pergélisol, les cycles saisonniers pour les plantes et les animaux, le bien-être des collectivités et d'autres facteurs. Nos travaux de cartographie de l'épaisseur de la neige et du pergélisol (indicateurs 2 et 10) reposent sur ces dates de fin de l'enneigement. Le développement se poursuit et est axé sur la réduction de l'incertitude dans les zones où les observations sont moins fréquentes, l'augmentation du rendement dans certains milieux (p. ex. la forêt) et la validation à l'échelle nationale. Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec mitchellthurston.bonney@nrcan-rncan.gc.ca.

Références

- [1] Global Climate Observing System, 2024. Essential Climate Variables. [Lien](#).
- [2] Trishchenko, A.P. et C. Ungureanu, 2024. Cumulative changes in minimum snow/ice extent over Canada and northern USA for 2000-2023. *Can. J. Remote Sens.* 50(1), 2371359.
- [3] Ju, J., Q. Zhou, B. Freitag, D.P. Roy, H.K. Zhang, M. Sridhar., ...C.S.R. Neigh., 2025. The Harmonized Landsat and Sentinel-2 version 2.0 surface reflectance dataset. *Remote Sens. Environ.* 324, 114723.
- [4] Bonney, M.T., Y. Zhang, 2025. Wide-area 30-m resolution snow dynamics from Harmonized Landsat Sentinel-2. *En cours d'examen à ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*

Indicateur 3. Épaisseur de la neige

Pertinence pour les priorités d'évaluation du Cercle de feu

La région du Cercle de feu (CdF) est couverte de neige environ six mois par année. La neige entraîne des répercussions importantes sur l'environnement et le mode de vie des communautés des Premières Nations, en particulier les conditions hydrologiques des lacs et des rivières, l'approvisionnement en eau et les inondations printanières, les routes d'hiver et les activités hivernales de chasse/piégeage, le dégel/gel du sol et le pergélisol, l'humidité du sol et les écosystèmes terrestres, la migration et les habitats des animaux. Mais surtout, les conditions de neige diffèrent d'un endroit à l'autre et d'une année à l'autre, et elles changent sous l'effet du réchauffement climatique à long terme.

L'épaisseur de la neige est enregistrée à la plupart des stations climatologiques, mais celles-ci sont éparpillées et ne sont pas représentatives des conditions naturelles du sol. La distribution spatiale de l'épaisseur de la neige a été cartographiée à des résolutions très grossières allant de 1 km à 20 km. Ces cartes grossières ne sont pas utiles en pratique pour les communautés et les évaluations d'impact régionales. La figure 1 montre des cartes de la neige à différentes résolutions. Des travaux intensifs sur le terrain et l'utilisation de drones ou d'avions peuvent permettre de cartographier l'épaisseur de la neige à de hautes résolutions spatiales (pixels de petite taille). Cependant, ils ne peuvent couvrir que des périodes et des zones limitées, et leur coût est élevé.

Nous avons mis au point une nouvelle méthode pour modéliser et cartographier l'épaisseur de la neige avec des pixels de 30 m et en quantifier les variations par rapport au climat.

Méthodologie

La méthode est fondée sur le modèle NEST (Northern Ecosystem Soil Temperature), qui intègre les processus détaillés de la dynamique de la neige, y compris l'accumulation de neige après les chutes de neige, le compactage de la neige, la sublimation, la fonte et les changements de la température, de la densité et de l'épaisseur de la neige [2]. Le modèle

utilise un paramètre (F_{snow}) pour représenter les variations de l'apport de neige dues à la redistribution de la neige par le vent et les biais potentiels dans les données sur les précipitations. La valeur de F_{snow} pour chaque cellule de la grille est estimée en fonction de la date de fin de l'enneigement (S_{end}), qui est cartographiée à partir des données satellitaires (indicateur 2). Notre analyse et d'autres études montrent que F_{snow} est relativement stable d'une année à l'autre pour un site donné [1].

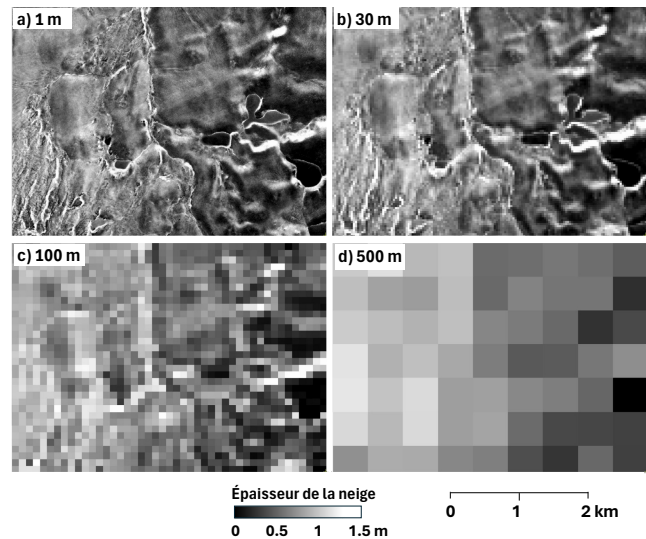


Figure 1. Cartes de l'épaisseur de la neige pour la même région à des résolutions spatiales différentes. Le panneau « a » montre l'épaisseur de la neige à une résolution de 1 m mesurée le 16 avril 2012, dans une zone du nord de l'Alaska [1]. Les autres panneaux ont été rééchantillonnés en utilisant des moyennes du panneau « a » à différentes résolutions.

Nous pouvons donc utiliser la moyenne de F_{snow} calculée entre 2018 et 2024 pour exécuter le modèle pour les autres années lorsque les données S_{end} ne sont pas disponibles. Pour modéliser et cartographier efficacement la neige à une taille de pixel de 30 m, nous avons exécuté le modèle pour diverses valeurs possibles de F_{snow} , l'état de la végétation et les conditions du sol pour un petit nombre de sites, puis nous avons interpolé linéairement les résultats du modèle à chaque pixel de 30 m en fonction de son emplacement et des conditions locales, y compris sa date de fin de l'enneigement S_{end} cartographiée à partir des données satellitaires.

Nous avons cartographié l'épaisseur de la neige dans les basses terres de la baie d'Hudson (BTBH) de 1950 à 2100. Les données climatiques de 1950 à 2024 proviennent de l'ensemble de données ERA5-Land [3]. Le climat futur de 2025 à 2100 est fondé sur une projection d'un modèle climatique régional canadien dans le cadre de scénario d'émissions moyennes à faibles de gaz à effet de serre en utilisant les profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP) 4.5 [4]. Les cartes des types de couvertures terrestres et de l'épaisseur de la tourbe pour les régions des BTBH proviennent respectivement d'Ian Olthof et d'Emily Ogden d'Environnement et Changement climatique Canada (communications personnelles). L'indice de surface foliaire a été calculé à partir des données satellitaires (indicateur 9).

Premiers résultats

La figure 2 représente un exemple de l'épaisseur moyenne de la neige cartographiée en mars 2018. L'épaisseur de la neige variait considérablement à l'échelle du paysage, principalement sous l'effet de la redistribution de la neige par le vent. L'épaisseur de la neige varie également de la côte à l'intérieur des terres et du nord au sud en raison des gradients climatiques. Notre carte spatialement détaillée de l'épaisseur de la neige montre l'emplacement des routes, des routes d'hiver et des chemins de fer (panneau de droite sur la figure 2), bien que nous n'ayons pas tenu compte des processus complexes des répercussions d'origine humaine.

La figure 3 illustre l'épaisseur moyenne de la neige en avril au cours de la dernière décennie (de 2014 à 2025) et dans les années 2090, selon un scénario de réchauffement climatique moyen (RCP 4.5). En avril, la neige sera moins épaisse avec le réchauffement climatique.

On peut voir sur la figure 4a les variations de la température moyenne annuelle de l'air de 1950 à 2100 à Attawapiskat (52.926 °N, 82.429 °O; voir le panneau de gauche de la figure 1). Les figures 4b et 4c montrent l'épaisseur moyenne modélisée de la neige en mai et le nombre annuel de jours d'enneigement de 1950 à 2100 dans une tourbière arbustive typique sans redistribution de la neige par

le vent ($F_{snow} = 1$). On voit que la durée de viabilité des routes d'hiver sera plus courte avec le réchauffement climatique.

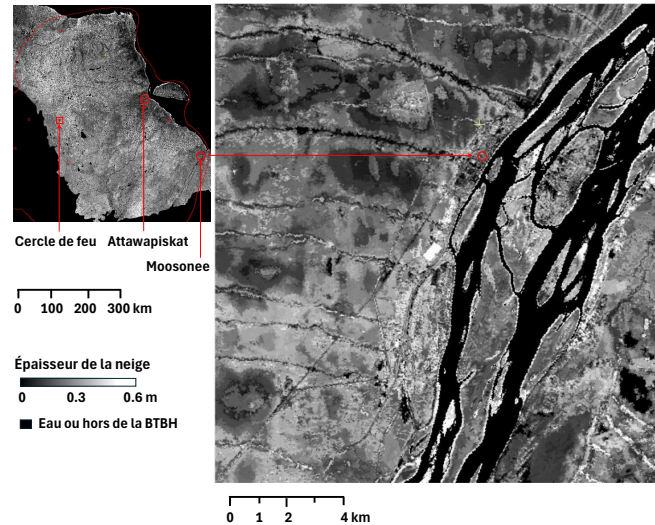


Figure 2. Épaisseur moyenne de la neige cartographiée en mars 2018. Le panneau de gauche montre une grande partie de la zone de l'étude d'impact du CdF dans les BTBH (sa limite est indiquée par la courbe rouge), et le panneau de droite est un petit secteur autour de la ville de Moosonee représenté par un cercle rouge.

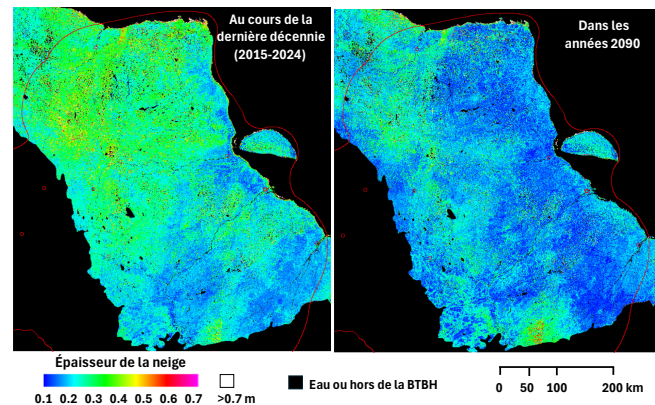


Figure 3. Épaisseur moyenne de la neige en avril cartographiée au cours de la dernière décennie (de 2014 à 2025) et dans les années 2090 selon un scénario de réchauffement climatique moyen à faible (RCP 4.5) pour une grande partie de la zone de l'étude d'impact du Cercle de feu dans les BTBH (sa limite est indiquée par la courbe rouge).

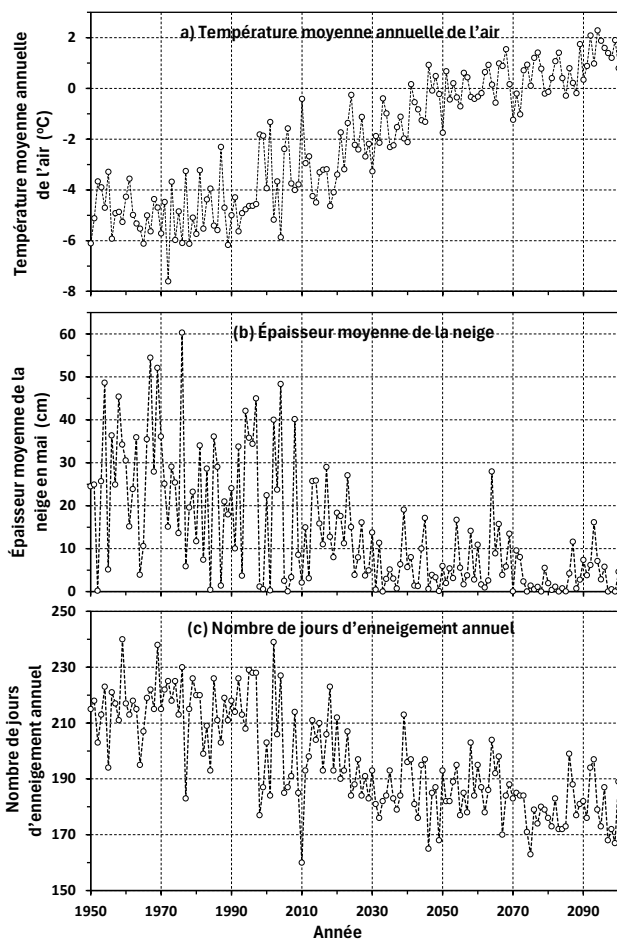


Figure 4. Température moyenne annuelle de l'air, épaisseur moyenne modélisée de la neige en mai et journées annuelles d'enneigement dans une tourbière arbustive près d'Attawapiskat (52.926 °N., 82.429 °O.). Les données climatiques de 2025 à 2100 sont fondées sur la projection selon un scénario de réchauffement climatique moyen-faible (RCP 4.5).

Conclusions et prochaines étapes

La neige, en tant que variable climatique essentielle, n'influence pas seulement sur le système climatique à grande échelle; elle a également des répercussions importantes sur l'environnement local et régional et sur la vie des populations locales. Les anciennes cartes de l'épaisseur de la neige sont trop grossières pour les communautés des Premières Nations. Nous avons mis au point une nouvelle méthode pour modéliser et cartographier l'épaisseur de la neige avec une taille de pixel de 30 m. Les résultats révèlent de grandes variations à l'échelle du paysage et avec les gradients climatiques, ainsi qu'avec les changements dus au réchauffement climatique. Ces renseignements sont importants pour les activités de chasse et de piégeage, l'utilisation des terres et le

développement des infrastructures, ainsi que pour l'adaptation à un climat en évolution.

Nous avons testé cette méthode à partir d'observations dans deux régions du nord de l'Alaska. Nous continuerons de valider les résultats dans les BTBH. Nous étendrons les produits de l'épaisseur de neige pour couvrir toute la région d'évaluation du Cercle de feu en fonction des besoins des communautés locales et des exigences de l'étude d'impact. Nous examinerons également d'autres projections possibles des changements climatiques. Les résultats seront publiés plus tard, et les données seront diffusées sur la Plateforme de science et de données ouvertes. Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec [yu.zhang @RNCAN-RNCAN.gc.ca](mailto:yu.zhang@RNCAN-RNCAN.gc.ca).

Remerciements

Cette étude est financée par l'Agence Parcs Canada dans le cadre de l'Initiative de conservation de la biodiversité et de séquestration du carbone des BTBH et de la baie James. Glen Brown, du ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, a fourni les données climatiques à plusieurs stations. Emily Ogden, Ian Olthof et Taylor Biccum d'Environnement et Changement climatique Canada ont fourni une carte de la couverture terrestre, une carte de l'épaisseur de la tourbe et une carte de la fraction d'eau à l'échelle du sous-pixels dans les BTBH. Xiping Wang a traité les données climatiques des stations et évalué les données climatiques maillées. Et Gang Hong a créé une carte de l'indice de la surface foliaire.

Références

- [1] Parr, C., M. Sturm et C. Larsen (2020). Snowdrift landscape patterns: An arctic investigation. *Water Resources Research*, 56. doi: 10.1029/2020wr027823.
- [2] Zhang, Y., W. Chen et J. Cihlar (2003). A process-based model for quantifying the impact of climate change on permafrost thermal regimes. *Journal of Geophysical Research*, 108, D22, 4695. doi: 10.1029/2002JD003354
- [3] Muñoz-Sabater, J., E. Dutra, A. Agustí-Panareda *et al.* (2021). ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth*

System Scientific Data, 13, 4349-4383. doi:
10.5194/essd-13-4349-2021
[4] Scinocca, J. F., V. V. Kharin, Y. Jiao *et al.*
(2016). Coordinated global and regional climate
modeling. *Journal of Climate*, 29, 17-35. doi:
10.1175/JCLI-D-15-0161.1

Indicateur 4. Étendue de la glace de lac

Pertinence pour les priorités d'évaluation du Cercle de feu

La glace de lac est une composante notable du paysage hivernal dans la plupart des régions du Canada, y compris dans la région d'évaluation du Cercle de feu. Les interactions entre la glace de lac et l'environnement sont importantes et concernent, par exemple, les conditions climatiques, hydrologiques, biologiques, sociales, culturelles et économiques [1]. Selon le *Mandat de l'évaluation régionale de la région du Cercle de feu*, ces conditions constituent des priorités d'évaluation globales. Par exemple, la glace de lac fournit une base efficace pour les routes et les sentiers qui facilitent l'accès saisonnier aux sites isolés comme les communautés éloignées et les territoires traditionnels de chasse et de pêche. À ce titre, la glace de lac contribue à des priorités d'évaluation plus précises comme le bien-être de la communauté, le bien-être culturel et l'équité économique. Grâce à ses interactions avec l'eau, la faune, la biodiversité et le climat, la glace de lac est également pertinente pour la priorité d'évaluation « Relations avec un environnement sain ».

Ici, nous allons nous concentrer sur une mesure de la glace de lac, appelée étendue de la glace de lac. Cette mesure caractérise la superficie totale d'un lac qui est recouverte de glace en fonction du temps. Il s'agit donc d'un indicateur des variations de la phénologie de la glace de lac, c'est-à-dire du moment saisonnier de l'englacement et de la débâcle, ainsi que la durée de la saison des glaces. Les causes possibles de la variation de ces indicateurs sont naturelles ou causées par l'homme et comprennent les changements tels que le climat, les conditions météorologiques, les niveaux d'eau et la température de l'eau.

Méthodologie

Grâce à leur capacité d'acquérir constamment des données géolocalisées sur de vastes zones, les satellites d'observation de la Terre (OT) constituent d'excellents outils pour recueillir des renseignements à jour sur l'étendue de la glace de lac. Par rapport aux

satellites optiques d'OT, les satellites radar à synthèse d'ouverture (RSO) sont un outil plus fiable, pratique et rentable pour caractériser l'étendue de la glace de lac, grâce à leur capacité unique d'acquérir des images de bonne qualité et à haute résolution dans des conditions météorologiques défavorables et de faible luminosité. De telles conditions sont fréquentes au Canada et ont contribué à la décision du gouvernement du Canada d'investir dans des systèmes de satellites RSO comme la mission de la Constellation RADARSAT (MCR) [2]. Les méthodes classiques pour déterminer l'étendue de la glace de lac à partir des images RSO nécessitent une interprétation visuelle. Les volumes de données accrus, les besoins plus grands en information et les contraintes budgétaires rendent ces méthodes insoutenables. C'est pourquoi nous élaborons des méthodes automatisées pour caractériser l'étendue de la glace de lac au moyen d'images satellitaires RSO [3,4]. À l'heure actuelle, notre objectif est de mettre au point des méthodes spécifiques pour extraire l'information sur l'étendue de la glace de lac à partir des produits d'images de polarimétrie compacte (PC) de la MCR. Du fait de la forte sensibilité des capteurs radars à la variabilité de l'humidité de la glace de lac, qui dépend de la température de l'air, il est nécessaire d'élaborer deux approches différentes pour cartographier l'évolution de l'étendue de la glace de lac pendant les périodes de l'englacement et de la débâcle. Les modèles originaux de classification de la glace et de l'eau se trouvent au cœur de chaque approche et sont encadrés par les étapes de pré-traitement et de post-traitement des images radar. Les modèles de classification sont élaborés au moyen d'un algorithme d'apprentissage machine et des données de la MCR pour trois sites qui vont du sud au nord du Canada. Ces sites représentent ainsi un large éventail de conditions de la glace de lac. Les lacs situés dans la région d'évaluation du Cercle de feu (CdF) offrent une bonne occasion de mettre à l'essai la performance de nos modèles de classification.

Définition de l'indicateur et premiers résultats

Pour résumer, l'étendue de la glace de lac, notre principal indicateur, est égale à la superficie totale d'un lac qui est recouverte de glace plutôt que d'eau. L'information sur l'étendue de la glace de lac peut être présentée de diverses façons, sous forme de cartes ou de chiffres. Numériquement, l'étendue de la glace de lac est généralement exprimée en pourcentage de la superficie totale du lac. Ce pourcentage est habituellement appelé *concentration de glace de lac*. Nos méthodes sont conçues pour produire les deux types de résultats.

La comparaison des renseignements sur l'étendue de

la glace de lac pour différentes dates permet d'établir des indicateurs secondaires comme les dates de l'englacement et de la débâcle et, par extension, la durée des saisons des glaces et des saisons libres de glace, ainsi que les anomalies liées à l'englacement, à la débâcle et à la durée des glaces.

La figure 1 comporte six cartes de l'étendue de la glace de lac pour une partie de la région d'évaluation du Cercle de feu qui est centrée sur le lac Missisa (52°19' N, 85°12' O). Ces cartes ont été produites en appliquant nos modèles de classification à certaines images de la MCR acquises pendant la saison d'englacement de 2023 (d'octobre à novembre) et la saison de débâcle de 2024 (d'avril à mai).

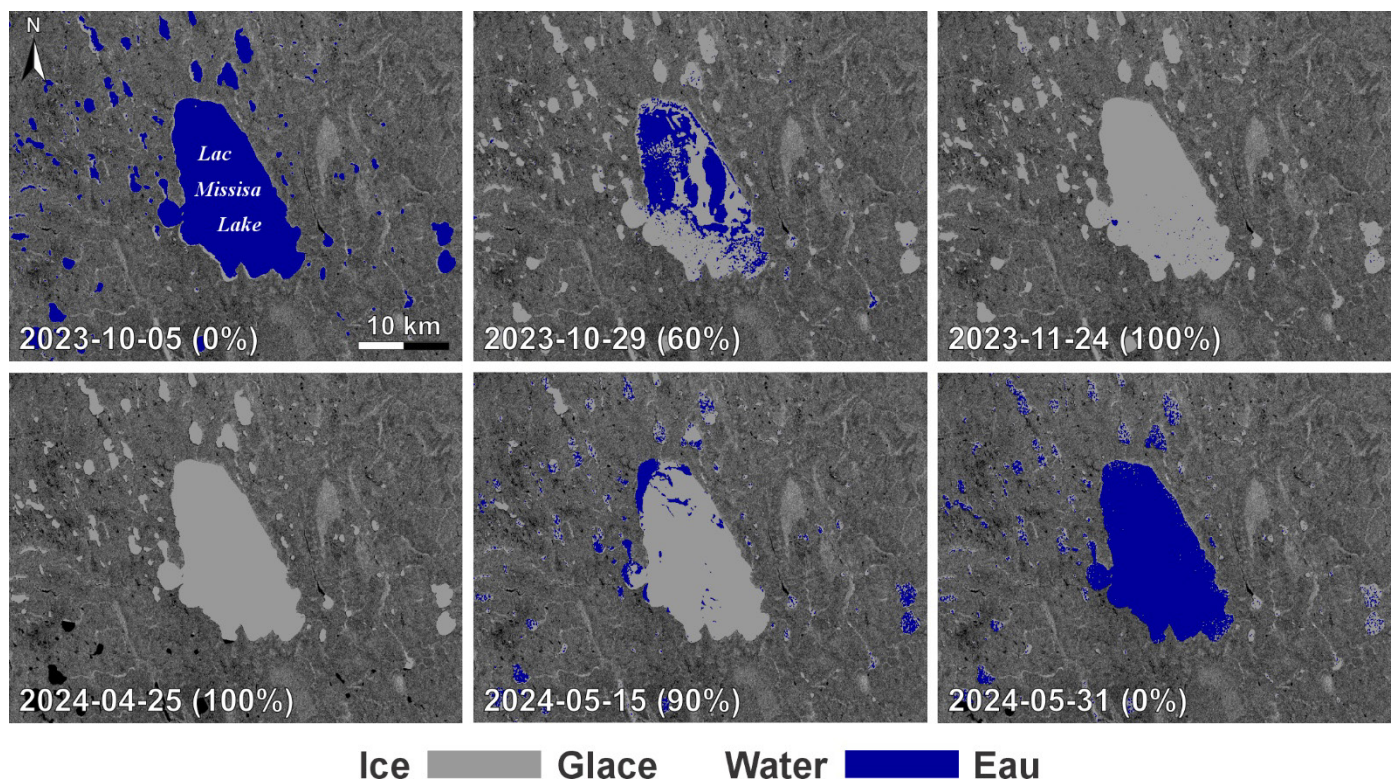


Figure 1. Cartes de l'étendue de la glace de lac montrant une section de la région d'évaluation du CdF centrée sur le lac Missisa (52°19' N, 85°12' O). Les cartes sont tirées des images de la MCR acquises pendant la saison de l'englacement de 2023 (d'octobre à novembre) et la saison de la débâcle de 2024 (d'avril à mai). Les pourcentages représentent les concentrations de glace de lac pour le lac Missisa. Imagerie de mission de la Constellation RADARSAT © Gouvernement du Canada (2023, 2024). RADARSAT est une marque officielle de l'Agence spatiale canadienne.

Les concentrations de glace de lac pour le lac Missisa sont également présentées, c'est-à-dire le pourcentage indiqué après chaque date. Les concentrations de glace de lac pour les lacs voisins sont disponibles, mais elles ne sont pas indiquées dans un souci de clarté.

Selon la figure 1, les dates de l'englacement et de la débâcle pour le lac Missisa étaient respectivement le 24 novembre 2023 et le 31 mai 2024. La durée de la saison des glaces de 2023-2024 pour ce lac est donc estimée à 189 jours. Les petits lacs entourant le lac Missisa semblent avoir une date d'englacement plus hâtive (voir la carte pour le 29 octobre 2023), mais leur date de débâcle correspond davantage à celle du lac Missisa.

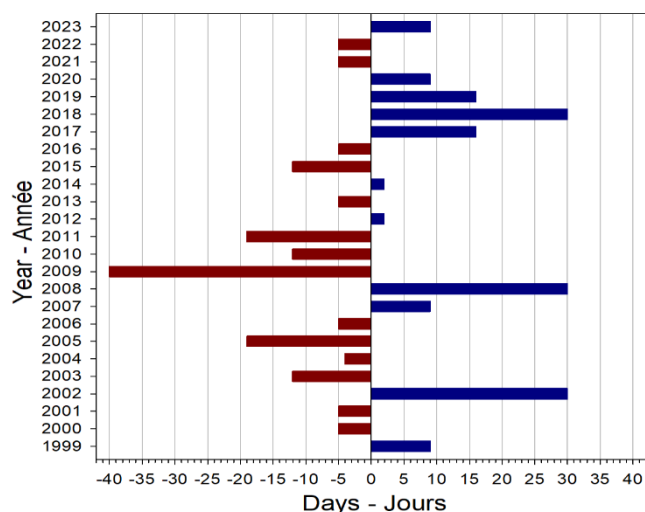


Figure 2. Graphique montrant les anomalies de la durée des glaces pour le lac Missisa de 1999 à 2023. Les barres bleues et rouges représentent les années où, respectivement, la durée des glaces est plus longue et plus courte que la moyenne à long terme de 187 jours. Source des données : ECCC/SCG.

Pour de nombreux utilisateurs, notamment ceux qui participent aux évaluations régionales, plus la période couverte par les données est longue, plus grande est la valeur des renseignements sur l'étendue de la glace de lac. Pour illustrer ce point, nous avons choisi d'ajouter aux renseignements représentés sur la figure 1 ceux que nous avons tirés de données fournies par le Service canadien des glaces (SCG) d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). À des fins de prévisions météorologiques et de modélisation climatique, les analystes du Service canadien des glaces utilisent diverses images

d'observation de la Terre pour interpréter visuellement l'étendue hebdomadaire de la glace sur un nombre maximum de 136 lacs canadiens, dont le lac Missisa. Leurs observations pour le lac Missisa remontent jusqu'au 15 décembre 1998 et ont été appliquées ici pour créer la courbe des anomalies de la durée des glaces illustrée sur la figure 2. Les étiquettes sur l'axe des ordonnées correspondent à la saison de l'englacement. L'année 2023 représente donc la saison des glaces de 2023-2024 et correspond à la période associée à la figure 1. Il n'est pas du ressort de ce document, ni de notre objectif ou de notre expertise, d'analyser de manière détaillée l'information présentée à la figure 2. Cependant, nous aimerions vous faire part d'une observation évidente et à laquelle nous ne nous attendions pas : d'une année à l'autre, la durée de la saison des glaces pour le lac Missisa peut varier jusqu'à 70 jours (p. ex. de 2008 à 2009). Les anomalies à long terme des dates de l'englacement et de la débâcle pourraient être tracées de la même façon et fournir des renseignements supplémentaires sur la phénologie de la couverture de glace du lac Missisa.

Conclusions et prochaines étapes

L'information sur l'étendue de la glace de lac facilite la prise de décisions dans le contexte des évaluations régionales, car elle peut révéler des changements naturels et d'origine humaine dans les conditions environnementales. En raison des interconnexions, de tels changements peuvent ensuite faire varier les conditions de santé, culturelles, sociales et économiques.

Grâce à leur capacité d'imagerie unique, les satellites RSO constituent d'excellents outils pour recueillir des renseignements sur l'étendue de la glace de lac. Nos approches facilitent l'extraction automatisée des renseignements sur l'étendue de la glace de lac à partir des images satellitaires RSO et sont donc plus durables que les méthodes faisant appel aux analystes d'images.

Une évaluation quantitative de l'exactitude de nos modèles de classification entre glace et eau est en cours. Les conditions du sol qui sont connues pour réduire la précision de la classification pendant l'englacement sont la présence de zones à l'abri du vent et de glace nouvelle très mince. De même, la

présence de neige mouillée, d'eau qui s'accumule et de vents violents complique la classification entre glace et eau pendant la débâcle.

Pour obtenir de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec

Joost.vanderSanden@NRCan-RNCan.gc.ca

Références

- [1] Leppäranta, M., 2015. *Freezing of Lakes and the Evolution of Their Ice Cover*. Springer-Verlag, Heidelberg etc., 301 p.
- [2] Thompson, A., 2015. Overview of the RADARSAT Constellation Mission. *Canadian*

Journal of Remote Sensing, Vol. 41, No. 5, p. 401-407.

- [3] Geldsetzer, T., et J.J. van der Sanden, 2013. Identification of polarimetric and non-polarimetric C-band SAR parameters for application in the monitoring of lake ice freeze-up, *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 39, No. 3, pp. 263-275.
- [4] Geldsetzer, T., J.J. van der Sanden et B. Brisco, 2010. Monitoring Lake Ice during Spring Melt using RADARSAT-2 SAR, *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 36, No. 2, pp. S391-S400.

Indicateur 5. Stockage terrestre de l'eau

Pertinence pour les priorités d'évaluation du Cercle de feu

L'eau et les écosystèmes aquatiques dans la région du Cercle de feu (CdF) de l'Ontario sont essentiels aux peuples autochtones locaux pour des raisons culturelles, écologiques et pratiques. L'eau est considérée comme sacrée et porteuse de vie, elle est au cœur des enseignements, des cérémonies et des responsabilités d'intendance; les lacs, les rivières et les terres humides soutiennent des sources alimentaires vitales comme le poisson, le riz sauvage et la sauvagine, qui constituent les moyens de subsistance traditionnels. Les cours d'eau servent également de voies de circulation, reliant les communautés et renforçant l'identité et le patrimoine. La région du CdF possède un paysage riche en eau, traversé par six grandes rivières. Les communautés locales dépendent de ces rivières pour l'eau potable, le transport et la nourriture. La région chevauche les basses terres de la baie d'Hudson (BTBH), l'un des plus grands complexes de tourbières de la planète et un important puits de carbone mondial. Dans leur état naturel de saturation en eau, ces milieux humides pauvres en oxygène ralentissent la décomposition, ce qui permet à la tourbe d'accumuler et de stocker de grandes quantités de carbone. Cependant, les changements dans le bilan hydrique – causés par le drainage, la construction de routes, l'exploitation minière, les changements climatiques ou la modification du débit des rivières – menacent cet équilibre. Le séchage expose la tourbe à l'oxygène, accélérant alors la décomposition et libérant du dioxyde de carbone, et les inondations excessives peuvent accroître les émissions de méthane provenant de l'activité microbienne. Les deux processus risquent de transformer les basses terres, en les faisant passer d'un puits de carbone en source de gaz à effet de serre, ce qui nuira à la régulation du climat et déclenchera des boucles de rétroaction qui intensifieront le réchauffement et les changements hydrologiques. Au-delà du stockage du carbone, les terres humides régulent le débit de l'eau, filtrent les polluants et soutiennent la biodiversité, ce qui en fait un élément essentiel pour la santé environnementale

locale. Les communautés autochtones ont exprimé de vives préoccupations, craignant que l'exploitation minière dans le CdF contamine l'eau, perturbe les terres humides et endommage les habitats des poissons et de la faune, mettant en danger leur culture, leur sécurité alimentaire et les générations futures.

Compte tenu de ces risques, il est de plus en plus important de surveiller et de quantifier le stockage terrestre de l'eau (Terrestrial Water Storage, TWS) et sa variabilité. Il est essentiel de comprendre comment l'eau est stockée et redistribuée dans le paysage, non seulement pour l'hydrologie et la climatologie, mais aussi pour l'écologie, la gestion des ressources en eau et la planification socioéconomique. Des études antérieures ont mis en évidence la valeur des évaluations du TWS dans le suivi du bilan hydrique à long terme, l'évaluation des impacts climatiques et l'élaboration de stratégies de gestion durable [1].

La mission satellitaire GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), lancée en 2002, offre une occasion unique de surveiller les variations mensuelles du TWS en suivant celles du champ gravitationnel de la Terre [2].

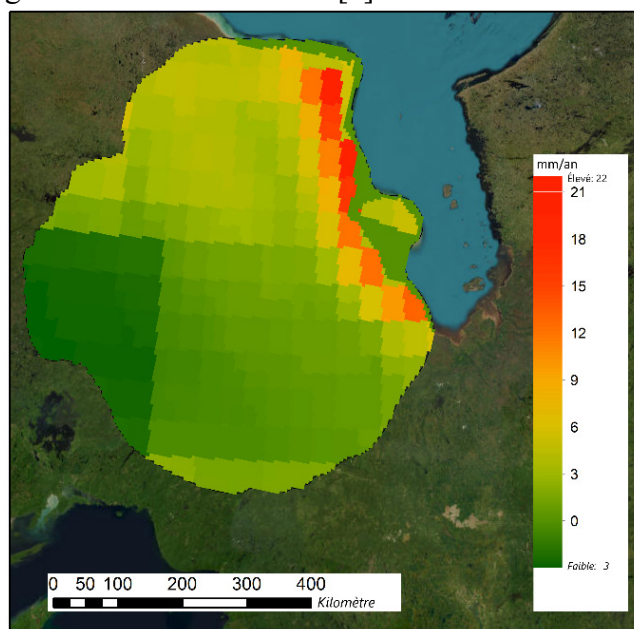


Figure 1. Tendances du TWS (pente de Sen) pour le TWS de 2002 à 2024 dans la région du CdF, tirées des produits Mascon de la mission GRACE. La tendance est superposée sur une carte de base ArcGIS

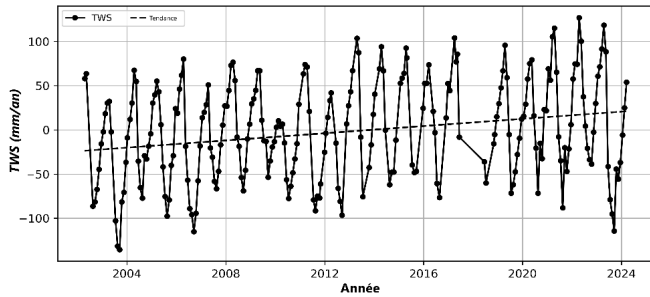


Figure 2. Moyenne mensuelle du TWS dans la région du Cercle de feu de 2002 à 2024

En reflétant les contributions combinées des eaux souterraines, de l'humidité du sol, des eaux de surface, de la neige et de la glace, le TWS offre un aperçu précieux de la façon dont différentes composantes de l'eau interagissent dans les écosystèmes. Les études fondées sur la mission GRACE ont réussi à déterminer l'épuisement des eaux souterraines, le bilan hydrique à l'échelle du bassin, l'évapotranspiration, les changements de la neige et de la glace, les inondations, les sécheresses et les réactions de la végétation, démontrant ainsi la grande pertinence de cette mission pour la recherche hydrologique et climatique. En nous appuyant sur cette base, nous caractérisons la climatologie du TWS pour la région du CdF à l'aide des observations de la mission GRACE de 2002 à 2024, dans le but de mieux comprendre la dynamique régionale du cycle de l'eau.

Méthodologie

Le TWS pour la région du CdF dans le nord de l'Ontario a été déterminé à partir de données des missions satellitaires GRACE et GRACE Follow-On (FO) pour la période allant d'avril 2002 à mars 2024. Les ensembles de données mensuels ont été obtenus auprès de trois centres de traitement des données : le Center for Space Research de l'Université du Texas [3], le Goddard Space Flight Center [4] et le Jet Propulsion Laboratory de la NASA [5]. Afin de réduire les incertitudes associées aux différentes stratégies de traitement, nous avons utilisé des moyennes d'ensemble pour produire un jeu de données consolidé. Nous avons reprojété les champs obtenus sur une grille à une résolution spatiale de 5 km dans une projection conique conforme de Lambert et extrait les valeurs pour la zone d'étude du

CdF au moyen d'un masque régional.

Définition de l'indicateur

Huit variables ont été calculées à partir de la série chronologique mensuelle du TWS afin de caractériser la climatologie de la zone d'étude [6] :

1. $M_{\max}$ et $M_{\min}$ – les mois d'occurrence maximale et minimale du TWS, indiquant le moment saisonnier du stockage d'eau le plus important et le plus bas.
2. $\sigma_{\max}$ et $\sigma_{\min}$ – les écarts types de $M_{\max}$ et de $M_{\min}$ entre les années, représentant la variabilité interannuelle du moment saisonnier.
3. ΔTWS – la plage de variation saisonnière maximale du TWS, calculée comme la différence moyenne entre $M_{\max}$ et $M_{\min}$ de 2002 à 2024.
4. COV – le coefficient de variation de ΔTWS , représentant la variabilité interannuelle de l'amplitude saisonnière.
5. Pente de Sen – la tendance de la série chronologique mensuelle du TWS, représentant un changement à long terme.
6. Valeur p – la signification statistique de la pente de Sen, fondée sur un essai bilatéral.

La pente de Sen a été cartographiée spatialement pour la région du CdF (figure 1). Les sept autres variables ont été calculées à l'aide de la moyenne mensuelle du TWS dans la région du CdF en raison des contraintes d'espace du présent compte rendu.

Premiers résultats

Le TWS affiche un cycle saisonnier très prononcé dans la région du CdF, avec le stockage maximal ($M_{\max}$) se produisant vers le mois d'avril, sous l'effet de l'accumulation de neige, et le stockage minimal ($M_{\min}$) vers le mois d'août, après le pic de l'évapotranspiration en été. La durée moyenne de transition entre $M_{\max}$ et $M_{\min}$ est d'environ 4,5 mois (figure 2). Dans l'ensemble de l'enregistrement, $M_{\max}$ va de mars à juin ($\sigma_{\max} = 0,7$ mois), et $M_{\min}$ de juillet à octobre ($\sigma_{\min} = 0,9$ mois).

L'amplitude moyenne saisonnière (ΔTWS) est de 155 ± 32 mm, comprise entre 87,9 et 232,7 mm, les plus grandes variations (>200 mm) étant observées sur la rive sud de la baie d'Hudson et la plus petite variation (<100 mm) dans la région du bassin

hydrographique de la rivière Winisk (figure 3). Le coefficient de variation de ΔTWS est de 0,21, dénotant une variabilité interannuelle modérée.

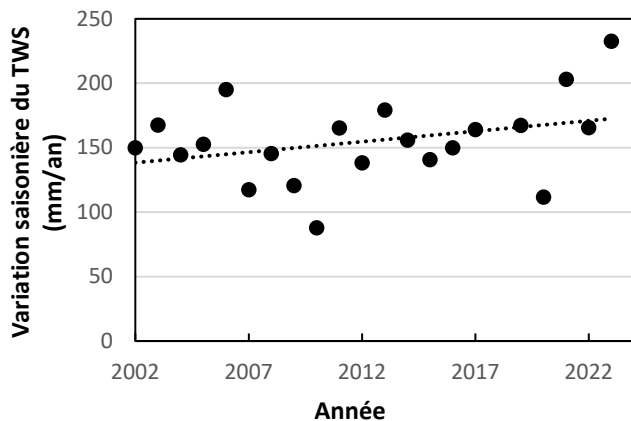


Figure 3. Variation saisonnière du TWS de 2002 à 2024 (21 ans, en excluant 2024).

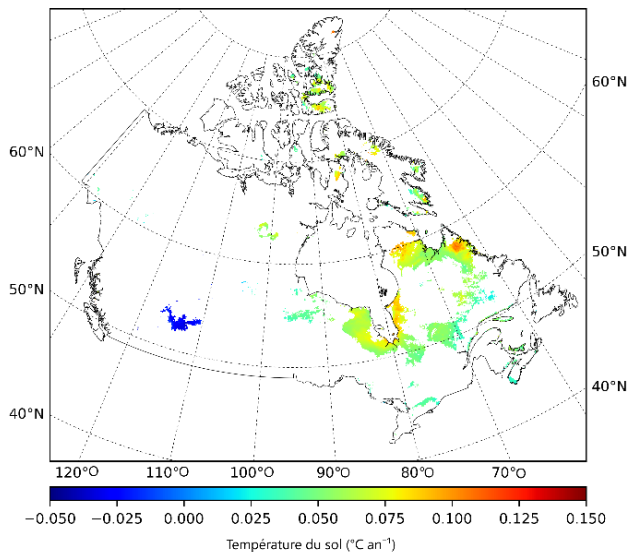


Figure 4. Pente de Sen de la température du sol simulée entre 1950 et 2023 à l'aide du modèle EALCO, utilisée pour interpréter les variations du TWS. On observe des tendances positives importantes dans les BTBH.

Sur les 22 années de la période d'étude, l'analyse de la pente de Sen révèle une augmentation à long terme du TWS, de 2,03 mm par année ($p < 0,001$) en moyenne, avec un gradient spatial entre le littoral et l'intérieur des terres : les tendances positives les plus importantes atteignent 22 mm par année sur la rive de la baie, avec les tendances négatives baissant à -3 mm par année à l'intérieur des terres (figure 1). Les tendances élevées sur le littoral pourraient refléter en partie l'incertitude dans les produits GRACE.

La variabilité saisonnière du stockage terrestre de l'eau (ΔTWS) affiche une faible tendance positive de 1,3 mm par an ($p = 0,2$), qui peut être liée à des hausses des températures de l'air et du sol causées par le climat qui renforcent l'évapotranspiration et prolongent la saison de croissance, amplifiant ainsi les oscillations saisonnières du stockage de l'eau, comme on le voit sur la figure 4.

Bien que les résultats laissent entendre des gains modestes de stockage à long terme, l'interprétation doit tenir compte des incertitudes associées au relèvement post-glaciaire et de la résolution spatiale grossière des données de la mission GRACE. Néanmoins, l'intégration des anomalies du TWS dérivées de GRACE aux modèles de surface terrestre et aux registres hydrométriques fournit un cadre précieux pour la surveillance de la disponibilité de l'eau et de la résilience hydrologique dans le CdF, où les observations in situ demeurent rares.

Conclusions et prochaines étapes

Les observations tirées des missions GRACE et GRACE-FO révèlent un cycle saisonnier prononcé du TWS dans la région du CdF en Ontario, avec une amplitude moyenne de 155 ± 32 mm et des maxima et minima en avril et août, respectivement. L'analyse de la pente de Sen indique une légère augmentation à long terme d'environ 2,03 mm par année. Les erreurs de fuite et les effets du relèvement post-glaciaire peuvent entraîner des incertitudes dans les résultats. Bien que la variabilité saisonnière n'affiche qu'une faible tendance à la hausse ($\sim 1,3$ mm par année), les résultats mettent en évidence la valeur de la surveillance fondée sur les données de la mission GRACE pour caractériser la dynamique hydrologique dans cette région pauvre en données et dominée par les tourbières.

Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec :

Liming.He@NRCan-RNCan.gc.ca,
Shusen.Wang@NRCan-RNCan.gc.ca.

Références

- [1] X. Shi *et al.*, "Quantifying the long-term changes of terrestrial water storage and their driving factors," *Journal of Hydrology*, vol. 635, p. 131096, May 2024, doi: 10.1016/j.jhydrol.2024.131096.

- [2] B. D. Tapley, S. Bettadpur, M. Watkins et C. Reigber, “The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results,” *Geophysical Research Letters*, vol. 31, no. 9, 2004, doi: 10.1029/2004GL019920.
- [3] H. Save, S. Bettadpur et B. D. Tapley, “High-resolution CSR GRACE RL05 mascons,” *JGR Solid Earth*, vol. 121, no. 10, pp. 7547–7569, Oct. 2016, doi: 10.1002/2016JB013007.
- [4] B. D. Loomis, K. E. Rachlin et S. B. Luthcke, “Improved Earth Oblateness Rate Reveals Increased Ice Sheet Losses and Mass-Driven Sea Level Rise,” *Geophysical Research Letters*, vol. 46, no. 12, pp. 6910–6917, 2019, doi: 10.1029/2019GL082929.
- [5] F. W. Landerer *et al.*, “Extending the Global Mass Change Data Record: GRACE Follow-On Instrument and Science Data Performance,” *Geophysical Research Letters*, vol. 47, no. 12, p. e2020GL088306, 2020, doi: 10.1029/2020GL088306.
- [6] S. Wang et J. Li, “Terrestrial Water Storage Climatology for Canada from GRACE Satellite Observations in 2002–2014,” *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 42, no. 3, pp. 190–202, May 2016, doi: 10.1080/07038992.2016.1171132.

Indicateur 6. Disponibilité du lichen pour le caribou

Pertinence pour les priorités d'évaluation du Cercle de feu

L'une des principales priorités de l'évaluation pour les *Relations avec un environnement sain* est « la faune et son habitat, y compris les espèces en péril, les oiseaux migrateurs, les poissons et leur habitat », telle qu'elle est énoncée dans le « Mandat de l'évaluation régionale de la région du Cercle de feu ». Parmi les espèces sauvages en péril au Canada, la population boréale de caribous des bois a été officiellement évaluée comme étant menacée en vertu de la *Loi sur les espèces en péril* en 2003, ce statut a été confirmé en 2014. Le caribou est essentiel au Canada pour des raisons écologiques, culturelles et économiques. Il constitue une espèce clé, indiquant la santé des écosystèmes, et est important pour les cultures, les modes de vie et les économies autochtones. La région d'évaluation du Cercle de Feu (CdF) englobe six aires de répartition du caribou (voir la figure 1) : cinq aires de répartition du caribou boréal (Missisa, Ozhiski, Nipigon, Pagwachuan et la baie James), ainsi qu'une aire de répartition du caribou migrateur (basses terres de la baie d'Hudson).

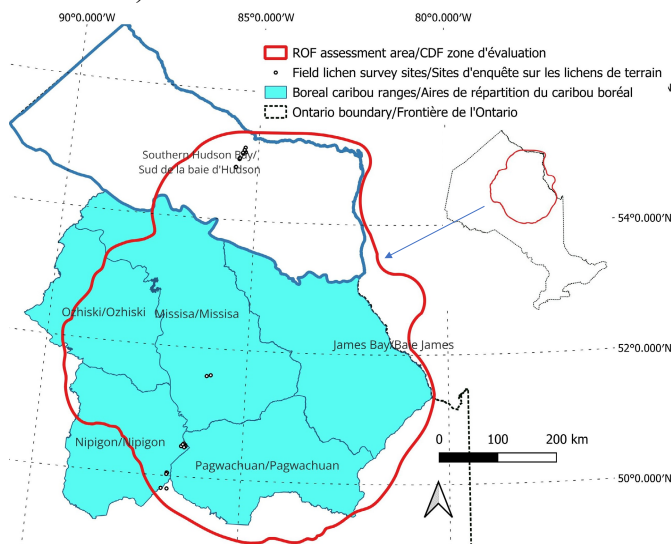


Figure 1. Aires de répartition du caribou boréal et du caribou migrateur qui chevauchent en grande partie la région d'évaluation du CdF dans le nord de l'Ontario. Le médaillon montre l'emplacement de la région du CdF en Ontario, au Canada. Les emplacements de nos relevés des lichens sur le terrain effectués en 2020 et 2022 sont également indiqués.

Plusieurs facteurs, dont la qualité et la perte de l'habitat, la chasse, la prédation, les maladies et les parasites, le développement industriel, les phénomènes météorologiques extrêmes, et les changements climatiques et leurs interactions, peuvent menacer les populations de caribous. Dans la plupart des cas, les causes exactes du déclin des populations de caribous demeurent obscures et diffèrent probablement d'une région à l'autre et au fil du temps. Pour évaluer ces causes et élaborer des programmes de rétablissement efficaces, il est essentiel de disposer de renseignements complets sur tous les facteurs. Ces facteurs ont tendance à être complexes et leur quantification nécessite de multiples indicateurs. Par exemple, l'habitat du caribou boréal peut être divisé en sept périodes distinctes : toute l'année, la mise bas, l'été, le rut, l'hiver, la fin de l'hiver et la migration. Un examen scientifique effectué par Environnement Canada a révélé que, pour l'aire d'hivernage seulement, divers types d'habitats essentiels ont été désignés dans des études menées dans la région du CdF et les zones avoisinantes. Par exemple, dans les basses terres de la baie d'Hudson (BTBH) et de la baie James, le caribou préfère les forêts denses de conifères, les milieux humides et les forêts matures de conifères avec des lichens. Il privilégie également les habitats avec des sols sablonneux, des îles et des forêts d'épinettes noires, d'épinettes et mélèzes et de pins gris dans la région du lac Nipigon. Une étude du régime alimentaire menée récemment par Thompson et coll. a confirmé que les lichens sont vitaux pour les populations de caribous boréaux dans le nord de l'Ontario, représentant respectivement 76 % et 79 % de leur alimentation en automne et en hiver. Cependant, il est important de reconnaître que tous ces types d'habitats n'offrent pas suffisamment de lichens. Il peut être imprécis et trompeur de se fier uniquement à de grandes catégories d'habitat. Des cartes détaillées de la disponibilité des lichens amélioreront la désignation des habitats hivernaux essentiels et faciliteront les efforts de gestion des terres. La disponibilité du lichen pour les caribous devrait donc être un indicateur clé dans l'évaluation de la priorité « La faune et son habitat ».

Méthodologie

Lors de l'élaboration d'une méthodologie pour cartographier la disponibilité des lichens à l'aide de l'imagerie satellitaire, nous devons tenir compte des effets de l'échelle résultant des différentes tailles des objets d'étude et des images satellitaires.

(1) La taille de l'aire de répartition d'un caribou. Comme le montre la figure 1, une aire de répartition du caribou boréal couvre habituellement des milliers de kilomètres carrés. La façon la plus simple de couvrir ces aires de répartition des caribous dans la région du CdF consiste à utiliser des données satellitaires à résolution grossière, comme le radiomètre perfectionné à très haute résolution (AVHRR). Depuis 1980, le capteur AVHRR fournit une couverture mondiale quotidienne à une résolution au sol d'environ 1,1 km. Par ailleurs, nous pouvons utiliser des données satellitaires à résolution modérée, comme celles du système Landsat, qui a une résolution au sol de 30 m et une fréquence de réobservation de 16 jours depuis les années 1980. Pour couvrir toutes les aires de répartition des caribous dans la région du CdF, nous créons une mosaïque de centaines d'images Landsat des années adjacentes. Ces données satellitaires à résolution moyenne et grossière sont disponibles gratuitement et facilement accessibles, avec de nombreux enregistrements historiques pour l'analyse des tendances.

(2) Les tailles des divers profils de répartition des lichens à cartographier sont déterminées. Selon la littérature et nos études sur le terrain au Canada, nous classons la répartition des lichens en trois grandes catégories : dispersée, fragmentée et en tapis. En ce qui concerne la répartition dispersée, les lichens terrestres sont principalement des plantes individuelles dont le diamètre de couronne est habituellement inférieur à quelques millimètres. La longueur et la largeur d'une parcelle de lichens sont mesurées en centimètres, mais un tapis de lichen peut s'étendre sur des mètres ou plus. Compte tenu de ces fourchettes de tailles et de la tendance des lichens terrestres à se trouver sous les arbres et les arbustes, une cartographie directe au moyen d'images satellitaires à résolution moyenne ou grossière donnerait probablement une faible précision. À l'inverse, les images de drones à une résolution spatiale inférieure à 2 cm nous permettent de

distinguer les parcelles ou les tapis de lichen des arbres, des arbustes et des autres plantes. Des photos orientées vers le bas de parcelles à une résolution inférieure à 1 mm seraient plus efficaces pour identifier les espèces de lichens au niveau de chaque plante, fournissant ainsi des renseignements supplémentaires sur la disponibilité des lichens. Étant donné que les caribous doivent creuser dans la neige pour accéder au lichen et que les considérations relatives à l'équilibre énergétique permettent de penser que les lichens dispersés ne sont pas une source de nourriture importante, nous nous concentrons sur la cartographie des parcelles et des tapis de lichen.

(3) Les échelles de sélection de l'habitat hivernal du caribou. Le choix de l'habitat hivernal du caribou se fait à plusieurs échelles : le caribou choisit principalement des zones d'évitement des prédateurs au niveau du paysage; au niveau de la parcelle terrestre, il recherche l'abondance d lichens; et au niveau du site d'alimentation, il préfère des endroits plus faciles d'accès; comme les zones où la neige est peu épaisse et à proximité de troncs d'arbres et de branches d'arbustes. Les aires d'alimentation sont généralement de l'ordre de quelques décimètres à quelques mètres, comme l'indiquent les « cratères de lichens » formés pendant l'alimentation hivernale. La taille des parcelles terrestres a tendance à être de l'ordre de dizaines de mètres, et les paysages se mesurent en kilomètres. Une carte à une résolution spatiale de 30 m est donc appropriée pour repérer les parcelles où le lichen est abondant. Par conséquent, pour la planification de l'occupation des sols et l'évaluation d'impact, les cartes à une résolution de 30 mètres peuvent être meilleures que celles ayant une résolution plus grossière de 500 à 1 000 mètres.

Nous avons mis au point une méthode ascendante pour cartographier la disponibilité du lichen pour le caribou qui tient compte de ces effets de l'échelle. Plus précisément, la méthode comprend quatre étapes : (1) développer une vaste base de données de vérification au sol à partir de photos de parcelles et d'images par drones [1], dont la résolution spatiale est appropriée pour distinguer les parcelles et les tapis de lichens; (2) passer de la résolution des données de vérification au sol à moins de 2 cm à des cartes dérivées de Landsat de la couverture des lichens à une résolution de 30 m à l'aide d'images

satellitaires à haute résolution (p. ex. WorldView à une résolution au sol de 0,5 m), pour couvrir toutes les aires de répartition des caribous dans la région du CdF [2]; (3) convertir les cartes dérivées de Landsat de la couverture des lichens en cartes d'état de la disponibilité des lichens en fonction de critères de classification écologique des lichens, à l'appui de la désignation de l'habitat essentiel et de la planification de l'occupation des sols; (4) détecter les changements historiques de la disponibilité du lichen à l'aide des séries chronologiques tirées de Landsat et de méthodes d'harmonisation, afin de faciliter l'évaluation de l'impact dans la région du CdF [3].

Définition de l'indicateur et premiers résultats

Un indicateur environnemental efficace doit répondre à trois critères : il doit être pertinent pour l'objet évalué, la mise en œuvre des options de gestion doit être pratique et la surveillance doit être faisable. Selon ces critères, nous avons proposé de définir l'indicateur de la disponibilité des lichens des caribous comme la superficie des classes de bonne et moyenne disponibilité des lichens dans une aire de répartition des caribous.

La figure 2 présente l'état de la disponibilité du lichen pour le caribou dans l'aire de répartition du caribou d'Ozhiski. Les zones terrestres où il y avait peu ou pas de lichens étaient prédominantes. En revanche, les terres où la disponibilité des lichens était bonne ou modérée ne représentaient que 0,01 % ou 2,29 % de l'aire de répartition, respectivement. Nous supposons que certains projets de développement pourraient entraîner une perte de 3 % de l'aire de répartition du caribou d'Ozhiski. Si cette perte se produit dans les régions où la disponibilité des lichens est bonne et modérée, elle pourrait être dévastatrice pour la population de caribous. Toutefois, si l'on utilise le type d'habitat plus général de la forêt de conifères, qui couvre 75 % de l'aire de répartition, les répercussions pourraient sembler moins graves. Cet exemple montre que l'utilisation des types d'habitats généraux peut mener à des inexactitudes et à des erreurs. Des cartes explicites de la disponibilité des lichens seraient une meilleure solution.

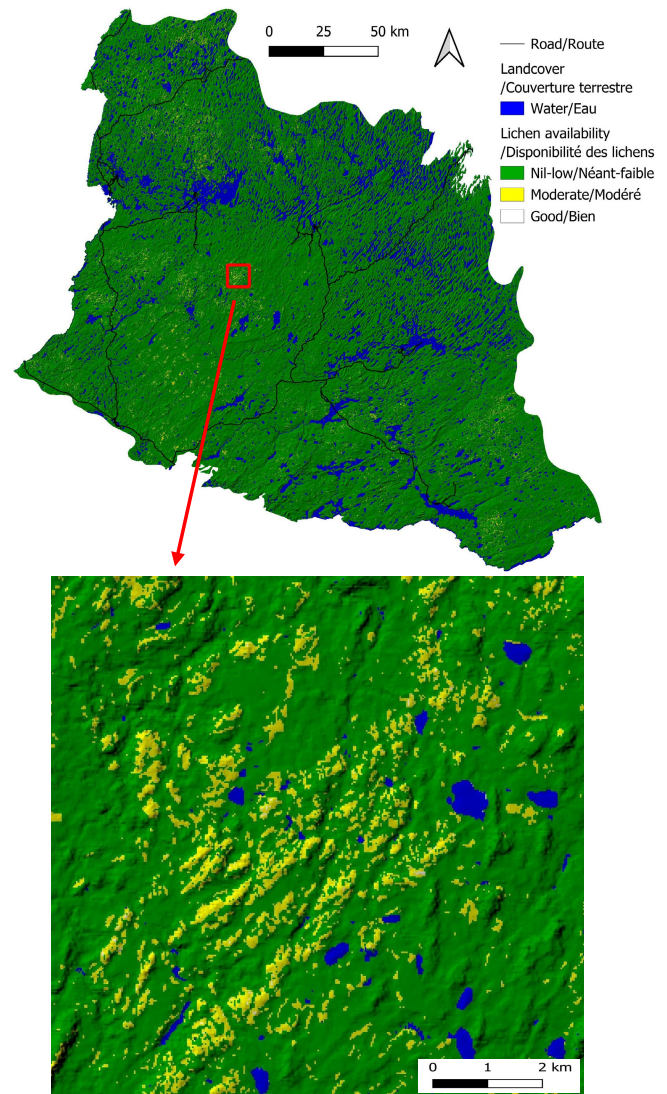


Figure 2. Carte de la disponibilité des lichens datant de 2020 environ pour l'aire de répartition du caribou d'Ozhiski en Ontario, au Canada. Une carte agrandie de 10 km sur 10 km est également présentée. L'effet 3D a été ajouté pour représenter la topographie de la région à l'aide des données d'un modèle altimétrique numérique.

Conclusions et prochaines étapes

Le caribou est une espèce en péril prioritaire dans la région du CdF. Nos résultats montrent que l'utilisation de types d'habitats généraux (p. ex. forêt mature de conifères) peut mener à des inexactitudes et à des erreurs et que la disponibilité du lichen est un indicateur plus approprié de l'aire d'hivernage du caribou. À l'heure actuelle, les zones terrestres où la disponibilité des lichens est modérée ou bonne représentent moins de 3 % de l'aire de répartition du caribou d'Ozhiski. Ces zones devraient donc être une priorité pour la conservation de l'habitat.

Pour les prochaines étapes, nous finaliserons les cartes d'état et déterminerons les tendances de la disponibilité du lichen dans les aires de répartition du caribou situées dans la région du CdF. Nous analyserons également la relation entre la disponibilité du lichen et les types d'habitats généraux et évaluerons les effets cumulatifs sur la disponibilité du lichen pour les aires de répartition du caribou dans la région du CdF. Les résultats seront inclus dans notre prochain rapport public en langage clair, avec les données publiées sur la Plateforme de science et de données ouvertes. Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec : <mailto:Wenjun.Chen@NRCan-RNCan.gc.ca>

Références

- [1] J. Lovitt, G. Richardson, K. Rajaratnam, W. Chen, S. G. Leblanc, L. He, S. E. Nielsen, A. Hillman, I. Schmelzer et A. Arsenault, « A new U-net-based convolutional neural network for estimating caribou lichen ground cover from field-level digital pictures », *Canadian Journal of Remote Sensing*, 48, no. 6, p. 849–8722022, <https://doi.org/10.1080/07038992.2022.2144179>
- [2] S. Jozdani, D. Chen, W. Chen, S.G. Leblanc, C. Prévost, J. Lovitt, L. He et B.A. Johnson. « Leveraging Deep Neural Networks to Map Caribou Lichen in High-Resolution Satellite Images Based on a Small-Scale, Noisy UAV-Derived Map », *Remote Sensing*, vol. 13, p. 2658, 2021, <https://doi.org/10.3390/rs13142658>
- [3] L. He, W. Chen, S.G. Leblanc, J. Lovitt, A. Arsenault, I. Schmelzer, R.H. Fraser, R. Latifovic, L. Sun, C. Prévost, H.P. White et D. Pouliot. « Integration of multi-scale remote sensing data for reindeer lichen fractional cover mapping in Eastern Canada », *Remote Sensing of Environment*, vol. 267, p. 112731, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112731>
- [4] G. Richardson, A. Knudby, K. Millard et W. Chen, A tool for global and regional Landsat 7 and Landsat 8 cross-sensor harmonization. *Geocarto International*, vol. 40, no. 1, p. 2538108, 2025, <https://doi.org/10.1080/10106049.2025.2538108>

Indicateur 7. Ingénierie des castors

Pertinence pour les priorités d'évaluation du Cercle de feu

Le castor (*Castor canadensis*) est présent dans les milieux aquatiques de l'ensemble de l'Ontario, là où une végétation feuillue utilisée pour son alimentation est disponible. Les populations de castors ont commencé à se rétablir au début des années 1900 après avoir été dévastées par la surexploitation pendant le commerce des fourrures, qui a débuté dans les années 1600 et qui a joué un rôle important dans l'histoire du Canada [1]. Lorsque les castors construisent des digues sur des cours d'eau, ils ont un impact majeur sur les écosystèmes en créant des étangs qui retiennent l'eau et les sédiments, en enlevant la végétation pour se nourrir et l'utiliser comme matériau de construction, et en formant des habitats humides riche en biodiversité. Les activités d'ingénierie des castors protègent également contre la sécheresse, atténuent les débits élevés pendant les inondations et fournissent des coupe-feu et un abri contre les grands feux de forêt, offrant ainsi une solution naturelle pour atténuer les effets des changements climatiques.

Le *Mandat de l'évaluation régionale de la région du Cercle de feu* inclut les *Relations avec un environnement sain* parmi ses priorités principales. Il est important de connaître la répartition spatiale des milieux humides créés par les castors et leur variation au fil du temps pour traiter l'ensemble des composantes énumérées dans cette priorité : *l'eau et les réseaux hydrographiques (y compris l'écoulement de l'eau), la faune et son habitat, les changements climatiques et l'adaptation aux changements climatiques et la biodiversité*. Bien que l'on observe fréquemment les étangs de castors sur des images satellitaires dans la région d'évaluation de 312 000 km² (figure 1) qui couvre certaines parties des basses terres de la baie d'Hudson (BTBH) et du bouclier boréal, peu d'information est disponible pour décrire leur répartition régionale et leurs changements à long terme [2].

Méthodologie

Les castors sont traditionnellement recensés dans les climats nordiques au moyen de relevés aériens pour détecter visuellement les réserves de nourriture qu'ils empilent à l'automne près de leurs huttes. Cependant, ces relevés aériens sont coûteux et peu pratiques pour de vastes régions comme la région d'évaluation du Cercle de feu (CdF). Le gouvernement de l'Ontario recueille chaque année des renseignements sur le nombre de castors prélevés dans plusieurs centaines de zones de piégeage situées dans la région d'évaluation, mais ils ne constituent peut-être pas une mesure fiable de l'évolution de la population de castors. Chaque ligne de piégeage de castors ne couvre qu'une partie du vaste paysage, et le nombre d'animaux prélevés varie en raison de facteurs autres que la taille de la population, comme l'évolution du prix des peaux, l'effort de piégeage et la réglementation. La densité potentielle des digues et des étangs de castors peut également être estimée à l'aide de modèles de qualité de l'habitat, mais leurs prévisions sont propres à chaque région et ne correspondent pas toujours fortement à la présence réelle de castors.

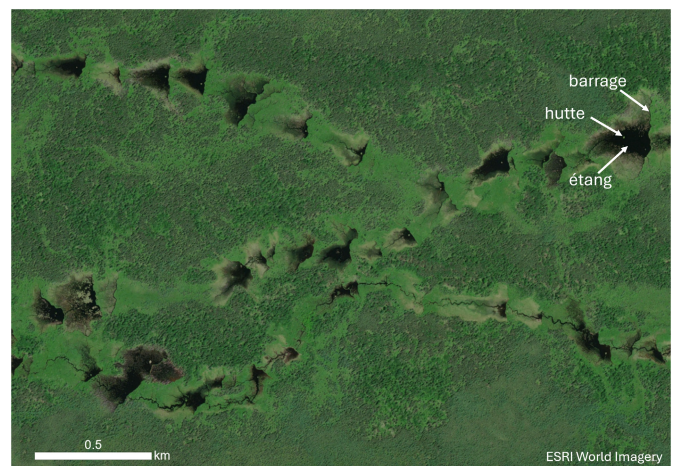


Figure 1. Zone du sud de la région d'évaluation du CdF (84.89° O, 49.96° N) où les données satellitaires à haute résolution (~ 0,5 m) permettent d'observer une forte densité de digues, de huttes et d'étangs de castors.

Afin de surmonter ces limites pour suivre l'activité des castors dans de vastes régions, nous avons élaboré une méthode pour mesurer les changements à long terme des étangs de castors au moyen de la télédétection par satellite. L'emplacement de toutes les digues de castors, nouvelles et abandonnées, est déterminé à l'aide d'images à haute résolution pour distinguer les plans d'eau cartographiés par satellite qui ont été créés ou au moins modifiés par des castors [3]. Cette approche utilise l'état des étangs de castors (c'est-à-dire pleins ou vides) comme indicateur de la présence d'une colonie de castors qui entretient activement une digue, puisque les digues se dégradent et que la plupart des étangs se vident graduellement une fois abandonnés. La méthode a été démontrée sur une région de 5 000 km² des basses terres côtières de la baie d'Hudson au Manitoba, et a nécessité la numérisation de 1 714 digues de castors à l'aide de données satellitaires à haute résolution (~ 0,5 m). Étant donné qu'il ne serait pas pratique de numériser toutes les digues de castors, actuelles et anciennes, sur l'ensemble de la région d'évaluation du CdF, nous modifions cette méthode de cartographie des étangs de castors.

Notre nouvelle méthode utilisera un modèle d'apprentissage machine pour distinguer les étangs de castors en fonction de leurs propriétés spatiales et temporelles uniques qui peuvent être mesurées à l'aide des données de satellites optiques et de satellites radar à synthèse d'ouverture (RSO), des produits satellitaires sur la végétation et la couverture terrestre, ainsi que de modèles numériques d'élévation (figure 2). Le modèle est élaboré à l'aide de plus de 15 000 observations d'étangs de castors et d'autres étangs provenant de quatre régions d'entraînement couvrant la gamme des conditions présentes dans la région d'évaluation. Il sera ensuite utilisé pour classer les 238 000 plans d'eau à long terme dans la région d'évaluation d'une superficie d'au moins 0,5 ha et situés à moins de 200 m d'un cours d'eau. Les prédictions seront validées à l'aide de régions échantillonnées au hasard qui n'ont pas été utilisées pour élaborer le modèle.

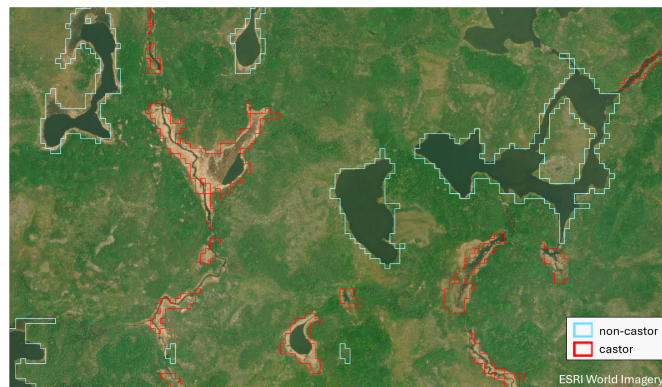


Figure 2. Exemples de prédictions d'étangs construits par les castors (contours rouges) et d'étangs non artificiels (contours bleus) à partir d'un modèle de forêt aléatoire d'apprentissage machine (87.56° O, 53.24° N). Sur cette image satellite, les étangs de castors sont principalement à l'état vide comparativement aux étangs de la figure 1, ce dont on peut déduire qu'ils ne sont pas actuellement occupés par des colonies de castors.

Définition de l'indicateur et premiers résultats

Le premier indicateur qui peut être dérivé à l'aide de cette approche cartographique caractérise la variation spatiale des étangs de castors sur une grande superficie. Les résultats d'une version préliminaire de notre modèle qui prévoit 49 000 étangs de castors à long terme sont présentés de manière agrégée dans des hexagones de 20 km sur la figure 3. Cet indicateur représente la densité des plans d'eau de plus de 0,5 ha qui ont été inondés au moins une fois depuis 1985 par les travaux de castors et indique le potentiel des différentes régions de la région d'évaluation aux populations de castors. La densité des étangs de castors devrait également être liée aux multiples avantages des milieux humides créés par les castors qui ont été décrits précédemment.

Un deuxième indicateur permettra de suivre la variabilité annuelle de ces étangs de castors sur une période de 37 ans (de 1985 à 2021) afin de révéler les changements régionaux dans les aménagements des castors. La superficie annuelle des eaux de surface en été sera calculée pour chaque étang selon une technique conçue pour mesurer les plans d'eau plus petits à partir de données satellitaires Landsat d'une résolution de 30 m [4]. On peut aussi exprimer la superficie annuelle de chaque étang en pourcentage de sa superficie maximale à long terme (de 1985 à 2021), puis appliquer un seuil (p. ex. 30 %) pour prédire la présence d'une colonie qui entretient une digue de castors. Par exemple, les étangs de castors

pleins sur la figure 1 suggère que des colonies sont présentes comparativement aux étangs vides sur la figure 2. La superficie totale des zones contenant des étangs et le nombre d'étangs probablement colonisés seront agrégés pour chaque année de la même manière que sur la figure 3 et présentés sous forme d'animations et de tendances à long terme.

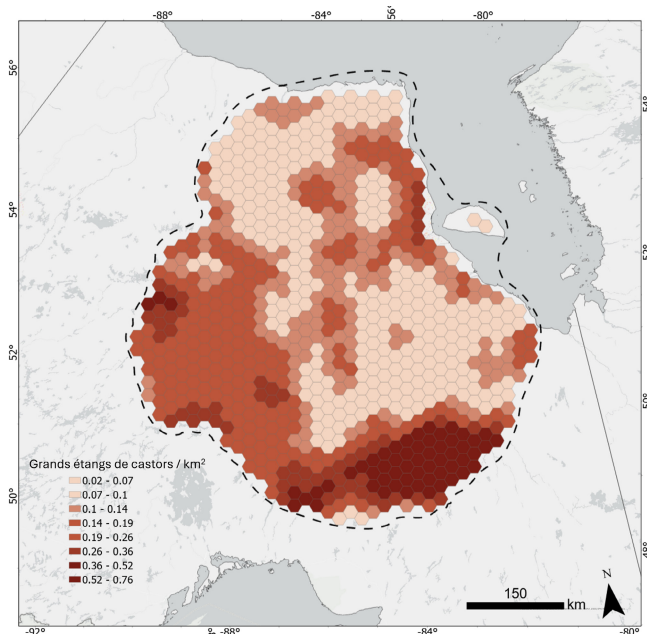


Figure 3. Prédiction préliminaire de la densité des étangs de castors dans la région d'évaluation du Cercle de feu de 312 000 km² en Ontario. Elles mesurent la présence d'étangs de castors qui ont été inondés à un moment donné entre 1985 et 2021.

Conclusions et prochaines étapes

Grâce à leurs activités d'ingénierie, les castors créent des étangs et des milieux humides qui fournissent de multiples services écosystémiques et offrent de la résilience aux changements climatiques dans la région d'évaluation du CdF. Notre méthode satellitaire de cartographie annuelle des eaux de

surface des étangs de castors produira de nouveaux renseignements sur la variabilité spatiale et temporelle de l'activité des castors dans cette région. L'élaboration, l'application et la validation du modèle devraient être terminées en 2026.

Cette recherche est menée en collaboration avec Ian Olthof et Darren Pouliot d'Environnement et Changement climatique Canada, ainsi qu'avec Glen Brown du ministère des Richesses naturelles de l'Ontario. Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec : Robert.Fraser@NRCan-RNC.gc.ca

Références

- [1] Rosell, F., et R. Campbell-Palmer. 2022. Beavers: Ecology, Behaviour, Conservation and Management; Oxford University Press: Oxford, Royaume-Uni
- [2] Abraham, K.F., L.M. McKinnon, Z. Jumeau, S.M. Tully, L.R. Walton et H.M. Stewart (auteurs coordonnateurs principaux et des compilateurs). 2011. Hudson Plains Ecozone+ Status and Trends Assessment. Canadian Biodiversity: Ecosystem Status and Trends 2010, Technical Ecozone+ Report. Conseil canadien des ministres des Ressources, Ottawa (Ontario). xxi + 445 p.
- [3] Fraser, R. H., I. Olthof et D. Berezanski. 2024. Large multi-decade beaver ponding changes in the subarctic Hudson Bay Lowlands, Canada observed using satellite remote sensing Environ. Res. Lett. 19(4):044061.
- [4] Olthof, I., et R.H. Fraser. 2024 Mapping Surface Water Dynamics (1985-2021) in the Hudson Bay Lowlands, Canada using sub-pixel Landsat Analysis Remote Sens. Environ. 113895.

Indicateur 8. Couverture terrestre

Pertinence pour les priorités d'évaluation du Cercle de feu

La région du Cercle de feu (CdF) dans le nord de l'Ontario, au Canada, est l'un des paysages du pays les plus importants sur les plans écologique et géologique. Située dans les basses terres de la baie d'Hudson (BTBH), où l'on trouve de vastes tourbières, des forêts boréales et des systèmes d'eau douce, cette région éloignée et largement sous-développée fait maintenant face à une pression croissante par les promoteurs de projets de développement de mines et d'infrastructures [1]. Dans ce contexte, la cartographie et la classification de la couverture terrestre jouent un rôle essentiel pour alimenter les évaluations d'impact, qui sont fondamentales pour évaluer les effets possibles des futurs projets sur les écosystèmes, les ressources en eau et les communautés locales. Des renseignements exacts et à jour sur la couverture terrestre constituent le fondement spatial nécessaire pour évaluer les perturbations potentielles, quantifier la perte d'habitat, surveiller les effets cumulatifs et orienter la prise de décisions vers des voies de développement plus durables et responsables [2].

Les forêts boréales et les vastes zones humides de tourbières jouent des rôles écologiques distincts, mais interreliés dans ce paysage. La forêt boréale, qui fait partie de l'un des plus grands systèmes forestiers intacts au monde, est essentielle pour maintenir la biodiversité, soutenir les espèces en péril comme le caribou des bois et assurer le stockage à long terme du carbone. Les terres humides de la région sont tout aussi importantes, en particulier les vastes tourbières des BTBH, qui constituent d'importants puits de carbone et jouent un rôle crucial dans la régulation hydrologique et la biodiversité. Il est primordial de cartographier et de classer ces écosystèmes avec une grande précision spatiale et thématique pour détecter les changements, comprendre les effets cumulatifs et guider les décisions sur l'utilisation durable des terres. Ces efforts appuient des stratégies de conservation efficaces et garantissent que le développement industriel ne compromet pas la santé et les fonctions à long terme de ces systèmes

écologiques sensibles.

Traditionnellement, les cartes de la couverture terrestre étaient créées au moyen de relevés sur le terrain, les experts consignait manuellement les types de végétation et les caractéristiques d'utilisation des terres. Bien qu'elle offre une grande précision locale, cette méthode exige beaucoup de ressources et est peu pratique pour les régions vastes ou éloignées comme le CdF. Avec les progrès de la télédétection par satellite, la classification de la couverture terrestre a passé à l'analyse de l'imagerie d'observation de la Terre, qui permet de déterminer les caractéristiques de la surface sur de grandes étendues. Ces données peuvent maintenant être traitées à l'aide d'algorithmes d'apprentissage machine et sont accessibles sur des plateformes infonuagiques, ce qui permet une cartographie efficace, évolutive et reproductible.

Les progrès récents réalisés dans les technologies de télédétection, l'apprentissage machine et l'informatique en nuage offrent des possibilités transformatrices pour la cartographie de la couverture terrestre dans une région aussi éloignée et écosensible. Ces innovations facilitent non seulement les évaluations de référence, mais aussi la surveillance environnementale à long terme, qui est essentielle pour comprendre les effets cumulatifs du développement industriel dans des régions comme le CdF. Surtout, l'intégration des données sur la couverture terrestre dans le processus décisionnel environnemental peut également habiliter les communautés autochtones, qui jouent des rôles d'intendance dans une grande partie de la région. Combinées aux systèmes de connaissances autochtones, les données géospatiales deviennent un outil puissant pour appuyer la gouvernance des terres, protéger les valeurs culturelles et orienter le développement d'une manière qui reflète les priorités communautaires.

Méthodologie

Les données de Sentinel-2, riches en information spectrale, ont été utilisées comme principale source de données satellitaires pour cartographier la

couverture terrestre dans le cadre de cette étude, car leur résolution spatiale est suffisante par rapport à la taille des catégories existantes de couvertures terrestres dans la région. Avec 13 bandes spectrales à des résolutions de 10 m, 20 m et 60 m, Sentinel-2 permet une discrimination précise des principaux types de couvertures terrestres, comme les forêts boréales, les terres humides, les tourbières et les eaux de surface. La disponibilité de bandes à infrarouge proche et à ondes courtes, visible, améliore la détection des caractéristiques de la végétation, des conditions d'humidité et des perturbations du sol, qui sont essentielles pour cartographier et surveiller les écosystèmes complexes dans cette région éloignée et écosensible. Son cycle de réobservation de cinq jours assure une couverture temporelle constante, particulièrement précieuse compte tenu de la couverture nuageuse fréquente et de la courte saison libre de neige dans le nord de l'Ontario. De plus, les données de Sentinel-2 sont accessibles librement sur des plateformes comme le Copernicus Data Space Ecosystem et Google Earth Engine, ce qui en fait une solution abordable et évolutive pour la surveillance environnementale continue, les évaluations d'impact et le soutien à l'intendance dirigée par les Autochtones dans la région d'évaluation du CdF.

Pour cette étude, nous avons utilisé des bandes de Sentinel-2 à une résolution spatiale de 10 m et 20 m, de mai à septembre, les bandes de 20 m étant rééchantillonnées à une résolution de 10 m pour créer des composites médians. De plus, nous avons sélectionné des images avec une couverture nuageuse inférieure à 5 % pour assurer la qualité et la fiabilité des données.

Un modèle avancé d'apprentissage profond a été élaboré au Centre canadien de télédétection (CCT) [3] pour produire les cartes de la couverture terrestre à grande échelle (provinciale). La méthode utilise un cadre de classification en deux étapes qui intègre à la fois les techniques d'apprentissage machine et d'apprentissage profond, en traitant efficacement les limites des données de formation qui restreignent souvent les modèles conventionnels d'apprentissage profond pour cartographier la couverture terrestre à grande échelle.

Définition de l'indicateur et premiers résultats

Le premier indicateur qui peut être dérivé à l'aide de l'approche proposée est la caractérisation des catégories de couvertures terrestres et de leur répartition spatiale dans la zone d'étude. Dans des régions comme le CdF, caractérisées par de vastes paysages boréaux, une couverture importante des terres humides et un intérêt croissant pour le développement, les indicateurs de la couverture terrestre jouent un rôle essentiel dans le suivi des changements environnementaux, l'orientation des évaluations des effets cumulatifs et l'orientation de la planification de l'utilisation des terres. La figure 1 illustre la carte de la couverture terrestre de la région du CdF, qui couvre une superficie d'environ 319 000 km², produite selon l'approche proposée à partir des images de Sentinel-2. Cette carte de la couverture terrestre comprend 10 catégories de couvertures terrestres, selon le Système nord-américain de surveillance des changements dans la couverture terrestre (North American Land Change Monitoring System, NALCMS) de niveau 1 [4], compatible avec les efforts antérieurs de cartographie à grande échelle de la couverture terrestre déployés par le CCT.

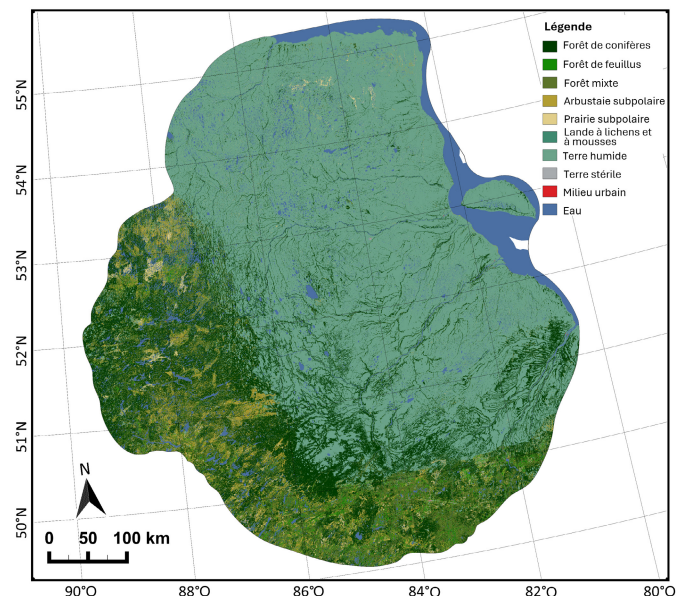


Figure 1. La carte de la couverture terrestre dans la région d'évaluation du CdF en Ontario à une résolution spatiale de 10 m, obtenue à partir des données multispectrales de Sentinel-2.

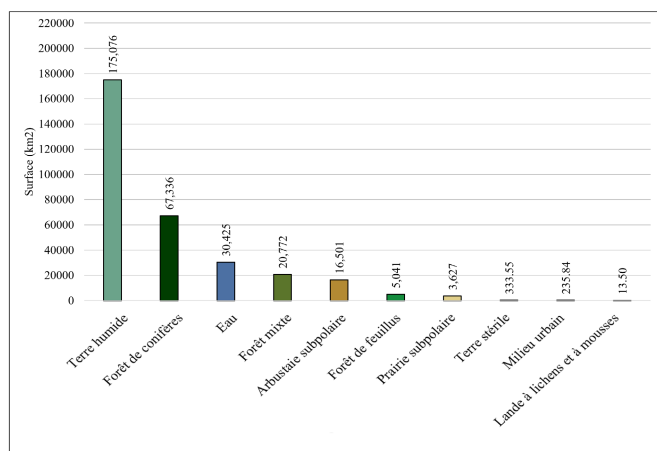


Figure 2. Répartition de 10 catégories de couvertures terrestres dans la région d'évaluation du Cercle de feu.

Il convient de noter que les deux catégories « neige/glace » et « terres cultivées » ont été retirées dans cette sous-région de l'Ontario, puisqu'il n'y a pas de catégorie permanente de glace et de neige dans la région, ni d'activité agricole. Comme il a été démontré, les deux catégories « forêts » (en particulier la forêt de conifères) et « terres humides » sont les catégories dominantes de couvertures terrestres dans la zone d'étude. La figure 2 illustre la répartition des catégories de couvertures terrestres dans la zone d'étude.

Comme on le voit sur la figure 2, les terres humides constituent la plus grande proportion, occupant environ 175 075 km², suivies de la forêt de conifères (67 336 km²) et des plans d'eau (30 425 km²). Les forêts mixtes (20 772 km²), les zones arbustives subarctiques (16 501 km²), les forêts de feuillus (5 040 km²) et les prairies subpolaires (3 627 km²) sont plus petites, mais importantes sur le plan écologique. Les trois catégories « terre stérile » (333,55 km²), « milieu urbain » (235,84 km²) et « landes à lichens et à mousses » (13,50 km²) sont les moins dominantes dans la zone d'étude. Les figures 3 et 4 montrent les masques de deux catégories dominantes de couvertures terrestres dans la zone d'étude.

Comme on le voit sur les figures 3 et 4, la prédominance des terres humides et des forêts souligne l'importance écologique de cette région et son rôle dans le soutien de la biodiversité, des fonctions hydrologiques et du stockage du carbone.

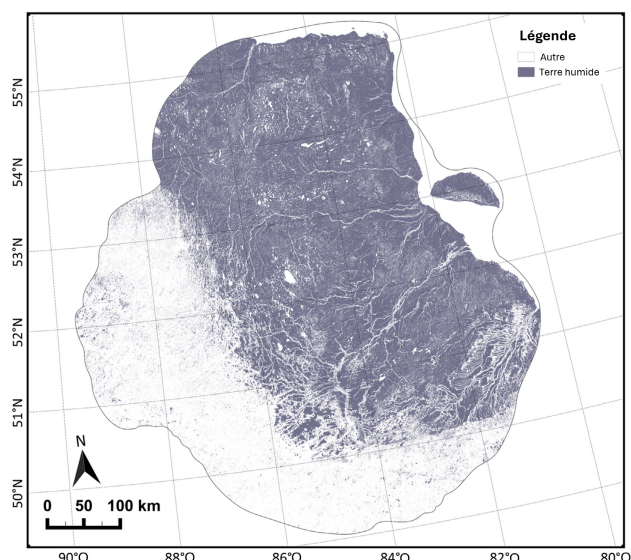


Figure 3. Masque des terres humides montrant l'étendue des terres humides par rapport aux zones non humides dans la région d'évaluation du CdF.

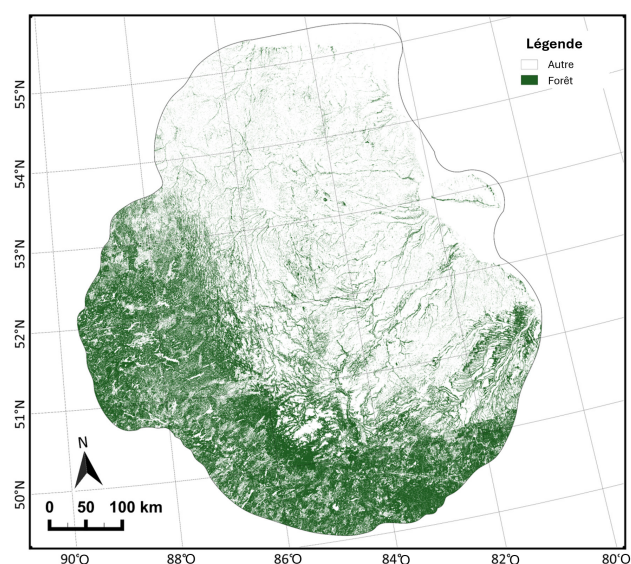


Figure 4. Masque des forêts montrant l'étendue des forêts par rapport aux zones non boisées dans la région d'évaluation du CdF.

Conclusions et prochaines étapes

Nos résultats illustrent la répartition des types de couvertures terrestres présents dans la zone d'étude, les terres humides et les forêts constituant les principales catégories de couvertures terrestres. La carte de la couverture terrestre de 2023 élaborée dans le cadre de cette étude fournit un point de référence précieux pour détecter les changements futurs et surveiller la dynamique du paysage à mesure que les activités de développement se déroulent dans la

région. L'analyse du paysage actuel révèle que les terres humides et les zones boisées sont les principaux types de couvertures terrestres, ce qui souligne la sensibilité écologique de cette région et son importance pour le stockage du carbone.

Une prochaine étape consistera à effectuer une analyse annuelle des changements de la couverture terrestre à l'aide des données de série chronologique satellitaire afin d'évaluer les changements spatiaux et temporels dans les profils de la couverture terrestre. L'analyse de série chronologique utilisera la carte de la couverture terrestre produite par cette étude comme point de référence pour suivre les changements annuels et les tendances dans la région. À cette fin, il faudra utiliser des observations satellitaires multitemporelles et des algorithmes de détection des changements pour déterminer les profils de perturbation ou de conversion. L'analyse de la détection des changements est particulièrement importante dans le contexte des projets d'infrastructure, d'exploitation minière et d'aménagement routier prévus dans la région du CdF. La couverture terrestre devrait être considérée comme un indicateur environnemental complémentaire dans les évaluations continues des effets cumulatifs, les études d'impact sur l'environnement (EIE) et les cadres de planification régionaux. Ces connaissances alimenteront les

processus de réglementation, appuieront l'intendance environnementale dirigée par les Autochtones et contribueront à l'élaboration de politiques fondées sur des données probantes pour la gestion durable des ressources dans le Nord de l'Ontario. Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec : fariba.mohammadimanesh@nrcan-rncan.gc.ca.

Références

- [1] C. Burton et C. Chetkiewicz, "Terrestrial ecological monitoring: A review and recommendations for northern Ontario's Ring of Fire," *Unpubl. Rep. WCS Can. Alta. Innov. Futur. Httpsdoi Org10*, vol. 13140, 2015.
- [2] E. F. Lambin et H. J. Geist, *Land-use and land-cover change: local processes and global impacts*. Springer Science & Business Media, 2008..
- [3] F. Mohammadimanesh, "Large Scale Land Cover Mapping in Ontario, Canada, Using a Deep Learning Framework," *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, 2025.
- [4] M. Pasos, "NALCMS — The North American Land Change Monitoring System," Commission for Environmental Cooperation.

Indicateur 9. Couverture et densité de la végétation

Pertinence pour les priorités d'évaluation du Cercle de feu

Le Cercle de feu (CdF) englobe « une vaste étendue de forêt boréale intacte et de complexes de tourbières qui, bien qu'elle soit habitée depuis des milliers d'années, reste en grande partie exempte d'activités de développement industriel à grande échelle » [1]. La végétation est essentielle à la santé de l'environnement dans le CdF: elle fournit des habitats, influence la stabilité du pergélisol, lutte contre les inondations et soutient l'un des plus grands puits de carbone au monde. Comme dans une grande partie du nord du Canada, les perturbations naturelles comme les feux de forêt et les changements climatiques peuvent entraîner des répercussions sur la végétation dans le CdF. L'exploration minière et l'exploitation minière modifieront également la couverture végétale grâce à de nouvelles routes, mines et infrastructures [2]. Il est donc important d'avoir des données sur la couverture végétale actuelle et historique, la densité et la productivité de la végétation pour s'assurer que le développement futur sera durable. Nous décrivons ici une approche fondée sur la cartographie par satellite et l'apprentissage machine qui comble ce besoin en données et peut compléter les relevés spécifiques aux sites et le savoir traditionnel.

Méthodologie

L'inventaire forestier et les relevés aériens sont une source principale de données pour la surveillance de la végétation dans les forêts aménagées et les régions habitées [3,4]. Toutefois, de telles données ne sont pas disponibles pour le CdF en raison de l'absence de forêts aménagées et du grand pourcentage (54 %) de terres humides végétalisées. Les cartes satellitaires de la couverture terrestre peuvent repérer les terres végétalisées, mais ne fournissent pas d'information sur l'état et les tendances du couvert végétal et de la densité ou de la productivité de la végétation.

Ici, les indicateurs de la quantité et de l'état de la végétation sont dérivés de variables physiques qui décrivent la structure et la productivité de la végétation (tableau 1). Ils sont cartographiés à une résolution de 20 à 30 m en utilisant des séries chronologiques pluriannuelles d'images satellitaires. Ces variables sont applicables à toutes les catégories de couvertures terrestres végétales et ont été reconnues comme « essentielles » par les groupes d'experts de l'ONU sur le climat, la biodiversité et l'agriculture [5,6,7]. FCOVER généralise le concept de couvert vertical au sol aux couvertures terrestres autre que les forêts et cartographie la variation de la végétation à l'intérieur des catégories de couvertures végétales. L'ISF fournit une mesure de la densité de la végétation indépendante de la couverture terrestre qui comprend à la fois la végétation dominante et celle du sous-étage. FAPAR fournit une limite supérieure de la productivité de la végétation largement utilisée pour modéliser l'absorption annuelle du carbone.

On utilise l'outil Landscape Evolution and Forecasting Toolbox (LEAF) pour produire des cartes mensuelles pour tout le CdF et des séries chronologiques saisonnières en appliquant des algorithmes d'apprentissage machine fondés sur la physique afin de relier la lumière réfléchie à partir de la surface dans plusieurs longueurs d'onde à chaque variable [8]. LEAF utilise des algorithmes d'apprentissage machine pour cartographier FCOVER, l'ISF et FAPAR à partir de l'imagerie satellitaire Landsat à une résolution de 30 m sans nuage et Sentinel-2 à une résolution de 20 m. Ces algorithmes offrent une précision comparable (supérieure à 10 % pour FCOVER et FAPAR et à 20 % pour L'ISF) aux mesures sur le terrain en Amérique du Nord, y compris les sites bordant le Cercle de feu [9,10], et une stabilité temporelle suffisante pour détecter des changements aussi faibles que 2,5 % par année [11].

Tableau 1. Variables de la végétation cartographiées.

Variable	Définition	Pertinence
FCOVER	Fraction de la couverture végétale	Quelle proportion du territoire est couverte de végétation?
ISF	Indice de surface foliaire	Quelle est la densité de la végétation?
FAPAR	Fraction de la lumière absorbée pour la photosynthèse	Quelle est la productivité potentielle de la végétation?

Définition de l'indicateur et premiers résultats

Les indicateurs régionaux et propres au site de la quantité et de l'état de la végétation sont fondés sur la valeur annuelle maximale de FCOVER et de l'ISF et, pour FAPAR, sur la valeur intégrée en juin, juillet et août. LEAF est utilisé pour cartographier FCOVER, l'ISF et FAPAR pour toutes les mesures satellitaires sans nuage, en commençant par l'imagerie Landsat à 30 m depuis 2013, complétée par l'imagerie Sentinel-2 à 20 m depuis 2016 sur le site. Ces données peuvent fournir jusqu'à un échantillonnage quotidien, mais seule la valeur moyenne maximale du site est utilisée comme indicateur de la quantité pour réduire la sensibilité au nombre d'observations par ciel clair chaque année. Les valeurs annuelles maximales de FCOVER et de l'ISF (p. ex. figure 1) sont utilisées comme indicateurs quantitatifs, tandis que l'indicateur FAPAR est utilisé comme indicateur de condition.

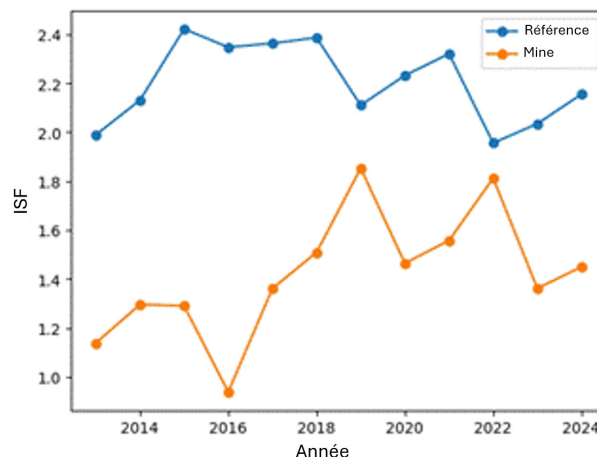


Figure 1. Valeur annuelle maximale de l'ISF à moins de 100 m des infrastructures du projet Eagles-Nest (mine) lancé en 2012 par rapport aux conditions de référence dans une zone tampon externe de 100 m. L'augmentation de l'ISF sur la mine reflète la régénération des couloirs d'exploration.

Les indicateurs régionaux pour tout le CdF sont calculés au moyen des séries chronologiques mensuelles plutôt que quotidiennes de chaque variable afin de réduire l'impact des nuages sur l'échantillonnage temporel. Les valeurs maximales de FCOVER et de l'ISF sont estimées pour chaque pixel (figure 2). FAPAR n'est pas présenté, car il est très semblable à FCOVER. L'ISF et FCOVER sont les plus élevés dans les régions côtières et méridionales de la zone d'étude. Des indicateurs de l'état de la végétation par couverture terrestre sont également dérivés pour chaque sous-bassin versant. Ils sont définis comme la valeur maximale annuelle moyenne de l'ISF et la valeur totale moyenne de FCOVER pour une catégorie de couverture terrestre donnée (p. ex. figure 3). L'ISF et FCOVER sont les plus faibles dans les basses terres de la baie d'Hudson (BTBH), où les forêts correspondent à la taïga de faible densité, et les plus élevés dans le sud du CdF, où les forêts correspondent aux résineux productifs.

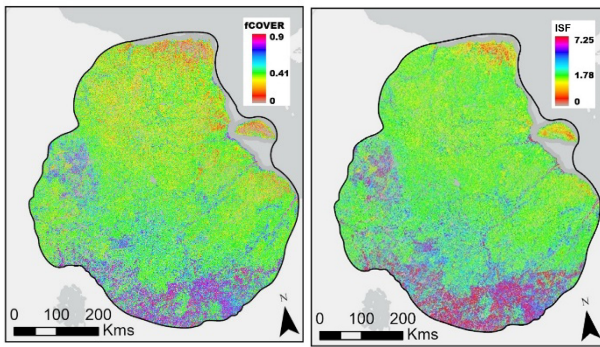


Figure 2. Valeur maximale de FCOVER (à gauche) et de l'ISF (à droite) pour 2023, cartographiées à une résolution de 20 m à partir des images de Copernicus Sentinel-2 à l'aide de la boîte à outils LEAF du Centre canadien de télédétection.

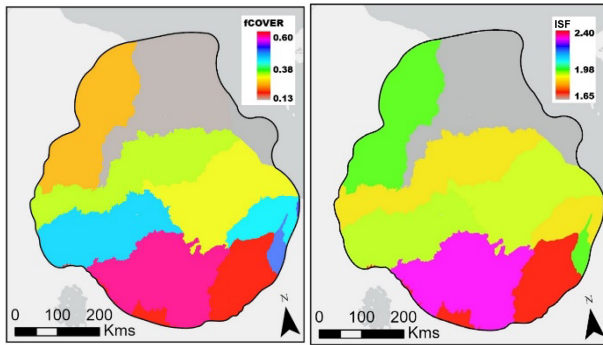


Figure 3. Valeur maximale moyenne de FCOVER pour les conifères (à gauche) et valeur maximale de l'ISF (à droite) pour 2023 sur les pixels de forêt de conifères de 2023 pour les sous-bassins versants dans le CdF. Des indicateurs semblables sont produits pour les autres catégories de couvertures terrestres.

Conclusions et prochaines étapes

La végétation fournit de nombreux services écosystémiques dans le CdF. Les changements du climat et de l'utilisation des terres auront des impacts sur la végétation. Les indicateurs historiques et actuels de la quantité et de l'état de la végétation peuvent être cartographiés de façon fiable à l'aide d'images satellitaires gratuites et publiées avec un minimum de relevés in situ. Les travaux présentés fournissent des indicateurs des profils spatiaux régionaux et des tendances temporelles locales. Les résultats à venir produiront des évaluations régionales des tendances temporelles sur la période de 15 ans recommandée pour les études climatiques. Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec : Richard.Fernandes@NRCan-RNCan.gc.ca

Références

1. AEIC (2025). Mandat de l'évaluation régionale de la région du Cercle de feu. Consulté à l'adresse <https://iaac-aeic.gc.ca/050/evaluations/proj/80468?culture=f-r-CA> le 21 août 2025.
2. Alberta Biodiversity Monitoring Institute. 2014. ABMI Science Letters: Human Footprint in Alberta. Consulté à l'adresse : <https://abmi.ca/publication/364.html> le 21 août 2025.
3. Burton, Cole, et Cheryl-Lesley Chetkiewicz. (2015). Terrestrial Ecological Monitoring: A review and recommendations for Northern Ontario's Ring of Fire. 10.13140/RG.2.1.4468.6568.
4. Alberta Biodiversity Monitoring Institute. 2017. Regional Mapping of Vegetation Structure for Biodiversity Monitoring Using Airborne Lidar Data. Disponible à l'adresse : <https://abmi.ca/publication/466.html>
5. GEOGLAM. (2022). Full EAV table | AgVariables. Consulté à l'adresse : <https://agvariables.org/> le 12 août 2025.
6. OMM (Organisation météorologique mondiale) (2022). The 2022 GCOS Implementation Plan (GCOS-244). Organisation météorologique mondiale. Consulté à l'adresse : <https://library.wmo.int/records/item/58104-the-2022-gcos-implementation-plan-gcos-244> WMO e-Library le 12 août 2025.
7. Navarro, L.M., N. Fernández, C. Guerra, R. Guralnick, W.D. Kissling, M.C. Londoño *et al.* (2017). Monitoring biodiversity change through effective global coordination. *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, 29, 158–169.
8. Fernandes, R., F. Baret, L. Brown, F. Canisius, J. Dash, N. Djamai, G. Hong, S. Kalimpalli, R. Latifovic, M. MacDougall, H. Shah, M. Weiss, K. Harvey et L. Sun. (2021). LEAF Toolbox: A software for environmental and remote sensing data analysis. <https://github.com/rfernand387/LEAF-Toolbox/wiki> (consulté en janvier 2025)
9. Fernandes, R., L. Brown, F. Canisius, J. Dash, L. He, G. Hong, L. Huang, N.Q. Le, C. MacDougall, C. Meier, P.O. Darko, H. Shah, H., L. Spafford et L. Sun. (2023). Validation of

simplified level 2 prototype processor Sentinel-2 fraction of canopy cover, fraction of absorbed photosynthetically active radiation, and leaf area index products over North American forests. Remote Sensing of Environment, 293, Article 113600.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113600>

10. Fernandes, R., N. Djamai, K. Harvey, G. Hong, C. MacDougall, H. Shah et L. Sun (2024). Evidence of a bias-variance trade-off when correcting for bias in Sentinel-2 forest LAI retrievals using radiative transfer models. Remote Sensing of Environment, 305, Article 114060.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114060>

11. Djamai, N., R. Fernandes, L. Sun, G. Hong, L. Brown, H. Morris et J. Dash (2025). On the consistency and stability of vegetation biophysical variables retrievals from Landsat-8/9 and Sentinel-2. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 224, 329–347.

<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2025.04.006>

Indicateur 10. Pergélisol

Pertinence pour les priorités d'évaluation du Cercle de feu

La région du Cercle de feu (CdF) connaît un dégel/gel saisonnier, et certaines zones contiennent du pergélisol qui demeure gelé tout au long de l'année. Le dégel/gel du sol et le pergélisol ont des répercussions importantes sur les routes et les bâtiments, l'écoulement de l'eau et les niveaux d'eau, les types de plantes et leur croissance, la décomposition du sol, et les émissions de gaz à effet de serre, en particulier dans les basses terres de la baie d'Hudson (BTBH) riches en tourbe. Les conditions thermiques du sol varient d'un endroit à l'autre, et elles changent avec le réchauffement climatique. Cependant, notre connaissance du pergélisol est limitée. La figure 1 montre la carte actuelle du pergélisol au Canada autour de la région du CdF. Sur la carte, le territoire est divisé en cinq zones représentant des probabilités différentes ou des pourcentages de superficie différents de pergélisol. Elle ne donne aucune information sur l'emplacement exact, l'état et les changements potentiels liés au réchauffement climatique. Une carte aussi grossière n'est pas utile en pratique pour les communautés locales et les évaluations régionales.

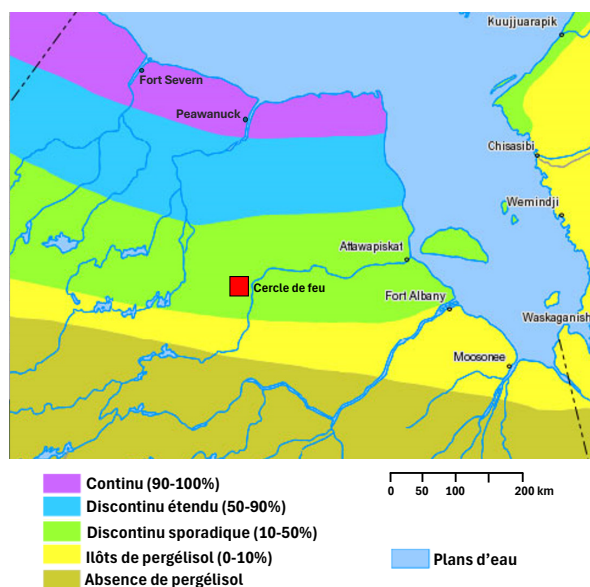


Figure 1. Répartition du pergélisol dans la région d'évaluation du CdF selon la carte actuelle du pergélisol au Canada [1].

Dans cette étude, nous avons mis au point une nouvelle méthode pour modéliser et cartographier, à une résolution de 30 m, la température du sol, le dégel/gel et le pergélisol dans les BTBH et leurs changements potentiels liés au climat de 1950 à 2100.

Méthodologie

La méthode est fondée sur le modèle NEST (Northern Ecosystem Soil Temperature), qui simule la dynamique de la température du sol en fonction de la conduction thermique, y compris les effets de la neige et du dégel/gel de l'eau [2]. La neige est un facteur important qui influence les conditions thermiques du sol à l'échelle du paysage. Le modèle utilise un paramètre (F_{snow}) pour représenter les variations de la redistribution de la neige par le vent. La valeur de F_{snow} pour chaque cellule de la grille est estimée en fonction des dates de la disparition de la neige, qui sont cartographiées à partir des données satellitaires à une résolution de 30 m (voir les indicateurs 1 et 2). Nous avons également tenu compte des flux de chaleur latéraux entre les cellules de la grille, notamment ceux associés aux plans d'eau [3]. Les profondeurs de dégel et de gel du sol et le pergélisol sont déterminés en fonction des conditions modélisées de la température du sol. Pour cartographier efficacement la température du sol à une résolution de 30 m, nous avons utilisé le modèle pour diverses valeurs possibles de F_{snow} et diverses conditions de végétation et du sol à un petit nombre de sites, puis nous avons interpolé les résultats du modèle à des cellules de grille de 30 m en fonction de leur emplacement et des conditions locales. Les données climatiques sont tirées de l'ensemble de données ERA5-Land. Les types de couvertures terrestres et l'épaisseur de la tourbe proviennent respectivement de Ian Olthof et Emily Ogden, d'Environnement et Changement climatique Canada (communications personnelles). L'indice de la surface foliaire a été calculé selon Fernandes *et al.* [4] (indicateur 9).

Premiers résultats

La figure 2 illustre la température moyenne annuelle du sol cartographiée à une profondeur de 0,5 m, calculée pour la dernière décennie (de 2015 à 2024). La température moyenne du sol augmente du nord au sud, principalement en raison du gradient de la température de l'air. La figure fait également apparaître d'importantes variations à l'échelle locale dues aux répercussions de la neige, de la végétation et des conditions du sol. La figure 3 montre une carte indiquant la moyenne de la profondeur maximale de dégel du sol en été, établie pour la dernière décennie dans les zones de pergélisol. La couleur blanche correspond aux zones sans pergélisol. Le pergélisol permanent est surtout limité aux régions situées au nord. La plupart des régions d'évaluation du CdF ont un pergélisol discontinu ou pas de pergélisol. La profondeur du dégel estival augmente généralement du nord au sud, mais avec d'importantes variations à l'échelle locale. La figure 4 représente la moyenne de la profondeur maximale du gel en hiver sur la dernière décennie. Les zones où la profondeur de gèle du sol est importante contiennent habituellement du pergélisol. La profondeur du gel en hiver devient plus faible du nord au sud, encore une fois avec de fortes variations locales.

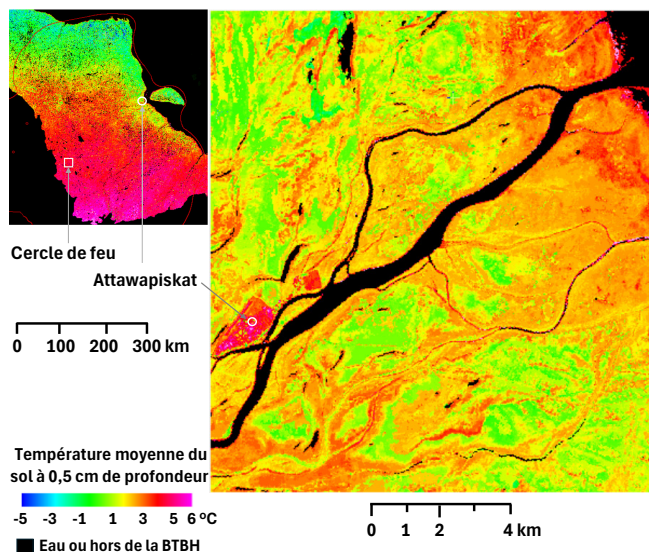


Figure 2. Température moyenne annuelle du sol cartographiée à 0,5 m de profondeur pour la dernière décennie (de 2015 à 2024). Le panneau de gauche montre une grande partie de la zone de l'étude d'impact du CdF dans les BTBH (sa limite est illustrée par la courbe rouge), et le panneau de droite représente une petite zone autour d'Attawapiskat, indiquée par un cercle blanc.

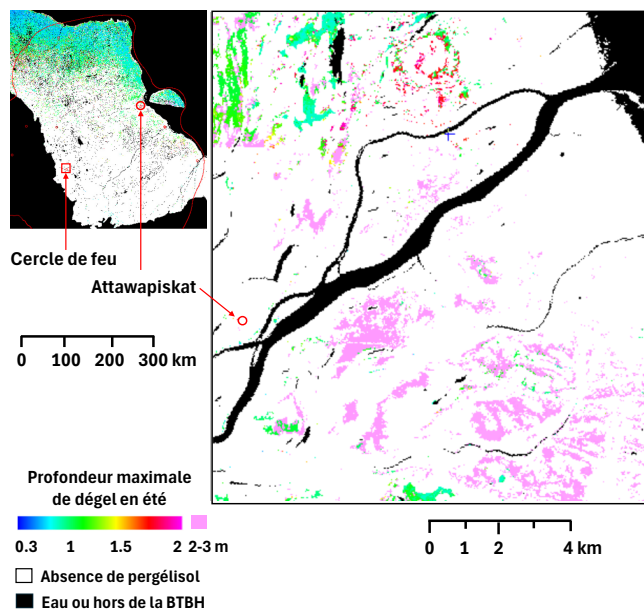


Figure 3. Profondeur maximale de profondeur de dégel du sol en été dans les zones de pergélisol au cours des dix dernières années (de 2015 à 2024). Le panneau de gauche montre une grande partie de la zone de l'étude d'impact du CdF dans les BTBH, et le panneau de droite est un petit secteur autour d'Attawapiskat.

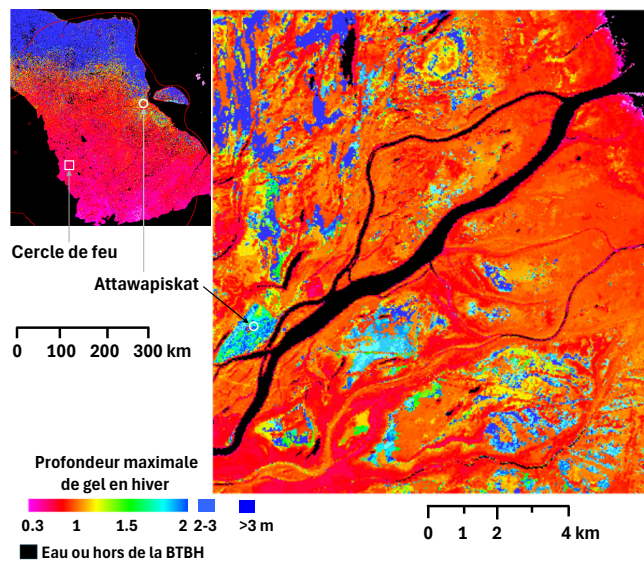


Figure 4. Profondeur moyenne maximale de gel en hiver cartographiée, établie pour les dix dernières années (de 2015 à 2024). Le panneau de gauche montre une grande partie de la zone de l'étude d'impact du CdF dans les BTBH, et le panneau de droite est un petit secteur autour d'Attawapiskat. Les zones où le sol gèle sur une grande profondeur contiennent habituellement du pergélisol.

Conclusions et prochaines étapes

La température du sol, le dégel/gel et le pergélisol ont des répercussions majeures sur l'environnement et

les collectivités dans les régions froides. Les cartes précédentes du pergélisol sont trop grossières pour que les collectivités locales puissent les utiliser en pratique. Nous avons mis au point une nouvelle méthode pour modéliser et cartographier les conditions thermiques du sol et le pergélisol à une résolution de 30 m. Les résultats révèlent à la fois des variations à grande échelle avec les gradients climatiques et de grandes différences à petite échelle. Ces renseignements spatialement détaillés sont importants pour la planification de l'utilisation des terres, le développement des infrastructures et les stratégies d'adaptation aux changements climatiques.

Les prochaines étapes consistent à analyser et valider les résultats en fonction des observations, ainsi qu'à exécuter le modèle dans le cadre de scénarios futurs de changements climatiques. Nous étendrons également les produits de manière à couvrir l'ensemble de la région d'évaluation du Cercle de feu. Les résultats seront publiés plus tard, et les données seront diffusées sur la Plateforme de science et de données ouvertes.

Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec : yu.zhang@NRCan-RNCan.gc.ca.

Remerciements

Cette étude est financée par l'Agence Parcs Canada dans le cadre de l'Initiative de conservation de la biodiversité et de séquestration du carbone des BTBH et de la baie James. Ces travaux sont également appuyés par les collaborateurs suivants : Glen Brown, du ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, a communiqué des observations sur le climat, la température du sol et les données sur le pergélisol à plusieurs sites dans la région des BTBH. Wendy Sladen et ses collègues, de la Commission géologique du Canada, ont mesuré et compilé des données sur la température du sol à plusieurs sites dans le parc national Wapusk. Jesse Shirton et Leeann Fishback, du parc national Wapusk, ont fourni de nombreuses données recueillies sur le

terrain dans leur parc. Alison Cassidy, Karen Richardson et Alice Yue, de l'Agence Parcs Canada, ont recueilli des données sur la température du sol près de la surface à 41 sites. Rich Russell, Russ Weeber, David Hope et Kevin Hannah, du Service canadien de la faune, ont également recueilli des données sur la température près de la surface du sol à 32 sites. Nous sommes reconnaissants de leurs efforts pour déployer et récupérer les minuscules capteurs de température sur le terrain. Kara Webster et son équipe du Service canadien des forêts nous ont apporté un soutien précieux et des suggestions. Nous remercions également Emily Ogden, Ian Olthof et Taylor Biccum, d'Environnement et Changement climatique Canada, qui nous ont fourni une carte de la couverture terrestre, une carte de l'épaisseur de la tourbe et une carte de la fraction d'eau en sous-pixels dans les BTBH. Xiping Wang a traité les données climatiques des stations et évalué les ensembles de données climatiques maillées. Gang Hong a produit une carte de l'indice de surface foliaire.

Références

- [1] Atlas du Canada, 6^e édition (version archivée) (2009). Pergélisol. Ressources naturelles Canada, Ottawa, Canada.
- [2] Zhang, Y., W. Chen et J. Cihlar *et al.* (2003). A process-based model for quantifying the impact of climate change on permafrost thermal regimes. *Journal of Geophysical Research*, 108, D22, 4695. doi: 10.1029/2002JD003354
- [3] Zhang, Y., G. Hong et M. T. Bonney. (2024). Impacts of lateral conductive heat flow on ground temperature and implications for permafrost modeling. *Scientific Reports*. 14, 31595. doi: 10.1038/s41598-024-78901-6
- [4] Fernandes, R., L. Brown, F. Canisius *et al.* (2023). Validation of simplified level 2 prototype processor Sentinel-2 fraction of canopy cover, fraction of absorbed photosynthetically active radiation and leaf area index products over North American forests. *Remote Sensing of Environment*, 293, 113600. doi: 10.1016/j.rse.2023.113600

Indicateur 11. Déformation du terrain

Pertinence pour les priorités d'évaluation du Cercle de feu

La déformation du terrain résulte de nombreux processus différents, certains naturels et d'autres anthropiques. La déformation du sol peut être verticale ascendante ou descendante, horizontale ou les deux, et il peut s'agir d'un simple déplacement dans une seule direction ou d'un remodelage hétérogène local du terrain. La déformation régionale à grande échelle est due à des processus géologiques et sismiques; la déformation locale à petite échelle est le résultat de processus écologiques et géomorphologiques, ainsi qu'à l'activité humaine. La surveillance des quantités et des profils de la déformation du sol peut nous aider à cartographier la stabilité du terrain, à déterminer les zones qui subissent des changements, ainsi qu'à comprendre les processus en jeu et les causes du changement.

Les basses terres de la baie d'Hudson (BTBH) sont des terrains relativement plats reposant sur le pergélisol. La région subit une déformation saisonnière du sol en raison du cycle gel-dégel de l'eau contenue dans les couches supérieures du sol (la couche active). L'ampleur de la déformation saisonnière est principalement liée aux conditions de drainage. Sur des périodes comptées en années, la déformation se produira également en raison de processus géomorphologiques à long terme, notamment le mouvement des pentes dû à la gravité, la croissance et l'effondrement des formes de relief à noyau de glace, le développement du thermokarst avec le dégel du pergélisol, l'expansion des lacs thermokarstiques, le drainage des lacs en raison de l'évolution du débit des eaux souterraines et la migration de rives lacustres sous l'effet des régimes éoliens et des processus riverains. L'activité humaine peut également causer une déformation du terrain, comme l'affaissement du sol dû à l'extraction minière souterraine ou à l'extraction de ressources, le soulèvement du sol dû à l'injection d'air ou de fluides dans le sol pour en extraire des ressources, ou la construction qui modifie les réseaux de drainage, la couverture végétale et les conditions thermiques du sol.

L'information sur la déformation du terrain pourrait être utile pour plusieurs sujets inclus dans les priorités de l'évaluation régionale du Cercle de feu

(<https://iaac-aeic.gc.ca/050/documents/p80468/158865F.pdf>).

Dans le cadre des relations avec un environnement sain, on peut mieux comprendre « les tourbières et les autres environnements uniques » à l'aide de leurs comportements de déformation, et d'une compréhension des processus géomorphologiques locaux. Cette compréhension, ajoutée à l'identification des zones vulnérables, appuie « l'adaptation aux changements climatiques ». La déformation du terrain est également liée aux réseaux de drainage locaux et peut donc être une composante de la compréhension de « l'eau et des réseaux hydrographiques, y compris de l'écoulement de l'eau ».

Méthodologie

L'interférométrie radar par satellite (InSAR) est une méthode qui mesure le déplacement de la surface de la Terre depuis l'espace avec une précision millimétrique. Cette méthode utilise des acquisitions radar effectuées dans une configuration identique sur une même zone et de très faibles différences dans les cycles de phase des ondes radar pour mesurer les différences de position de la surface du sol. Ces différences de phase pixel par pixel peuvent être converties en cartes de grandes zones du déplacement du sol [1]. La méthode a été utilisée pour toutes les échelles de surveillance de la déformation du terrain, y compris les études sur le pergélisol [2,3,4].

Le déplacement du sol est mesuré dans la direction de la ligne de visée radar (Line of Sight, LOS), c'est-à-dire le mouvement vers le satellite radar ou en direction opposée. En terrain très plat, cette mesure peut être convertie de façon fiable en déplacement vertical, ce qui est plus intuitif à comprendre pour les utilisateurs, mais elle n'est généralement pas utilisée là où des pentes compliqueraient les profils du déplacement et donneraient des résultats confus. Sur de vastes zones, qui peuvent être un mélange de zones plates et pentues, la déformation du terrain est

habituellement présentée sous forme de déplacement de la ligne de visée radar.

Le niveau de détail des cartes de la déformation dépend de la nature des données radar et du traitement. Des niveaux élevés de détails sont possibles avec les données radar à haute résolution et le traitement des données par des experts, bien que cela soit coûteux et donc réservé aux petites régions qui subissent des changements complexes. La surveillance à l'échelle régionale et nationale utilise de grands volumes de données à résolution modérée qui sont gratuites et traitées dans des systèmes automatisés [5].

Définition de l'indicateur et premiers résultats

La figure 1 illustre les tendances de la déformation du relief en été dans la région d'évaluation régionale du Cercle de feu (CdF), mesurées à l'aide des données radar à moyenne résolution du satellite Sentinel-1. La résolution spatiale est d'environ 20 m et la période d'observation correspond aux saisons de dégel estival entre 2017 et 2024. Le rouge vif et le bleu vif indiquent les zones présentant de fortes tendances saisonnières de la déformation. Il s'agit de zones dynamiques avec des pentes ou une teneur élevée en glace et en eau. Ces zones pourraient être vulnérables si les débits d'eau étaient détournés, contaminés ou réduits en raison du réchauffement climatique ou de changements anthropiques. Les couleurs crème/jaune sont des zones relativement stables, composées de roches ou de graviers et sables bien drainés. Ces zones ont tendance à être moins sensibles et plus résilientes au changement.

La figure 2 illustre un exemple de données à très haute résolution sur la déformation du terrain dans le parc provincial Polar Bear, dans l'angle nord-est de la région d'évaluation, créées à l'aide des données de RADARSAT-2 à une résolution spatiale de 1 m au cours de l'été 2023. Les images satellitaires optiques correspondantes montrent que certaines tendances de la déformation peuvent être associées à différents types de reliefs et de couvertures terrestres.

Conclusions et prochaines étapes

Les premiers résultats montrent qu'il est possible d'utiliser l'interférométrie radar pour cartographier

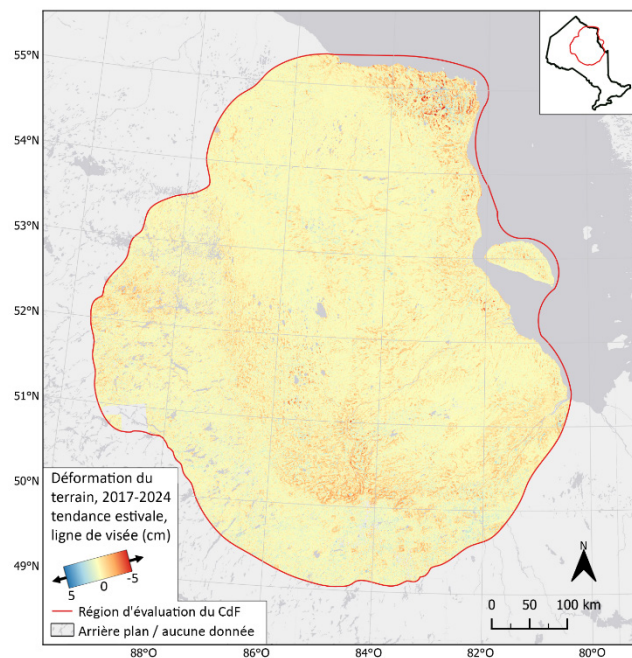


Figure 1. Tendance de la déformation du terrain en été de 2017 à 2024 pour la région d'évaluation du CdF, dérivée de l'interférométrie radar du satellite Sentinel-1.

la déformation du terrain dans la région d'évaluation du CdF. Nous pouvons ainsi déterminer les zones qui sont naturellement dynamiques et vulnérables au changement, par rapport à celles qui sont stables et relativement inertes. Les taux et les profils de changement nous aident à comprendre les processus en cours à un emplacement, ainsi que les répercussions potentielles du changement, ce qui peut faciliter les décisions sur l'endroit où autoriser le développement, les types d'activités qui peuvent être permises sur un site et l'élaboration de mesures d'atténuation et de conservation, comme le contrôle du drainage, la stabilisation des infrastructures ou la gestion thermique du sol. Une fois qu'un site a été aménagé, la cartographie et la surveillance de la déformation du terrain peuvent déterminer avec précision les zones qui subissent des changements et quantifier les impacts des activités de développement. Si des mesures d'atténuation ont été mises en œuvre, les renseignements sur la déformation du terrain peuvent servir à en surveiller l'efficacité. Pour résumer, les renseignements sur la déformation du terrain peuvent être utiles pour détecter les changements et la gestion et la conservation du paysage.

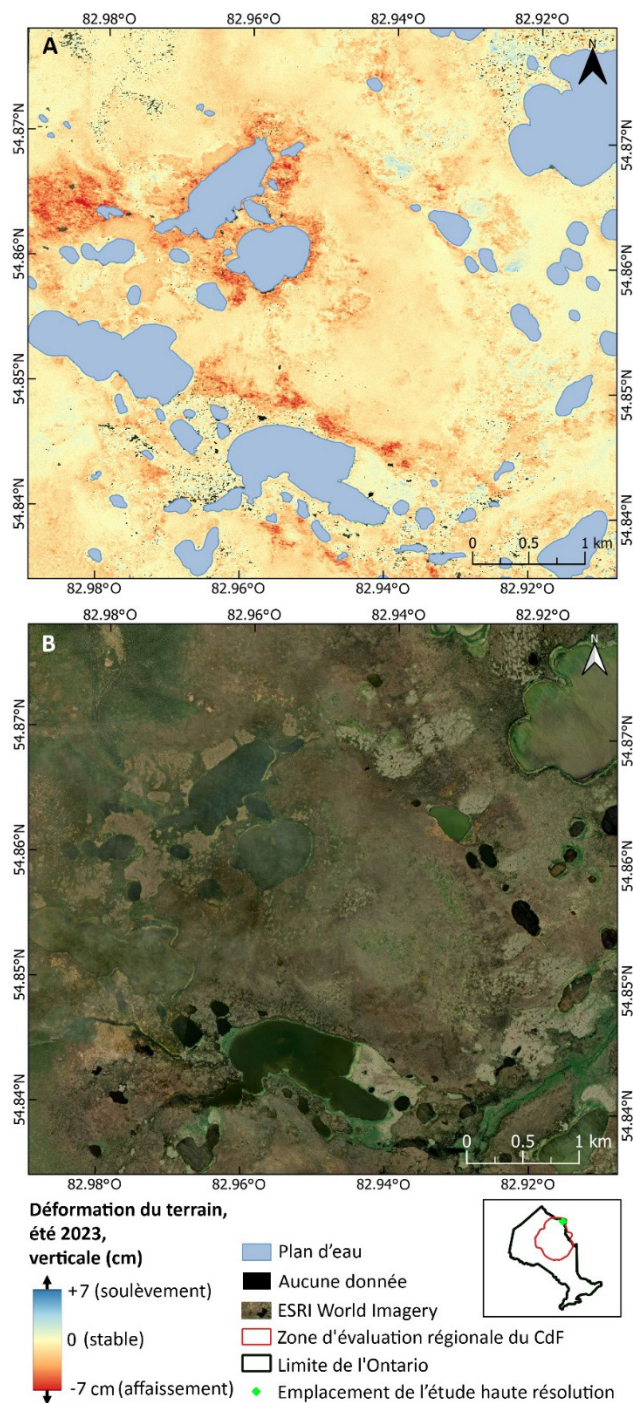


Figure 2. A) Déformation du terrain mesurée au cours de l'été 2023 à une résolution de 1 m dans le parc provincial Polar Bear à l'aide des données de RADARSAT-2 en mode spotlight. B) Image correspondante obtenu par satellite optique.

Durant l'année à venir, nous continuerons d'élaborer et d'optimiser des méthodes pour le traitement par interférométrie radar par satellite dans les BTBH et le nord de l'Ontario, en produisant des cartes que les communautés et les décideurs pourront

utiliser. Les résultats de ces travaux seront inclus dans un deuxième rapport. Dans la mesure du possible, les produits cartographiques définitifs seront rendus publics sur la Plateforme de science et de données ouvertes.

Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec : naomi.short@nrcan-rncan.gc.ca

Références

- [1] Gabriel, A., Goldstein, R., et Zebker, H. (1989). Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*, 94(B7): 9183-9191.
- [2] Short, N., Brisco, B., Couture, N., Pollard, W., Murnaghan, K., et Budkewitsch, P. (2011). A Comparison of TerraSAR-X, RADARSAT-2 and ALOS-PALSAR Interferometry for Monitoring Permafrost Environments, Case Study from Herschel Island, Canada, *Remote Sensing of Environment*, 115: 3491–3506. doi:10.1016/j.rse.2011.08012
- [3] Short, N., A.-M. LeBlanc, W. Sladen, G. Oldenborger, V. Mathon-Dufour et B. Brisco. (2014). RADARSAT-2 D-InSAR for ground displacement in permafrost terrain, validation from Iqaluit Airport, Baffin Island, Canada. *Remote Sensing of Environment*. 141: 40-51, doi: 10.1016/j.rse.2013.10.016
- [4] Zwieback, S., L. Liu, L. Rouyet, N. Short et T. Strozzi (2024). Advances in InSAR analysis of permafrost terrain. *Permafrost and Periglacial Processes*, 35(4), 544-556. doi.org/10.1002/ppp.2248
- [5] Samsonov, S., et W Feng. (2023). Deformation Retrievals for North America and Eurasia from Sentinel-1 DInSAR: Big Data Approach, Processing Methodology and Challenges. *Canadian Journal of Remote Sensing* doi:10.1080/07038992.2023.2247095.

Remerciements

Tout d’abord, nous reconnaissons que notre zone d’étude, la région du Cercle de feu, est située dans une vaste région du nord de l’Ontario qui fait partie des territoires traditionnels de plusieurs Nations des Anishinaabe et des Cris, notamment des Premières Nations Aroland, Attawapiskat, de Constance Lake, Eabametoong, de Fort Albany, Ginoogaming, Kashechewan, de Long Lake (réserve n° 58), de Marten Falls, des Cris de Missinabie, des Cris de Moose, Neskantaga, Nibinamik, Webequie et Weenusk.

L’étude fait partie du programme Observation de la Terre pour les effets cumulatifs, qui est financé par l’initiative d’évaluation environnementale annoncée dans le budget fédéral de 2018 et renouvelée en 2022. L’Agence Parcs Canada a également financé des parties de cette étude dans le cadre de l’Initiative de conservation de la biodiversité et de séquestration du carbone des basses terres de la baie d’Hudson et de la baie James.

Les membres de l’équipe de gestion du Centre canadien de cartographie et d’observation de la Terre ont joué un rôle essentiel dans la préparation de ce rapport, notamment en déterminant le besoin, en préparant le plan, en organisant le contenu et en fournissant des commentaires d’ordre rédactionnel. Sylvia Thomas et Peter White ont examiné le rapport à l’interne et formulé de nombreux commentaires constructifs. Alice Deschamps et Sylvain Leblanc ont coordonné la traduction française de ce rapport et veillé à la cohérence scientifique entre les deux versions. De plus, une dernière relecture du texte français a été effectuée par Raphaël Gendron.

De nombreux partenaires des autres ministères fédéraux, des gouvernements provinciaux et des communautés autochtones ont contribué à la rédaction du présent rapport. Par exemple, des membres de communautés autochtones (p. ex. David Hunter, Matthew Gull, Mike (Moose) Koostachin, Xavier Hunter, Abraham Hunter, Clinton Patrick et Linda Friday, de la Première Nation Crie de Peawanuck; Jack Moonias, de la Première Nation de Marten Falls) et d’organisations autochtones (p. ex. Four Rivers Environmental Services Group-Conseil de Matawa, Conseil Mushkegowuk) ont guidé nos relevés de terrain pour les lichens en 2021 et 2022 dans la région du Cercle de feu et y ont participé. Sumac Geomatics, l’Université McMaster et le Fonds mondial pour la nature du Canada ont également participé à nos relevés de terrain du lichen en 2021 et 2022. Glen Brown, du ministère des Richesses naturelles de l’Ontario, a fourni les données sur le climat, la température du sol et le pergélisol pour plusieurs sites des basses terres de la baie d’Hudson. Son équipe a également effectué deux étés d’observations sur le terrain des formes de relief dans le parc provincial Polar Bear pour faciliter l’interprétation des cartes de la déformation du terrain. Ses mesures sur le terrain, ses photographies et ses connaissances de la composition du paysage ont été inestimables. Wendy Sladen et ses collègues de la Commission géologique du Canada ont communiqué des données sur la température du sol pour plusieurs sites du parc national Wapusk. Jesse Shirton et Leeann Fishback, du parc national Wapusk, ont également fourni des données sur la température du sol recueillies dans leur parc. Alison Cassidy, Karen Richardson et Alice Yue, de l’Agence Parcs Canada, ont recueilli des données sur la température du sol près de la surface à 41 sites. Rich Russell, Russ Weeber, David Hope et Kevin Hannah, du Service canadien de la faune, ont également recueilli des données sur la température près de la surface du sol à 32 sites. Nous sommes reconnaissants de leurs efforts pour déployer et récupérer les capteurs de température sur le terrain. Adam Collingwood, de l’Agence Parcs Canada, a contribué à la détermination des routes d’hiver et des principales rivières dans le cadre de l’analyse de la dynamique de la couverture de neige. Kara Webster et son équipe du Service canadien des forêts nous ont apporté un soutien précieux et des suggestions. Nous remercions également Emily Ogden, Ian Olthof et Taylor Biccum, de la Section de géomatique d’Environnement et Changement climatique Canada, qui nous ont fourni une carte de la couverture terrestre, une carte de l’épaisseur de la tourbe et une carte de la fraction d’eau en sous-pixels dans les basses terres de la baie d’Hudson. Le Service des terres et des ressources du Conseil Mushkegowuk nous a donné l’occasion de partager notre travail avec les membres des communautés autochtones et d’apprendre auprès d’eux. Adam Kirkwood et Pascale Roy-Léveillé (Université Laval) ont fourni une discussion éclairée

et utile sur les signaux de déformation du terrain sur les formes de relief du pergélisol. Outre l'aide au travail sur le terrain et le partage des données, le Four Rivers Environmental Services Group-Conseil de Matawa a coproduit avec nous une StoryMap d'ArcGIS intitulée « Trouver du lichen pour le caribou » en trois langues (anglais, français et cri) <https://storymaps.arcgis.com/stories/2bb940b2d3bd4d94b5dea08169c12bf3>.