



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

**COMMISSION GÉOLOGIQUE DU CANADA
DOSSIER PUBLIC 9299f**

**Observations sur le terrain du climat, du sol et des conditions
écologiques au cours des cinq premières années suivant un
incendie de forêt, sud des Territoires du Nord-Ouest**

**J.E. Holloway, Y. Wang, A.G. Lewkowicz, S.A. Wolfe,
M.R. Turetsky et J.L. Baltzer**

2025

**COMMISSION GÉOLOGIQUE DU CANADA
DOSSIER PUBLIC 9299f**

**Observations sur le terrain du climat, du sol et des conditions
écologiques au cours des cinq premières années suivant un
incendie de forêt, sud des Territoires du Nord-Ouest**

**J.E. Holloway¹, Y. Wang², A.G. Lewkowicz¹, S.A. Wolfe², M.R. Turetsky³ et
J.L. Baltzer⁴**

¹Département de géographie, environnement et géomatique, Université d'Ottawa, 60 Université,
Ottawa (Ontario) K1N 6N5

²Ressources naturelles Canada, Commission géologique du Canada, 601, rue Booth, Ottawa (Ontario) K1A0E8

³Renewable and Sustainable Energy Institute, Department of Ecology and Evolutionary Biology, University of
Colorado Boulder, Boulder, CO, 80309-0552, USA

⁴Biology Department, Wilfrid Laurier University, 75 University Avenue West, Waterloo (Ontario) N2L 3C5

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@nrcan-rncan.gc.ca.

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

Notation bibliographique conseillée

Holloway, J.E., Wang, Y., Lewkowicz, A.G., Wolfe, S.A., Turetsky, M.R. et Baltzer, J.L., 2025. Observations sur le terrain du climat, du sol et des conditions écologiques au cours des cinq premières années suivant un incendie de forêt, sud des Territoires du Nord-Ouest; Commission géologique du Canada, Dossier public 9299f, 1 fichier .zip.
<https://doi.org/10.4095/pktk0u9hp4>

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

ISSN 2816-7163
ISBN 978-0-660-79984-1
N° de catalogue M183-2/9299F-PDF
<https://doi.org/10.4095/pktk0u9hp4>

Introduction

Le présent dossier public contient des mesures et des données recueillies sur le terrain pour caractériser le climat, le pergélisol et les conditions écologiques de 19 sites d'étude situés dans le sud des Territoires du Nord-Ouest, au nord-est du Grand lac des Esclaves. Sur les 19 sites d'étude, 16 ont été perturbés par des feux de forêt en 2014 ou 2015 (incendiés – B), tandis que trois sites sont demeurés intacts ou non incendiés (non incendiés – UB). Un résumé des données et des mesures est présenté dans le document principal, tandis que les températures moyennes quotidiennes de l'air, de la surface du sol et du sol sont fournies sous forme de fichiers .csv. Le présent dossier public appuie les recherches en cours de la Commission géologique du Canada sur la dynamique du pergélisol après un incendie dans le sud des Territoires du Nord-Ouest et accompagne le dossier public 9298, intitulé « Levés de tomographie par résistivité électrique pour la caractérisation des conditions du pergélisol à la suite d'un incendie de forêt, sud des Territoires du Nord-Ouest, 2015-2018 ». Des renseignements supplémentaires sont disponibles dans Holloway (2020).

Ce dossier public comprend un fichier .zip contenant les fichiers suivants :

- 1) B1.csv – Températures moyennes quotidiennes de la surface du sol et du sol au site B1
- 2) B2.csv – Températures moyennes quotidiennes de l'air, de la surface du sol et du sol au site B2
- 3) B3.csv – Températures moyennes quotidiennes de l'air, de la surface du sol et du sol au site B3
- 4) B4.csv – Températures moyennes quotidiennes de la surface du sol au site B4
- 5) B5.csv – Températures moyennes quotidiennes de la surface du sol et du sol au site B5
- 6) B6.csv – Températures moyennes quotidiennes de l'air, de la surface du sol et du sol au site B6
- 7) B7.csv – Températures moyennes quotidiennes de la surface du sol et du sol au site B7
- 8) B8.csv – Températures moyennes quotidiennes de l'air, de la surface du sol et du sol au site B8
- 9) B9.csv – Températures moyennes quotidiennes de la surface du sol et du sol au site B9
- 10) B10.csv – Températures moyennes quotidiennes de la surface du sol et du sol au site B10
- 11) B11.csv – Températures moyennes quotidiennes de la surface du sol au site B11
- 12) B12.csv – Températures moyennes quotidiennes de l'air, de la surface du sol et du sol au site B12
- 13) B13.csv – Températures moyennes quotidiennes de la surface du sol et du sol au site B13
- 14) B14.csv – Températures moyennes quotidiennes de la surface du sol et du sol au site B14
- 15) B15.csv – Températures moyennes quotidiennes de la surface du sol et du sol au site B15
- 16) B16.csv – Températures moyennes quotidiennes de la surface du sol et du sol au site B16
- 17) UB1.csv – Températures moyennes quotidiennes de la surface du sol et du sol au site UB1
- 18) UB2.csv – Températures moyennes quotidiennes de la surface du sol et du sol au site UB2
- 19) UB3.csv – Températures moyennes quotidiennes de l'air, de la surface du sol et du sol au site UB3

Zone et sites d'étude

La description suivante de la zone et des sites d'étude est également fournie dans le dossier public 9298, intitulé « Levés de tomographie par résistivité électrique pour la caractérisation des conditions du pergélisol à la suite d'un incendie de forêt, sud des Territoires du Nord-Ouest, 2015-2018 ».

Les sites de surveillance ont été sélectionnés en appliquant un plan d'échantillonnage aléatoire stratifié dans sept zones touchées par des feux de forêt en 2014 ou 2015 le long des routes 1 et 3, principalement entre Kakisa et Behchoko (figure 1). Les strates représentaient un éventail de types de végétation, de gravité d'incendie et d'historiques d'incendie. La sélection finale des sites a été effectuée sur le terrain en fonction de la présence du sommet du gélisol et d'autres conditions caractéristiques du pergélisol. Les sites ont été établis en 2015 (n=16), 2016 (n=2) et 2017 (n=1) et ont fait l'objet de réexamens annuels de 2015 à 2019 à quelques exceptions près en raison de contraintes logistiques (tableau 1). Les sites d'étude sont disposés le long d'un transect orienté du sud-ouest au nord-est, perpendiculaire aux isothermes de la température moyenne annuelle de l'air, à la limite entre les zones de pergélisol discontinu sporadique et étendu (Heginbottom *et al.*, 1995), et à la frontière entre les écozones de la Taïga des plaines et de la Taïga du Bouclier.

Le climat régional est de type subarctique et continental, avec une température moyenne annuelle de l'air (TMAA) de -4,0 °C à Yellowknife (62,5° N) et de -2,2 °C à Hay River (60,1° N) (selon les normales climatiques de 1991 à 2020) (Environment and Climate Change Canada, 2025). Les précipitations moyennes annuelles totales s'élèvent à 294 mm à Yellowknife et à 320 mm à Hay River, avec des fractions nivométriques respectives de 0,39 et 0,34 (normales climatiques de 1991 à 2020) (Environnement et Changement climatique Canada, 2025).

Quinze sites se situent dans l'écozone de la Taïga des plaines, tandis que quatre sites près de Yellowknife se situent dans celle de la Taïga du Bouclier. La Taïga des plaines se caractérise par une plaine sur un substrat de roches sédimentaires légèrement vallonnée et recouverte de till et de dépôts glaciolacustres. La végétation est principalement composée d'épinettes noires (*Picea mariana*) dans les basses terres et de forêts mixtes dans les hautes terres, avec des sous-étages généralement constitués de mousses, de lichens, de carex et de thé du Labrador (*Rhododendron groenlandicum*). La Taïga du Bouclier présente un relief vallonné sur un substrat de roches ignées et métamorphiques affleurantes comprenant des zones basses de milieux humides reposant sur du till et des dépôts glaciolacustres. Le pin gris (*Pinus banksiana*), l'épinette noire et le bouleau à papier (*Betula papyrifera*) poussent dans les sols minces des hautes terres, alors que l'épinette noire domine dans les basses terres. Les milieux humides couvrent environ 40 % de la superficie, l'épaisseur de tourbe variant entre 2 et 6 m (Gibson *et al.*, 2018).

La portion sud du transect se trouve dans la zone de pergélisol discontinu sporadique, où l'épaisseur du pergélisol est inférieure à 30 m et la température moyenne annuelle du sol est supérieure à -1 °C (Smith *et al.*, 2008; 2015). La portion nord du transect se situe dans la zone de pergélisol discontinu étendu, où l'épaisseur du pergélisol est inférieure à 50 m et la température moyenne annuelle du sol est supérieure à -2 °C (Wolfe *et al.*, 2015; Morse *et al.*, 2016).

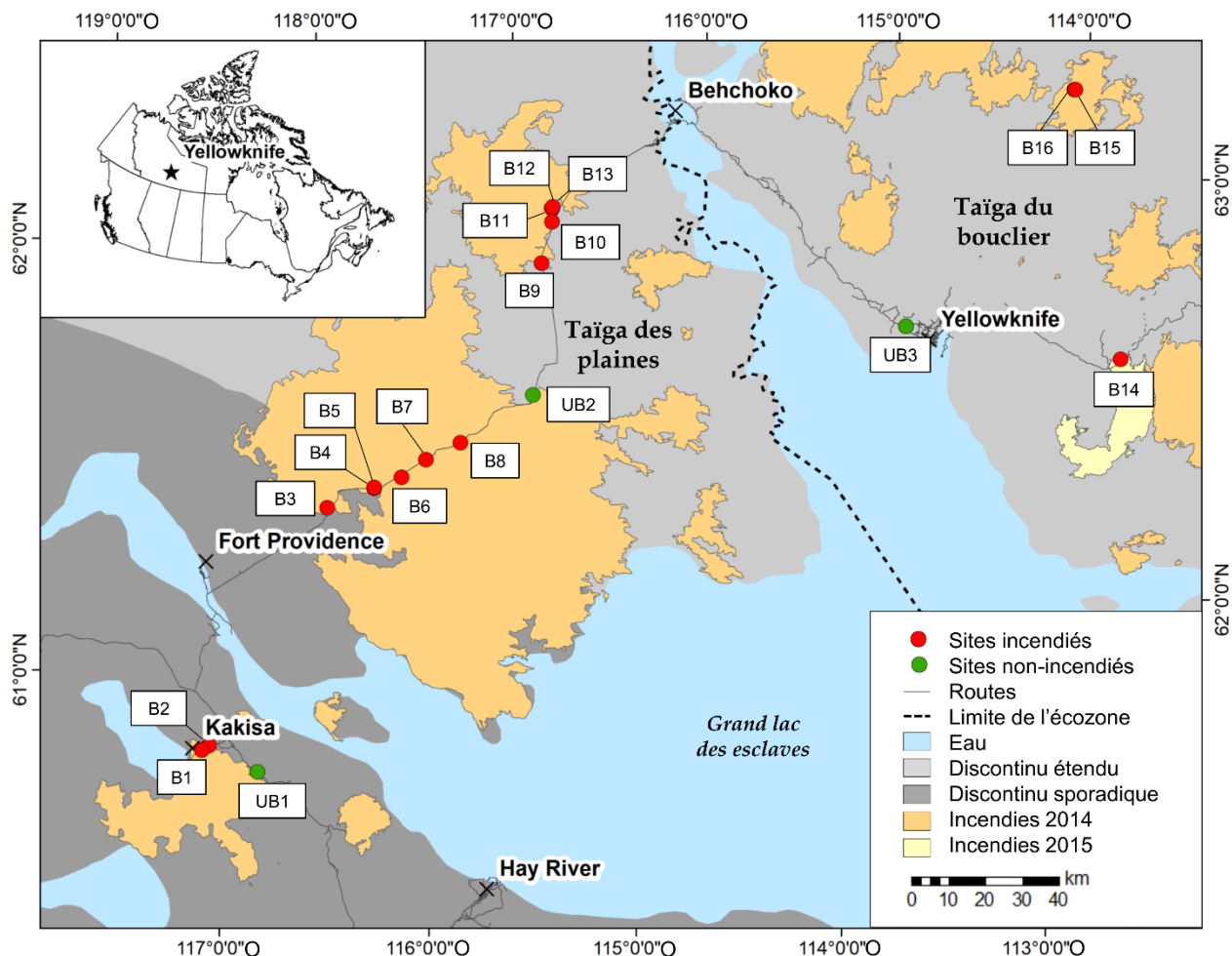


Figure 1. Carte de la zone d'étude dans le sud des Territoires du Nord-Ouest, au Canada, présentant les sites incendiés ($n=16$) et non incendiés ($n=3$), les routes principales, les limites d'incendies de 2014 et 2015 (Northwest Territories Centre for Geomatics, 2015), les écozones (Government of Northwest Territories, 2008) et les zones de répartition du pergélisol (Heginbottom *et al.*, 1995). La carte dans l'encadré situe Yellowknife à l'intérieur du Canada.

Tableau 1. Noms, coordonnées, descriptions, écozones, dates de visite et épaisseur estimée du pergélisol des sites d'étude.

Nom du site	Latitude, Longitude (°)	Description (p. ex. humidité du sol, forme de relief, végétation, topographie locale)	Écozone	Dates de visite (AAAA-MM-JJ)	Épaisseur du pergélisol (m)
B1 (SS33-9a)	60,941 -117,366	Mésique-subhygrique. Plateau palsique, présence élevée de thermokarst. Aucune pente.	Taïga des plaines sud	2015-06-16 2015-08-16 2016-05-17 2016-09-01 2017-08-29 2018-09-03	15-20
B2 (SS33-6c)	60,958 -117,339	Subhygrique. Forêt d'épinettes, présence élevée de buttes. Aucune pente.	Taïga des plaines sud	2015-06-04 2015-08-14 2016-09-06	Aucun
B3 (ZF20-34b)	61,608 -117,154	Mésique-subxérique. Gradient allant du pin à l'épinette à la tourbière. Aucune pente.	Taïga des plaines centrale	2015-06-02 2015-08-15	Aucun
B4 (ZF20-6b-1)	61,689 -116,952	Mésique-subxérique. Secteur gravement incendié, tous les arbres tombés. Aucune pente.	Taïga des plaines centrale	2015-06-08 2015-08-15 2016-05-13 2016-09-07 2017-09-01 2018-09-07	10 (parcelle)
B5 (ZF20-6b-LK)	61,692 -116,953	Mésique-subhygrique. Forêt d'épinettes humide près d'un étang; une extrémité présente un plateau palsique épais, l'autre est très marécageuse.	Taïga des plaines centrale	2015-06-11 2015-08-18 2016-05-13 2016-09-05 2017-09-02 2018-09-06	15
B6 (ZF20-12b)	61,736 -116,834	Mésique. Gradient allant du pin à l'épinette à la tourbière. Aucune pente.	Taïga des plaines centrale	2015-06-14 2015-08-13 2016-05-15 2016-09-03 2017-08-31 2018-09-08	5 (petite parcelle)
B7 (ZF20-9c)	61,796 -116,740	Mésique-subhygrique. Forêt d'épinettes avec de nombreuses buttes et une petite section non incendiée. Aucune pente.	Taïga des plaines centrale	2015-06-10 2015-08-19 2016-05-14 2016-09-04 2017-09-01 2018-09-05	5-10
B8 (ZF20-4a)	61,863 -116,597	Mésique-subxérique. Gradient de la sévérité du brûlage, allant de non incendié à gravement incendié. Aucune pente.	Taïga des plaines centrale	2015-06-02 2015-08-17 2016-05-14 2016-09-02 2017-08-30 2018-09-09	10-20
B9 (ZF46-18b)	62,345 -116,482	Mésique-subhygrique. Pinède avec une petite zone d'épinettes noires. Aucune pente.	Taïga des plaines nord	2015-06-09 2015-08-12 2016-05-11 2016-09-14 2017-09-05 2018-09-12	>5
B10 (ZF46-35c)	62,450 -116,496	Mésique. Pinède et parcelle de petites épinettes noires. Aucune pente.	Taïga des plaines nord	2015-06-09 2015-08-20 2016-05-16 2016-09-13 2017-09-05 2018-09-12	>5
B11 (ZF46-1b-1)	62,480 -116,518	Mésique-subhygrique. Petite vallée de pins sur les hauteurs et d'épinettes dans le fond (humide/marécageux). Pente de 30°, fond de vallée (60 m) plat. Sol sablonneux.	Taïga des plaines nord	2015-06-06 2015-08-20 2016-05-15 2017-09-06 2018-09-11	5 (petite parcelle)
B12 (ZF46-1b-2)	62,481 -116,520	Mésique-subhygrique. Petite vallée de pins sur les hauteurs et d'épinettes dans le fond (humide/marécageux).	Taïga des plaines nord	2015-06-06 2015-08-20 2016-05-20 2016-09-15	5-10

Pente de 30°, fond de vallée (60 m) plat. Sol sablonneux.				2017-09-06 2018-09-11	
B13 (ZF46-1c)	62,485 -116,518	Mésique. Pessière. Sol sablonneux. Aucune pente.	Taïga des plaines nord	2015-06-10 2015-08-19 2016-06-03 2016-09-15 2017-09-05 2018-09-10	5-10
B14 (TIB-1)	62,522 -113,382	Tourbière incendiée avec coins de glace.	Taïga du bouclier	2016-06-16 2016-09-12 2017-09-07 2018-09-14	>24
B15 (LL-PEAT)	63,133 -114,004	Tourbière dans une vallée près de lithalses.	Taïga du bouclier	2015-06-18 2015-08-30 2016-09-10 2018-08-25	>24
B16 (LL-LITH2)	63.132, -114.006	Lithalse avec un couvert d'épinettes et de bouleaux.	Taïga du bouclier	2015-06-18 2015-08-30 2016-09-11 2018-08-25	>24
UB1 (KAK-UB)	60,935 -117,072	Mésique-subhygrique. Forêt non incendiée. Aucune pente.	Taïga des plaines sud	2017-08-23 2018-09-04	5
UB2 (HWY3- UB-1A)	62,029 -116,314	Mésique-subhygrique. Forêt non incendiée. Aucune pente.	Taïga des plaines centrale	2016-05-18 2016-09-09 2017-09-03 2018-09-10	>24
UB3 (UB-1)	62,458 -114,532	Tourbière non incendié.	Taïga du bouclier	2015-06-07 2015-08-11 2016-05-31 2016-09-16 2017-09-07 2018-09-13	>24

Aperçu des données

Les données comprennent des mesures directes et dérivées prises sur le terrain pour caractériser le climat, le sol et les conditions écologiques aux 19 sites d'étude (tableau 2).

Les conditions météorologiques et de température du sol sont résumées d'après les températures sous-quotidiennes de l'air, de la surface du sol et du sol enregistrées aux sites d'étude. Les températures moyennes quotidiennes de l'air, de la surface du sol et du sol sont présentées dans les fichiers .csv pour l'ensemble des sites d'étude. Les conditions du sol sont décrites, pour certains sites, à partir de carottes de sol prélevées par forage. Les conditions de sol relevées comprennent la teneur en glace excédentaire, la teneur en eau gravimétrique, la masse volumique apparente, la granulométrie et la teneur en matière organique. Les conditions écologiques associées à la sévérité du brûlage et à l'épaisseur de la couche résiduelle de sol organique ont été consignées pour les 16 sites incendiés.

Tableau 2. Résumé des mesures directes et dérivées recueillies sur le terrain à 16 sites d'étude incendiés et trois sites non incendiés dans le sud des Territoires du Nord-Ouest de 2015 à 2019.

Variable	Méthode ou instrument de mesure; Méthode de calcul ou de dérivation	Fréquence des mesures; Paramètres; Référence	Exactitude de la mesure; Précision; Erreur
Mesures climatiques et météorologiques directes			
Température de l'air	HOBO Pro U23-003	Fréquence : 2 heures	Exactitude $\pm 0,21$ °C, Précision $\pm 0,02$ °C
Température de la surface du sol	DS1922L Thermochron iButton	Fréquence : 4 heures	Exactitude $\pm 0,5$ °C, Précision $\pm 0,0625$ °C
Température du sol	HOBO Pro U12-008	Fréquence : 2 heures	Exactitude $\pm 0,25$ °C, Précision $\pm 0,03$ °C
Épaisseur de la neige	DS1921G-F5 Thermochron iButton	Fréquence : 4 heures	Exactitude ± 1 °C, Précision $\pm 0,5$ °C
Mesures climatiques et météorologiques dérivées			
Température moyenne annuelle de l'air (AMAT)	Moyenne des températures quotidiennes de l'air	Année hydrologique : 1 septembre-31 août	-
Température moyenne annuelle de la surface du sol (AMGST)	Moyenne des températures quotidiennes de la surface du sol	Année hydrologique : 1 septembre-31 août	-
Température moyenne annuelle du sol (AMGT) à 1 m	Moyenne des températures quotidiennes du sol à 1 m	Année hydrologique : 1 septembre-31 août	-
Degrés-jours de gel (air) (FDD _a)	Somme des températures quotidiennes de l'air inférieures à 0 °C	Saison de gel : 1 octobre-30 avril	-
Degrés-jours de dégel (air) (TDD _a)	Somme des températures quotidiennes de l'air supérieures à 0 °C	Saison de dégel : 1 mai-30 septembre	-
Degrés-jours de gel (surface du sol) (FDD _s)	Somme des températures quotidiennes de la surface du sol inférieures à 0 °C	Saison de gel : 1 octobre-30 avril	-
Degrés-jours de dégel (surface du sol) (TDD _s)	Somme des températures quotidiennes de la surface du sol supérieures à 0 °C	Saison de dégel : 1 mai-30 septembre	-
Facteur N de gel (n _F)	Ratio de degrés-jours de gel dans l'air et de la surface du sol	Saison de gel : 1 octobre-30 avril	-
Facteur N de dégel (n _T)	Ratio de degrés-jours de dégel dans l'air et de la surface du sol	Saison de dégel : 1 mai-30 septembre	-
Décalage thermique de surface (SO)	AMGST-AMAT	Année hydrologique : 1 septembre-31 août	-
Décalage thermique nival (NO)	AMGST(F)-AMAT(F)	Saison de gel : 1 octobre-30 avril	-
Décalage thermique dans la couche active (TO)	TTOP-AMGST	Année hydrologique : 1 septembre-31 août	-
Épaisseur maximale de la couverture de neige	Interprétée à partir d'un poteau d'iButton	Lewkowicz (2008)	Erreur: 10-20 cm
Jours avec couverture de neige (SDD)	Somme des jours avec couverture de neige	-	-
Caractéristiques du sol			
Teneur en glace excédentaire (EIC)	Proportion volumétrique de la glace présente qui dépasse le volume poreux de l'échantillon dégelé	Kokelj et Burn (2003)	-
Masse volumique apparente (bD)	Masse volumique sèche	-	-
Teneur en eau gravimétrique (GMC)	Quantité d'eau présente par rapport à la masse de l'échantillon sec	van Everdingen (2005)	-
Taille moyenne des grains	Granulomètre à laser Microtrac S3500	-	-
Granulométrie	Granulomètre à laser Microtrac S3500	-	-
Teneur en matière organique	Analyseur thermogravimétrique avec balance intégrée LECO, TGA701; Perte par calcination	Heiri <i>et al.</i> (2001)	-
Caractéristiques environnementales directes			
Hauteur des racines adventives (ARH)	Moyenne de trois mesures	Mesurée le long des transects linéaires	-
Épaisseur de la couche résiduelle de sol organique	Fosses d'observation	-	-
Caractéristiques environnementales dérivées			
Profondeur de brûlage	Calcul à l'aide de la hauteur des racines adventives et de l'épaisseur de la couche résiduelle de sol organique	Walker <i>et al.</i> (2018)	-

Épaisseur de la couche organique avant l'incendie	Somme de l'épaisseur de la couche résiduelle de sol organique et de la profondeur de brûlage	-	-
Proportion de la couche organique perdue	Proportion de la profondeur de brûlage par rapport à l'épaisseur de la couche organique avant l'incendie	-	-

Conditions climatiques/météorologiques

Température de l'air

Les températures de l'air ont été mesurées à six sites (B2, B3, B6, B8, B12 et UBI3) à l'aide d'enregistreurs Hobo Pro U23-003 placés dans des écrans anti-rayonnement installés à une hauteur de 1,5 m. Chaque site représente la température de l'air d'un ensemble de sites voisins situés dans un rayon maximal de 20 km. Les données de température de l'air ont été agrégées à partir de mesures bihoraires pour obtenir les valeurs quotidiennes maximales, minimales et moyennes à l'aide d'un script R personnalisé (Way *et al.*, 2018). Les températures de l'air des sites sans station ont été estimées à partir d'une moyenne pondérée fondée sur la distance linéaire entre les deux stations les plus proches. Dans le cas du site B14, comme aucun autre site ne se trouvait dans un rayon de 20 km pour établir une moyenne pondérée, la température de l'air du site UB3 (situé à 60 km) a été utilisée. Les deux sites se trouvant à la même latitude, on s'attendait à ce que les valeurs à B14 et UB3 soient semblables. Les analyses de régression intersites affichaient une valeur de r^2 supérieure à 0,94, ce qui indique que les températures de l'air sont davantage régies par des facteurs régionaux que locaux. Les températures agrégées et interpolées ont servi au calcul des températures moyennes annuelles de l'air (AMAT), des décalages thermiques de surface (SO), des décalages thermiques nivaux (NO) et les degrés-jours de gel et de dégel (FDD_a, TDD_a).

Température de la surface du sol

Les températures de la surface du sol ont été mesurées à l'aide d'enregistreurs de température Thermochron iButton DS1922L, installés à une profondeur de 5 cm à chaque site (tableau 2). Une deuxième série de températures des sols non incendiés a été enregistrée à chacun des sept sites où de telles zones étaient présentes. Les températures de la surface du sol ont été agrégées à partir des mesures sous-quotidiennes (prises toutes les 4 heures) jusqu'aux valeurs quotidiennes maximales, minimales et moyennes à l'aide d'un script R personnalisé (Way *et al.*, 2018). Les températures de la surface du sol ont été interpolées au moyen de leur relation avec la température de l'air au site, lorsque cette relation présentait une valeur de r^2 supérieure à 0,8. Les températures de la surface du sol agrégées et interpolées ont servi au calcul des températures moyennes annuelles de la surface du sol (AMGST), des décalages thermiques de surface (SO), des décalages thermiques nivaux (NO) et des décalages thermiques dans la couche active (TO), ainsi que du nombre de degrés-jours de gel et de dégel de la surface du sol (FDD_s, TDD_s).

Température du sol

Les températures du sol ont été mesurées à l'aide d'enregistreurs Hobo Pro U12-008 munis de quatre thermistances externes ($\pm 0,25$ °C d'exactitude; $\pm 0,03$ °C de précision). Des thermistances ont été placées au niveau du sommet du gélisol lors de l'installation des instruments et à plusieurs profondeurs dans la couche active à tous les sites, et, lorsque possible, dans un tubage de plastique inséré dans des trous forés dans le pergélisol au moyen d'un jet d'eau. Les mesures bihoraires de la température du sol ont été agrégées en valeurs quotidiennes maximales, minimales et moyennes à l'aide d'un script R personnalisé (Way *et al.*, 2018). Les données de température du sol manquantes ont été interpolées au moyen d'une fonction spline cubique (Riseborough et Burgess, 1996). Lorsque les données manquantes couvraient moins de 10 jours, les températures enregistrées durant les 10 jours précédents et suivants ont servi à établir la relation. Lorsque les données manquantes couvraient plus de 10 jours, les températures enregistrées durant les 30 jours précédents et suivants

ont été utilisées. Afin d'interpoler les données manquantes au début de l'enregistrement des températures du sol, une relation linéaire a été générée à partir des 20 jours suivant les données manquantes. Les températures du sol agrégées et interpolées ont été utilisées pour calculer les températures moyennes annuelles du sol (AMGT) à une profondeur d'environ 1 m et les décalages thermiques (TO).

Tableau 3. Profondeurs des enregistreurs de température installés aux sites d'étude. La profondeur du capteur utilisée pour calculer la AMGT à environ 1,0 m est indiquée en caractères gras. GST correspond à la température de la surface du sol.

Site	Instrumentation
B1	Incendie: GST; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 ; 1,0; 1,5; 2,5; 3,1 m Non incendie: GST; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 ; 1,0; 1,5; 2,0; 2,4 m
B2	Incendie: GST; 0,15; 0,4; 0,5; 0,7; 0,9 m Non incendie: GST; 0,15; 0,5; 0,7; 0,9 m
B3	Incendie: GST; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0 m Non incendie: GST; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0 m
B4	Incendie: GST
B5	Incendie: GST; 0,5; 0,75; 1,0 ; 1,5; 2,0; 2,5 m
B6	Incendie: GST; 0,15; 0,3; 0,45; 0,5; 0,6 m
B7	Incendie: GST; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 m Non incendie: GST; 0,2; 0,4; 0,8 m
B8	Incendie: GST; 0,2; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8 m Non incendie: GST; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 m
B9	Incendie: GST; 0,15; 0,3; 0,45 ; 0,6 m
B10	Incendie: GST; 0,2; 0,4; 0,8 m
B11	Incendie: GST
B12	Incendie: GST; 0,25; 0,5; 1,0 ; 1,5; 1,9 m Non incendie: GST; 0,5; 0,75; 1,0 ; 1,5 m
B13	Incendie: GST; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 m Non incendie: GST; 0,1; 0,2; 0,4; 0,6 m
B14	Incendie: GST; 0,2; 0,5; 1,0 m
B15	Incendie: GST; 0,75 ; 1,5; 2,2 m
B16	Incendie: GST; 0,75; 1,0 ; 1,5; 2,0; 2,2; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0 m
UB1	Non incendie: GST; 0,15; 0,35; 0,45; 0,55 m
UB2	Non incendie: GST; 0,25; 0,5; 1,0 ; 1,5 m
UB3	Non incendie: GST; 0,5; 1,0 ; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0; 6,0; 7,4 m

Résumé des mesures

Les totaux annuels des degrés-jours de gel et de dégel (FDD et TDD) ont été calculés pour l'air (FDD_a et TDD_a) et pour la surface du sol (FDD_s et TDD_s) à partir des enregistrements de températures quotidiennes moyennes, en additionnant respectivement les températures inférieures et supérieures à 0 °C (tableau 4). Aux fins de ce calcul, la période de gel a été établie du 1^{er} octobre au 30 avril et la période de dégel, du 1^{er} mai au 30 septembre (Smith *et al.*, 2015).

Les facteurs N de gel et de dégel ont été déterminés à l'aide des équations suivantes (Klene *et al.*, 2001; Karunaratne et Burn, 2004) :

$$n_F = \frac{FDD_s}{FDD_a}; n_T = \frac{TDD_s}{TDD_a}$$

où n_F est le facteur N de gel, FDD_s est le total des degrés-jours de gel à la surface et FDD_a est le total des degrés-jours de gel de l'air; et n_T est le facteur N de dégel, TDD_s est le total des degrés-jour de dégel à la surface, et TDD_a est le total des degrés-jours de dégel de l'air (tableau 4).

Les décalages thermiques de surface (SO), nivaux (NO) et dans la couche active (TO) ont été calculées à l'aide des équations suivantes :

$$\begin{aligned} SO &= AMGST - AMAT \\ NO &= AMGST_F - AMAT_F \\ TO &= TTOP - AMGST \end{aligned}$$

où AMGST_F et AMAT_F correspondent respectivement aux températures moyennes de la surface du sol et de l'air mesurées durant la saison de gel, et TTOP correspond à la température moyenne annuelle au sommet du pergélisol (représentée par la AMGST à 1 m de profondeur) (Smith et Riseborough, 2002) (tableau 5).

Épaisseur et durée de la couverture de neige

L'épaisseur et la durée du manteau neigeux ont été évaluées à chaque site à partir des données de température recueillies à l'aide d'enregistreurs de température DS1921G-F5 Thermochron iButton, disposés verticalement sur un poteau de bois (habituellement à 10, 20, 30, 40, 50, 60 et 80 cm de hauteur) (Lewkowicz, 2008) (tableau 6). Les capteurs iButton recouverts de neige présentaient des variations diurnes de température plus faibles que ceux exposés à l'air libre (Lewkowicz, 2008). Les épaisseurs de la neige ont été déduites à partir des différences absolues entre la moyenne mobile future sur deux jours et l'écart-type calculé entre le capteur iButton le plus élevé (habituellement 80 cm) et tous les autres capteurs installés sur le poteau. La neige était considérée présente à une hauteur donnée lorsque :

- la température enregistrée était inférieure à un seuil de température de 1 °C;
- la température maximale enregistrée au cours des 24 heures suivantes était inférieure au seuil de 1 °C;
- la différence dans les moyennes mobiles futures sur deux jours était inférieure au seuil de température de 1 °C;
- la différence dans l'écart-type sur deux jours était inférieure à un seuil de 1 °C.

Si de la neige était présente à une hauteur donnée, mais absente à la hauteur immédiatement au-dessus, l'épaisseur de la neige était estimée au point médian entre les deux capteurs iButtons. Compte tenu de l'espacement vertical entre les capteurs, la précision de l'épaisseur de la neige est de ± 5 ou 10 cm. Les épaisseurs quotidiennes de la neige ont servi à déterminer l'épaisseur maximale de la couverture de la neige et le nombre de jours avec couverture de neige (SDD).

Tableau 4. Degrés-jours annuels de gel et de dégel de l'air et de la surface du sol, ainsi que les facteurs N de gel (n_F) et de dégel (n_T) dans les zones incendiées et non incendiées des sites d'étude, le cas échéant. Les valeurs de n_F correspondent aux saisons de gel qui se sont terminées durant l'année civile indiquée. Les tirets indiquent l'absence de données.

Site	Année	FDD _a	TDD _a	FDD _s (B)	TDD _s (B)	n_F (B)	n_T (B)	FDD _s (UB)	TDD _s (UB)	n_F (UB)	n_T (UB)
B1	2016	2432	2075	83	1583	0,03	0,76	139	1712	0,06	0,83
	2017	2537	2136	207	1086	0,08	0,51	326	1482	0,13	0,69
	2018	2935	1789	111	1456	0,04	0,81	21	985	0,01	0,55
	2019	2414	-	51	-	0,02	-	156	-	0,06	-
B2	2016	2432	2075	-	-	-	-	-	-	-	-
	2017	2537	2136	-	-	-	-	-	-	-	-
	2018	2935	1789	-	-	-	-	-	-	-	-
	2019	2550	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B3	2016	2491	2089	-	-	-	-	-	-	-	-
	2017	2748	2167	-	-	-	-	-	-	-	-
	2018	3045	1798	-	-	-	-	-	-	-	-
	2019	2654	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B4	2016	2501	2092	356	1656	0,14	0,79	-	-	-	-
	2017	2743	2169	663	1842	0,24	0,85	-	-	-	-
	2018	3018	1781	689	1508	0,23	0,85	-	-	-	-
	2019	2688	-	553	-	0,21	-	-	-	-	-
B5	2016	2501	2092	320	1346	0,13	0,64	-	-	-	-
	2017	2743	2169	550	1571	0,20	0,72	-	-	-	-
	2018	3018	1781	308	1685	0,10	0,95	-	-	-	-
	2019	2598	-	184	-	0,07	-	-	-	-	-
B6	2016	2506	2094	225	1569	0,09	0,75	-	-	-	-
	2017	2740	2171	590	1633	0,22	0,75	-	-	-	-
	2018	3003	1772	349	1563	0,12	0,88	-	-	-	-
	2019	2709	-	221	-	0,08	-	-	-	-	-
B7	2016	2533	2069	131	1886	0,05	0,91	98	1274	0,04	0,62
	2017	2784	2142	270	1750	0,10	0,82	214	1343	0,08	0,63
	2018	3050	1745	211	1586	0,07	0,91	88	1502	0,03	0,86
	2019	2734	-	237	-	0,09	-	91	-	0,03	-
B8	2016	2567	2038	310	1831	0,12	0,90	357	1297	0,14	0,64
	2017	2840	2105	277	1608	0,10	0,76	326	1221	0,11	0,58
	2018	3110	1709	391	1581	0,13	0,93	422	1081	0,14	0,63
	2019	2699	-	210	-	0,08	-	290	-	0,12	-
B9	2016	2799	1940	109	1153	0,04	0,59	-	-	-	-
	2017	3072	2006	236	997	0,08	0,50	-	-	-	-
	2018	3312	1617	304	933	0,09	0,58	-	-	-	-
	2019	2956	-	171	-	0,06	-	-	-	-	-
B10	2016	2850	1919	195	1853	0,07	0,97	-	-	-	-
	2017	3123	1985	152	1769	0,05	0,89	-	-	-	-
	2018	3357	1598	334	1541	0,10	0,96	-	-	-	-
	2019	3042	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B11	2016	2866	1912	99	1508	0,03	0,79	-	-	-	-
	2017	3139	1979	86	1702	0,03	0,86	-	-	-	-
	2018	3371	1591	113	1564	0,03	0,98	-	-	-	-
	2019	3057	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B12	2016	2866	1912	475	1175	0,17	0,61	403	1431	0,14	0,75
	2017	3139	1979	463	1154	0,15	0,58	351	1561	0,11	0,79
	2018	3371	1591	724	855	0,21	0,54	411	1287	0,12	0,81
	2019	3028	-	411	-	0,14	-	210	-	0,07	-
B13	2016	2866	1912	-	-	-	-	-	-	-	-
	2017	3139	1979	108	1515	0,03	0,77	122	1161	0,04	0,59
	2018	3371	1591	101	1436	0,03	0,90	125	1171	0,04	0,74
	2019	3028	-	59	-	0,02	-	58	-	0,02	-
B14	2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2017	3000	2053	426	1521	0,14	0,74	-	-	-	-
	2018	3281	1622	843	1049	0,26	0,65	-	-	-	-
	2019	3026	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B15	2016	3216	1958	1175	1786	0,37	0,91	-	-	-	-
	2017	3331	2033	1454	1748	0,44	0,86	-	-	-	-
	2018	3596	1560	1734	1419	0,48	0,91	-	-	-	-
	2019	3396	-	1395	-	0,41	-	-	-	-	-
B16	2016	3216	1958	1396	1460	0,43	0,75	-	-	-	-
	2017	3331	2033	1390	1489	0,42	0,73	-	-	-	-
	2018	3596	1560	2032	1171	0,56	0,75	-	-	-	-

	2019	3396	-	1930	-	0,57	-	-	-	-	-
	2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2017	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UB1	2018	2920	1774	-	-	-	-	713	989	0,24	0,56
	2019	2532	-	-	-	-	-	484	741	0,19	0,49
	2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UB2	2017	2908	2030	-	-	-	-	1294	1859	0,44	0,92
	2018	3179	1666	-	-	-	-	2200	1627	0,69	0,98
	2019	2772	-	-	-	-	-	1508	-	0,54	-
	2016	2899	2021	-	-	-	-	935	1625	0,32	0,80
UB3	2017	3000	2053	-	-	-	-	970	1664	0,32	0,81
	2018	3281	1623	-	-	-	-	1031	1386	0,31	0,85
	2019	3026	-	-	-	-	-	406	-	0,13	-

Tableau 5. Température moyenne annuelle de l'air (AMAT), température moyenne annuelle de la surface du sol (AMGST), température moyenne annuelle du sol (AMGT), et résumé des mesures de décalage thermique de surface (SO), nival (NO) et dans la couche active (TO) calculées à partir des températures de l'air, de la surface du sol et du sol (à environ 1 m de profondeur) aux sites d'étude (toutes les valeurs exprimées en °C). Les mesures sont calculées pour les années hydrologiques, du 1^{er} septembre au 31 août, et la colonne « Année » indique l'année civile correspondant à la fin de l'année hydrologique. Les tirets indiquent l'absence de données.

Site	Année	AMAT	AMGST		AMGT		SO		NO		TO	
			B	UB	B	UB	B	UB	B	UB	B	UB
B1	2016	-0,7	4,3	4,3	0,0	0,0	5,0	5,0	14,4	12,5	-4,3	-4,3
	2017	-1,0	2,8	3,2	0,1	0,0	3,9	4,2	13,7	11,8	-2,7	-3,2
	2018	-2,3	4,1	3,3	0,7	-0,1	6,4	5,5	15,9	13,8	-3,2	-3,4
	2019	-2,3	1,8	2,4	0,0	-	4,1	4,7	19,3	-	-1,8	-
B2	2016	-0,7	4,8	-	4,4	3,3	5,5	-	12,4	9,9	-0,5	-
	2017	-1,0	4,3	3,2	3,6	2,9	5,3	4,2	13,8	-	-0,7	-0,3
	2018	-2,3	4,7	-	4,4	2,9	7,0	-	18,4	9,3	-	-
	2019	-2,3	3,3	2,0	2,7	-	5,6	4,3	15,9	-	-0,6	-
B3	2016	-0,8	4,4	3,8	4,3	3,6	5,3	4,7	12,7	13,3	-0,1	-0,3
	2017	-1,6	4,3	4,0	3,9	3,3	5,9	5,6	13,3	13,6	-0,3	-0,7
	2018	-2,4	5,1	4,1	4,5	3,9	7,4	6,4	16,8	16,0	-0,5	-0,2
	2019	-2,7	3,7	-	3,3	3,4	6,4	-	12,6	-	-0,5	-
B4	2016	-0,9	3,7	-	-	-	4,6	-	11,6	-	-	-
	2017	-1,6	3,1	-	-	-	4,7	-	10,4	-	-	-
	2018	-2,6	2,8	-	-	-	5,4	-	12,6	-	-	-
	2019	-2,8	2,7	-	-	-	5,5	-	10,9	-	-	-
B5	2016	-0,9	2,9	-	-0,2	-	3,8	-	11,9	-	-3,2	-
	2017	-1,6	2,6	-	0,6	-	4,2	-	11,1	-	-1,9	-
	2018	-2,6	-	-	-	-	-	-	14,0	-	-	-
	2019	-2,8	3,9	-	3,1	-	6,7	-	13,8	-	-0,8	-
B6	2016	-0,9	3,6	-	0,4	-	4,5	-	12,8	-	-3,3	-
	2017	-1,6	2,8	-	0,4	-	4,4	-	11,6	-	-2,3	-
	2018	-2,6	3,8	-	1,8	-	6,4	-	14,6	-	-2,0	-
	2019	-2,8	3,1	-	-	-	5,9	-	13,2	-	-	-
B7	2016	-1,0	5,0	3,0	1,7	0,6	6,0	4,0	13,0	14,8	-3,3	-2,3
	2017	-1,8	4,1	3,2	2,1	1,6	5,9	5,1	13,4	15,0	-2,0	-1,6
	2018	-2,8	4,3	4,5	3,0	2,9	7,1	7,3	14,9	18,6	-1,3	-1,5
	2019	-3,0	3,5	3,3	2,4	2,3	6,5	6,3	13,0	17,2	-1,1	-1,0
B8	2016	-1,3	4,3	-	1,6	0,1	5,5	-	12,0	12,7	-2,7	-
	2017	-2,1	3,9	2,3	1,6	0,1	6,0	4,4	13,4	13,7	-2,2	-2,2
	2018	-3,1	-	-	2,5	0,2	6,1	-	15,9	13,9	-	-
	2019	-3,2	3,1	2,3	-	0,1	6,3	5,5	17,7	12,7	-	-2,2
B9	2016	-2,2	3,0	-	0,7	-	5,2	-	16,1	-	-2,3	-
	2017	-3,0	2,5	-	1,0	-	5,6	-	15,5	-	-1,5	-
	2018	-4,0	2,1	-	-	-	6,1	-	16,4	-	-	-

	2019	-4,2	1,5	-	-	-	5,8	-	16,8	-	-	-
B10	2016	-2,4	4,5	-	2,4	-	6,9	-	15,8	-	-2,1	-
	2017	-3,3	4,4	-	3,0	-	7,6	-	16,2	-	-1,3	-
	2018	-4,2	3,8	-	3,1	-	8,0	-	15,6	-	-0,7	-
	2019	-4,4	3,1	-	2,4	-	7,5	-	13,9	-	-0,7	-
B11	2016	-2,5	3,8	-	-	-	6,2	-	16,5	-	-	-
	2017	-3,3	4,3	-	-	-	7,6	-	17,8	-	-	-
	2018	-4,2	4,6	-	-	-	8,8	-	18,8	-	-	-
	2019	-4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B12	2016	-2,5	-	-	-0,2	0,6	-	-	11,9	14,1	-	-
	2017	-3,3	1,7	3,2	-0,2	2,5	5,0	6,5	13,5	17,0	-1,9	-0,7
	2018	-4,2	-	-	-0,4	2,1	-	-	14,6	16,6	-	-
	2019	-4,5	1,1	2,3	0,0	1,9	5,6	6,7	14,5	-	-1,2	-0,4
B13	2016	-2,5	2,7	2,3	-	-	5,2	4,7	14,9	16,4	-	-
	2017	-3,3	3,5	2,5	-	-	6,8	5,8	17,2	17,4	-	-
	2018	-4,2	4,0	3,0	3,7	1,4	8,2	7,3	18,5	18,4	-0,3	-1,7
	2019	-4,5	3,2	2,3	3,0	1,2	7,7	6,7	19,5	-	-0,1	-1,0
B14	2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2017	-2,7	2,9	-	-0,2	-	5,6	-	12,3	-	-3,1	-
	2018	-3,9	1,3	-	-0,8	-	5,1	-	11,9	-	-1,3	-
	2019	-4,3	1,4	-	-0,1	-	5,8	-	11,5	-	-1,5	-
B15	2016	-3,3	1,8	-	-	-	5,1	-	9,9	-	-	-
	2017	-5,7	0,7	-	-1,1	-	5,1	-	8,9	-	-0,5	-
	2018	-5,0	-0,4	-	-2,4	-	4,6	-	9,0	-	-2,0	-
	2019	-5,6	-0,5	-	-2,5	-	5,1	-	9,1	-	-2,0	-
B16	2016	-3,3	0,2	-	-	-	3,5	-	8,7	-	-	-
	2017	-5,7	-1,0	-	-1,1	-	4,7	-	9,2	-	-0,1	-
	2018	-5,0	-1,9	-	-1,9	-	3,0	-	7,5	-	0,0	-
	2019	-5,6	-2,5	-	-1,8	-	3,0	-	6,5	-	0,8	-
UB1	2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2017	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2018	-2,2	-	1,1	-	-0,6	-	3,3	-	12,5	-	-1,7
	2019	-2,3	-	0,9	-	-0,5	-	3,4	-	10,4	-	-1,4
UB2	2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2017	-2,6	-	1,3	-	-0,9	-	3,9	-	7,6	-	-2,2
	2018	-3,5	-	-1,0	-	-1,3	-	2,4	-	4,8	-	-0,2
	2019	-3,6	-	0,1	-	-0,6	-	3,7	-	6,6	-	-0,7
UB3	2016	-2,2	-	-	-	-0,8	-	-	-	9,4	-	-
	2017	-2,6	-	1,7	-	-0,8	-	4,3	-	9,6	-	-2,6
	2018	-3,9	-	1,5	-	-1,0	-	5,3	-	11,3	-	-2,5
	2019	-4,3	-	2,2	-	-0,6	-	6,5	-	12,5	-	-2,7

Tableau 6. Épaisseur maximale annuelle de la neige et nombre total de jours avec couverture de neige aux sites d'étude. Les tirets indiquent l'absence de données. Les sites B2, B11, B15 et B16 sont exclus puisqu'aucune donnée n'est disponible.

Site	Année	Épaisseur maximale de la neige (cm)	Jours avec couverture de neige (n jours)
B1	2016	55	58
	2017	55	38
	2018	70	71
	2019	45	38
B3	2016	45	49
	2017	55	42
	2018	55	66
	2019	45	49
B4	2016	-	-
	2017	-	-
	2018	70	71
	2019	55	52
B5	2016	45	47
	2017	55	37
	2018	70	65
	2019	45	44
B6	2016	45	46
	2017	55	45
	2018	55	61
	2019	55	57
B7	2016	45	44
	2017	70	47
	2018	55	68
	2019	55	47
B8	2016	55	55
	2017	70	60
	2018	70	73
	2019	55	53
B9	2016	70	101
	2017	70	69
	2018	70	64
	2019	100	57
B10	2016	70	71
	2017	70	82
	2018	-	-
	2019	55	45
B12	2016	45	59
	2017	70	74
	2018	55	66
	2019	70	50
B13	2016	55	60
	2017	70	66
	2018	50	61
	2019	55	46
B14	2016	-	-
	2017	-	-
	2018	-	-
	2019	55	45
UB1	2016	-	-
	2017	-	-
	2018	70	91
	2019	55	52
UB2	2016	-	-
	2017	-	-
	2018	-	-
	2019	45	55
UB3	2016	45	49
	2017	70	54
	2018	45	46
	2019	45	48

Conditions de sol

Des échantillons de sol provenant de la couche active et au sommet du pergélisol ont été prélevés à la plupart des sites à l'aide d'un carottier motorisé SIPRE doté d'un tube carottier de 75 mm de diamètre. Aux sites où le carottage s'avérait impossible en raison des conditions du substrat ou de contraintes logistiques, les échantillons de sol ont été prélevés dans des fosses creusées dans la couche active. Les échantillons ont été emballés et expédiés, dans leur état d'origine – gelé (pergélisol) ou non gelé (couche active) – à l'Université d'Ottawa pour analyses en laboratoire, afin d'estimer la teneur en glace excédentaire (EIC), la masse volumique apparente (bD), la teneur en eau gravimétrique (GMC), la granulométrie et la teneur en matière organique (tableaux 7 et 8). Chaque échantillon a été sectionné en segments d'au plus 15 cm pour permettre la caractérisation verticale du profil pédologique.

Glace excédentaire

La glace excédentaire correspond à la proportion de glace présente en excès dans l'espace interstitiel d'un sol dégélé et est généralement déterminée par la mesure du volume d'eau surnageante après la décongélation de l'échantillon (French, 2017; Lewkowicz *et al.*, 2024). Les échantillons de pergélisol ont été placés dans des béciers en verre, pesés (W_w), puis laissés à dégeler et à se stabiliser pendant 24 heures. Une fois les échantillons dégélés, les volumes d'eau surnageante (W_v) et de sédiments (S_v) ont été mesurés, et la glace excédentaire (EIC) a été calculée selon l'équation suivante :

$$EIC(\%) = \left[\frac{W_v \times 1.09}{S_v + (W_v \times 1.09)} \right] \times 100$$

où W_v est le volume d'eau surnageante (cm^3), multiplié par 1,09 pour estimer le volume équivalent de glace, et S_v est le volume de sédiments saturés (cm^3) (Kokelj et Burn, 2003).

Masse volumique apparente

Les échantillons ont été séchés à 105 °C pendant 24 heures, puis pesés (W_d). La masse volumique apparente (bD) a été calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$bD = \frac{W_d}{S_v + W_v}$$

où W_d est la masse sèche de l'échantillon (g), S_v le volume de sédiments saturés (cm^3) et W_v le volume d'eau surnageante (cm^3).

Teneur en eau gravimétrique

Les masses humide (W_w) et sèche (W_d) de l'échantillon ont été comparées pour calculer la teneur en eau gravimétrique (van Everdingen, 2005) :

$$GMC(\%) = \left[\frac{W_w - W_d}{W_d} \right] \times 100$$

où W_w est la masse humide (g) et W_d est la masse sèche (g) de l'échantillon.

Taille moyenne des grains et granulométrie

Des échantillons secs ont été passés à travers un tamis de 2 mm pour déterminer la proportion de gravier présente dans l'échantillon. Seuls trois sites contenaient des particules de plus de 2 mm, et à deux d'entre eux (B9 et B13), le gravier représentait moins de 10 % de l'échantillon total. Au site B8, le profil du sol contenait de 36 à 86 % de gravier. Une fois cette fraction grossière éliminée, la granulométrie a été déterminée à l'aide d'un analyseur laser de granulométrie Microtrac S3500 (LPSA), capable de mesurer des particules de 0,02 à 2 800 µm de diamètre. La matière organique a été éliminée de la fraction fine à l'aide d'une solution de peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) à 30 % (Verret *et al.*, 2019), car l'analyseur ne fait pas de distinction entre les matières minérales et organiques. L'échantillon de sol minéral restant a été dispersé dans une solution d'hexamétaphosphate à 5 % avant l'ajout d'une aliquote d'échantillon dans la chambre de l'analyseur. On a analysé des doubles pour 5 % des échantillons afin d'évaluer la précision de l'instrument, laquelle se situait entre 2 et 4 %. L'analyseur a produit la granulométrie de chaque échantillon, qui correspondait à sable, limon ou argile, ainsi qu'une estimation de la taille moyenne des sédiments en µm.

Teneur en matière organique

La perte par calcination a été déterminée à l'aide d'un analyseur thermogravimétrique LECO TGA701 muni d'une balance intégrée (modèle TGA701). Des sous-échantillons ont été placés dans des creusets à l'intérieur de l'instrument, puis soumis à des augmentations de température allant jusqu'à 105 °C pour garantir que l'échantillon était sec, et jusqu'à 550 °C pour la combustion de la matière organique. Les échantillons ont été pesés à 105 °C et 550 °C lorsque la variation de la masse de l'échantillon était sous 0,1 %. L'exactitude de l'analyse de la perte par calcination a été déterminée à l'aide d'un étalon d'oxalate de calcium et présente une erreur analytique de ± 0,13 %. La teneur en matière organique a été calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$Teneur\ en\ matière\ organique\ (\%) = (LOI_{105} - \frac{LOI_{550}}{LOI_{105}}) \times 100$$

où LOI₁₀₅ est la masse de l'échantillon à 105 °C (g) et LOI₅₅₀ est la masse de l'échantillon à 550 °C (g).

Ces caractéristiques du sol et des carottes permettent de caractériser les sites d'étude, de déterminer leur vulnérabilité au gel et de paramétrer les activités de modélisation thermique pour cette région d'étude.

Tableau 7. Caractéristiques des sédiments provenant d'échantillons de sol et de carottes prélevés en 2016 ou de fosses d'observation creusées en 2016 ou 2017. La taille moyenne des sédiments, la proportion de sédiments sous forme de gravier, de sable, de limon ou d'argile, ainsi que la teneur en matière organique sont présentées pour les échantillons minéraux. La masse volumique apparente, la teneur en eau gravimétrique et la teneur en glace excédentaire sont présentées pour les échantillons de matière organique et de minéraux lorsque les données sont disponibles. Les tirets indiquent l'absence de données. Les sites B15, B16 et UB1 sont exclus puisqu'aucune donnée n'est disponible.

Site	Profondeur (cm)	Type de sol	Taille moyenne des sédiments (µm)	Proportion des sédiments (%)			Teneur en matière organique (%)	Masse volumique apparente (kg/m³)	Teneur en eau gravimétrique (%)	Teneur en glace excédentaire (%)
				Sable	Limon	Argile				
B1	24-39	Organique	-	-	-	-	-	0,2	639	0
	39-53	Organique	-	-	-	-	-	0,2	509	0
	55-65	Organique	-	-	-	-	-	0,2	553	0
	65-78	Organique	-	-	-	-	-	0,1	1253	0
	78-94	Organique	-	-	-	-	-	0,1	1476	0
	94-100	Organique	-	-	-	-	-	0,1	922	13
	100-117	Organique	-	-	-	-	-	0,1	907	0
	117-129	Organique	-	-	-	-	-	0,1	789	0
	145-159	Organique	-	-	-	-	-	0,1	150	0
	159-174	Organique	-	-	-	-	-	0,1	671	0
	174-189	Organique	-	-	-	-	-	0,1	790	0
	189-203	Organique	-	-	-	-	-	0,1	814	0
	203-214	Organique	-	-	-	-	-	0,1	864	0
	214-225	Organique	-	-	-	-	-	0,1	971	0
	225-238	Organique	-	-	-	-	-	0,1	768	0
	238-251	Organique	-	-	-	-	-	0,1	860	0
	251-263	Organique	-	-	-	-	-	0,1	626	0
	263-275	Organique	-	-	-	-	-	0,2	332	0
	275-297	Minéraux	55	26	64	10	21,1	0,2	239	8
	297-310	Minéraux	21	7	66	27	6,9	0,8	89	7
B2	20	Minéraux	-	-	-	-	-	-	345	0
	40	Minéraux	193	92	9	0	1,5	-	24	0
B3	0-15	Minéraux	-	-	-	-	-	-	216	0
	30-35	Minéraux	85	65	29	6	1,2	-	6	0
B4	0-16	Organique	-	-	-	-	-	-	121	0
	16-20	Minéraux	52	34	60	6	1,9	-	11	0
	20	Minéraux	51	24	65	9	2,6	-	21	0
	35	Minéraux	56	32	61	8	1,7	-	11	0
	56	Minéraux	51	41	41	18	2,1	-	11	0
B5	25	Minéraux	56	31	61	8	1,7	-	17	0
	35-40	Minéraux	53	27	64	9	2,2	-	23	0
	43-58	Minéraux	54	29	64	8	1,3	-	59	29
	50	Minéraux	64	41	52	7	3,8	-	29	0
	58-72	Minéraux	65	41	54	5	1,2	-	41	24
	72-86	Minéraux	86	51	46	3	0,9	-	40	18
B6 (1)	50	Minéraux	79	85	14	1	48,4	-	36	0
	60-65	Minéraux	112	66	27	7	2,0	-	13	0
	75	Minéraux	12	30	37	32	3,3	-	20	0
	100	Minéraux	33	26	42	32	2,9	-	16	0
B6 (2)	70-82	Organique	-	-	-	-	-	0,2	503	0
	82-93	Organique	-	-	-	-	-	0,2	513	0
	93-108	Organique	-	-	-	-	-	0,2	446	11
	108-122	Organique	-	-	-	-	-	0,3	365	13
	125-137	Organique	-	-	-	-	-	0,2	461	11
B7	137-141	Organique	-	-	-	-	-	0,2	462	0
	35	Minéraux	184	79	20	2	1,3	-	12	0
B8	45-50	Minéraux	206	79	20	1	6,7	-	16	0
	15	Organique	-	-	-	-	-	-	336	0
B9 (1)	35-40	Minéraux	206	82	16	2	2,5	-	6	0
	40	Minéraux	185	75	21	4	2	-	14	0
B9 (2)	10-15	Minéraux	218	76	20	5	-	-	7	0
	35	Organique	-	-	-	-	-	-	332	0
B10	75	Organique	-	-	-	-	-	-	483	0
	30	Minéraux	-	-	-	-	-	-	-	0
B11	38	Minéraux	-	-	-	-	-	-	47	0
	15	Organique	-	-	-	-	-	-	485	0
B12	30	Minéraux	564	95	5	0	0,7	-	20	0
	50	Minéraux	-	81	17	2	-	-	-	0
B13	0-18	Organique	-	-	-	-	-	-	123	0

	18-31	Organique	-	-	-	-	-	-	316	0
	31-64	Organique	-	-	-	-	-	-	467	0
	50	Organique	-	-	-	-	-	-	334	0
	64-93	Organique	-	-	-	-	-	-	569	0
	93-99	Organique	-	-	-	-	-	-	588	0
	99-124	Organique	-	-	-	-	-	-	372	0
	124-153	Organique	-	-	-	-	-	-	520	0
	153-167	Organique	-	-	-	-	-	-	237	0
	167-199	Organique	-	-	-	-	-	-	492	0
	199-218	Organique	-	-	-	-	-	-	264	0
	239-254	Organique	-	-	-	-	-	-	322	0
	254-289	Organique	-	-	-	-	-	-	278	0
	289-312	Minéraux	26	10	58	33	7,3	-	120	40
	312-325	Minéraux	58	30	44	26	3,6	-	82	30
UB2	0-15	Organique	-	-	-	-	-	-	429	0
	15-20	Organique	-	-	-	-	-	0,1	12307	84
	20-35	Organique	-	-	-	-	-	0,1	736	0
	35-47	Organique	-	-	-	-	-	0,2	313	0
	47-58	Minéraux	31	15	64	21	12,4	0,7	79	10
	58-70	Minéraux	31	16	62	22	2,7	1,0	59	17
	60	Minéraux	-	-	-	-	-	-	380	0
	70-82	Minéraux	43	27	60	14	1,8	1,0	65	29
	82-91	Minéraux	40	21	66	13	2	1,0	61	27
	91-103	Minéraux	27	11	72	17	1,6	1,0	46	16
	103-115	Minéraux	24	9	74	18	1,7	0,8	46	30
	115-121	Minéraux	33	14	69	17	2,2	-	87	46
	121-133	Minéraux	31	13	69	17	2,2	0,7	87	42
	133-143	Minéraux	33	14	72	14	2	0,7	89	36
	143-153	Minéraux	-	17	72	12	1,4	1,4	-	0
UB3	0-4	Organique	-	-	-	-	-	-	153	0
	4-9	Organique	-	-	-	-	-	-	655	0
	9-19	Organique	-	-	-	-	-	-	700	0
	25-33	Organique	-	-	-	-	-	-	759	0
	33-50	Organique	-	-	-	-	-	-	379	0
	45-50	Organique	-	-	-	-	-	-	537	0
	50-60	Organique	-	-	-	-	-	-	650	0
	60-70	Organique	-	-	-	-	-	-	981	0
	70-81	Organique	-	-	-	-	-	-	1067	0
	81-90	Organique	-	-	-	-	-	-	795	0
	90-99	Organique	-	-	-	-	-	-	805	0
	99-110	Organique	-	-	-	-	-	-	696	0
	110-120	Organique	-	-	-	-	-	-	700	0
	120-130	Organique	-	-	-	-	-	-	606	0
	130-145	Organique	-	-	-	-	-	-	635	0
	145-161	Organique	-	-	-	-	-	-	574	0
	161-175	Organique	-	-	-	-	-	-	597	0
	175-185	Organique	-	-	-	-	-	-	555	0
	185-195	Organique	-	-	-	-	-	-	387	0
	218-239	Organique	-	-	-	-	-	-	469	0

Tableau 8. Résumé du type et du nombre d'échantillons, de la taille moyenne des sédiments dans les échantillons minéraux, de la proportion des sédiments sous forme de sable, de limon ou d'argile, de la teneur en matière organique des échantillons minéraux, de la masse volumique apparente, de la teneur en eau gravimétrique et de la teneur en glace excédentaire des échantillons de sol et de carottes prélevés sur les sites d'étude. Les tirets indiquent l'absence de données. Les sites B15, B16 et UB1 sont exclus puisqu'aucune donnée n'est disponible.

Site	Type de sol	Profondeur (cm)	Nombre d'échantillons	Taille moyenne des sédiments (µm)	Proportion des sédiments (%)			Teneur en matière organique (%)	Masse volumique apparente (kg/m³)	Teneur en eau gravimétrique (%)	Teneur en glace excédentaire (%)
					Sable	Limon	Argile				
B1	Organique	24-275	18	-	-	-	-	-	0,1	772	0,7
	Minéraux	275-310	2	38	16	65	19	14,0	0,5	164	7,5
B2	Minéraux	20-40	2	193	92	9	0	1,5	-	185	0
B3	Minéraux	0-35	2	85	65	29	6	1,2	-	111	0
B4	Organique	0-16	1	-	-	-	-	-	-	121	0
	Minéraux	16-56	4	53	33	57	10	2,1	-	13	0
B5	Minéraux	25-86	6	63	37	57	7	1,9	-	35	11,8
B6	Organique	70-141	6	-	-	-	-	-	0,2	458	0
	Minéraux	50-100	4	59	52	30	18	14,2	-	21	5,8
B7	Minéraux	35-50	2	195	79	20	2	4,0	-	14	0
B8	Organique	15	1	-	-	-	-	-	-	336	0
	Minéraux	35-40	2	196	79	19	3	2,3	-	10	0
B9	Organique	35	2	-	-	-	-	-	-	408	0
	Minéraux	10-75	2	218	76	20	5	1,0	-	7	0
B10	Minéraux	30-50	3	393	88	12	1	2,4	-	21	0
B11	Minéraux	25	1	460	96	4	0	0,5	-	13	0
B12	Organique	38	1	-	-	-	-	-	-	427	0
B13	Organique	15	1	-	-	-	-	-	-	485	0
	Minéraux	30-50	2	564	88	11	1	0,7	-	20	0
B14	Organique	0-289	13	-	-	-	-	-	-	376	0
	Minéraux	289-325	2	42	20	51	30	5,4	0,2	101	35
UB2	Organique	0-47	4	-	-	-	-	-	0,1	3446	21
	Minéraux	47-153	11	33	16	68	17	3,0	0,9	100	23
UB3	Organique	0-239	20	-	-	-	-	-	-	635	0

Conditions et caractéristiques écologiques

Les conditions antérieures à l'incendie ont été déduites à partir des données climatiques à long terme, des mesures prises sur les trois sites non incendiés et des portions non incendiées de certains sites incendiés. La sévérité du brûlage variait entre les sites et à l'intérieur d'un même site.

La profondeur de brûlage et la sévérité du brûlage ont été estimées d'après la hauteur des racines adventives des épinettes noires et de l'épaisseur de la couche résiduelle de sol organique (tableau 9). Les racines adventives des épinettes noires servent à estimer l'épaisseur de la couche organique consommée par l'incendie (Kasischke et Johnstone, 2005; Boby *et al.*, 2010). Trois hauteurs de racines adventives ont été mesurées à intervalles de 2 m le long de transects linéaires de 80 ou 160 m, lorsque des épinettes noires étaient présentes à moins de 2 m. L'épaisseur de la couche résiduelle de sol organique a été évaluée par le creusage de petites fosses à chaque site. La profondeur de brûlage a été calculée à l'aide de l'équation suivante (Walker *et al.*, 2018) :

$$\text{Profondeur de brûlage} = \text{ARH mesurée} + \text{ARH non incendiée} + (0.03 \times \text{SOL})$$

où ARH est la hauteur mesurée des racines adventives (cm), la ARH non incendiée des peuplements non incendiés adjacents est de 3,7 cm (Walker *et al.*, 2018), et SOL est l'épaisseur de la couche résiduelle de sol organique (cm). La proportion de la couche organique détruite par l'incendie variait de 6 à 68 %, les sites présentant les couches organiques les plus épaisses avant l'incendie ayant subi les plus faibles proportions de pertes. La profondeur de brûlage variait entre 9 et 36 cm, ce qui représente une sévérité de brûlage de modérée à élevée.

Tableau 9. Hauteur moyenne des racines adventives, couche résiduelle de sol organique, profondeur de brûlage, épaisseur de la couche organique avant l'incendie et proportion de la couche organique perdue à huit sites d'étude. Les sites B2, B3, B6, B7, B11, B14, B15 et B16 sont exclus puisqu'aucune donnée n'est disponible.

Site	Hauteur moyenne des racines adventives (cm)	Couche résiduelle de sol organique (cm)	Profondeur de brûlage (cm)	Épaisseur de la couche organique avant l'incendie (cm)	Proportion de la couche organique perdue (%)
B1	5	297	18	315	6
B4	17	10	21	31	68
B5	5	20	9	29	32
B8	9	21	13	34	39
B9	9	80	15	95	16
B10	31	28	36	64	56
B12	5	101	12	113	11
B13	4	33	9	42	21

Remerciements

Le soutien financier pour la collecte des données sur le terrain a été assuré par le Programme de surveillance des effets cumulatifs des Territoires du Nord-Ouest (projet n° 170), le Programme de subventions à la découverte du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada, la Fondation de la famille Weston, le Programme de formation scientifique dans le Nord, la Société géographique royale du Canada, l'Université d'Ottawa et la Commission géologique du Canada. Le soutien logistique sur le terrain a été fourni par Steven Cumming. L'assistance sur le terrain a été fournie par Kirsten Reid, Lucas Brehaut, Nicola Day, Xanthe Walker, Geneviève Degré-Timmons, Julie Trus, Tom Douglas, Catherine Dieleman, Brittany Main, Kevin Stones, Moya Painter et Tracy Holloway. Des commentaires constructifs ont été formulés par Brendan O'Neill.

Références

- Boby, L.A., Schuur, E.A.G., Mack, M.C., Verbyla, D. et Johnstone, J.F. 2010. Quantifying fire severity, carbon, and nitrogen emissions in Alaska's boreal forest. *Ecological Applications*, **20**(6): 1633–1647. doi:10.1890/08-2295.1.
- Environment and Climate Change Canada. 2025. Canadian Climate Normals.
- van Everdingen, R. (*Éditeur*). 2005. Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms. National Snow and Ice Data Center, Boulder, Colorado, USA.
- French, H.M. 2017. *The Periglacial Environment*, 4th Edition. Wiley-Blackwell.
- Gibson, C.M., Chasmer, L.E., Thompson, D.K., Quinton, W.L., Flannigan, M.D. et Olefeldt, D. 2018. Wildfire as a major driver of recent permafrost thaw in boreal peatlands. *Nature Communications*, **9**(1): 3041. doi:10.1038/s41467-018-05457-1.
- Government of Northwest Territories. 2008. Ecosystem classification.
- Heginbottom, J.A., Dubreuil, M.-A. et Harker, P. 1995. Canada, Permafrost (National Atlas of Canada, 5th Edition). Natural Resources Canada,. doi:10.4095/294672.
- Heiri, O., Lotter, A.F. et Lemcke, G. 2001. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: Reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology*, **25**: 101–110. doi:10.1023/A:1008119611481.
- Holloway, J. 2020. Impacts of forest fire on permafrost in the discontinuous zones of northwestern Canada. PhD, University of Ottawa, Ottawa, Canada.
- Karunaratne, K.C. et Burn, C.R. 2004. Relations between air and surface temperature in discontinuous permafrost terrain near Mayo, Yukon Territory. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **41**(12): 1437–1451. doi:10.1139/e04-082.
- Kasischke, E.S. et Johnstone, J.F. 2005. Variation in postfire organic layer thickness in a black spruce forest complex in interior Alaska and its effects on soil temperature and moisture. *Canadian Journal of Forest Research*, **35**(9): 2164–2177. doi:10.1139/x05-159.
- Klene, A.E., Nelson, F.E., Shiklomanov, N.I. et Hinkel, K.M. 2001. The n-factor in natural landscapes: Variability of air and soil-surface temperatures, Kuparuk River Basin, Alaska, U.S.A. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, **33**(2): 140–148. doi:10.1080/15230430.2001.12003416.
- Kokelj, S.V. et Burn, C.R. 2003. Ground ice and soluble cations in near-surface permafrost, Inuvik, Northwest Territories, Canada. *Permafrost and Periglacial Processes*, **14**(3): 275–289. doi:10.1002/ppp.458.
- Lewkowicz, A., Wolfe, S., Roujanski, V., Hoeve, E., O'Neill, H.B., Gruber, S., Roy-Léveillé, P., Brown, N., Koenig, C., Brooks, H., Rudy, A., Bonnaventure, P. et Paquette, M. 2024. An illustrated permafrost dictionary. Canadian Permafrost Association (CPA).

- Lewkowicz, A.G. 2008. Evaluation of miniature temperature-loggers to monitor snowpack evolution at mountain permafrost sites, northwestern Canada. *Permafrost and Periglacial Processes*, **19**(3): 323–331. doi:10.1002/ppp.625.
- Morse, P.D., Wolfe, S.A., Kokelj, S.V. et Gaanderse, A.J.R. 2016. The occurrence and thermal disequilibrium state of permafrost in forest ecotopes of the Great Slave Region, Northwest Territories, Canada. *Permafrost and Periglacial Processes*, **27**(2): 145–162. doi:10.1002/ppp.1858.
- Northwest Territories Centre for Geomatics. 2015. Fire history.
- Riseborough, D.W. et Burgess, M.M. 1996. Measurement interval and the accurate assessment of ground temperature trends. *Permafrost and Periglacial Processes*, **7**(4): 321–335. doi:10.1002/(SICI)1099-1530(199610)7:4<321::AID-PPP233>3.0.CO;2-J.
- Smith, M.W. et Riseborough, D.W. 2002. Climate and the limits of permafrost: A zonal analysis. *Permafrost and Periglacial Processes*, **13**(1): 1–15. doi:10.1002/ppp.410.
- Smith, S.L., Burgess, M.M. et Riseborough, D.W. 2008. Ground temperature and thaw settlement in frozen peatlands along the Norman Wells Pipeline Corridor, NWT Canada: 22 years of monitoring. *Dans Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost*. Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks. pp. 1665–1670.
- Smith, S.L., Riseborough, D.W. et Bonnaventure, P.P. 2015. Eighteen year record of forest fire effects on ground thermal regimes and permafrost in the Central Mackenzie Valley, NWT, Canada. *Permafrost and Periglacial Processes*, **26**(4): 289–303. doi:10.1002/ppp.1849.
- Verret, M., Wang, Y., Bjornson, J. et Lacelle, D. 2019. Hummocks in alpine tundra, northern British Columbia, Canada: distribution, morphology and organic carbon composition. *Arctic Science*, **5**(3): 127–147. doi:10.1139/as-2018-0021.
- Walker, X.J., Baltzer, J.L., Cumming, S.G., Day, N.J., Johnstone, J.F., Rogers, B.M., Solvik, K., Turetsky, M.R. et Mack, M.C. 2018. Soil organic layer combustion in boreal black spruce and jack pine stands of the Northwest Territories, Canada. *International Journal of Wildland Fire*, **27**(2): 125. doi:10.1071/WF17095.
- Way, R.G., Lewkowicz, A.G. et Zhang, Y. 2018. Characteristics and fate of isolated permafrost patches in coastal Labrador, Canada. *The Cryosphere*, **12**(8): 2667–2688. doi:10.5194/tc-12-2667-2018.
- Wolfe, S.A., Morse, P.D., Hoeve, T.E., Sladen, W.E., Kokelj, S.V. et Arenson, L.U. 2015. Disequilibrium permafrost conditions on NWT Highway 3. *Dans Proceedings of GeoQuebec 2015*. Quebec, Canada. pp. 1–8.