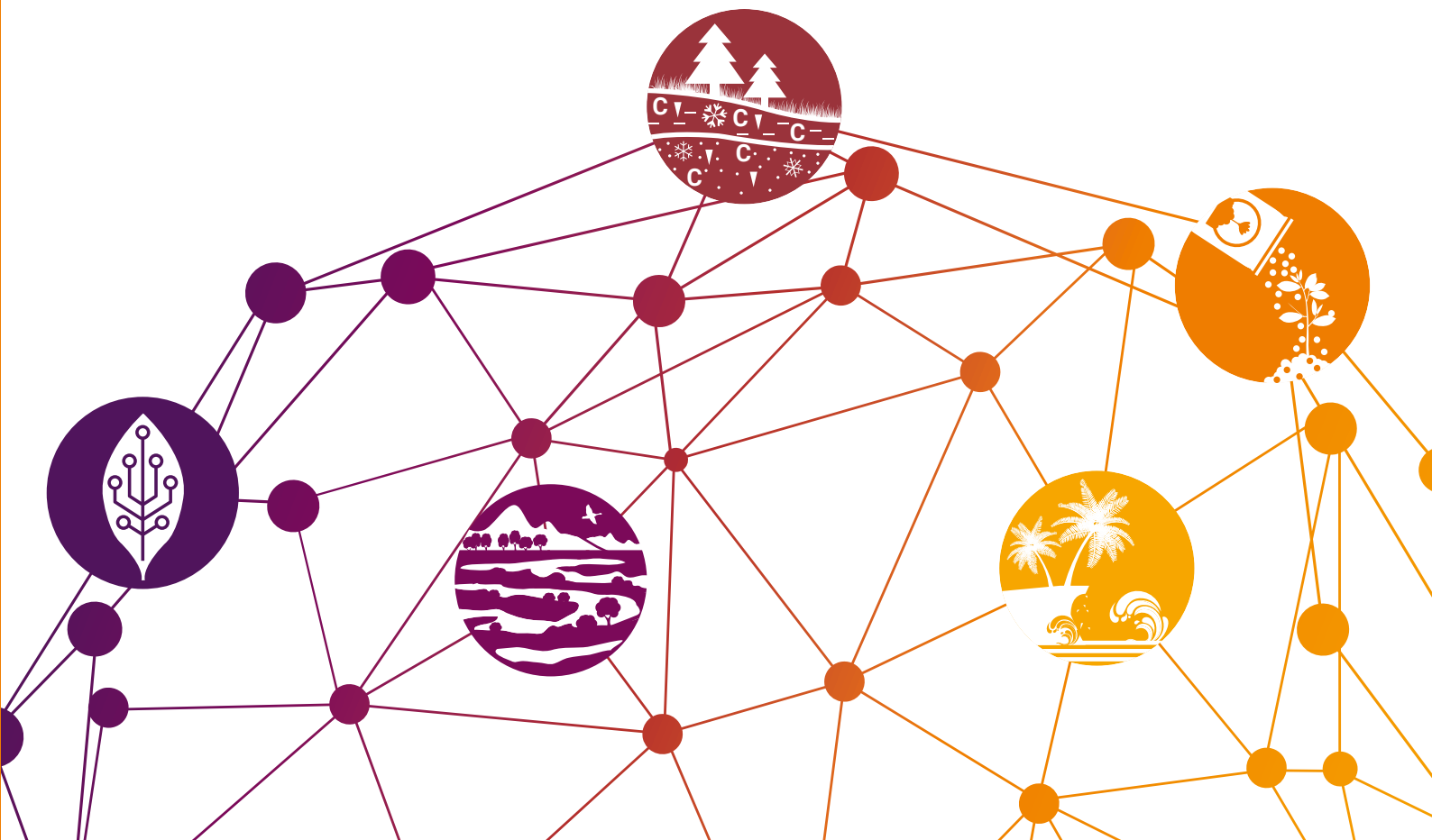


FRONTIÈRES 2018/19

Questions émergentes d'ordre environnemental



© 2019 Programme des Nations Unies pour l'environnement
ISBN: 978-92-807-3738-7
Job no : DEW/2222/NA

Avertissement

Cette publication peut être reproduite en tout ou en partie et sous quelque forme que ce soit à des fins pédagogiques et non lucratives sans autorisation spéciale du détenteur des droits d'auteur, à condition d'en mentionner la source. L'ONU Environnement souhaiterait recevoir un exemplaire de toute publication utilisant ce document comme source.

La présente publication ne peut être ni revendue ni utilisée à quelque fin commerciale que ce soit sans l'autorisation écrite préalable de l'ONU Environnement. Toute demande d'autorisation, mentionnant l'objectif et la portée de la reproduction, doit être adressée au Directeur de la Division de la communication, ONU Environnement, P.O. Box 30552, Nairobi, 00100, Kenya.

Les appellations employées dans le présent document, et la présentation des données qui y figurent n'impliquent aucune prise de position de la part de l'ONU Environnement quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites. Pour plus d'informations concernant l'utilisation des cartes dans les publications, veuillez consulter la page suivante : <http://www.un.org/Depts/Cartographic/french/htmain.htm>.

La mention de toute société commerciale ou de tout produit dans la présente publication ne signifie pas que l'ONU Environnement s'en porte garant. L'utilisation, à des fins de publicité, d'informations issues de la présente publication et concernant des produits brevetés n'est pas autorisée.

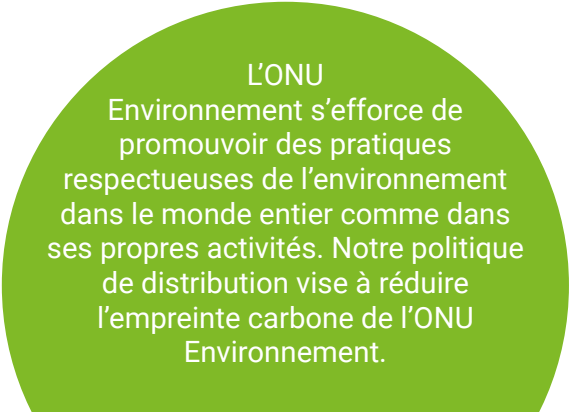
© Cartes, photos et illustrations, comme précisé.

Pour citer ce document

PNUE, 2019. *Frontières 2018/19, Questions émergentes d'ordre environnemental*, Programme des Nations Unies pour l'environnement, Nairobi

Production

Division de la science
ONU Environnement
P.O. Box 30552,
Nairobi, 00100, Kenya
Tél. : (+254) 20 7621234
Courriel : publications@unenvironment.org
Site : www.unenvironment.org



L'ONU
Environnement s'efforce de
promouvoir des pratiques
respectueuses de l'environnement
dans le monde entier comme dans
ses propres activités. Notre politique
de distribution vise à réduire
l'empreinte carbone de l'ONU
Environnement.

FRONTIÈRES 2018/19

Questions émergentes d'ordre environnemental

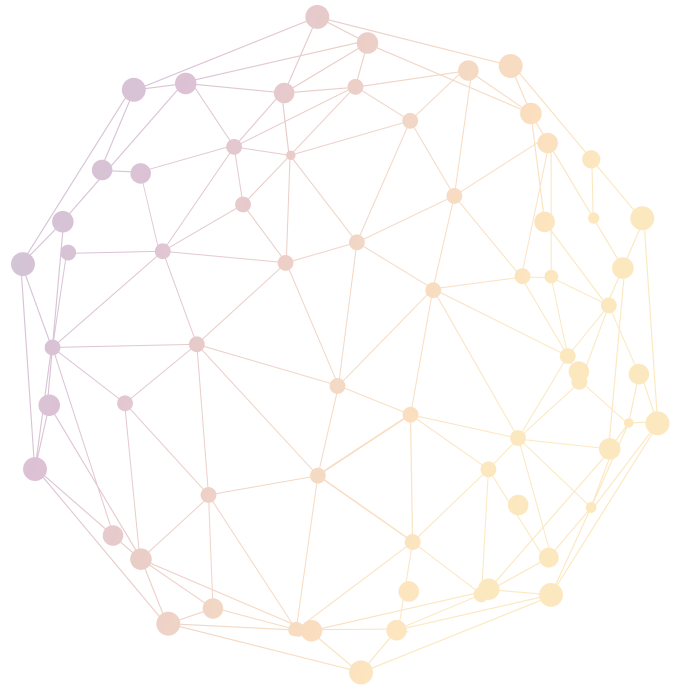









Table des matières

	Avant-propos	7
	Remerciements	8
	Biologie synthétique : reconfigurer l'environnement	10
	Opportunités et défis	10
	Réécrire le code de la vie	12
	Redéfinition des applications : du laboratoire aux écosystèmes	16
	Innover avec sagesse	18
	Bibliographie	20
	Connectivité écologique : une passerelle vers la préservation de la biodiversité	24
	Rétablir le lien entre les écosystèmes fragmentés	24
	Les forces de fragmentation	26
	Promouvoir des solutions de connectivité	30
	Fixer des objectifs de connectivité future	32
	Bibliographie	34
	Les tourbières à pergélisol : perdre du terrain sur une planète qui se réchauffe	38
	L'évolution accélérée de l'Arctique	38
	Fonte du pergélisol, décomposition de la tourbe et interactions complexes	40
	Une meilleure connaissance des tourbières à pergélisol	44
	Priorités en matière de connaissances et expansion du réseau	46
	Bibliographie	48
	La solution de l'azote : de la pollution du cycle de l'azote à l'économie circulaire de l'azote	52
	Le défi mondial de la gestion de l'azote	52
	Les éléments connus et les « inconnues connues » concernant l'azote	54
	Fragmentation des politiques et solutions d'économie circulaire	58
	Vers une approche internationale holistique de l'azote	60
	Bibliographie	62
	Une mauvaise adaptation au changement climatique : éviter les pièges se trouvant sur la voie de l'évolutivité	66
	Définir l'adaptation et la mauvaise adaptation dans un contexte de changement climatique	66
	La mauvaise adaptation à grande échelle	68
	Éviter la mauvaise adaptation dans un avenir limité à une hausse de la température de 1,5 °C	73
	Bibliographie	74



Avant-propos



Au début du XX^e siècle, les chimistes allemands Fritz Haber et Carl Bosch ont mis au point un processus permettant de produire de l'azote synthétique à un coût abordable et en grande quantité. Leur invention, qui a stimulé la production de masse d'engrais azotés, a transformé les pratiques agricoles du monde entier. Elle a aussi marqué le début de notre interférence à long terme avec le bilan azoté de la Terre. Chaque année, l'équivalent de 200 milliards de dollars US d'azote réactif est rejeté dans l'environnement. Ce phénomène contribue à la dégradation de nos sols, à la pollution de notre air, à l'extension des « zones mortes » ainsi qu'à la prolifération d'algues toxiques dans nos cours d'eau.

Il n'est donc pas surprenant que de nombreux scientifiques estiment que l'ère géologique actuelle devrait officiellement porter le nom d'« Anthropocène ». En seulement quelques décennies, le genre humain a provoqué une hausse des températures mondiales 170 fois plus rapide que la normale. Nous avons également transformé délibérément plus de 75 pour cent de la surface terrestre, et modifié de façon permanente le flux de plus de 93 pour cent de nos cours d'eau. Non seulement nous modifions drastiquement la biosphère, mais nous sommes maintenant également capables de réécrire, et même de créer ex nihilo, les éléments

constitutifs de la vie.

Chaque année, un réseau de scientifiques, de spécialistes et d'institutions du monde entier collabore avec l'ONU Environnement pour identifier et examiner les problèmes émergents qui auront des effets marqués sur notre société, notre économie et notre environnement. Certains de ces problèmes sont liés aux nouvelles technologies qui ont des applications étonnantes mais présentent des risques incertains, tandis que d'autres, tels que la fragmentation des paysages sauvages et la fonte des pergélisols, constituent des préoccupations de longue date. Autre problème soulevé : la pollution azotée, qui représente l'une des conséquences inattendues de plusieurs décennies d'activités humaines dans la biosphère. Un mauvaise adaptation au changement climatique, dernier point abordé dans ce rapport, met en évidence notre incapacité à nous adapter suffisamment et convenablement à un monde en constante mutation.

Le présent rapport contient toutefois de bonnes nouvelles. Comme vous pourrez le lire dans les pages suivantes, une approche globale vis-à-vis de la gestion de l'azote, une problématique mondiale, est en train de se mettre en place. En Chine, en Inde et dans l'Union européenne, des efforts prometteurs commencent à être déployés en vue de réduire les pertes et d'améliorer l'efficacité des engrais azotés. À long terme, la récupération et le recyclage de l'azote, ainsi que d'autres matières et nutriments précieux, peuvent nous aider à mener des activités agricoles propres et durables en vue de mettre en place une économie véritablement circulaire.

Les problématiques abordées dans le rapport Frontières visent à nous rappeler que chaque fois que nous interférons avec la nature, que ce soit à l'échelle de la planète ou au niveau moléculaire, nous prenons le risque de créer des effets à long terme sur notre environnement. En faisant preuve de prévoyance et en travaillant de concert, nous pouvons éviter ces problèmes et mettre au point des solutions qui seront utiles à tous pendant des générations.

Joyce Msuya
Directrice exécutive par intérim,
Programme des Nations Unies pour l'Environnement

Remerciements

Biologie synthétique : reconfigurer l'environnement

Auteurs principaux

Bartłomiej Kolodziejczyk, H2SG Energy Pte. Ltd., Singapour
Natalie Kofler, Yale Institute for Biospheric Studies, Université de Yale, Connecticut, États-Unis

Contributeurs et réviseurs

Marianela Araya, Convention sur la diversité biologique, Montréal, Canada
James Bull, College of Natural Sciences, Université du Texas à Austin, Texas, États-Unis
Jackson Chamber, Département de statistiques biologiques et de bio-informatique, Cornell University, New York, États-Unis
Chen Liu, Département de statistiques biologiques et de bio-informatique, Cornell University, New York, États-Unis
Yongyuth Yuthavong, Agence nationale thaïlandaise pour le développement de la science et de la technologie, Pathumthani, Thaïlande

Connectivité écologique : une passerelle vers la préservation de la biodiversité

Auteur principal

Gary Tabor, Center for Large Landscape Conservation, Montana, États-Unis

Contributeurs et réviseurs

Maya Bankova-Todorova, Fonds Mohamed bin Zayed pour la conservation des espèces, Abou Dhabi, Émirats arabes unis
Camilo Andrés Correa Ayram, Institut Alexander von Humboldt de recherche sur les ressources biologiques, Bogotá, Colombie
Letícia Couto Garcia, Université fédérale du Mato Grosso do Sul, Campo Grande, Brésil
Valerie Kapos, ONU Environnement – Centre mondial de surveillance de la conservation de la nature, Cambridge, Royaume-Uni
Andrew Olds, School of Science and Engineering, University of the Sunshine Coast, Maroochydore, Australie
Ileana Stupariu, Faculté de géographie, Université de Bucarest, Roumanie

Les tourbières à pergélisol : perdre du terrain sur une planète qui se réchauffe

Auteur principal

Hans Joosten, Université de Greifswald/Greifswald Mire Centre, Greifswald, Allemagne

Contributeurs et réviseurs

Dianna Kopansky, ONU Environment, Nairobi, Kenya
David Olefeldt, Faculté des sciences de l'agriculture, de la vie et de l'environnement, Université de l'Alberta, Edmonton, Canada
Dmitry Streletskiy, Department de géographie, The George Washington University, Washington DC, États-Unis

La solution de l'azote : de la pollution du cycle de l'azote à l'économie circulaire de l'azote

Auteurs principaux

Mark Sutton, Centre for Ecology & Hydrology, Édimbourg, Royaume-Uni
Nandula Raghuram, Guru Gobind Singh Indraprastha University, New Delhi, Inde
Tapan Kumar Adhya, Kalinga Institute of Industrial Technology, Bhubaneswar, Odisha, Inde

Contributeurs et réviseurs

Jill Baron, Commission géologique des États-Unis, Colorado, États-Unis
Christopher Cox, ONU Environnement, Nairobi, Kenya
Wim de Vries, Université et centre de recherche de Wageningen, Wageningen, Pays-Bas
Kevin Hicks, Institut de Stockholm pour l'environnement, York, Royaume-Uni
Clare Howard, Centre for Ecology & Hydrology, Édimbourg, Royaume-Uni
Xiaotang Ju, College of Agricultural Resources and Environmental Science, Université agricole de Chine, Pékin, Chine
David Kanter, College of Arts and Science, Université de New York, New York, États-Unis
Cargele Masso, Institut international d'agriculture tropicale, Ibadan, Nigéria

Jean Pierre Ometto, Institut national de recherche spatiale, São José dos Campos, Brésil
Ramesh Ramachandran, Centre national de gestion durable des zones côtières, ministère de l'Environnement, des Forêts et du Changement climatique, Chennai, Inde
Hans Van Grinsven, Agence néerlandaise d'évaluation environnementale PBL, La Haye, Pays-Bas
Wilfried Winiwarter, Institut international pour l'analyse appliquée des systèmes, Laxenburg, Autriche

Une mauvaise adaptation au changement climatique : éviter les pièges se trouvant sur la voie de l'évolutivité

Auteur principal

Catherine McMullen, Institut de Stockholm pour l'environnement, Bangkok, Thaïlande

Contributeurs et réviseurs

Thomas Downing, Global Climate Adaptation Partnership, Oxford, Royaume-Uni

Anthony Patt, Institut pour les décisions environnementales, EPF Zürich, Zürich, Suisse

Bernadette Resurrección, Institut de Stockholm pour l'environnement, Bangkok, Thaïlande

Jessica Troni, ONU Environnement, Nairobi, Kenya

Nous tenons tout particulièrement à remercier :

Alexandra Barthelmes et Cosima Tegetmeyer, Greifswald Mire Centre, Allemagne ; Marin Klinger, National Snow and Ice Data Center, Colorado, États-Unis ; Salome Chamanje, David Cole, Nicolien Delange, Angeline Djampou, Philip Drost, Virginia Gitari, Jian Liu, Ariana Magini, Nada Matta, Pauline Mugo, Susan Mutebi-Richards, Shari Nijman, Andreas Obrecht, Samuel Opiyo, Moses Osani, Roxanna Samii, Rajinder Sian, Nandita Surendran et Josephine Wambua, ONU Environnement

Conseillers en production

Maarten Kappelle et Edoardo Zandri, ONU Environnement, Nairobi, Kenya

Équipe de production

Rédacteur en chef : Pinya Sarasas, ONU Environnement

Soutien technique : Allan Lelei, ONU Environnement

Relectrice : Alexandra Horton, Royaume-Uni

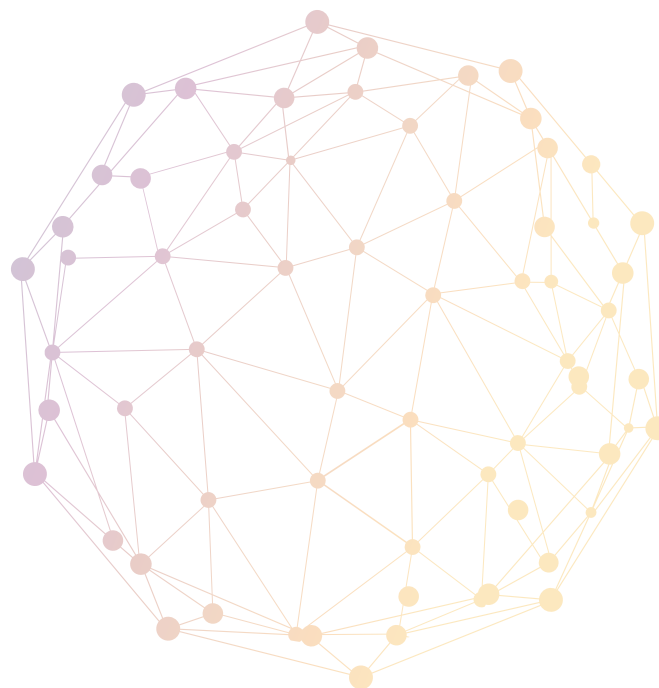
Conception graphique et mise en page

Infographiste : Audrey Ringler, ONU Environnement

Cartographe : Jane Muriithi, ONU Environnement

Impression

UNON/Section des services de publication/Nairobi, certifié ISO ISO14001:2004





*Tourbières à pergélisol avec plusieurs dépressions lacustres, Cape Bolvansky, Russie
Crédit photo : Hans Joosten*

Les tourbières à pergélisol : perdre du terrain sur une planète qui se réchauffe

L'évolution accélérée de l'Arctique

Les tourbières situées sous les tropiques attirent davantage l'attention en raison de leur rôle de haut lieu mondial du stockage du carbone et de moteur de l'atténuation du changement climatique. Celles-ci renferment près de 120 gigatonnes de carbone, mais ce chiffre ne représente que près de 20 pour cent de la totalité du carbone contenu dans les tourbières à l'échelle mondiale¹. La plus grande partie se situe dans les zones les plus septentrionales de la planète, avec la région circumpolaire nordique renfermant près de la moitié du carbone organique de la planète piégé dans la terre, principalement sous la forme de tourbe gelée en permanence²⁻⁵.

Dans l'hémisphère nord, si la majorité des sols gèlent et dégèlent en fonction des saisons, certains restent gelés toute l'année. Le pergélisol, à savoir les terres qui restent à une température inférieure à zéro degré pendant au moins deux années

consécutives, représente environ 23 millions de kilomètres carrés du nord. On retrouve des tourbières arctiques et subarctiques dans les zones de pergélisol du Canada, du Danemark/Groenland, de Finlande, de Norvège, de Russie, de Suède et des États-Unis. Les tourbières à pergélisol dont l'épaisseur de la couche de tourbe est supérieure à 40 centimètres s'étendent sur plus de 1,4 million de kilomètres carrés et la superficie des tourbières à pergélisol dont la couche de tourbe est moins profonde est d'autant plus vaste^{3,6-8}. De larges dépôts de tourbe à pergélisol se situent bien au-delà des régions arctiques et subarctiques, par exemple en Mongolie et sur le plateau de Qinghai au Tibet, où les chaînes de montagnes empêchent l'air chaud océanique de pénétrer dans les terres, maintenant les températures très basses en hiver^{9,10}.

Les tourbières à pergélisol connaissent une transformation rapide. L'Arctique se réchauffe à un rythme deux fois plus élevé que la moyenne mondiale¹¹. Au cours des dernières décennies, les limites sud du pergélisol ont reculé de 30 à 80 km vers le nord, soit une

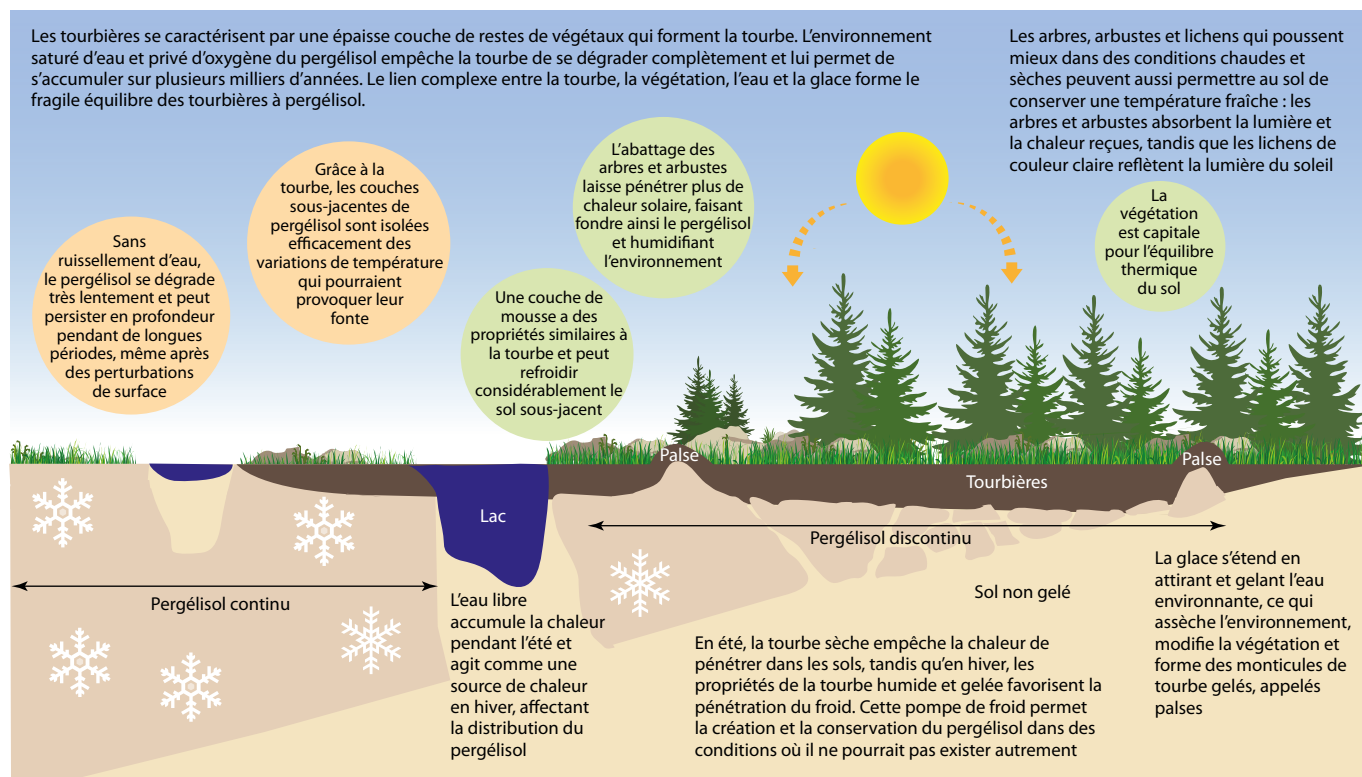
perte de couverture importante¹²⁻¹⁵. Les risques liés à la dégradation du pergélisol sont la mobilisation et la décomposition microbienne des matières organiques gelées enfouies qui peuvent dégager des volumes importants de dioxyde de carbone et de méthane qui sont susceptibles, à leur tour, d'accélérer considérablement le réchauffement climatique¹⁶⁻¹⁹. La dégradation généralisée du pergélisol aurait également des répercussions directes colossales sur les écosystèmes, l'hydrologie et les infrastructures des régions concernées.

Même si le pergélisol est étudié de façon approfondie depuis plus d'un siècle, il est absolument indispensable de mener davantage de recherches sur sa distribution, ses caractéristiques et ses dynamiques afin de mieux comprendre sa réaction face au changement climatique et aux perturbations anthropiques²⁰. Pour ce qui est des tourbières à pergélisol, les connaissances sont encore plus limitées. La manière dont les tourbières à pergélisol

réagissent au réchauffement climatique et leur rôle collectif dans le changement climatique mondial ne sont pas simples ni clairement comprises, car l'interaction du pergélisol, des écosystèmes et du climat est extrêmement complexe²⁰⁻²². Par exemple, même si les tourbières gelées (sèches) et dégelées (humides) affichent des taux de stockage du carbone similaires et jouent le rôle de puits de carbone, elles présentent généralement des volumes d'émissions de gaz à effet de serre totalement différents et peuvent constituer une source nette d'émissions²³⁻²⁵. En outre, les points de tourbières gelées et dégelées peuvent alterner rapidement dans le temps et l'espace^{23,26}.

La fonte du pergélisol est considérée comme l'un des principaux éléments pouvant faire basculer la planète vers un effet de serre incontrôlé ou une « serre » incontrôlable²⁷. Pour éviter un scénario aussi catastrophique, il est essentiel que le pergélisol de la planète et ses tourbières restent gelés et retiennent leurs dépôts de carbone.

Tourbières et pergélisol : le rôle de la tourbe, des plantes et de l'eau



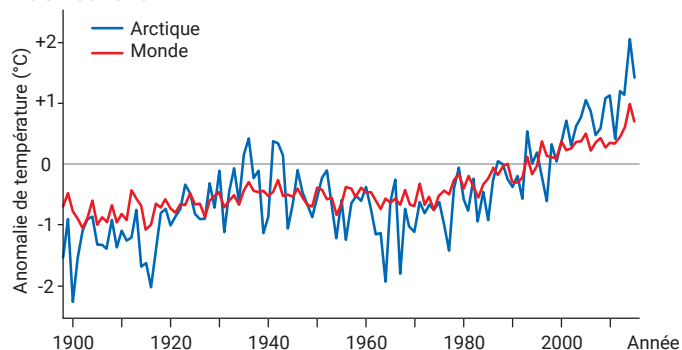
Fonte du pergélisol, décomposition de la tourbe et interactions complexes

En Arctique, chaque année de la dernière décennie a systématiquement dépassé le record de chaleur annuel enregistré au XX^e siècle¹⁵. À l'échelle mondiale, les températures du pergélisol ont continué à grimper ces dernières années. La plus forte hausse des températures moyennes annuelles du pergélisol a été observée dans les régions les plus froides de l'Arctique, tandis que la hausse a été bien moins importante dans les zones de pergélisol « plus chaudes » et dans les zones de pergélisol discontinues. À certains endroits, les températures du pergélisol ont légèrement diminué en raison des récents hivers rigoureux^{15,28}.

Avec la hausse des températures, la fonte du pergélisol contenant beaucoup de glace ou de la glace souterraine entraîne des dépressions significatives dans le paysage, appelées thermokarsts. Au cours des dernières décennies, la formation de thermokarsts dans les tourbières semble s'être accélérée dans les zones de pergélisol discontinues²⁹⁻³¹. Cependant, en Arctique, des observations à long terme n'ont pas permis de dégager de tendances uniformes dans l'évolution du thermokarst due au réchauffement climatique¹⁵.

Lorsque les sols gelés s'effondrent du fait de leur fonte, l'affaissement crée la formation de nouvelles petites masses d'eau pouvant se transformer par la suite en lacs. À son tour, la formation de lacs thermokarstiques accélère la fonte plus rapide et plus

Température annuelle de l'air en surface à l'échelle mondiale et en Arctique (60-90°N) par rapport à la valeur moyenne entre 1981 et 2010



Source : adapté du rapport 2018 sur l'Arctique de l'Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique¹¹

profonde du pergélisol¹⁹. D'un autre côté, l'élargissement de ces lacs peut accroître la connectivité des réseaux de drainage, favorisant le drainage des lacs, la repousse de la végétation, la formation de tourbe et la nouvelle formation de pergélisol³²⁻³⁷. Ce contraste des dynamiques illustre le besoin accru de mieux comprendre les répercussions potentielles de la tendance au réchauffement.

Le changement climatique et les températures élevées ont entraîné une forte augmentation de l'incidence des incendies de forêt en Arctique qui s'étendent jusqu'aux régions du pourtour de la toundra et de la toundra forestière. Alimentés par des dépôts de tourbe sous-jacents, les incendies dégagent d'importants volumes de carbone, détruisent la végétation et les couches isolantes du sol et diminuent l'albédo du sol, ou sa capacité de réflexion de la lumière, ce qui accroît sa vulnérabilité au changement climatique et la formation généralisée de thermokarsts³⁸⁻⁴⁴. Même les scénarios climatiques les moins pessimistes prédisent que l'impact combiné de la hausse des températures et des incendies de forêt sera particulièrement important dans les zones de pergélisol discontinues, avec des conditions climatiques totalement défavorables au pergélisol³¹. Ceci pourrait entraîner des changements dans le type de végétation de ces zones et sa productivité, favorisant des incendies plus fréquents et de plus grande ampleur^{45,46}.

Un autre effet potentiel de la hausse de la température due au réchauffement climatique est la libération d'importants volumes de méthane, un puissant gaz à effet de serre, dans l'atmosphère à la suite de la fonte du pergélisol. Bien que les estimations des émissions de méthane en Arctique varient considérablement, les projections du changement climatique mondiales actuelles semblent indiquer uniquement une légère augmentation des émissions de méthane dans la zone de pergélisol septentrionale^{47,48}. Toutefois, il convient de souligner que la plupart des modèles ne prennent pas en compte une représentation adéquate des

 Vidéo : Qu'est-ce que le pergélisol ?



Lien vers la vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=kixy1u8GjY>
Photo : échantillon de pergélisol fraîchement prélevé, Pokhodsk, Russie
Crédit photo : Hans Joosten

© Alfred-Wegener-Institut,
Helmholtz-Zentrum für Polar
und Meeresforschung



Thermokarst



Crédit photo : Hans Joosten

Le **thermokarst** est une caractéristique du paysage créée par la fonte des glaces souterraines dans les régions présentant des couches sous-jacentes de pergélisol, qui entraîne un affaissement de la surface. Les formations typiques de thermokarst se composent de lacs thermokarstiques, de gouffres, de dépressions et de fosses sur un terrain doté de polygones^{56,57}. Les thermokarsts sont très répandus dans les zones de pergélisol discontinues^{58,59}. On les retrouve également fréquemment dans les zones de pergélisol continus bien plus froides, où les coins de glace créent une instabilité du pergélisol^{60,61}.

L'accumulation de l'eau due au thermokarst renforce initialement l'augmentation de la chaleur et la dégradation à travers des réactions positives. À l'inverse, la croissance de la végétation et l'accumulation de matière organique limitent progressivement la poursuite de la fonte en aval. En raison de nouvelles accumulations rapides de tourbe dans les dépressions thermokarstiques, la fonte du pergélisol ne transforme pas systématiquement les tourbières en source de carbone^{22,23,62}. Néanmoins, un sol humide causera certainement la libération de méthane.

processus de fonte⁶. Une récente étude de modélisation a évalué les répercussions à long terme de la dégradation du pergélisol sur le climat, en prenant en compte le processus brutal de fonte dû à la formation récente de lacs thermokarstiques. Les résultats de cette étude ont indiqué qu'au cours du XXI^e siècle, l'émission de carbone sous forme de méthane (CH₄) devrait représenter uniquement une

petite portion des émissions totales de carbone dues au récent dégel du pergélisol. Pourtant, elle pourrait représenter jusqu'à 40 pour cent du réchauffement supplémentaire imputable au récent dégel du pergélisol⁴⁹.

Le changement climatique n'est que l'un des nombreux facteurs exerçant une influence directe sur l'évolution des tourbières à pergélisol. Toute perturbation du sol de surface peut entraîner la dégradation du pergélisol, y compris les processus naturels comme les incendies de forêt ou de toundra, ou les perturbations anthropiques, telles que les activités de construction et de développement des infrastructures urbaines et industrielles, les activités minières, le tourisme et l'agriculture^{50,51}. Ces nombreux modèles de développement dans les zones de tourbières à pergélisol ne tiennent souvent pas compte des caractéristiques uniques de ces zones, entraînant la fragmentation du paysage et la perturbation du cycle de l'eau^{14,52}. En Russie, 15 pour cent du territoire de la toundra a été détruit par les activités de transport, ce qui a entraîné une fonte du pergélisol, une érosion et un affaissement des sols, ainsi que la création de thermokarsts⁵³. Dans l'Arctique russe, près de 45 pour cent de la production de pétrole et de gaz naturel se situe dans les zones les plus sensibles sur le plan écologique, bien souvent dans les tourbières, comme cela est le cas dans la région de Petchora, sur le territoire de l'Oural polaire et en Sibérie centrale et du nord-ouest^{54,55}. La demande croissante en ressources naturelles et l'accessibilité accrue des régions gelées du fait du réchauffement climatique peuvent à l'avenir conduire à une intensification des activités industrielles et de développement des infrastructures, perturbant encore davantage les tourbières et le pergélisol. Les changements qui en découleront affecteront également les populations autochtones qui dépendent traditionnellement de l'utilisation des tourbières pour se nourrir, élever leurs rennes, chasser le gibier et pêcher le poisson¹⁴.



Fonte et effondrement du pergélisol en Mongolie

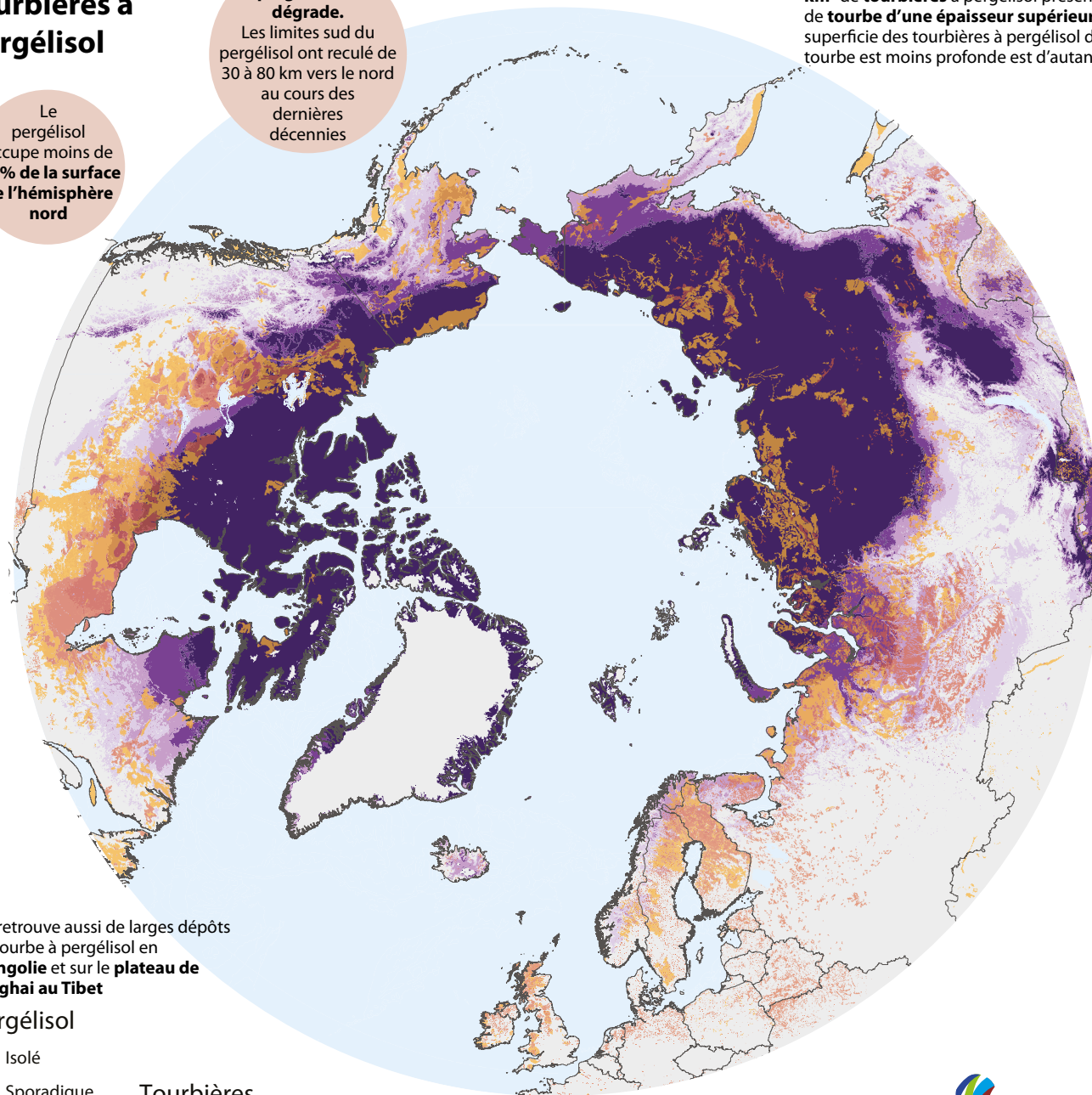
Crédit photo : Hans Joosten

Répartition des tourbières à pergélisol

Le pergélisol occupe moins de **25 % de la surface de l'hémisphère nord**

Le **pergélisol se dégrade**.
Les limites sud du pergélisol ont reculé de 30 à 80 km vers le nord au cours des dernières décennies

Les **tourbières** s'étendent sur de vastes surfaces dans les zones de pergélisol. Pas moins de **1,4 million de km² de tourbières à pergélisol** présentent une couche de **tourbe d'une épaisseur supérieure à 40 cm** et la superficie des tourbières à pergélisol dont la couche de tourbe est moins profonde est d'autant plus vaste.



On retrouve aussi de larges dépôts de tourbe à pergélisol en **Mongolie** et sur le **plateau de Qinghai au Tibet**

Pergélisol

- Isolé
- Sporadique
- Discontinu
- Continu

Tourbières

- Couverture > 50 %
- Couverture entre 20 et 50 %



Sources des données géospatiales :

Les données sur les tourbières ont été fournies par le Greifswald Mire Centre, Greifswald, Allemagne

Les données sur le pergélisol ont été fournies par l'Institut Alfred Wegener du Centre Helmholtz pour la recherche polaire et marine, Bremerhaven, Allemagne⁹⁰

Les températures arctiques augmentent deux fois plus rapidement que les températures moyennes mondiales

Les tourbières représentent la **plus grande réserve de carbone organique à long terme** de tous les écosystèmes terrestres

Le modèle climatique prévoit une **perte du pergélisol près de la surface de 35 % d'ici à 2050**

Les **arbustes, les arbres** et les **lichens** peuvent conserver la fraîcheur du sol en absorbant ou en réfléchissant la lumière du soleil. L'élimination du couvert végétal peut entraîner une dégradation rapide du pergélisol

Les incendies détruisent les couches isolantes de végétation, de tourbe et de sol, augmentant la vulnérabilité des tourbières au changement climatique

Le réchauffement de l'Arctique a **augmenté l'activité des incendies de forêt** dans les régions de toundra et de toundra forestière, réduisant de manière significative la teneur en carbone du sol

L'effet combiné du réchauffement climatique et des **incendies de forêt** est accentué dans les zones de pergélisol discontinues

Lorsque la tourbe n'est plus gelée du fait de la fonte du pergélisol, des micro-organismes décomposeurs deviennent actifs et décomposent les matières organiques, générant des émissions de CO_2 et de méthane (CH_4)

Les **masses d'eau plus profondes** accumulent de la chaleur en été et jouent le rôle de source de chaleur en hiver, affectant la répartition locale du pergélisol

Le **thermokarst** est une dépression caractéristique due à la fonte du pergélisol ou des glaces souterraines

En l'absence d'écoulement d'eau en surface ou sous terre, le pergélisol se dégrade très lentement et peut persister en profondeur pendant longtemps

Le thermokarst est très répandu dans les zones de pergélisol discontinues

Les **tourbières** sont des zones composées d'une couche de **restes de végétaux** (tourbe) en surface. L'environnement saturé d'eau et privé d'oxygène empêche la tourbe de se dégrader complètement

Les sols de la région circumpolaire renferment près de la **moitié du carbone organique de la planète piégé dans la terre**, stocké principalement dans les tourbières et souvent sous la forme de pergélisol

La fonte du pergélisol pourrait donc libérer d'importants volumes de **mercure** dans l'environnement

Le carbone organique contenu dans le sol peut être libéré sous différentes formes (CO_2 ou CH_4), être rejeté sous forme de gaz dans l'atmosphère, être dissous ou être transporté sous forme de particules dans les cours d'eau

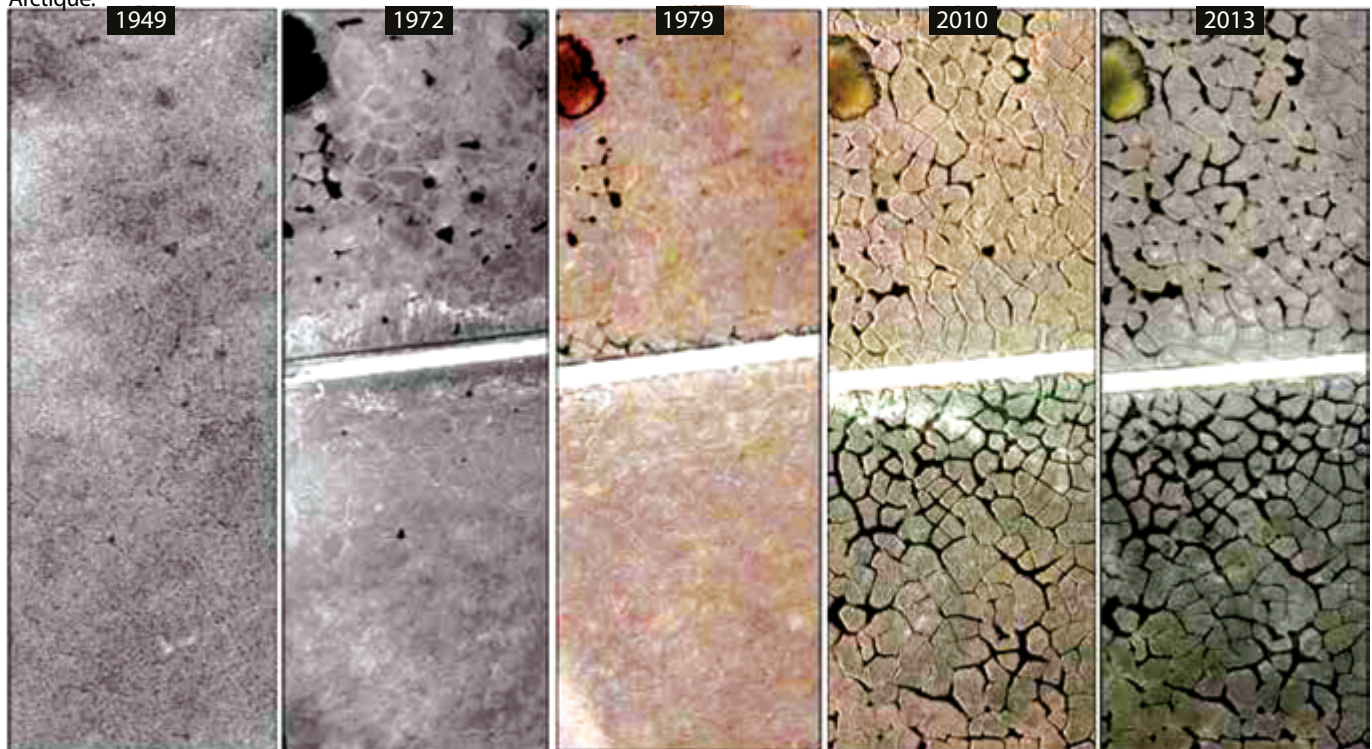
Les experts estiment que les pergélisols deviendront des **sources de carbone** d'ici à 2100

Les sols de pergélisol comprenant des dépôts de tourbe contiennent **deux fois plus de mercure** que le reste des sols de la planète, l'atmosphère et les océans combinés

Une meilleure connaissance des tourbières à pergélisol

Depuis plus d'un siècle, et de façon encore plus marquée ces dernières décennies, les régions de pergélisol ont fait l'objet de recherches et des technologies ont été élaborées pour surmonter les défis scientifiques et techniques auxquels ces régions font face. Malgré les efforts déployés par l'Association internationale du pergélisol et le Réseau terrestre mondial pour le pergélisol, d'importantes lacunes persistent quant aux connaissances propres à ces régions et à cet habitat, principalement en raison des conditions climatiques extrêmes, de l'accès limité et du contexte géopolitique complexe. Un examen récent a montré qu'un peu plus de 30 pour cent de l'ensemble des références au pergélisol dans la documentation scientifique portant sur les expérimentations menées sur le terrain en Arctique provenaient essentiellement des environs de seulement deux stations de recherche : le lac Toolik en Alaska (États-Unis) et Abisko en Suède⁶³. Cela pourrait fausser le consensus scientifique et mener à des prévisions inexactes concernant les répercussions du changement climatique en Arctique.

Avec la considération croissante du changement climatique et de la fonte des glaces en Arctique, les récentes évaluations tentent de plus en plus de tenir compte de certains aspects, comme les changements sociaux et écologiques, les changements de régime et le rôle des activités anthropiques sur l'adaptation et la transformation^{64,65}. Des projets de recherche à grande échelle sont mis en place afin de se pencher sur les répercussions de la fonte et de la dégradation du pergélisol. Ces derniers comprennent l'initiative Arctic Development and Adaptation to Permafrost in Transition (ADAPT), qui collabore avec 15 laboratoires à travers tout le Canada et d'autres groupes de chercheurs pour élaborer un cadre scientifique intégré sur les systèmes de notre planète dans l'Arctique canadien. Des lois spécifiques, telles que la Loi sur le Grand Nord de 2010 adoptée par l'Ontario, sont associées à de nouvelles initiatives de planification pour rendre le Grand Nord plus accessible et le protéger grâce à un processus de planification de l'affectation des sols, en consultation avec les Premières Nations⁶⁶.



Évolution de la formation du thermokarst due à la fonte du pergélisol entre 1949 et 2013 sur un site d'étude situé dans la baie de Prudhoe, Alaska, États-Unis. La ligne blanche est la route Spine construite en 1969.

Source : Walker et al. (2014)⁵²

Le Conseil de l'Arctique est un exemple de solide coopération internationale qui s'est montrée particulièrement utile dans la création et l'amélioration des connaissances nécessaires à l'élaboration de politiques nationales et internationales, telles que son rapport de 2017 sur la neige, l'eau, la glace et le pergélisol en Arctique^{66,67}. Même s'il est établi que les États de l'Arctique jouent un rôle essentiel dans la gérance de la région, les autres acteurs doivent également déployer davantage d'efforts pour protéger les tourbières à pergélisol et améliorer les connaissances à leur sujet. Plusieurs organisations internationales, telles que le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) à travers son Rapporteur spécial sur l'océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique, l'Organisation météorologique mondiale et le Conseil international des sciences au travers du Comité scientifique international de l'Arctique, s'engagent de plus en plus et contribuent à mieux comprendre les répercussions du changement climatique dans l'Arctique et à sensibiliser à ce sujet.



La fonte du pergélisol a entraîné la formation de thermokarst dans les tourbières proches de Naryan-Mar, région autonome de Nenets, Russie

Crédit photo : Hans Joosten



Loi du Grand Nord de l'Ontario et le rôle des Premières Nations dans la protection des tourbières à pergélisol

Le **Grand Nord de l'Ontario** (Canada) se situe entre la latitude 50-57 °N et la longitude 79-94 °O et désigne un paysage dynamique qui englobe des biomes arctiques, boréaux et tempérés. Ce paysage est marqué principalement par des tourbières qui couvrent 47 pour cent soit 21 millions d'hectares, du Grand Nord et stockent près de 36 gigatonnes de carbone sous la forme de tourbe⁶⁸. Cette quantité équivaut à un quart du carbone stocké dans l'ensemble des tourbières du Canada.

Adoptée en octobre 2010, la **Loi sur le Grand Nord** reconnaît le rôle important du Grand Nord dans les capacités de stockage et de piégeage du carbone et soutient la planification de l'occupation des sols à l'échelle communautaire comme stratégie de lutte contre le changement climatique^{66,69}. La Loi se concentre sur le rôle important des Premières Nations, à savoir les populations autochtones du Canada qui ne sont ni métisses ni inuits, dans la planification de l'occupation des sols qui comprend des aspects culturels, sociaux, écologiques et économiques.

Comme l'exige la loi, la **stratégie d'occupation des sols du Grand Nord** contribue à l'élaboration de plans communautaires d'occupation des sols tout en intégrant des problématiques dépassant la portée de chaque domaine de planification, telles que les connaissances autochtones. La stratégie comprend les quatre objectifs suivants :

1. L'attribution aux Premières Nations d'un rôle important en matière de planification.
2. La protection des systèmes écologiques et des zones de valeur culturelle du Grand Nord en intégrant au moins 225 000 kilomètres carrés de la région à un réseau interconnecté de zones protégées prévu dans les plans communautaires d'occupation des sols.
3. Le maintien de la diversité biologique et des processus et fonctions écologiques, y compris le stockage et le piégeage du carbone dans le Grand Nord.
4. Permettre un développement économique durable qui profite aux Premières Nations.

La stratégie aurait dû prendre fin en 2016, mais elle est toujours en cours, dirigée par les Premières Nations intéressées, en collaboration avec le ministère des Richesses naturelles et des Forêts de l'Ontario. Certains plans communautaires d'occupation des sols ont été approuvés, tandis que d'autres ont seulement été rédigés, mis en œuvre ou n'ont pas encore commencé⁷⁰. Bien que des avancées ont été réalisées dans ce domaine, des incertitudes subsistent quant à la manière dont certains objectifs de la Loi seront atteints, notamment concernant les domaines de la gouvernance, et des connaissances scientifiques en particulier. Il est impératif de comprendre comment le changement climatique influe sur le stockage et le piégeage du carbone dans les tourbières du Grand Nord et d'en apprendre davantage sur les processus écologiques qui en découlent afin de pouvoir élaborer des politiques et des méthodes de gestion adaptées.

Priorités en matière de connaissances et expansion du réseau

Beaucoup d'incertitudes subsistent quant à la vitesse à laquelle les tourbières à pergélisol vont évoluer et quelles seront les répercussions de ces changements à l'échelle locale et mondiale. Une coopération internationale est indispensable pour continuer à financer la recherche sur le long terme et élaborer des stratégies viables pour réduire les vulnérabilités. Les nations doivent collaborer sur la mise en œuvre d'une série de mesures applicables qui reconnaissent et appliquent les connaissances traditionnelles et locales, facilitent l'engagement auprès des parties prenantes et développent des réseaux d'observation efficaces¹⁵. En parallèle, il est indispensable de sensibiliser et éduquer le public aux risques, aux répercussions probables et aux possibilités d'adaptation pour élaborer une gouvernance et des politiques éclairées.

Bien qu'il existe un réseau de stations d'observation qui communiquent des informations sur les tendances générales d'évolution du pergélisol, la répartition géographique de ces sites est très inégale. Le réseau présente en particulier d'importantes lacunes dans le centre de l'Arctique canadien et le centre de l'Arctique sibérien, au Groenland, dans l'Extrême-Orient russe, sur le plateau tibétain et dans la région subarctique^{30,63}. L'évaluation

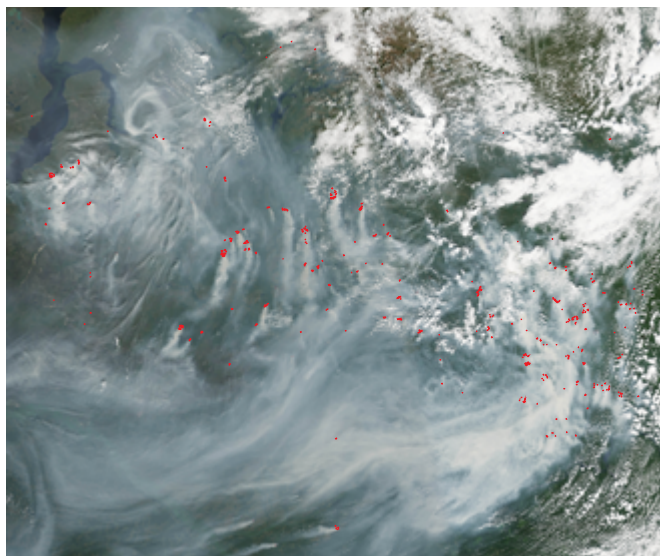


Image satellite prise le 19 juillet 2016 montrant une épaisse fumée au-dessus des tourbières à pergélisol du centre-nord de la Russie. Les démarcations rouges indiquent des températures de surface élevées, probablement causées par des feux de tourbières.

Crédit photo : NASA Earth Observatory/Jesse Allen and Joshua Stevens

en temps utile du statut mondial du pergélisol requiert l'expansion des réseaux de recherche existants pour former un réseau de suivi plus complet. Dans l'idéal, ce réseau élargi doit être conçu pour être facile d'utilisation pour toutes les parties prenantes, qu'il s'agisse des climatologues ou du grand public, et doit s'appuyer sur des mesures standards et des bases de données facilement accessibles^{15,64}. Les pays dotés de larges zones de pergélisol pourraient bénéficier de l'élaboration de plans d'adaptation qui évaluent les risques potentiels et intègrent des stratégies d'atténuation des dommages et des coûts engendrés par la dégradation du pergélisol⁶⁴.

En tant que réserves de carbone, les tourbières à pergélisol constituent un environnement dynamique, spécial et extrêmement divers, marqué par des relations complexes entre la teneur en carbone du sol, l'hydrologie, le pergélisol, la végétation et les populations. Les principales lacunes en matière de connaissances reposent sur la compréhension limitée des interactions entre les différents processus et sur l'insuffisance des études et modèles actuels. Davantage de recherches doivent être menées sur la localisation précise des tourbières à pergélisol, leur évolution et leur rejet possible de carbone. Les modèles climatiques doivent intégrer les émissions carbonées dues à la mobilisation du carbone contenu dans le pergélisol. Pour mieux saisir la réponse et la réaction des tourbières à pergélisol face au changement climatique, il est essentiel de réaliser des enquêtes interdisciplinaires. Pour cela,



Vidéo : Restaurer les tourbières de Russie pour prévenir les incendies et atténuer les effets du changement climatique



Lien vers la vidéo : https://www.youtube.com/watch?v=QZ5qu_nPHYM

Photo : incendie dans la toundra de bouleaux nains en République des Komis, Russie

© Wetlands International

Crédit photo : Hans Joosten

 Vidéo : Tourbières – régulation du climat et biodiversité



Lien vers la vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=ZcxZ9gvNf5U>
Palses plats en République des Komis, Russie

© Naturstyrelsen
Crédit photo : Hans Joosten

il convient d'intégrer des observations de terrain, des études rétrospectives (ou paléoenvironnementales), des données de télédétection et des modélisations dynamiques^{22,30}. La complexité physique des tourbières à pergélisol et les risques potentiels importants qu'entraînent leur dégradation et leur perturbation nécessitent également la mise en œuvre d'une approche de gestion et de planification de l'occupation des sols plus holistique et la mise à disposition de connaissances mieux intégrées pour les planificateurs et les décideurs.

L'Arctique a déjà commencé à changer considérablement. Même avec la mise en œuvre intégrale de l'Accord de Paris dans le cadre de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, il est encore probable que d'ici la fin du siècle l'environnement de l'Arctique soit très différent de celui que nous connaissons aujourd'hui¹⁵. L'accélération quasi inévitable des impacts de ce changement renforce le besoin urgent d'adopter des stratégies d'adaptation locales et régionales qui ciblent ces écosystèmes nordiques riches en carbone. La gestion avisée des tourbières à pergélisol est primordiale pour limiter les émissions de gaz à effet de serre, réduire les vulnérabilités humaines et écologiques et développer une résilience au changement climatique sur le long terme.



Palse de tourbière à pergélisol près de Noiaabrsk, Sibérie occidentale, Russie

Crédit photo : Franziska Tanneberger

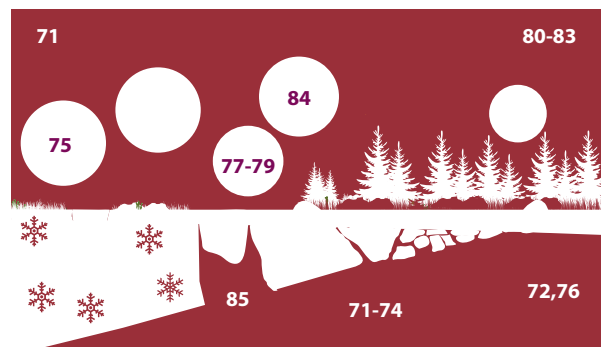
Bibliographie

1. Leifeld, J. and Menichetti, L. (2018). The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies. *Nature Communications* 9, 1071. <https://www.nature.com/articles/s41467-018-03406-6>
2. Tarnocai, C., Canadell, J.G., Schuur, E.A.G., Kuhry, P., Mazhitova, G. and Zimov, S. (2009). Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles* 23(2), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2008GB003327>
3. Hugelius, G., Strauss, J., Zubrzycki, S., Harden, J.W., Schuur, E.A.G., Ping, C.L. et al. (2014). Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps. *Biogeosciences* 11, 6573–6593. <https://doi.org/10.5194/bg-11-6573-2014>
4. Schuur, E.A.G., McGuire, A.D., Schädel, C., Grosse, G., Harden, J.W., Hayes, D.J. et al. (2015). Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature* 520, 171–179. <https://doi.org/10.1038/nature14338>
5. Strauss, J., Schirmer, L., Grosse, G., Fortier, D., Hugelius, G., Knoblauch, C. et al. (2017) Deep Yedoma permafrost: a synthesis of depositional characteristics and carbon vulnerability. *Earth-Science Reviews* 172, 75–86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.007>
6. Brown, J., Ferrians, O., Heginbottom, J.A. and Melnikov, E. (2002). *Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions, Version 2*. Colorado, USA: National Snow and Ice Data Center. https://nsidc.org/fgdc/maps/ipa_browse.html
7. Ballantyne, C.K. (2018). *Periglacial geomorphology*. Chichester, UK: Wiley-Blackwell.
8. Olefeldt, D., Goswami, S., Grosse, G., Hayes, D., Hugelius, G., Kuhry, P. et al. (2016). Circumpolar distribution and carbon storage of thermokarst landscapes. *Nature Communications* 7, 13043. <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms13043>
9. Brown, R.J.E. (1960). The distribution of permafrost and its relation to air temperature in Canada and the USSR. *Arctic* 13(3), 163–177. <http://pubs.ainu.ucalgary.ca/arctic/Arctic13-3-163.pdf>
10. Gravis, G.F., Melnikov, E.S., Guo, D., Li, S., Li, S., Tong, B. et al. (2003). Principles of classification and mapping of permafrost in Central Asia. *8th International Conference on Permafrost 2003*. Arenson, L.U., Springman, S.M. and Phillips, M. (eds.). AA Balkema Publishers. 297–302
11. Overland, J.E., Hanna, E., Hanssen-Bauer, I., Kim, S.J., Walsh, J.E., Wang, M. et al. (2017). Surface Air Temperature. Arctic Report Card: Update for 2017. <https://www.arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2017/ArtMID/7798/ArticleID/700/Surface-Air-Temperature>
12. Intergovernmental Panel on Climate Change (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 1535. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
13. Park, H., Kim, Y. and Kimball, J.S. (2016). Widespread permafrost vulnerability and soil active layer increases over the high northern latitudes inferred from satellite remote sensing and process model assessments. *Remote Sensing of Environment* 175, 349–358. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.rse.2015.12.046>
14. Minayeva, T., Sirin, A., Kershaw, P. and Bragg, O. (2018). Arctic peatlands. In *The Wetland Book II: Distribution, Description, and Conservation*. by Finlayson, C.M., Milton, G.R., Prentice, R.C. and Davidson, N.C. (eds.). Dordrecht, NL: Springer 1–15. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4001-3_109
15. Arctic Monitoring and Assessment Programme (2017a). *Snow, water, ice and permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017*. Oslo, Norway: AMAP. <https://www.amap.no/documents/doc/Snow-Water-Ice-and-Permafrost-in-the-Arctic-SWIPA-2017/1610>
16. Schuur, E.A.G., Abbott, B.W., Bowden, W.R., Brovkin, V., Camill, P., Canadell, J.G. et al. (2013). Expert assessment of vulnerability of permafrost carbon to climate change. *Climate Change* 119(2), 359–374. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0730-7>
17. Koven, C.D., Schuur, E.A.G., Schädel, C., Bohn, T.J., Burke, E.J., Chen, G. et al. (2015). A simplified, data-constrained approach to estimate the permafrost carbon–climate feedback. *Phil. Trans. R. Soc. A* 373, 20140423. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0423>
18. Schädel, C., Bader, M.K.F., Schuur, E.A.G., Biasi, C., Bracho, R., Capek, P. et al. (2016). Potential carbon emissions dominated by carbon dioxide from thawed permafrost soils. *Nature Climate Change* 6, 950–953. <https://www.nature.com/articles/nclimate3054>
19. Walter Anthony, K., Schneider von Deimling, T., Nitze, I., Frolking, S., Emond, A., Daanen, R. et al. (2018). 21st-century modeled permafrost carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes. *Nature Communications* 9(1), 3262. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05738-9>
20. Grosse, G., Goetz, S., McGuire, A.D., Romanovsky, V.E. and Schuur, E.A.G. (2016). Changing permafrost in a warming world and feedbacks to the Earth system. *Environmental Research Letters* 11, 040201. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/040201>
21. Shur, Y.L. and Jorgenson, M.T. (2007). Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems. *Permafrost and Periglacial Processes* 18, 7–19. <https://doi.org/10.1002/ppp.582>
22. Swindles, G.T., Morris, P.J., Mullan, D., Watson, E.J., Turner, E., Roland, T.P. et al. (2015). The long-term fate of permafrost peatlands under rapid climate warming. *Nature Scientific Reports* 5, 17951. <https://doi.org/10.1038/srep17951>
23. Gao, Y. and Couwenberg, J. (2015). Carbon accumulation in a permafrost polygon peatland: steady long-term rates in spite of shifts between dry and wet conditions. *Global Change Biology* 21(2), 803–815. <https://doi.org/10.1111/gcb.12742>
24. Ström, L., Ekberg, A., Mastepanov, M. and Christensen, T.R. (2003). The effect of vascular plants on carbon turnover and methane emissions from a tundra wetland. *Global Change Biology* 9(8), 1185–1192. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00655.x>
25. Turetsky, M.R., Wieder, R.K., Vitt, D.H., Evans, R.J. and Scott, K.D. (2007). The disappearance of relict permafrost in boreal North America: effects on peatland carbon storage and fluxes. *Global Change Biology* 13(9), 1922–1934. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01381.x>
26. De Klerk, P., Donner, N., Karpov, N. S., Minke, M. & Joosten, H. 2011. Short-term dynamics of a low-centred ice-wedge polygon near Chokurdakh (NE Yakutia, NE Siberia) and climate change during the last ca. 1250 years. *Quaternary Science Reviews*, 30, 3013–3031. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.06.016>

27. Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T.M., Folke, C., Liverman, D. et al. (2018). Trajectories of the Earth system in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115(33), 8252-8259. <https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>
28. Hartfield, G., Blunden, J. and Arndt, D.S. (eds.) (2018). State of the climate in 2017. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 99(8), Si-5332. <https://doi.org/10.1175/2018BAMSStateoftheClimate.1>
29. Baltzer, J.L., Veness, T., Chasmer, L.E., Sniderhan, A.E. and Quinton, W.L. (2014). Forests on thawing permafrost: fragmentation, edge effects, and net forest loss. *Global Change Biology* 20(3) 824-834. <https://doi.org/10.1111/gcb.12349>
30. Carpino, O.A., Berg, A.A., Quinton, W.L. and Adams, J.R. (2018). Climate change and permafrost thaw-induced boreal forest loss in northwestern Canada. *Environ. Res. Lett.* 13, 084018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad74e>
31. Gibson, C.M., Chasmer, L.E., Thompson, D.K., Quinton, W.L., Flannigan, M.D. and Olefeldt, D. (2018). Wildfire as a major driver of recent permafrost thaw in boreal peatlands. *Nature Communications* 9(1), 3041. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05457-1>
32. Jones, B.M., Grosse, G., Arp, M.C., Jones, K.M., Walter, A. and Romanovsky, V.E. (2011). Modern thermokarst lake dynamics in the continuous permafrost zone, northern Seward Peninsula, Alaska. *Journal of Geophysical Research* 116, G00M03. <https://doi.org/10.1029/2011JG001666>
33. Jones, M.C., Grosse, G., Jones, B.M. and Walter Anthony, K.M. (2012). Peat accumulation in drained thermokarst lake basins in continuous, ice-rich permafrost, northern Seward Peninsula, Alaska. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences* 117, G00M07. <https://doi.org/10.1029/2011JG001766>
34. Jones, B.M. and Arp, C.D. (2015). Observing a catastrophic thermokarst lake drainage in Northern Alaska. *Permafrost and Periglacial Processes* 26, 119-128. <https://doi.org/10.1002/ppp.1842>
35. Van Huissteden, J., Berrittella, C., Parmentier, F.J.W., Mi, Y., Maximov, T.C. and Dolman, A.J. (2011). Methane emissions from permafrost thaw lakes limited by lake drainage. *Nature Climate Change* 1, 119-123. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE1101>
36. Roach, J., Griffith, B., Verbyla, D. and Jones, J. (2011). Mechanisms influencing changes in lake area in the Alaskan boreal forest. *Global Change Biology* 17, 2567-2583. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02446.x>
37. Jepsen, S.M., Voss, C.I., Walvoord, M.A., Minsley, B.J. and Rover, J. (2013). Linkages between lake shrinkage/expansion and sublacustrine permafrost distribution determined from remote sensing of interior Alaska, USA. *Geophysical Research Letters* 40, 882-887. <https://doi.org/10.1002/grl.50187>
38. Flannigan, M., Stocks, B., Turetsky, M. and Wotton, M. (2009). Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest. *Global Change Biology* 15(3), 549-560. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01660.x>
39. Jones, B.M., Kolden, C.A., Jandt, R., Abatzoglou, J.T., Urban, F. and Arp, C.D. (2009). Fire behavior, weather, and burn severity of the 2007 Anaktuvuk river tundra fire, North Slope, Alaska. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 41, 309-316. <https://doi.org/10.1657/1938-4246-41.3.309>
40. Hu, F.S., Higuera, P.E., Walsh, J.E., Chapman, W.L., Duffy, P.A., Brubaker, L.B. et al. (2010). Tundra burning in Alaska: Linkages to climatic change and sea ice retreat. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 115, G04002. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JG001270>
41. Hu, F.S., Higuera, P.E., Duffy, P.A., Chipman, M.L., Rocha, A.V., Young, A.M. et al. (2015). Arctic tundra fires: natural variability and responses to climate change. *Frontiers in Ecology and the Environment* 13(7), 369-377. <https://doi.org/10.1890/150063>
42. Mack, M.C., Bret-Harte, M.S., Hollingsworth, T.N., Jandt, R.R., Schuur, E.A.G., Shaver, G.R. et al. (2011). Carbon loss from an unprecedented Arctic tundra wildfire. *Nature* 475, 489-492. <https://www.nature.com/articles/nature10283>
43. Kelly, R., Chipman, M.L., Higuera, P.E., Stefanova, I., Brubaker, L.B. and Hu, F.S. (2013). Recent burning of boreal forests exceeds fire regime limits of the past 10,000 years. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 110, 13055-13060. <https://doi.org/10.1073/pnas.1305069110>
44. Rupp, T.S., Duffy, P., Leonawicz, M., Lindgren, M., Breen, A., Kurkowski, T. et al. (2016). Climate scenarios, land cover, and wildland fire. In Zhu, Z. and McGuire, A.D. (eds.), *Baseline and projected future carbon storage and greenhouse-gas fluxes in ecosystems of Alaska*. USGS Professional Paper 1826, 17-52
45. Bret-Harte, M.S., Mack, M.C., Shaver, G.R., Huebner, D.C., Johnston, M., Mojica, C.A. et al. (2013). The response of Arctic vegetation and soils following an unusually severe tundra fire. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368, 20120490. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0490>
46. Arctic Climate Impact Assessment (2005). *Impacts of a warming Arctic: Arctic climate impact assessment*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
47. Riley, W.J., Subin, Z.M., Lawrence, D.M., Swenson, S.C., Torn, M.S., Meng, L. et al. (2011). Barriers to predicting changes in global terrestrial methane fluxes: analyses using CLM4Me, a methane biogeochemistry model integrated in CESM. *Biogeosciences* 8, 1925-1953. <https://doi.org/10.5194/bg-8-1925-2011>
48. Gao, X., Schlosser, C.A., Sokolov, A., Walter Anthony, K., Zhuang, Q. and Kicklighter, D. (2013). Permafrost degradation and methane: low risk of biogeochemical climate-warming feedback. *Environmental Research Letters* 8(3), 035014. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/035014>
49. Schneider von Deimling, T., Grosse, G., Strauss, J., Schirmermeister, L., Morgenstern, A., Schaphoff, S. et al. (2015). Observation-based modelling of permafrost carbon fluxes with accounting for deep carbon deposits and thermokarst activity. *Biogeosciences* 12(11), 3469-3488. <https://doi.org/10.5194/bg-12-3469-2015>
50. Grosse, G., Harden, J., Turetsky, M., McGuire, A.D., Camilli, P., Tarnocai, C. et al. (2011). Vulnerability of high-latitude soil organic carbon in North America to disturbance. *Journal of Geophysical Research* 116, G00K06. <https://doi.org/10.1029/2010JG001507>
51. Instanes, A., Anisimov, O., Brigham, L., Goering, D., Khrestalev, L.N., Ladanyi, B. et al. (2005). Infrastructure: buildings, support systems, and industrial facilities. In *ACIA: Arctic Climate Impact Assessment*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 908-944.
52. Walker, D.A., Reynolds, M.K., Buchhorn, M. and Peirce, J.L. (eds.) (2014). *Landscapes and permafrost changes in the Prudhoe Bay Oilfield, Alaska*. Alaska Geobotany Center Publication AGC 14-01. Fairbanks, AK: University of Alaska Fairbanks. https://www.geobotany.uaf.edu/library/pubs/WalkerDA2014_agc14-01.pdf

53. Vlassova, T. (2002). Human impacts on the tundra-taiga zone dynamics: the case of the Russian lesotundra. *Ambio Special Report*, 12, 30–36.
54. Instanes, A. (2016). Incorporating climate warming scenarios in coastal permafrost engineering design – Case studies from Svalbard and northwest Russia. *Cold Regions Science and Technology* 131, 76–87. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.09.004>
55. Shiklomanov, N.I., Streletskiy, D.A., Swales, T.B. and Kokorev, V.A. (2017). Climate change and stability of urban infrastructure in Russian permafrost regions: Prognostic assessment based on GCM climate projections. *Geographical Review* 107, 125–142. <https://doi.org/10.1111/gere.12214>
56. Jorgenson, T., Shur, Y.L. and Osterkamp, T.E. (2008). Thermokarst in Alaska. *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost* 1, 869–876. Fairbanks, AK: University of Alaska Fairbanks
57. Kokelj, S.V. and Jorgenson, M.T. (2013). Advances in thermokarst research. *Permafrost and Periglacial Processes* 24, 108–119. <https://doi.org/10.1002/ppp.1779>
58. Jorgenson, M.T., Racine, C.H., Walters, J.C. and Osterkamp, T.E. (2001). Permafrost degradation and ecological changes associated with a warming climate in central Alaska. *Climatic Change* 48, 551–579. <https://doi.org/10.1023/A:100566742>
59. Halsey, L.A., Vitt, D.H. and Zoltai, S.C. (1995). Initiation and expansion of peatlands in Alberta, Canada. *Climate, landscape and vegetation change in the Canadian Prairie Provinces Proceedings* 45–53. Edmonton, Alberta: Canadian Forestry Service. <http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/18992.pdf>
60. Jorgenson, M.T., Shur, Y.L. and Walker, H.J. (1998). Evolution of a permafrost-dominated landscape on the Colville River Delta, northern Alaska. *Proceedings of Seventh International Conference on Permafrost, Collection Nordicana* 57, 523–529.
61. Fortier, D. and Allard, M. (2004). Late Holocene syngenetic ice-wedge polygons development, Bylot Island, Canadian Arctic Archipelago. *Canadian Journal of Earth Sciences* 41(8), 997–1012. <https://doi.org/10.1139/e04-031>
62. Payette, S., Delwaide, A., Caccianiga, M. and Beauchemin, M. (2004). Accelerated thawing of subarctic peatland permafrost over the last 50 years. *Geophysical Research Letters* 31, L18208. <https://doi.org/10.1029/2004GL020358>
63. Metcalfe, D.B., Hermans, T.D.G., Ahlstrand, J., Becker, M., Berggren, M., Björk, R. G. et al. (2018). Patchy field sampling biases understanding of climate change impacts across the Arctic. *Nature Ecology & Evolution* 2, 1443–1448. <https://www.nature.com/articles/s41559-018-0612-5>
64. United Nations Environment Programme (2012). *Policy implications of warming permafrost*. UNEP : Nairobi. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8533>
65. Arctic Monitoring and Assessment Programme (2017b) *Adaptation actions for a changing Arctic: Perspectives from the Barents area*. Oslo, Norway: AMAP. <https://www.amap.no/documents/doc/Adaptation-Actions-for-a-Changing-Arctic-Perspectives-from-the-Barents-Area/1604>
66. Chetkiewicz, C. and Lintner, A. (2014). *Getting it right in Ontario's Far North: the need for a regional strategic environmental assessment in the Ring of Fire [Wawagajing]*. Canada: Wildlife Conservation Society Canada and Ecojustice Canada. https://www.wcsCanada.org/Portals/96/Documents/RSEA_Report_WCSCanada_Ecojustice_FINAL.pdf
67. Koivuova, T. (2016). Arctic resources: Exploitation of natural resources in the Arctic from the perspective of international law. In *Research Handbooks on International Law and Natural Resources*. Morgera, E. and Kulovesi, K. (eds.) Cheltenham/Northampton: Edward Elgar Publishing. Chapter 17. 349–366. <https://www.elgaronline.com/view/9781783478323.00031.xml>
68. McLaughlin, J.W. and Webster, K. (2013). *Effects of a changing climate on peatlands in permafrost zones: a literature review and application to Ontario's Far North*. Climate Change Research Report CCCR-34. Canada: Ontario Ministry of Natural Resources. <http://www.ontla.on.ca/library/repository/mon/27008/323518.pdf>
69. Legislative Assembly of Ontario (2010). Ontario House Bill 191 2010. An Act with respect to land use planning and protection in the Far North. Ontario. <https://www.ola.org/en/legislative-business/bills/parliament-39/session-2/bill-191>
70. Government of Ontario (2018). Land use planning process in the Far North. Ontario. <https://www.ontario.ca/page/land-use-planning-process-far-north#section-1>

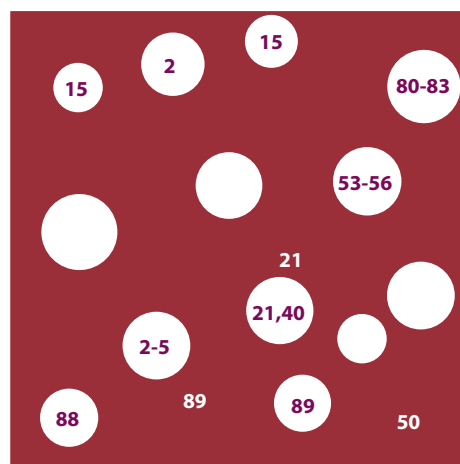
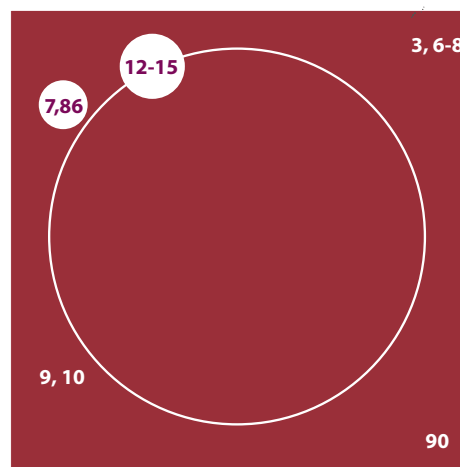
Références des illustrations



71. Washburn, A.L. (1979). *Geocryology. A survey of periglacial processes and environments*. London: Edward Arnold.
72. Kujala, K., Seppälä, M. and Holappa, T. (2008). Physical properties of peat and palsa formation. *Cold Regions Science and Technology* 52, 408–414. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2007.08.002>
73. Vasil'chuk, Y.K. (2013). Syngenetic ice wedges: cyclical formation, radiocarbon age and stable-isotope records. *Permafrost and Periglacial Processes* 24(1), 82–93. <https://doi.org/10.1002/ppp.1764>
74. Harris, S.A., Brouchkov, A. and Cheng, G. (2018). *Geocryology: Characteristics and use of frozen ground and permafrost landforms*. Leiden, NL: CRC Press/Balkema.
75. Burn, C.R. (1998). The response (1958–1997) of permafrost and near-surface ground temperatures to forest fire, Takhini River valley, southern Yukon Territory. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 35(2), 184–199. <https://doi.org/10.1139/cjes-35-2-184>
76. Routh, J., Hugelius, G., Kuhry, P., Filley, T., Kaislahti, P., Becher, M. et al. (2014). Multi-proxy study of soil organic matter dynamics in permafrost peat deposits reveal vulnerability to climate change in the European

Russian Arctic. *Chemical Geology* 368, 104-117. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.12.022>

77. Soudzilovskaia, N.A., van Bodegom, P.M. and Cornelissen, H.C. (2013). Dominant bryophyte control over high-latitude soil temperature fluctuations predicted by heat transfer traits, field moisture regime and laws of thermal insulation. *Functional Ecology* 27, 1442–1454. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12127>
78. Porada, P., Ekici, A. and Beer, C. (2016). Effects of bryophyte and lichen cover on permafrost soil temperature at large scale. *Cryosphere* 10, 2291–2315. <https://doi.org/10.5194/tc-10-2291-2016>
79. Park, H., Launiainen, S., Konstantinov, P.Y., Iijima, Y. and Fedorov, A.N. (2018). Modeling the effect of moss cover on soil temperature and carbon fluxes at a tundra site in northeastern Siberia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. <https://doi.org/10.1029/2018JG004491>
80. Chapin III, F., Sturm, M., Serreze, M., McFadden, J., Key, J., Lloyd, A. et al. (2005). Role of land-surface changes in Arctic summer warming. *Science* 310(5748), 657-660. <https://doi.org/10.1126/science.1117368>
81. Blok, D., Heijmans, M.P.D., Schaepman-Strub, G., Kononov, A.V., Maximov, T.C. and Berendse, F. (2010). Shrub expansion may reduce summer permafrost thaw in Siberian tundra. *Global Change Biology* 16(4), 1296-1305. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02110.x>
82. Briggs, M.A., Walvoord, M.A., McKenzie, J.M., Voss, C.I., Day-Lewis, F. D. and Lane, J.W. (2014). New permafrost is forming around shrinking Arctic lakes, but will it last? *Geophysical Research Letters* 41(5), 1585–1592. <https://doi.org/10.1002/2014GL059251>
83. Druel, A., Peylin, P., Krinner, G., Ciais, P., Viovy, N., Peregon, A. et al. (2017). Towards a more detailed representation of high-latitude vegetation in the global land surface model ORCHIDEE (ORC-HL-VEGv1.0). *Geoscientific Model Development* 10, 4693–4722. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4693-2017>
84. Nauta, A.L., Heijmans, M.M.P.D., Blok, D., Limpens, J., Elberling, B., Gallagher, A. et al. (2015). Permafrost collapse after shrub removal shifts tundra ecosystem to a methane source. *Nature Climate Change* 5, 67-70. <https://www.nature.com/articles/nclimate2446>
85. Johansson, M., Christensen, T.R., Åkerman, H.J., and Callaghan, T.V. (2006). What determines the current presence or absence of permafrost in the Torneträsk region, a sub-arctic landscape in northern Sweden? *Ambio* 35, 190-197. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2006\)35\[190:WDTCP0\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2006)35[190:WDTCP0]2.0.CO;2)
86. Zhang, T., Barry, R.G., Knowles, K., Ling, F. and Armstrong, R.L. (2003). Distribution of seasonally and perennially frozen ground in the Northern Hemisphere. In Phillips, M., Springman, S.M. and Arenson, L.U. (eds), *Permafrost, Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost*, Zurich, Switzerland, 21-25 July 2003, Volume 2.
87. Joosten, H. and Couwenberg, J. (2008) Peatlands and Carbon. In: Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silvius, M. & Stringer, L. (eds.) *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report*, Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen, 99–117. http://www.imcg.net/media/download_gallery/books/assessment_peatland.pdf



88. Abbott, B.W., Jones, J.B., Schuur, E.A.G., Chapin, F.S. III, Bowden, W.B., Bret-Harte, M.S., Epstein, H.E., et al. (2016) Biomass offsets little or none of permafrost carbon release from soils, streams and wildfire: an expert assessment. *Environmental Research Letters*, 11: 034014. doi: 10.1088/1748-9326/11/3/034014
89. Schuster, P. F., Schaefer, K. M., Aiken, G. R., Antweiler, R. C., Dewild, J. F., Gryziec, J. D., Gusmeroli, A., et al. (2018). Permafrost stores a globally significant amount of mercury. *Geophysical Research Letters*, 45, 1463–1471. <https://doi.org/10.1002/2017GL075571>
90. Brown, J., O. Ferriani, J. A. Heginbottom, and E. Melnikov. 2002. Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice Conditions, Version 2. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. <https://doi.org/nsidc.org/data/GGD318/versions/2>